

BMP.UKI:NM-02-FISMOD-PFis-VI-2021



BUKU MATERI PEMBELAJARAN FISIKA MODERN

Penulis:

NGIA MASTA, S.Pd., M.Si.

**PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA
FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN
UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA**

JAKARTA

2021

Kata Pengantar

Puji syukur kehadiran Tuhan Yang Maha Kuasa karena telah memberikan kesempatan pada penulis untuk menyelesaikan Buku Materi Pembelajaran (BMP) Fisika Modern ini. BMP ini disusun guna membantu kelancaran proses pembelajaran mata kuliah Fisika modern. Penulis juga berharap agar BMP ini dapat menambah wawasan dan berguna bagi mahasiswa yang mengambil mata kuliah. Penulis menyadari BMP ini masih jauh dari kata sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang membangun akan penulis terima demi kesempurnaan BMP ini.

Jakarta, Juni 2021

Ngia Masta

DAFTAR ISI

Kata Pengantar	ii
DAFTAR ISI	iii
DAFTAR GAMBAR	xiii
DAFTAR TABEL	xxii
PETUNJUK PENGGUNAAN BMP	xxiv
RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)	xxvii
SISTEM PENILAIAN	xlii
JADWAL PERKULIAHAN FISIKA MODERN	xlvii
PETA KONSEP FISIKA MODERN	lvi
MODUL 1	1
PENGANTAR FISIKA MODERN	1
Kegiatan Pembelajaran 1 SEJARAH FISIKA	4
A. Fisika Awal	4
B. Transisi Fisika Lama ke Fisika Klasik	10
C. Era Fisika Klasik	12
D. Transisi Fisika Klasik ke Fisika Modern.....	12
E. Era Fisika Modern	18
Rangkuman	20
Evaluasi Formatif	22
Umpan Balik	25
Kegiatan Pembelajaran 2 REVIEW FISIKA KLASIK	26
A. Mekanika.....	26
B. Elektrodinamika	31
C. Teori Kinetik Partikel.....	38
Rangkuman	40
Evaluasi Formatif	42
Umpan Balik	45
Rangkuman	46
Daftar Istilah.....	48
Referensi	48
MODUL 2	49
TEORI RELATIVITAS	49
Kegiatan Pembelajaran 1 RELATIVITAS KHUSUS	53
A. Teori Relativitas Klasik.....	54
B. Teori Relativitas Khusus	60
Rangkuman	76
Evaluasi Formatif	77

Pilihan Ganda	77
Umpan Balik	82
Referensi	82
Kegiatan Pembelajaran 2 GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS (PART 1)	84
Uraian Materi	84
A. Simultanitas	84
B. Paradoks Kembar.....	89
C. Eksperimen-eksperimen yang memverifikasi teori relativitas khusus	97
Rangkuman	100
Evaluasi Formatif	100
Pilihan ganda.....	100
Essay	103
Umpan Balik	104
Referensi	105
Kegiatan Pembelajaran 3 GEJALA – GEJALA RELATIVITAS KHUSUS (PART 2)	106
Uraian Materi	107
A. Penambahan Kecepatan Secara Relativistik	107
B. Energi Relativistik.....	116
C. Bukti Momentum dan Energi Relativistik Einstein.....	123
RANGKUMAN	124
Uji Formatif.....	124
Pilihan Ganda	124
Essay	127
Umpan Balik	131
Referensi	131
Kegiatan Pembelajaran 4 GEJALA RELATIVITAS KHUSUS (PART 3) DAN RELATIVITAS UMUM.....	133
Uraian Materi	134
A. Relativitas Khusus dan Elektrodinamika	134
B. Medan Gravitasi Einstein	141
Rangkuman	159
Uji Formatif.....	160
Pilihan Ganda	160
Essay	163
Umpan Balik	166
Referensi	166
Penutup.....	168
Rangkuman	168
Daftar Istilah.....	171

Referensi	175
MODUL 3.....	177
TEORI KUANTUM.....	177
Kegiatan Pembelajaran 1 EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 1)	182
Uraian Materi	182
A. Eksperimen Radiasi Benda Hitam.....	183
B. Teori Rayleigh - Jeans.....	190
C. Penemuan sinar X.....	197
D. Percobaan Sinar Katoda.....	198
E. Spektrum Garis.....	206
F. Teori kuantisasi Planck.....	210
Rangkuman	214
Evaluasi Formatif.....	218
Pilihan Ganda	218
Essay	220
Umpan Balik	226
Referensi	227
Kegiatan Pembelajaran 2 EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 2)	228
Uraian Materi	228
A. Eksperimen Efek Fotolistrik.....	229
B. Efek Compton.....	242
C. Produksi Sinar X.....	246
D. Produksi Pasangan dan Anihilasi	248
Rangkuman	253
Evaluasi Formatif.....	256
Pilihan Ganda	256
Essay	259
Umpan Balik	266
Referensi	266
Kegiatan Pembelajaran 3 SIMULASI FOTOLISTRIK	267
Uraian Materi	267
Rangkuman	270
Evaluasi Formatif.....	270
Umpan Balik.....	273
Referensi	273
Kegiatan Pembelajaran 4 DUALISME GELOMBANG-PARTIKEL	275
Uraian Materi	275
A. Hamburan Sinar X.....	275
B. Hipotesis de Broglie	279

C. Eksperimen Davisson-Germer (Difraksi Elektron).....	282
D. Gelombang atau Partikel?	283
E. Gelombang Materi	287
F. Ketidakpastian Heisenberg	297
Rangkuman	302
Evaluasi Formatif	303
Pilihan Ganda	303
Essay	305
Umpan Balik	308
Referensi	308
Penutup.....	310
Rangkuman	310
Daftar Istilah.....	310
Referensi:	310
MODUL 4.....	311
MEKANIKA GELOMBANG	311
Kegiatan Pembelajaran 1 PERSAMAAN SCHRODINGER DAN	
INTERPRETASINYA	314
Uraian Materi	314
A. Fungsi Gelombang Sebagai Probabilitas.....	314
B. Partikel Dalam Kotak	322
C Persamaan Gelombang Schrodinger.....	325
D. Keadaan Stasioner	329
Rangkuman	330
Evaluasi Formatif	331
Pilihan Ganda	331
Essay	334
Umpan balik	336
Referensi	336
Kegiatan pembelajaran 2 INTERPRETASI FUNGSI GELOMBANG	338
Uraian Materi	338
A. Harga Espektasi dan Operator.....	338
B. Partikel Bebas	344
C. Keberhasilan dan Kelemahan Persamaan Schrodinger	345
D. Potensial Tangga atau Potensial Undak	346
Rangkuman	348
Evaluasi Formatif	349
Pilihan Ganda	349
Essay	353
Umpan Balik	355
Referensi	356

Penutup.....	357
Rangkuman	357
Daftar Istilah.....	357
Referensi:	357
MODUL 5.....	358
SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER	358
Kegiatan Pembelajaran 1 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 1)	361
Uraian Materi	361
A. Sumur Potensial Tak Hingga.....	362
B. Sumur Potensial Berhingga	368
C. Sumur Potensial Tak Hingga 3 Dimensi	370
Rangkuman	374
Evaluasi Formatif	374
Pilihan Ganda	374
Essay	378
Umpan Balik	382
Referensi	382
Kegiatan Pembelajaran 2 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 2)	383
Uraian Materi	383
A. Osilator Harmonik Sederhana	383
B. Efek Tunneling	395
Rangkuman	411
Uji Formatif.....	412
Pilihan Ganda	412
Essay	416
Umpan Balik	418
Referensi	419
Penutup.....	420
Rangkuman	420
Daftar Istilah.....	420
Referensi:	420
MODUL 6.....	421
MODEL ATOM BERELEKTRON TUNGGAL	421
Kegiatan Pembelajaran 1 PERKEMBANGAN MODEL ATOM.....	425
Uraian Materi	425
A. Perkembangan Model Atom Mula – Mula.....	425
B. Model Atom Thomson	427
C. Model atom Rutherford.....	428
D. Spektrum Atom Hidrogen	435
E. Model Atom Bohr.....	438
Rangkuman	445

Uji Formatif.....	449
Pilihan Ganda	449
Essay	451
Umpan Balik	457
Referensi	457
Kegiatan Pembelajaran 2 SIMULASI TETES MINYAK MILIKAN	458
Uraian Materi	458
A. Judul Percobaan.....	458
B. Tujuan Praktikum:	458
C. Landasan Teori	458
D. Alat dan Bahan.....	463
E. Prosedur Eksperimen	463
F. Tabel Pengamatan.....	465
Rangkuman	465
Uji Formatif.....	465
Essay	465
Umpan Balik	467
Referensi	467
Kegiatan Pembelajaran 3 TINJAUAN KUANTUM ATOM HIDROGEN	469
Uraian Materi	469
A. Aplikasi fungsi gelombang pada model hidrogen.....	469
B. Solusi persamaan Schrodinger untuk Atom Hidrogen.....	472
C. Hubungan antar bilangan kuantum m, l dan n.....	475
Rangkuman	476
Uji Formatif.....	477
Essay	477
Umpan Balik	479
Referensi	479
Penutup.....	480
Rangkuman	480
Daftar Istilah.....	480
Referensi:	480
MODUL 7.....	481
FISIKA ATOM.....	481
Kegiatan Pembelajaran 1 BILANGAN KUANTUM.....	484
Uraian Materi	484
A. Defisiensi dari Model Atom Bohr	484
B. Bilangan Kuantum Elektron dalam Atom Hidrogen	486
C. Fungsi Distribusi Probabilitas	492
D. Notasi Spektroskopik & Kaidah Seleksi dan Transisi Elektron.....	500
E. Efek Zeeman Normal.....	501

F. Eksperimen Stern - Gerlach	505
G. Spin Intrinsic Elektron	507
H. Kopling Antara Momentum Sudut Orbital dan Spin Elektron.....	509
Rangkuman	512
Uji Formatif.....	516
Pilihan Ganda	516
Essay	520
Umpan Balik	524
Referensi	524
Kegiatan Pembelajaran 2 MODEL ATOM BERLEKTRON JAMAK.....	525
Uraian Materi	525
A. Struktur Atom, Tabel Periodik dan Prinsip Pauli.....	526
B. Konfigurasi Elektron dan Tabel Periodik.....	531
C. Efek Perisai dari Elektron di sub Petala Terluar	535
D. Kaidah Hund	537
E. Efek Zeeman Anomali.....	538
Rangkuman	539
Evaluasi Formatif.....	541
Pilihan Ganda	541
Essay	543
Umpan Balik	544
Referensi	544
Penutup.....	546
Rangkuman	546
Daftar Istilah.....	546
Referensi:	546
MODUL 8.....	547
STRUKTUR MOLEKUL.....	547
Kegiatan Pembelajaran 1 IKATAN MOLEKUL	550
Uraian Materi	550
A. Molekul Hidrogen	550
B. Ikatan Kovalen.....	557
C. Ikatan Ionik.....	571
Rangkuman	577
Evaluasi Formatif	578
Umpan Balik	583
Referensi	583
Kegiatan Pembelajaran 2 SPEKTRUM MOLEKULAR.....	584
Uraian Materi	584
A. Energi Vibrasi	584
B. Energi Rotasi	590

C. Spektrum Molekuler	596
Rangkuman	602
Evaluasi Formatif	602
Pilihan Ganda	602
Essay	605
Umpan Balik	606
Referensi	606
Penutup.....	607
Rangkuman	607
Daftar Istilah.....	607
Referensi:	607
MODUL 9.....	608
MODEL INTI ATOM.....	608
Kegiatan pembelajaran 1 MODEL INTI ATOM DAN GAYA NUKLIR.....	611
Uraian Materi	611
A. Penyusun Inti.....	611
B. Muatan Inti	612
C. Massa Inti	612
D. Spin Inti.....	613
E. Momen Dwikutub Magnet Inti	614
F. Gaya-gaya Antarnukleon	614
G. Deuteron	616
Rangkuman	616
Evaluasi Formatif	616
Pilihan Ganda	616
Umpan Balik	617
Referensi	618
Kegiatan pembelajaran 2 KESTABILAN INTI	619
Uraian Materi	619
A. Inti Stabil	619
B. Jejari Inti.....	619
C. Energi Ikat Inti Stabil	620
D. Model-model Inti.....	620
Rangkuman	622
Evaluasi Formatif	622
Essay	622
Umpan Balik	624
Referensi	625
Penutup.....	626
Rangkuman	626
Daftar Istilah.....	626

Referensi:	626
MODUL 10.....	627
RADIOAKTIVITAS	627
Kegiatan Pembelajaran 1 RADIOAKTIVITAS DAN JENIS JENIS RADIASI	
NUKLIR.....	630
Uraian Materi	630
A. Hukum Peluruhan Radioaktif.....	630
B. Peluruhan Berantai	634
C. Penanggalan ^{12}C	635
D. Peluruhan α	636
E. Peluruhan β	639
F. Peluruhan γ	643
Rangkuman	645
Evaluasi Formatif	645
Essay	645
Umpan Balik	647
Referensi	647
Kegiatan pembelajaran 2 EKSPERIMEN WAKTU PARUH RADIOAKTIVITAS	
(SIMULASI)	648
Kegiatan Pembelajaran 3 REAKSI NUKLIR.....	654
Uraian Materi	654
A. Skema Reaksi Nuklir.....	654
B. Energi Ambang (Threshold Energy)	656
C. Penampang Reaksi (Cross Section Reaction).....	657
D. Reaksi Fisi (Pembelahan).....	659
E. Reaksi Fusi (Peleburan).....	661
Rangkuman	662
Evaluasi Formatif	662
Umpan Balik	662
Referensi	663
Kegiatan Pembelajaran 4 SIMULASI REAKSI FISI	664
Uraian Materi	664
A. Simulasi Reaksi Fisi	664
Rangkuman	669
Evaluasi Formatif	669
Essay	669
Umpan Balik	674
Referensi	674
Penutup.....	675
Rangkuman	675
Daftar Istilah.....	675

Referensi:	675
MODUL 11.....	676
PARTIKEL ELEMENTER	676
Kegiatan Pembelajaran 1 PARTIKEL ELEMENTER.....	679
Uraian Materi	679
A. Perkembangan penemuan partikel elementer.....	679
B. Lepton.....	680
C. Barion	681
D. Meson.....	681
E. Interaksi antar partikel elementer	685
F. Quark.....	687
Rangkuman	688
Evaluasi Formatif	688
Essay	688
Umpan Balik	689
Referensi	690
Kegiatan Pembelajaran 2 DETECTOR DAN AKSELARATOR	691
Uraian Materi	691
A. Detektor Isian Gas.....	692
B. Detektor Kelipan (sintilasi)	696
C. Detektor Semikonduktor	698
D. Detektor Jejak.....	700
E. Detektor Cerenkov.....	703
F. Akselerator.....	704
G. Siklotron.....	708
H. Sinkrosiklotron.....	710
I. Betatron.....	711
J. Sinkrotron	711
Rangkuman	713
Evaluasi Formatif	713
Essay	713
Umpan Balik	715
Referensi	715
Kegiatan Pembelajaran 3 KUNJUNGAN ILMIAH KE BATAN	717
Penutup.....	719
Rangkuman	719
Daftar Istilah.....	719
Referensi:	719
TENTANG PENULIS.....	720

DAFTAR GAMBAR

Gambar 1. 1 Evolusi Fisika	5
Gambar 1. 2 Ilustrasi Teori Geosentris	6
Gambar 1. 3 Ilustrasi hukum gerak aristoteles pada gerak jatuh bebas	7
Gambar 1. 4 Sketsa perhitungan keliling bumi menurut Erasthotenes	8
Gambar 1. 5 Model lintasan planet mars dan matahari menurut ptolemy	9
Gambar 1. 6 Diagram Vektor dari Momentum Sudut.....	28
Gambar 1. 7 Spektrum Gelombang Elektromagnetik	35
Gambar 2. 1 Pembuktian sifat invarian hukum – hukum Newton menggunakan transformasi Galileo	56
Gambar 2. 2 Transformasi Galileo pada gelombang cahaya	59
Gambar 2. 3 Inferometer Michelson-Morley	61
Gambar 2. 4 Kontraksi (pemendekan) panjang pada Transformasi Lorentz	70
Gambar 2. 5 Pengerutan diameter bumi terhadap kecepatan pengamat bergerak	71
Gambar 2. 6 Gerak pesawat terhadap Stasiun Ruang Angkasa	72
Gambar 2. 7 Dilatasi Waktu	73
Gambar 2. 8 Ilustrasi simultanitas	85
Gambar 2. 9 Sinkronisasi terhadap jam acuan	86
Gambar 2. 10 Ilustrasi Paradoks kembar	91
Gambar 2. 11 Koordinat Euclidean pada gerak benda.....	92
Gambar 2. 12 Diagram ruang-waktu Minkowski.....	93
Gambar 2. 13 Ilustrasi eksperimen menghitung umur muon	98
Gambar 2. 14 Aberasi bintang.....	99
Gambar 2. 15 Penambahan Kecepatan Relativistik	107
Gambar 2. 16 Penjumlahan Kecepatan Dua Elektron Secara Relativistik.....	108
Gambar 2. 17 Penjumlahan Kecepatan Relativistik 3 Dimensi	109
Gambar 2. 18 Momentum relativistik	112
Gambar 2. 19 Perbandingan Energi Kinetik Relativistik dan Non Relativistik	118
Gambar 2. 20 Kesetaraan Massa dan Energi.....	121
Gambar 2. 21 Elektromagnetisme pada teori relativistik	135
Gambar 2. 22 Gelombang Elektromagnetik.....	136
Gambar 2. 23 Gelombang bidang dengan muka gelombang dan arah rambat	137
Gambar 2. 24 Keadaan "mengambang" saat observer ada pada objek yang sedang jatuh bebas, menurut observer, dirinya tidak mengalami medan gravitasi	143

Gambar 2. 25 Gravitasi nol pada astronot saat di ruang angkasa	144
Gambar 2. 26 Pelengkungan Berkas Sinar menurut Kerangka Acuan (a) Diam (b) Bergerak dengan kecepatan Konstan (c) Dipercepat ke atas (d) dipercepat ke bawah	146
Gambar 2. 27 Konsep Gravitasi menurut Newton	147
Gambar 2. 28 Penjelasan gaya gravitasi berdasarkan pelengkungan ruang waktu oleh massa	148
Gambar 2. 29 Lensa Gravitasi.....	153
Gambar 2. 30 Pergeseran Merah Gravitasi	154
Gambar 2. 31 Pergeseran Perihelion dari Merkurius	155
Gambar 2. 32 Ilustrasi Black Hole	157
Gambar 2. 33 Ilustrasi Percobaan Taylor dan Hulse.....	158
Gambar 3. 1 Lubang pada Permukaan Benda Berongga Sebagai Benda Hitam	184
Gambar 3. 2 Spektrum Distribusi dari Radiasi yang Diemisikan dari Benda Hitam dengan Temperatur yang Berbeda-Beda	188
Gambar 3. 3 Ketidaksesuaian Hasil Eksperimen dengan Hukum Wien pada temperatur 1500 K.....	190
Gambar 3. 4 Lubang pada Permukaan Kubus Berongga	191
Gambar 3. 5 Analogi Osilasi Muatan pada Dinding bagian dalam benda Hitam	191
Gambar 3. 6 Skema Gelombang Stasioner dalam Kubus	192
Gambar 3. 7 Kegagalan Fisika Klasik - Bencana UV.....	197
Gambar 3. 8 Citra tulang pada tangan yang dihasilkan dari penemuan sinar X oleh Rontgen	198
Gambar 3. 9 Skema Alat Percobaan Sinar Katoda oleh Thomson.....	199
Gambar 3. 10 Diagram Gaya Percobaan Thomson dalam Menemukan Rasio e/m	200
Gambar 3. 11 Skema Percobaan Tetes Minyak Milikan, (a) Diagram alat; (b) Seorang sedang mengamati melalui mikroskop sambil mengatur tegangan antar keping	202
Gambar 3. 12 Histogram Jumlah Pengamatan Terhadap Muatan Teramati dari Sebuah Bola pada Percobaan Milikan.....	205
Gambar 3. 13 Skema Spektrometer Optik	206
Gambar 3. 14 Deret Balmer dari Spektrum Atom Hidrogen	207
Gambar 3. 15 Grafik $S\lambda$ menurut Rayleigh-jeans dan Planck	212

Gambar 3. 16 Skema Peralatan Eksperimen Fotolistrik	230
Gambar 3. 17 Hubungan Tegangan dan Arus Fotolistrik dari Percobaan Efek Fotolistrik	231
Gambar 3. 18 Arus dan Tegangan penghenti terhadap intensitas radiasi	232
Gambar 3. 19 Energi Potensial Henti eV_0 terhadap frekuensi pada 3 jenis logam	232
Gambar 3. 20 Arus Fotolistrik adalah fungsi linear terhadap intensitas berkas sinar	233
Gambar 3. 21 Data Eksperimen Milikan tentang Efek Fotolistrik.....	238
Gambar 3. 22 Hamburan Compton	242
Gambar 3. 23 Fenomena Bremsstrahlung	247
Gambar 3. 24 Skema Alat Produksi Sinar X.....	247
Gambar 3. 25 Skema Produksi Pasangan (a) Vakum (b) di dalam Bahan	250
Gambar 3. 26 Pasangan anihilasi (a) Positroniuml (b) produksi 2 foton setelah anihilasi	252
Gambar 3. 27 Teknik Pemindaian PET.....	253
Gambar 3. 28 Simulasi Fotolistrik melalui PhET	268
Gambar 3. 29 Diagram Alat Transmisi Laue	276
Gambar 3. 30 Struktur Kubik pada Kristal Garam.....	276
Gambar 3. 31 Skema Percobaan Difraksi Bragg.....	277
Gambar 3. 32 Skema Hamburan Bragg	278
Gambar 3. 33 Skema Alat Eksperimen Davisson-Germer.....	282
Gambar 3. 34 Skema eksperimen Celah Ganda	284
Gambar 3. 35 Pola Interferensi Foton pada Celah Ganda.....	284
Gambar 3. 36 Pola Interferensi Elektron pada Celah Ganda	285
Gambar 3. 37 Superposisi Gelombang.....	289
Gambar 3. 38 Ilustrasi satu paket gelombang pada daerah Δx	290
Gambar 3. 39 Ilustrasi fungsi distribusi spektral konstan dalam rentang $k_0 - \Delta k_2 \leq k \leq k_0 + \Delta k_2$	292
Gambar 3. 40 Ilustrasi paket gelombang pada $t = 0$ untuk fungsi distribusi spektral tetap	292
Gambar 3. 41 Fungsi Distribusi Spektral Gaussian	293
Gambar 3. 42 Ilustrasi Paket Gelombang pada $t = 0$ untuk fungsi spektral Gaussian	294
Gambar 4. 1 Fungsi Gelombang	319
Gambar 4. 2 Fungsi Gelombang $Ae^{-\alpha x}$ Diplot sebagai fungsi terhadap x	321

Gambar 4. 3 Gelombang yang mungkin di dalam kotak 1 dimensi	323
Gambar 4. 4 Potensial Undak.....	346
Gambar 5. 1 Sumur Potensial Tak Hingga.....	362
Gambar 5. 2 Fungsi Gelombang, Densitas Probabilitas, dan Pita Energi pada Sumur Potensial Tak Terhingga.....	364
Gambar 5. 3 Sumur Potensial Berhingga.....	368
Gambar 5. 4 Pita Energi dan Fungsi Gelombang untuk Bilangan Kuantum Terendah Pada Sumur Potensial Berhingga	369
Gambar 5. 5 Kotak 3 Dimensi Berisi Partikel.....	372
Gambar 5. 6 Tingkat - tingkat Energi, Derajat Terdegenerasi, dan Bilangan Kuantum untuk Partikel dalam Potensial Kubus.....	374
Gambar 5. 7 Kurva Energi Potensial dari Molekul Diatomik yang berbentuk seperti Energi Potensial Osilator Harmonik.....	384
Gambar 5. 8 Gerak Harmonik Sederhana (GHS).....	384
Gambar 5. 9 Distribusi fungsi keadaan pada sumur potensial osilator Harmonik Sederhana (a) Empat Energi pertama dan Fungsi Gelombangnya; (b) Plot Fungsi Gelombang ; (c) Densitas Probabilitas	387
Gambar 5. 10 Ground State pada Sumur Potensial Osilator Harmonik Sederhana	388
Gambar 5. 11 Fungsi Keadaan Ground State pada Sumur Potensial Osilator Harmonik Sederhana.....	388
Gambar 5. 12 Grafik Rapat Probabilitas Kuantum untuk $n = 10$ dibandingkan dengan Probabilitas Klasik (Garis Putus).....	395
Gambar 5. 13 Analogi klasik Partikel pada Potensial Penghalang	396
Gambar 5. 14 Partikel dengan $E > V_0$ terhadap Potensial Penghalang	397
Gambar 5. 15 Gelombang Datang, Pantul dan Transmisi pada Potensial Penghalang	398
Gambar 5. 16 Potensial Penghalang dengan $E < V_0$	400
Gambar 5. 17 Keadaan Kuantum pada Efek Tunneling.....	401
Gambar 5. 18 Elektron Terhadap Dinding Potensial Undak.....	405
Gambar 5. 19 Partikel yang bergerak mendekati sebuah sumur potensial.....	407
Gambar 5. 20 Partikel alfa terjebak dalam nukleus oleh potensial nuklir.....	407
Gambar 6. 1 Model Atom Dalton.....	426
Gambar 6. 2 Model Atom Thomson	427
Gambar 6. 3 Susunan Percobaan Sinar Alfa	429

Gambar 6. 4 Interaksi Partikel Alfa dan Inti Atom	430
Gambar 6. 5 Geometri Hamburan Partikel Alfa ke arah sudut antara φ dan $\varphi + d\varphi$	432
Gambar 6. 6 Ilustrasi Model Atom Rutherford	434
Gambar 6. 7 Ilustrasi Kelemahan Model Atom Rutherford	435
Gambar 6. 8 Spektrometer untuk pengamatan spektrum emisi	436
Gambar 6. 9 Model Atom Bohr	439
Gambar 6. 10 Diagram Tingkat Energi Elektron dalam Atom Hidrogen	441
Gambar 6. 11 model atom bohr dalam transisi antar tingkat energi untuk menghasilkan spektrum emisi	444
Gambar 6. 12 Sistem inti dan elektron dengan pusat massanya	445
Gambar 6. 13 <i>Setup</i> Aparatus Tetes Minyak Milikan	459
Gambar 6. 14 Reaksi Ionisasi pada Tetes Minyak Milikan	460
Gambar 6. 15 Software Milikan Oil Experiment	462
Gambar 6. 16 Hubungan koordinat kartesian dengan koordinat polar	470
Gambar 7. 1 Ilustrasi tingkat - tingkat energi elektron pada Atom Hidrogen, disertai label set bilangan kuantum	488
Gambar 7. 2 Vektor momentum sudut yang mengalami presesi di sekitar sumbu z	490
Gambar 7. 3 Diagram Skematik dari hubungan antara vektor momentum sudut dengan komponennya dalam arah sumbu z untuk nilai $\ell = 2$	491
Gambar 7. 4 Elemen Volume dalam Koordinat Bola	493
Gambar 7. 5 Ilustrasi untuk probabilitas distribusi elektron untuk set bilangan kuantum berbeda. Sumbu z adalah dalam arah vertikal.	494
Gambar 7. 6 Keadaan Orbital $2p_x$, $2p_y$, dan $2p_z$ dari elektron atom H	495
Gambar 7. 7 Keadaan orbital pada sub kulit d	495
Gambar 7. 8 Keadaan orbital sub kulit f	496
Gambar 7. 9 Probabilitas Radial $P(r)dr$ untuk mendapatkan elektron di dalam volume dari sebuah kulit bola dengan radius r dan ketebalan dr	497
Gambar 7. 10 (a) Fungsi Gelombang elektron bagian radial; (b) Rapat Probabilitas Radial untuk beberapa keadaan kuantum pada atom hidrogen.	498
Gambar 7. 11 Pengaruh Sudut dari rapat probabilitas dengan $\ell = 0$ dan $\ell = 1$	500
Gambar 7. 12 Diagram Tingkat Energi Elektron dalam Atom H, tanpa kehadiran medan magnet	501

Gambar 7. 13 Representasi momentum sudut orbital dan momen magnetik yang saling berlawanan arah berkaitan dengan muatan negatif elektron pada atom hidrogen.....	503
Gambar 7. 14 Ilustrasi Pemisahan dari sebuah tingkat energi $\ell = 1$ di dalam sebuah medan magnet eksternal, yang menunjukkan nilai energi yang berbeda-beda sesuai dengan nilai $m\ell$ (Efek spin elektron diabaikan)	504
Gambar 7. 15 Ilustrasi efek Zeeman normal: transisi elektron dari keadaan eksitasi $n = 2, \ell = 1$ ke keadaan dasar $n = 1, \ell = 0$ dibawah pengaruh medan magnet luar yang menghasilkan pergeseran panjang gelombang foton	505
Gambar 7. 16 Ilustrasi Skematik eksperimen Stern - Gerlach	506
Gambar 7. 17 Ilustrasi Momentum Sudut Spin Elektron dan orientasi ruang dari Vektor Momentum Sudut Spin	508
Gambar 7. 18 Ilustrasi Elektron dalam atom hidrogen yang bergerak mengitari Proton (a) dari sudut pandang proton, (b) dari sudut pandang elektron , (c) Proton yang bergerak dipresentasikan oleh arah \hat{i} yang menyebabkan munculnya medanmagnet pada lokasi elektron	510
Gambar 7. 19 Ilustrasi Splitting Struktur Halus (Fine Structure) dari Atom Hidrogen.....	512
Gambar 7. 20 Ilustrasi urutan tingkat energi elektron pada atom berelektron jamak yang menunjukkan kebergantungan energi terhadap bilangan kuantum n dan ℓ	529
Gambar 7. 21 Tabel Periodik	533
Gambar 7. 22 Ilustrasi Atom Lithium yang menunjukkan konfigurasi inti bersama elektron sebelah dalam (1s) dan elektron terluar (2s). garis putus - putus mewakili permukaan Gaussian	536
Gambar 7. 23 Tiga Kemungkinan Penempatan 2 elektron di orbital p. Dari kiri ke kanan energi sistem berkurang sehingga sistem bersifat lebih stabil	538
Gambar 8. 1 Sketsa fungsi gelombang dua atom hidrogen yang terpisah pada jarak besar	551
Gambar 8. 2 Overlap fungsi gelombang hidrogen, garis putus putus menunjukkan fungsi gelombang dan garis solid menunjukkan penjumlahan dua fungsi gelombang (a) Sefase (bonding state atau keadaan simetri) (b) Berlawanan fase (antibonding state atau anti simetri)	552
Gambar 8. 3 Densitas probabilitas pada masing – masing kombinasi fungsi gelombang dari Gambar 8.2	552
Gambar 8. 4 Hubungan energi dengan jarak pisah R untuk $H2 +$	554

Gambar 8. 5 Perbedaan Energi pada kombinasi fungsi gelombang H₂	556
Gambar 8. 6 <i>Bonding</i> dan <i>Antibonding</i> pada H₂	556
Gambar 8. 7 Distribusi Probabilitas dari elektron p yang berbeda	559
Gambar 8. 8 Dua atom dengan elektron valensi di sub kulit p yang terpisah jauh	560
Gambar 8. 9 Overlapping distribusi probabilitas mempengaruhi kekuatan ikatan pada molekul (a) searah (b) tidak searah.....	560
Gambar 8. 10 Keadaan simetri (bonding) dan antisimetri (antibonding) pada sub kulit 2p.....	561
Gambar 8. 11 Overlapping fungsi gelombang pada sub kulit s dan p	564
Gambar 8. 12 Overlap Fungsi gelombang elektron pada H ₂ O.....	565
Gambar 8. 13 Overlap fungsi gelombang elektron pada NH ₃	566
Gambar 8. 14 Struktur tetrahedral pada molekul CH ₄	567
Gambar 8. 15 Distribusi Probabilitas hibrida sp, sp ² dan sp ³	569
Gambar 8. 16 Ikatan molekuler pada C ₂ H ₄ , untuk memperjelas overlap p _z tidak dapat diperlihatkan, anak panah putus-putus mengindikasikan adanya ikatan yang terbentuk oleh keadaan p _z unhibridisasi	570
Gambar 8. 17 (a) Ikatan molekuler pada benzena, overlap pada p _z tidak diperlihatkan namun garis panah putus - putus menunjukkan ikatan p _z , (b) image Scanning Electron Microscope menunjukkan distribusi elektron dari molekul benzena pada permukaan tembaga	570
Gambar 8. 18 Ikatan molekuler di C ₂ H ₂ atom karbon mengalami tiga ikatan di p _x hibrida dan dua lagi p _y dan p _z unhibrida (garis putus-putus).....	571
Gambar 8. 19 Energi Molekuler NaCl. Energi pada skala nol menunjukkan keadaan netral dari atom Na dan Cl. Kurva garis solid adalah sumasi dari tiga kontribusi energi molekuler	573
Gambar 8. 20 Dipol Listrik	575
Gambar 8. 21 Beda elektronegatif.....	576
Gambar 8. 22 Tingkatan energi pada osilator kuantum	585
Gambar 8. 23 Molekul diatomik yang bervibrasi. Pusat massa dari molekul dianggap tetap pada titik origin (0,0) dari sistem koordinat	587
Gambar 8. 24 Fitting parabola dengan energi minimum dari H ₂	588
Gambar 8. 25 Tingkat energi rotasi pada molekul	591
Gambar 8. 26 Rotasi dari molekul diatomik	593
Gambar 8. 27 Spektrum Absorpsi molekuler	595
Gambar 8. 28 Skema tingkat energi elektron, vibrasi dan translasi pada molekul	597

Gambar 8. 29 Kombinasi tingkat energi vibrasi dan rotasi pada sebuah molekul. Transisi ditandai dengan tanda x menunjukkan transisi yang tidak diperbolehkan menurut aturan seleksi.....	597
Gambar 8. 30 Baris yang diharapkan dari transisi absorpsi antara keadaan rotasi dan vibrasi. tiap garis vertikal menampilkan absorpsi foton dengan energi	599
Gambar 8. 31 Spektrum Absorpsi Molekul HCl.....	600
Gambar 9. 1 Struktur atom.....	612
Gambar 9. 2 Spin Inti	613
Gambar 9. 3 Interaksi Proton-proton.....	615
Gambar 9. 4 Interaksi Neutron-proton	615
Gambar 9. 5 Contoh isotop, isoton, dan isobar	619
Gambar 9. 6 Energi Ikat per nukleon vs nomor massa A	620
Gambar 9. 7 Tampang serapan neutron untuk inti-inti Z genap	622
Gambar 10. 1 peluruhan radioaktif berantai.....	634
Gambar 10. 2 Peluruhan Radioaktif	636
Gambar 10. 3 prisma: peluruhan radioaktif	637
Gambar 10. 4 skema peluruhan radioaktif	639
Gambar 10. 5 peluruhan Beta.....	641
Gambar 10. 6 skema peluruhan beta $^{12}_B$ dan $^{12}_N$	643
Gambar 10. 7 spektum energi β	643
Gambar 10. 8 Peluruhan Gamma	644
Gambar 10. 9 Simulator Waktu Paruh Berbasis Web dari Aplikasi Fisika Walter Fendt.....	651
Gambar 10. 10 Reaksi Nuklir.....	654
Gambar 10. 11 Reaktor Fisi	660
Gambar 10. 12 Reaksi Fusi	661
Gambar 10. 13 Tab FISSION-ONE ATOM pada Simulasi Reaksi Fisi Platform PhET.....	666
Gambar 10. 14 Reaksi Rantai Simulator Fisi Nuklir pada Platform PhET.....	666
Gambar 11. 1 partikel Elementer	680
Gambar 11. 2 proses Quark hadron lepton.....	680
Gambar 11. 3 Barion	681
Gambar 11. 4 Meson	681
Gambar 11. 5 Skema Detektor isian gas	692
Gambar 11. 6 Skema Untai Elektronik Detektor Kamar Ionisasi	693

Gambar 11. 7 (a) Untai RoCo (b) Bentuk Keluarannya.....	694
Gambar 11. 8 Detektor pencacah Geiger Muller	696
Gambar 11. 9 Detektor Kelipan	697
Gambar 11. 10 Detektor Semikonduktor	699
Gambar 11. 11 Skema Kamar Kabut Wilson	701
Gambar 11. 12 Hasil pendeteksian partikel dan anti partikel dari detektor kamar gelembung	702
Gambar 11. 13 Skema Detektor Film.....	703
Gambar 11. 14 Radiasi Cerenkov	704
Gambar 11. 15 Diagram Akselerator Cockroft-Walton	706
Gambar 11. 16 Akselerator Van de Graaff	706
Gambar 11. 17 Skema Akselerator Tandem	707
Gambar 11. 18 Skema Akselerator Linear	709
Gambar 11. 19 Skema Siklotron	710
Gambar 11. 20 Diagram Irisan Betatron	711
Gambar 11. 21 Diagram Sinkrotron	712

DAFTAR TABEL

Tabel 1 Beberapa Penemuan Fisika Klasik.....	14
Tabel 2 Percobaan/ fenomena/ simulasi yang Gagal Dijelaskan oleh Fisika Klasik	15
Tabel 3 Hasil Pengamatan Eksperimen Tetes Minyak Milikan	205
Tabel 4 Deret pada Spektrum Garis Atom Hidrogen	208
Tabel 5 Fungsi Kerja	230
Tabel 6 Menentukan Frekuensi Ambang Dari Bahan	269
Tabel 7 Menentukan Hubungan Potensial Henti dan Intensitas	269
Tabel 8 Menentukan Hubungan Potensial Henti dengan Panjang Gelombang.....	270
Tabel 9 Perbandingan Osilator Harmonik pada tinjauan Klasik dan Kuantum	395
Tabel 10 Massa dan Muatan Proton, Elektron dan Neutron	435
Tabel 11 Menu beserta fungsinya pada Software Milikan Oil Drop	462
Tabel 12 Data Pengamatan Eksperimen Simulasi Tetes Minyak Milikan	465
Tabel 13 Fungsi Gelombang lengkap elektron dalam Atom Hidrogen setelah normalisasi	476
Tabel 14 Penggunaan Abjad untuk Bilangan Kuantum l	489
Tabel 15 Perbandingan antara Momentum Sudut Orbital dan Apin dari Elektron di dalam Atom	508
Tabel 16 Jumlah maksimum elektron pada tiap bilangan kuantum utama n ..	528
Tabel 17 Urutan Pengisian Elektron dalam Subpetala atomik, kapasitas maksimum dan jumlah elektron total yang menempati semua subpetala	530
Tabel 18 Konfigurasi elektronik dari beberapa kelompok elemen dalam tabel periodik.....	535
Tabel 19 Sifat Molekul s-bonded	558
Tabel 20 Sifat molekul yang terikat pada sub kulit sp	564
Tabel 21 Sudut ikatan dari ikatan langsung sp	566
Tabel 22 Sudut ikatan oleh hibrida sp^3	569
Tabel 23 Sifat beberapa molekul ionik diatom	573
Tabel 24 Elektronegativitas dari beberapa elemen	576
Tabel 25 hubungan antara cacah radioaktif $N(t)$ dengan waktu t kelipatan dari $T_{(1/2)}$	632
Tabel 26 Data Pengamatan Eksperimen Waktu Paruh.....	651
Tabel 27 Reaksi Fisi Tanpa Containment Vessel.....	668
Tabel 28 Reaksi Fisi dengan Containment Vessel	668

Tabel 29 Partikel Elementer	682
Tabel 30 Barion	682
Tabel 31 Meson	684
Tabel 32 Empat macam gaya fundamental	686
Tabel 33 Perbandingan sifat quark	687

PETUNJUK PENGGUNAAN BMP

Sebelum mempelajari Buku Materi Pembelajaran (BMP) ini, sebaiknya anda membaca terlebih dahulu petunjuk penggunaan berikut.

- 1) Berdoalah sebelum memulai pembelajaran.
- 2) BMP ini terdiri dari 3 modul, yaitu Elektrostatika, Medan Listrik dalam Bahan, dan Medan Elektromagnetik. Pada bagian awal diberikan peta konsep yang menunjukkan hubungan antar konsep dalam kegiatan pembelajaran satu dengan lainnya, sehingga dapat membantu memahami gambaran umum seluruh mata kuliah Fisika Listrik Magnet.
- 3) BMP ini memiliki 15 Kegiatan Pembelajaran, yang sudah disesuaikan dengan jumlah minggu pertemuan tatap muka. Pembagian kegiatan pembelajaran sudah disesuaikan dengan alur implementasi, sehingga pemahaman satu materi akan memudahkan pemahaman di materi berikutnya.
- 4) Di setiap akhir kegiatan pembelajaran diberikan Uji Formatif, dengan tujuan menguji tingkat pemahaman Anda setelah menyelesaikan kegiatan pembelajaran. Jawablah setiap pertanyaan dan nilai yang diperoleh dapat dijadikan umpan balik untuk menilai apakah Anda sudah menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran tersebut dengan baik atau belum.
- 5) BMP ini didesain sesuai dengan KKNI, sehingga perkuliahan akan berlangsung dengan pendekatan Student Centered Learning (Berpusat pada mahasiswa). Setiap kegiatan pembelajaran akan dipresentasikan oleh mahasiswa secara berkelompok, sesuai kesepakatan pada awal perkuliahan
- 6) Untuk memudahkan Anda dalam memahami materi dalam modul, dosen (fasilitator) juga akan melakukan koreksi, penguatan konsep, simulasi, dan pembahasan contoh soal selama perkuliahan berlangsung.
- 7) Berdoalah setelah kamu selesai belajar.

Petunjuk penggunaan modul ini juga berguna untuk memandu pembaca mengetahui isi / komponen dalam ini. Penjelasan singkat tentang komponen tersebut akan membantu mempermudah pemahaman kalian tentang materi yang tersaji dalam BMP ini.

<p>1. Judul Kegiatan Pembelajaran Berisi tentang judul atau topik yang akan kamu pelajari per pertemuan.</p>	
---	--

2. Kemampuan Dasar dan Sub Kemampuan Dasar

Di bagian bawah judul, terdapat tabel yang menunjukkan kemampuan dasar dan sub kemampuan dasar. Fungsinya adalah untuk memandu tentang keterampilan apa saja yang harus kamu kuasai setelah melalui kegiatan pembelajaran ini.

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan proses lahirnya fisika modern	a) Mahasiswa mampu menjelaskan perkembangan ilmu fisika dalam 8 (delapan) periode menurut Arabatzis (C2) b) Mahasiswa mampu menjelaskan kelemahan fisika klasik (C2) c) Mahasiswa mampu menjelaskan eksperimen-eksperimen dan teori-teori yang mendasari kelahiran fisika modern (C2) d) Mahasiswa mampu menelaah ciri khas dari fisika klasik dan fisika modern (C4)

3. Uraian Materi

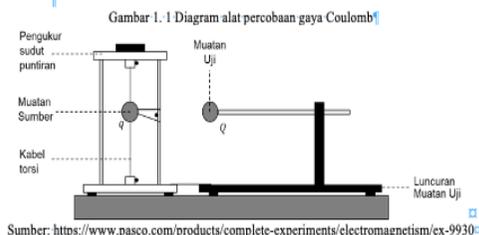
Berisi sejumlah uraian materi yang menjelaskan materi pembelajaran dalam setiap pertemuan. Pada uraian materi ini berisi uraian, contoh, ilustrasi, persamaan yang fungsinya untuk memperjelas materi pembelajaran.

Uraian Materi

Fisika sebagai salah satu cabang ilmu pengetahuan mengalami perubahan (evolusi) yang dapat dibagi menjadi 3 (tiga) bagian, yaitu fisika lama, fisika klasik dan fisika modern. Sesuai kronologinya, evolusi ilmu fisika dijelaskan dalam 8

4. Ilustrasi / Gambar

Ilustrasi / gambar dicantumkan untuk memberikan gambaran tentang narasi yang diberikan. Ilustrasi / gambar ini bertujuan agar pembaca lebih mudah memahami uraian materi.



5. Persamaan – Persamaan

Persamaan-persamaan ditulis secara tersusun dan diberi nomor, untuk memudahkan pembaca mencari persamaan yang diinginkan.

$$E = \frac{F}{Q} = \frac{k \frac{Qq}{r^2}}{Q} = k \frac{q}{r^2} \quad 1.5$$

6. Contoh Soal

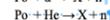
Contoh Soal diberikan agar kamu dapat berlatih dalam menyelesaikan permasalahan / kasus / soal secara matematis

Contoh Soal

Reaksi Peluruhan Radioaktif dari inti. Suatu nuklida Po ditembak dengan sinar alpha menurut reaksi : $Po + \alpha \rightarrow X + n$.

Berapa nomor atom dan bilangan massa Nuklida X ?

Jawab



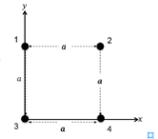
Maka: nomor atom = 92, bilangan massa = 237

7. Tugas / Latihan/ lembar kerja Praktek

Fungsinya untuk menguji dan memperdalam pengetahuan, serta salah satu bentuk penerapan pengetahuanmu.

Tugas

- Perhatikan gambar disamping.
Ada empat partikel membentuk sebuah persegi. Muatannya adalah $q_1 = q_4 = Q$ dan $q_2 = q_3 = q$. Tentukan:



Berapakah rasio $\frac{Q}{q}$ jika gaya elektrostatis total pada partikel 1 dan 3 adalah nol?

Jawab:

8. Rangkuman

Jika kamu tersesat, bacalah mulai dari rangkuman. Rangkuman menyajikan versi singkat dari uraian materi.

Rangkuman

- Elektrostatik atau listrik statis adalah bagian dari ilmu fisika yang mempelajari tentang fenomena yang ditimbulkan oleh muatan-muatan yang statik (diam) satu sama lain.
- Besar gaya Coulomb berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antara kedua muatan dan berbanding lurus dengan hasil kali kedua muatan.
- Prinsip superposisi menjelaskan bahwa interaksi antara dua muatan tidak dipengaruhi oleh kehadiran muatan lainnya.

9. Uji Formatif

Bagian ini berfungsi sebagai evaluasi pembelajaran pada setiap pertemuan. Jangan khawatir, jika skor mu masih dibawah 80, kamu bisa mengulang, hingga skormu mencapai 80.

Uji Formatif

Pilihan Ganda

- Dona melakukan sebuah observasi terhadap tiga balok bermuatan, yaitu A, B dan C. Ia memperhatikan bahwa balok A ditarik oleh balok B, tapi ditolak oleh balok C. Yang terjadi jika balok B didekatkan dengan balok C adalah ...
 A. kedua balok saling tarik menarik
 B. kedua balok saling menjauh
 C. kedua balok tolak menolak
 D. kedua balok tetap diam
 E. Informasi yang diperoleh belum cukup untuk menentukan keadaan kedua balok
- Sebuah muatan $-2,3 \times 10^{-6}$ mengalami gaya tolak sebesar $0,35 \text{ N}$ oleh sebuah partikel yang berjarak $0,20 \text{ m}$ terhadapnya. Besar dan jenis partikel tersebut adalah ...
 A. $6,8 \times 10^{-7}$ C, muatan negatif
 B. $6,8 \times 10^{-7}$ C, muatan positif
 C. muatan netral
 D. $1,2 \times 10^{-6}$, muatan negatif
 E. $1,2 \times 10^{-6}$, muatan positif
- Dua muatan positif dengan besar $q_1 = q_2 = 1,10^{-3} \text{ C}$ berada tepat di sumbu x (lihat Gambar) dengan $L = 10 \text{ cm}$.

10. Titik Henti

Mahasiswa bisa berselancar di internet, menonton video pembelajaran yang bisa membantumu memahami materi.

Untuk dapat memahami tentang presipitator elektrostatik, kamu dapat mengklik link dibawah ini
<https://www.youtube.com/watch?v=AcyFY3iAdlw>
 atau dengan melakukan scan kode QR disamping:



RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER (RPS)

	UNIVERSITAS KRISTEN INDONESIA				
	Fakultas	:	Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan		
	Jurusan / Prodi	:	Pendidikan Fisika		
RENCANA PEMBELAJARAN SEMESTER					
MATA KULIAH	KODE	Rumpun MK	BOBOT (SKS)	SEMESTER	TGL Penyusunan
Fisika Modern	14124128	Mata Kuliah Program Studi	5	GENAP	17 Februari 2021
OTORISASI	Pengembang RPS		Koordinator RMK		Ka. PRODI
	NGIA MASTA, S.Pd.,M.Si.				TAAT GUSWANTORO, M.Si,
	CPL	<p>Sikap</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6). 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8). 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9). <p>Keterampilan Umum</p> <ol style="list-style-type: none"> 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8). 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9). 			

		<p>3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).</p> <p>4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).</p> <p>Keterampilan Khusus</p> <p>1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)</p> <p>2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)</p> <p>Pengetahuan</p> <p>1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)</p> <p>2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)</p> <p>3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)</p> <p>4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)</p>
	CPMK	<p>1. Mahasiswa mampu merumuskan, mengaplikasikan dan menganalisis teori, hukum, dan azas yang terdapat dalam Fisika modern, serta mempresentasikannya dalam pembelajaran dengan sikap disiplin, menunjukkan kinerja mandiri, sistematis dan bertanggung jawab.</p> <p>2. Mahasiswa mampu melakukan simulasi / praktikum dan melakukan analisis terhadap hasil simulasi / praktikum tersebut se.</p> <p>3. Mahasiswa mampu merancang praktikum yang berhubungan dengan fisika modern dalam pembelajaran dan mempresentasikannya dengan kinerja mandiri, bermutu dan terukur.</p>
DESKRIPSI SINGKAT MK	<p>Mata kuliah ini menjabarkan peranan, prinsip kerja aplikasi hukum, konsep dan teori – teori dalam Fisika Modern untuk keperluan pembelajaran dan riset bidang fisika murni. Mata kuliah ini terdiri dari bagian, yaitu:</p> <p>1) PENGANTAR FISIKA MODERN</p> <p>2) TEORI RELATIVITAS</p>	

	<p>3) TEORI KUANTUM 4) MEKANIKA GELOMBANG 5) SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER 6) MODEL ATOM BERELEKTRON TUNGGAL 7) MODEL ATOM BERELEKTRON JAMAK 8) STRUKTUR MOLEKUL 9) MODEL INTI ATOM 10) RADIOAKTIVITAS 11) PARTIKEL ELEMENTER</p>
BAHAN KAJIAN	<p>Modul 1 PENGANTAR FISIKA MODERN Kegiatan Pembelajaran 1. Sejarah Fisika Kegiatan Pembelajaran 2 Review Fisika Klasik</p> <p>Modul 2 TEORI RELATIVITAS Kegiatan Pembelajaran 1 RELATIVITAS KHUSUS Kegiatan Pembelajaran 2 GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 1 Kegiatan Pembelajaran 3 GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 2 Kegiatan pembelajaran 4 GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 3</p> <p>Modul 3 TEORI KUANTUM Kegiatan pembelajaran 1 EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 1) Kegiatan Pembelajaran 2 EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 2) Kegiatan Pembelajaran 3 PRAKTIKUM EKSPERIMEN KUANTUM Kegiatan Pembelajaran 4 DUALISME GELOMBANG-PARTIKEL</p> <p>Modul 4 MEKANIKA GELOMBANG Kegiatan Pembelajaran 1 PERSAMAAN SCHRODINGER DAN INTERPRETASINYA Kegiatan pembelajaran 2 INTERPRETASI FUNGSI GELOMBANG</p> <p>Modul 5 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER Kegiatan pembelajaran 1 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 1)</p>

	<p>Kegiatan pembelajaran 2 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 2)</p> <p>Modul 6 MODEL ATOM BERELEKTRON TUNGGAL</p> <p>Kegiatan pembelajaran 1 PERKEMBANGAN MODEL ATOM</p> <p>Kegiatan pembelajaran 2 EKSPERIMEN SIMULASI MINYAK MILIKAN</p> <p>Kegiatan Pembelajaran 3 TINJAUAN KUANTUM ATOM HIDROGEN</p> <p>Modul 7 FISIKA ATOM</p> <p>Kegiatan pembelajaran 1 BILANGAN KUANTUM</p> <p>Kegiatan pembelajaran 2 ATOM BERELEKTRON JAMAK</p> <p>Modul 8 STRUKTUR MOLEKUL</p> <p>Kegiatan pembelajaran 1 IKATAN MOLEKUL DAN TRANSISI ELEKTRON DALAM MOLEKUL</p> <p>Kegiatan pembelajaran 2 TRANSISI ELEKTRON DALAM MOLEKUL</p> <p>Modul 9 MODEL INTI ATOM</p> <p>Kegiatan pembelajaran 1 MODEL INTI ATOM DAN GAYA NUKLIR</p> <p>Kegiatan pembelajaran 2 KESTABILAN INTI</p> <p>Modul 10 RADIOAKTIVITAS</p> <p>Kegiatan Pembelajaran 1 RADIOAKTIVITAS DAN JENIS JENIS RADIASI NUKLIR</p> <p>Kegiatan pembelajaran 2 PELURUHAN RADIOAKTIF, ALPA, BETA DAN GAMMA</p> <p>Kegiatan Pembelajaran 3 REAKSI NUKLIR</p> <p>Kegiatan Pembelajaran 4 SIMULASI REAKSI FISI DAN REAKSI FUSI</p> <p>Modul 11 PARTIKEL ELEMENTER</p> <p>Kegiatan Pembelajaran 1 PARTIKEL ELEMENTER</p> <p>Kegiatan pembelajaran 2 DETECTOR DAN AKSELARATOR</p> <p>Kegiatan Pembelajaran 3 KUNJUNGAN ILMIAH KE BATAN/ DESAIN ALAT PERAGA</p>
PUSTAKA	<p>UTAMA</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Buku Materi Ajar Fisika Modern 2. Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). Modern Physics Third Edition (third). Corvallis: John Wiley & SOns, Inc.

3. Thornton, S. T. (University O. V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition (Third)*. Boston: Cengage Learning.
4. Kusminarto (2011). *Esensi Fisika Modern*. Andi: Yogyakarta.
5. Kanginan, Marthen. (2018). *Fisika untuk SMA/MA Kelas XII*. Erlangga: Jakarta.

PENDUKUNG

6. Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). *Modern Physics - Fifth Edition*. In *Modern Physics Sixth Edition*. W.H.Freeman and Company: New York.
7. Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). *Fisika Dasar 1 Edisi 7 Jilid 3*. Jakarta: Erlangga.
8. Purwanto, Agus. (2016). *Fisika Kuantum Edisi 2 Revisi 2*. Gavamedia : Yogyakarta.
9. Purwanto, Agus. (2007). *Fisika Statistik*. Gavamedia: Yogyakarta
10. Einstein, Albert. (2019). *Relativitas Teori Khusus dan Umum*. Penerjemah: Like Wilardjo. *Kepustakaan Populer Gramedia: Jakarta*.
11. Surya, Yohanes. (2003). *Fisika itu Mudah SMU 3C*. Bina Sumber Daya MIPA: Jakarta.
12. Burns, Marshall, L. *Modern Physics for Science and engineering*. *Physics Curriculum & Instruction*.
13. Sutjahja, Inge. M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling*. ITB Press: Bandung.
14. Sugiyono, Vani. (2016). *Mekanika Kuantum “Indera Keenam” untuk Menjelajahi Dunia Atom yang Tak Kasat Mata*. PT BUKU SERU: Yogyakarta
15. Beiser, Arthur. (2003). *Concepts of Modern Phsics 6th Edition*. Mc Graw Hill.
16. Arabatzis, T. (2018). How Physica Became Physics. *Science & Education*, 27(1–2), 211–218. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9946-7>
17. Diolatzis, I. S., & Pavlogeorgatos, G. (2019). Simulating Kepler’s Geocentric Mars Orbit. *New Astronomy*, 71(March), 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2019.03.004>
18. Oh, J. (Hanyang U. (2017). Understanding the Estimation of Circumference of the Earth by of Eratosthenes based on the History of Science , For Earth Science Education. *대한지구과학교육학회지*, 10(August), 214–225

MEDIA PEMBELAJARAN	PERANGKAT LUNAK
	<ol style="list-style-type: none"> 1. Ms. Teams 2. Ms. Office 3. Internet browser 4. PhET 5. Software tetes Minyak Milikan
	PERANGKAT KERAS
	Laptop Handphone / gadget
DOSEN PENGAMPU	NGIA MASTA,S.Pd.,M.Si.
MATA KULIAH SYARAT	Fisika Gerak Metode Matematika untuk Fisika I Metode Matematika untuk Fisika II Matematika dasar Fisika Listrik Magnet

Mgu ke	Sub CPMK (Kemampuan Akhir yang direncanakan)	Bahan kajian (Materi Pembelajaran)	Bentuk dan metode pembelajaran (Media dan Sumber Belajar)	Estimasi waktu	Pengalaman Belajar Mahasiswa	Penilaian		
						Kriteria	Indikator	Bobot
1.	Mahasiswa mampu menjelaskan proses lahirnya fisika modern.	RPS + Kontrak Kuliah Sejarah Fisika 1) <i>Physica</i> (fisik) pada peradaban Yunani Kuno dan Islam 2) <i>Physica</i> pada abad Pertengahan 3) <i>Physica</i> pada awal abad modern 4) Transformasi <i>Physica</i> menjadi <i>Physics</i> (fisika) 5) Fisika Klasik 6) Revolusi Teori Relativitas dan Fisika Kuantum 7) Fisika pada tahun 1930 an 8) Fisika setelah perang dunia kedua	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan sejarah fisika	
	Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep fisika klasik yang masih berlaku pada fisika modern.	Review Fisika Klasik 1) Mekanika klasik yang masih berlaku pada fisika modern. 2) Termodinamika yang masih berlaku pada fisika modern. 3) Elektromagnetisme yang masih berlaku pada fisika modern.	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan dan mengaplikasikan hukum-hukum fisika klasik yang masih berlaku pada fisika modern.	
2.	A. Mahasiswa dapat menjelaskan sejarah singkat tentang lahirnya teori relativitas Einstein. B. Mahasiswa dapat menjelaskan Postulat-postulat relativitas khusus Einstein C. Mahasiswa dapat menjelaskan konsep-konsep relativistik yang terdapat di transformasi Lorentz	RELATIVITAS KHUSUS A. Pengertian kerangka acuan inersial B. Transformasi Galileo C. Percobaan Michelson-Morley D. Postulat-postulat relativitas khusus E. Transformasi Lorentz 1. Kontraksi panjang 2. Dilatasi waktu	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan dan mengaplikasikan teori relativitas khusus	

		GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 1 A. Paradoks kembar B. Eksperimen-eksperimen yang menverifikasi teori relativitas khusus 1. Eksperimen muon 2. Aberasi bintang 3. Pengukuran waktu atomik 4. Pengujian simetri lorentz 5. Penjumlahan kecepatan	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan dan mengaplikasikan gejala – gejala relativitas khusus	
3.	1. Mahasiswa dapat mengaplikasikan gejala momentum relativistik dalam media ajar. 2. Mahasiswa dapat mengaplikasikan gejala energi relativistic dalam media ajar.	GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 2 A. Momentum relativistik B. Energi relativistik 1. Energi total dan energi diam 2. Kesetaraan massa dan energi 3. Hubungan energi dan momentum 4. Partikel tak bermassa	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan dan mengaplikasikan gejala – gejala relativitas khusus	
	1. Mahasiswa dapat menjelaskan gejala relativitas dalam perambatan gelombang elektromagnetik 2. mahasiswa dapat melakukan perumusan kovarian.	GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 3 A. Relativitas khusus dan elektrodinamika B. Teori Relativitas Umum	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan dan mengaplikasikan gejala – gejala relativitas khusus	
4.	Mahasiswa dapat menjelaskan fenomena-fenomena fisis yang terjadi pada eksperimen - eksperimen pencetus teori kuantum	EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 1) A. Eksperimen radiasi benda hitam B. Teori Rayleigh – Jeans C. Penemuan sinar X D. Percobaan sinar katoda E. Spektrum garis F. Teori kuantitas Planck .	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan dan menganalisis eksperimen – eksperimen pencetus teori kuantum	

	<p>mahasiswa dapat menjelaskan eksperimen-eksperimen yang menjadi dasar lahirnya teori kuantum.</p>	<p>EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 2)</p> <p>A. Eksperimen efek fotolistrik</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Hasil eksperimen 2. Interpretasi fisika klasik 3. Teori einstein 4. Interpretasi kuantum <p>B. Efek Compton</p> <p>C. Produksi Sinar X</p> <p>D. Produksi pasangan dan anihilasi</p>	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 2 x 50 ''</p> <p>TT: 2 x 2 x 60''</p> <p>BM: 2 x 2 x 60''</p>	<p>Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan dan menganalisis eksperimen – eksperimen pencetus teori kuantum</p>	
5.	<p>Mahasiswa dapat melakukan simulasi percobaan radiasi benda hitam menggunakan platform virtual lab</p> <p>Mahasiswa dapat melakukan simulasi efek fotolistrik hitam menggunakan platform virtual lab</p>	<p>PRAKTIKUM EKSPERIMEN KUANTUM</p> <p>A. Simulasi radiasi benda hitam</p> <p>B. Simulasi efek foto listrik</p>	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan, simulasi</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 3 x 50 ''</p> <p>TT: 3 x 2 x 60''</p> <p>BM: 3 x 2 x 60''</p>	<p>Mahasiswa melakukan simulasi / eksperimen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan dan menganalisis eksperimen – eksperimen pencetus teori kuantum</p>	
	<p>1. mahasiswa dapat menjelaskan eksperimen-eksperimen yang menjadi dasar lahirnya teori dualism gelombang-partikel</p> <p>2. mahasiswa dapat menjelaskan teori-teori yang menjadi dasar dualism gelombang-partikel</p>	<p>DUALISME GELOMBANG-PARTIKEL</p> <p>A. Hamburan X-ray</p> <p>B. Hipotes de Broglie</p> <p>C. Hamburan electron (eksperimen Davisson – Germer)</p> <p>D. Gelombang atau Partikel? Gelombang bergerak</p> <p>E. Ketidakpastian Heisenberg</p>	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 2 x 50 ''</p> <p>TT: 2 x 2 x 60''</p> <p>BM: 2 x 2 x 60''</p>	<p>Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis dualismgelombang partikel</p>	

6.	<p>1. mahasiswa dapat menurunkan persamaan schrodinger dalam mekanika gelombang</p> <p>2. mahasiswa dapat menurunkan persamaan schrodinger dalam bentuk nilai dan fungsi eigen</p>	<p>PERSAMAAN SCHRODINGER DAN INTERPRETASINYA</p> <p>A. fungsi gelombang sebagai probabilitas</p> <p>B. Partikel dalam kotak</p> <p>C. Persamaan gelombang Schrodinger</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Normalisasi gelombang 2. Sifat fungsi gelombang yang valid 3. Persamaan Schrodinger tak gayut waktu 	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 3 x 50 ''</p> <p>TT: 3 x 2 x 60''</p> <p>BM: 3 x 2 x 60''</p>	<p>Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis persamaan schrodinger dan interpretasinya</p>	
	<p>1. mahasiswa dapat menjelaskan interpretasi persamaan schrodinger sebagai sebuah probabilitas</p> <p>2. mahasiswa dapat menurunkan persamaan schrodinger tak bergantung waktu</p>	<p>INTERPRETASI FUNGSI GELOMBANG</p> <p>A. Nilai eigen</p> <p>B. Fungsi eigen degenerasi</p> <p>C. Operator dan harga espektasi</p> <p>D. Partikel bebas</p> <p>E. Potensial tangga</p>	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 2 x 50 ''</p> <p>TT: 2 x 2 x 60''</p> <p>BM: 2 x 2 x 60''</p>	<p>Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis persamaan schrodinger dan interpretasinya</p>	
7.	<p>Mahasiswa dapat menentukan solusi persamaan schrodinger pada system kuantum 1 dimensi</p>	<p>SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 1)</p> <p>A. Sumur potensial tak hingga</p> <p>B. Sumur Potensial berhingga</p> <p>C. Sumur potensial tak hingga 3 dimensi</p>	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 3 x 50 ''</p> <p>TT: 3 x 2 x 60''</p> <p>BM: 3 x 2 x 60''</p>	<p>Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis solusi persamaan schrodinger</p>	

	1. mahasiswa dapat menentukan solusi persamaan schrodinger pada efek tunneling 2. mahasiswa dapat menentukan solusi persamaan schrodinger pada osilator harmobik sederhana	SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 2) B. Osilator harmonik sederhana A. Efek tunneling	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis solusi persamaan schrodinger	
8.	UTS							20%
	1. mahasiswa dapat menjelaskan model-model atom Fisika Klasik, yaitu model atom Thomson dan rutherford 2. mahasiswa dapat menjelaskan eksperimen yang mendasari lahirnya model atom kuantum	PERKEMBANGAN MODEL ATOM A. Model atom Thomson B. Model atom rutherford C. Spektrum atom hidrogen D. Model atom Bohr E. Spektrum sinar X dan Bremstrahlung F. Hukum Moseley	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis perkembangan model atom	
9.	Mahasiswa dapat melakuakn percobaan minyak milikan menggunakan aplikasi virtual lab	Percobaan minyak milikan	Bentuk : Simulasi / praktikum Metode: Simulasi / praktikum melalui virtual lab, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway, PhET Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Panduan praktikum, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa melakukan simulasi / eksperimen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis percobaan minyak milikan.	

	mahasiswa dapat mengaplikasikan persamaan schrodinger pada system kuantum 3D untuk membuat model atom hidrogen	TINJAUAN KUANTUM ATOM HIDROGEN A. Aplikasi fungsi gelombang pada model hidrogen B. Solusi persamaan Schrodinger untuk Atom Hidrogen 1. Separasi variabel 2. Solusi untuk persamaan radial 3. Solusi untuk persamaan angular dan azimuth	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis tinjauan kuantum atom hydrogen	
10.	Mahasiswa dapat menjelaskan keempat bilangan kuantum berdasarkan model atom kuantum.	BILANGAN KUANTUM A. Bilangan kuantum 1. Bilangan kuantum utama 2. Bilangan kuantum momentum angular orbital 3. Bilangan kuantum magnetik B. Efek zeeman normal C. Spin intrinsik D. Tingkat energi E. Probabilitas elektron	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis bilangan kuantum.	
	Mahasiswa dapat menjelaskan model kuantum pada atom berelektron banyak	FISIKA ATOM A. Struktur Atom dan tabel periodik B. Momentum angular total C. Efek zeeman anomali	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis teori fisika atom	
11.	Mahasiswa dapat menjelaskan jenis ikatan-ikatan pada molekul	IKATAN MOLEKUL A. Molekul Hidrogen B. Ikatan Kovalen C. Ikatan Ionik	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis ikatan molekul dan transisi electron dalam molekul	

	Mahasiswa dapat menjelaskan transisi electron dalam molekul	SPEKTRUM MOLEKULAR A. Energi Vibrasi B. Energi Rotasi C. Spektrum Elektron pada Molekul	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 ** TT: 2 x 2 x 60** BM: 2 x 2 x 60**	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis ikatan molekul dan transisi electron dalam molekul	
12.	Mahasiswa dapat menjelaskan model inti dan gaya nuklir	MODEL INTI ATOM DAN GAYA NUKLIR A. Penemuan inti B. Sifat inti atom 1. Ukuran dan bentuk inti atom 2. Densitas nuklir 3. Spin intrinsik 4. Momen magnet intrinsik 5. Resonansi magnetik nuklir C. Deuteron	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 ** TT: 3 x 2 x 60** BM: 3 x 2 x 60**	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis model inti atom dan gaya nuklir	
	Mahasiswa dapat menjelaskan tentang kestabilan inti atom	KESTABILAN INTI A. Gaya nuklir B. Kestabilan inti atom C. Energi ikat nuklir D. Rumus semi empirik weiszacker	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 ** TT: 2 x 2 x 60** BM: 2 x 2 x 60**	Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis kestabilan inti	
13.	Mahasiswa dapat menjelaskan tentang radioaktivitas dan jenis – jenis radiasi nuklir	RADIOAKTIVITAS DAN JENIS JENIS RADIASI NUKLIR A. Besaran – besaran dasar radioaktivitas B. Peluruhan berantai C. Keseimbangan radioaktif D. Radioaktivitas buatan E. Peluruhan radioaktif 1. Peluruhan alpha 2. Peluruhan beta 3. Peluruhan gamma	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 ** TT: 3 x 2 x 60** BM: 3 x 2 x 60**	Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis radioaktivitas dan jenis – jenis radiasi nuklir.	

	<p>1. Mahasiswa dapat melakukan simulasi percobaan peluruhan alpha, beta dan gamma menggunakan virtual Lab</p> <p>2. Mahasiswa dapat menjelaskan fenomena-fenomena fisis yang terdapat pada simulasi peluruhan alphan beta dan gamma</p>	<p>SIMULASI PELURUHAN</p> <p>A. Peluruhan radioaktif</p> <p>B. Peluruhan alpha</p> <p>C. Peluruhan beta</p> <p>D. Peluruhan gamma</p>	<p>Bentuk : Simulasi / praktikum</p> <p>Metode: Simulasi / praktikum melalui virtual lab, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway, PhET</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Panduan praktikum, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 2 x 50 **</p> <p>TT: 2 x 2 x 60**</p> <p>BM: 2 x 2 x 60**</p>	<p>Mahasiswa mendengarkan penjelasan dosen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis peluruhan radioaktif : alpha, gamma dan beta</p>	
14.	<p>Mahasiswa dapat menjelaskan reaksi nuklir.</p>	<p>REAKSI NUKLIR</p> <p>A. Klasifikasi reaksi nuklir</p> <p>B. Mekanisme reaksi nuklir</p> <p>C. Kinematika reaksi nuklir</p> <p>D. Parameter reaksi nuklir</p>	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 3 x 50 **</p> <p>TT: 3 x 2 x 60**</p> <p>BM: 3 x 2 x 60**</p>	<p>Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis reaksi nuklir</p>	
	<p>Mahasiswa dapat melakukan simulasi reaksi fisis, fusi dan simulasi kerja reactor melalui virtual lab</p>	<p>SIMULASI REAKSI FISI DAN REAKSI FUSI</p> <p>A. Simulasi reaksi fisis</p> <p>B. Simulasi reaksi fusi</p> <p>C. Simulasi reaktor</p>	<p>Bentuk : Simulasi / praktikum</p> <p>Metode: Simulasi / praktikum melalui virtual lab, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway, PhET</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Panduan praktikum, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 2 x 50 **</p> <p>TT: 2 x 2 x 60**</p> <p>BM: 2 x 2 x 60**</p>	<p>Mahasiswa melakukan simulasi / eksperimen, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis simulasi reaksi fusi dan reaksi fisis</p>	
15.	<p>Mahasiswa dapat menjelaskan tentang partikel elementer yang terdapat pada atom</p>	<p>PARTIKEL ELEMENTER</p> <p>A. Partikel elementer</p> <p>B. Interaksi lepton, muon, hadron dan quark</p>	<p>Bentuk : Kuliah Daring</p> <p>Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan</p> <p>Media : Ms. Teams , Power point / Sway</p> <p>Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout</p>	<p>TM: 3 x 50 **</p> <p>TT: 3 x 2 x 60**</p> <p>BM: 3 x 2 x 60**</p>	<p>Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.</p>	<p>Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku</p> <p>Bentuk Test Tertulis</p> <p>Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap</p>	<p>Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis partikel elementer</p>	

	Mahasiswa dapat menjelaskan fungsi dan prinsip kerja detector dan akselarator	DETECTOR DAN AKSELARATOR a. Detektor b. Akselarator	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 2 x 50 '' TT: 2 x 2 x 60'' BM: 2 x 2 x 60''	Mahasiswa mempresentasikan, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan, mengaplikasikan dan menganalisis detector dan akselarator	
16.	Mahasiswa dapat mengkomunikasikan peranan teknologi nuklir melalui kunjungan ilmiah atau dalam media pembelajaran	KUNJUNGAN ILMIAH KE BATAN A. Observasi reaktor B. Produksi radioisotope Atau pembuatan media pembelajaran tentang teknologi nuklir	Bentuk : Kuliah Daring Metode: Presentasi dosen, diskusi kelas dan penugasan Media : Ms. Teams , Power point / Sway Sumber belajar Buku Materi Pembelajaran, Buku Referensi, handout	TM: 3 x 50 '' TT: 3 x 2 x 60'' BM: 3 x 2 x 60''	Mahasiswa melakukan simulasi / eksperimen / kunjungan ilmiah, membaca buku materi pembelajaran, mengajukan pertanyaan dalam diskusi kelas dan mengerjakan tugas per kegiatan pembelajaran.	Kriteria : Kesesuaian dengan asas, teori dan hukum fisika yang berlaku Bentuk Test Tertulis Bentuk Non test: Rubrik Penilaian sikap	Ketepatan menjelaskan aplikasi teknologi nuklir bagi kehidupan	
	UAS							20%

SISTEM PENILAIAN

I. PERSYARATAN UMUM

A. Kehadiran:

1. Jumlah kuliah tatap muka per semester yang harus dihadiri oleh mahasiswa/i adalah 32 pertemuan.
2. Batas toleransi kehadiran mahasiswa/i 75 % dari total jumlah pertemuan.
3. Kriteria ketidakhadiran mahasiswa/i adalah: S (sakit) ditandai dengan surat keterangan dokter, I (Ijin) ditandai dengan surat ijin resmi, dan A (Alpa), maksimal 4x pertemuan kelas.
4. Mahasiswa aktif dan partisipatif mengikuti ibadah keluarga besar UKI dan tidak diperkenankan melakukan kegiatan lain selama ibadah berlangsung.
5. Toleransi keterlambatan perkuliahan (dosen + mahasiswa/i) setiap tatap muka adalah 15 menit. Jika setelah 15 menit dosen + mahasiswa/i tidak hadir maka perkuliahan dibatalkan. (kecuali ada persetujuan atau ada masalah tertentu).

B. Perkuliahan:

1. Mata kuliah yang dilaksanakan mahasiswa berbasis KKNI.
2. Mata kuliah berbasis KKNI dinilai/dievaluasi per topik yang telah tuntas
3. Persentase penilaian/evaluasi ditentukan oleh dosen yang bersangkutan sesuai kompetensi MK dan capaian pembelajaran.
4. Tidak diperkenankan meninggalkan kelas selama perkuliahan tanpa ijin oleh dosen.
5. Mahasiswa memakai busana yang sopan.
6. Tidak membuat kegaduhan selama proses pembelajaran berlangsung.

C. Kejahatan akademik: plagiarisme Menurut Peraturan Menteri Pendidikan RI Nomor 17 Tahun 2010:

“Plagiat adalah perbuatan **sengaja** atau **tidak sengaja** dalam memperoleh atau mencoba memperoleh kredit atau nilai untuk suatu karya ilmiah, dengan mengutip sebagian atau seluruh karya dan atau karya ilmiah pihak lain yang diakui sebagai karya ilmiahnya, tanpa menyatakan sumber secara tepat dan memadai.” (Permendik No 17 Tahun 2010 dan Panduan Anti Plagiasime terlampir).

Sanksi sesuai Permendik No 17 Tahun 2010 Pasal 12:

1. teguran;
2. peringatan tertulis;
3. penundaan pemberian sebagian hak mahasiswa;
4. pembatalan nilai satu atau beberapa mata kuliah yang diperoleh mahasiswa;
5. pemberhentian dengan hormat dari status sebagai mahasiswa;
6. pemberhentian tidak dengan hormat dari status sebagai mahasiswa; atau
7. pembatalan ijazah apabila mahasiswa telah lulus dari suatu program.

II.PERSYARATAN KHUSUS

A. Tugas dan Tanggung jawab mahasiswa/i

Pada setiap tatap muka mahasiswa/i diwajibkan berpartisipasi aktif dalam proses perkuliahan melalui hal-hal berikut

1. Presentasi: mahasiswa/i wajib berpartisipasi aktif dalam diskusi yang diadakan dalam setiap tatap muka sesuai kebutuhan materi perkuliahan (lihat RPS).
2. Studi lapangan/*proyek*: mahasiswa/i wajib berpartisipasi aktif dalam studi lapangan yang diadakan di luar kampus sesuai topik materi perkuliahan yang sudah ditentukan dalam RPS.
3. Tugas Mandiri: mahasiswa/i wajib mengerjakan tugas mandiri dalam bentuk review materi kuliah yang telah diberi tanda bintang pada referensi yang digunakan di RPS.
4. Tugas terstruktur & Praktikum : mahasiswa/i wajib membentuk kelompok untuk mendiskusikan berbagai fenomena yang berhubungan dengan media dengan menerapkan konsep, teori dan metode analisis untuk menganalisis dan menjelaskannya.

B. Gaya Selingkung Pengerjaan Tugas

1. Untuk mengerjakan tugas review, mahasiswa/i wajib mematuhi ketentuan berikut:
 - a. Artikel mahasiswa/i harus ditulis dengan komposisi: Pendahuluan (1 hal), Pembahasan (2 hal), Kesimpulan ($\frac{1}{2}$ hal).
 - b. Daftar referensi minimal menggunakan 3 buku dan 2 jurnal ilmiah.
 - c. Pengutipan dan penulisan daftar pustaka sesuai .

- d. Ketentuan kertas A4, huruf Cambria, ukuran jenis 12, spasi 1½.
2. Untuk mengerjakan tugas makalah kelompok, mahasiswa/i wajib mematuhi ketentuan berikut:
- Artikel mahasiswa/i harus ditulis dengan komposisi: Pendahuluan berisi permasalahan dan pentingnya isu/fenomena tersebut dibahas (2 hal), Tinjauan Teoritis berisi teori apa yang hendak digunakan sebagai pisau analisis (2 hal), Pembahasan (5 hal), Kesimpulan (1 hal).
 - Daftar referensi minimal menggunakan 5 buku dan 10 jurnal ilmiah.
 - Pengutipan dan penulisan daftar pustaka menggunakan “APA (American Psychological Association).
 - Ketentuan kertas A4, jenis huruf calibri , ukuran 12, spasi 1½.

III. PENILAIAN (*point-point penilaian rubrik dapat diisi sesuai dengan kebutuhan)

1. Rubrik penilaian presentasi

No	Indikator Penilaian Presentasi	Bobot (B)	Nilai (N)	B x N
1.	Penguasaan materi	30%		
2.	Slide	20%		
3.	Komunikatif	20%		
4.	Kemampuan menjawab pertanyaan dari audience	30%		
Jumlah				

2. Rubrik penilaian kognitif (Kuis dan tugas mingguan)

No	Kualitas Jawaban	Bobot
1.	Kuis awal	25%
2.	Kuis akhir	25%
3.	Tugas mingguan	50%
4.		
5.		

3. Rubrik penilaian Kinerja (makalah presentasi dan Proyek)

No	Indikator	Bobot (B)	Nilai (N)	B x N
1	Makalah presentasi	-		50%
2	Laporan praktikum			50%
3				
Jumlah				

4. Rubrik penilaian sikap

No	Pernyataan	Selalu (SL)	Sering (SR)	Kadang – Kadang (KK)	Tidak Pernah (TP)
1	Aktif dalam diskusi kelas				
2	Jujur tidak melakukan plagiasi				
3	Bekerja sama				
4	Bertanggung jawab				
5	Disiplin				

5. Skala nilai akhir dalam huruf dan angka:

Nilai Akhir (NA)	Nilai Huruf (NH)	Nilai Mutu (NM)
80,0-100,0	A	4,0
75,0-79,0	A-	3,7
70,0-74,9	B+	3,3
65,0-69,9	B	3,0
60,0-64,9	B-	2,7
55,0-59,9	C	2,3
50,0-54,9	C-	2,0
45,0-49,9	D	1,0
<44,9	E	0

6. Presentase Tahap Penilaian Tugas dan kewajiban mahasiswa

Tahap1 : Presentasi Kelompok sebesar 10 %

Tahap2	: Penilaian kognitif	sebesar 30 %
Tahap3	: Penilaian Kinerja	sebesar 10%
Tahap 4	: Penilaian Sikap	sebesar 10%
Tahap 5	: UTS	sebesar 20 %
Tahap 6	: UAS	sebesar 20%

Terima kasih atas kerja sama dan kerja keras mahasiswa sekalian. Shalom.

Jakarta, 17 Februari 2021

**Mengetahui,
Ketua Program
Studi,**



**Taat Guswantoro,
M.Si.**

**Disusun Oleh
Dosen Pengampu,**



**Ngia Masta, S.Pd.,
M.Si.**

JADWAL PERKULIAHAN FISIKA MODERN

PRODI : PENDIDIKAN FISIKA SEMESTER : GENAP
 KODE MATA KULIAH : 14124128 SKS : 5 SKS

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
1.		MODUL 1 PENGANTAR FISIKA MODERN	Kegiatan Pembelajaran 1 Sejarah Fisika Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN TUGAS MODUL 1 Keg. Pembelajaran 1	
2.			Kegiatan Pembelajaran 2 Review Fisika Klasik Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN TUGAS MODUL 1 Keg. Pembelajaran 2	
3.		MODUL 2 TEORI RELATIVITAS	Kegiatan Pembelajaran 1 RELATIVITAS KHUSUS Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 2 Keg. Pembelajaran 1	
4.			Kegiatan Pembelajaran 2 GEJALA-GEJALA	PRESENTAS I MAHASISWA	

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
			RELATIVITAS KHUSUS PART 1 Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	TUGAS MODUL 1 Keg. Pembelajaran 2	
5.			Kegiatan Pembelajaran 3 GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 2 Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I MAHASISWA TUGAS MODUL 1 Keg. Pembelajaran 1	
6.			Kegiatan Pembelajaran 4 GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS PART 3 Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS	MS. teams
7.		MODUL 3 TEORI KUANTUM	Kegiatan Pembelajaran 1 EKSPERIMEN- EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 1) Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	Presentasi Mahasiswa	MS. teams

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
8.			Kegiatan Pembelajaran 2 EKSPERIMEN- EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 2) Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I MAHASISWA	MS. teams
9.			Kegiatan Pembelajaran 3 PRAKTIKUM EKSPERIMEN KUANTUM Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRAKTIKUM / SIMULASI	MS. Teams
10.			Kegiatan Pembelajaran 4 DUALISME GELOMBANG- PARTIKEL Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I MAHASISWA	
11.		MODUL 4 MEKANIKA GELOMBANG	Kegiatan Pembelajaran 1 PERSAMAAN SCHRODINGER DAN INTERPRETASI NYA	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS	

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
			Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.		
12.			Kegiatan Pembelajaran 2 INTERPRETASI FUNGSI GELOMBANG Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS	
13.		MODUL 5 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER	Kegiatan Pembelajaran 1 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 1) Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 3 Keg. Pembelajaran 1	
14.			Kegiatan Pembelajaran 2 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 2) Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 3 Keg. Pembelajaran 2	
15.		MODUL 1 – 5 UTS	Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	UJIAN TULIS / WAWANCARA	MS. teams
16.		MODUL 6	Kegiatan Pembelajaran 1	PRESENTAS I	MS. teams

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
		MODEL ATOM BERELEKTRO N TUNGGAL	PERKEMBANGAN MODEL ATOM Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	MAHASISWA TUGAS MODUL 6 Keg. Pembelajaran 1	
17.			Kegiatan Pembelajaran 2 Percobaan minyak milikan Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRAKTIKUM / SIMULASI TUGAS MODUL 6 Keg. Pembelajaran 2	MS. teams
18.			Kegiatan Pembelajaran 3 TINJAUAN KUANTUM ATOM HIDROGEN Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTASI DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 6 Keg. Pembelajaran 3	MS. teams
19.		MODUL 7 MODEL ATOM BERELEKTRO N JAMAK	Kegiatan Pembelajaran 1 BILANGAN KUANTUM Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTASI DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 7 Keg. Pembelajaran 1	MS. teams
20.			Kegiatan Pembelajaran 2 FISIKA ATOM	PRESENTASI DOSEN &	

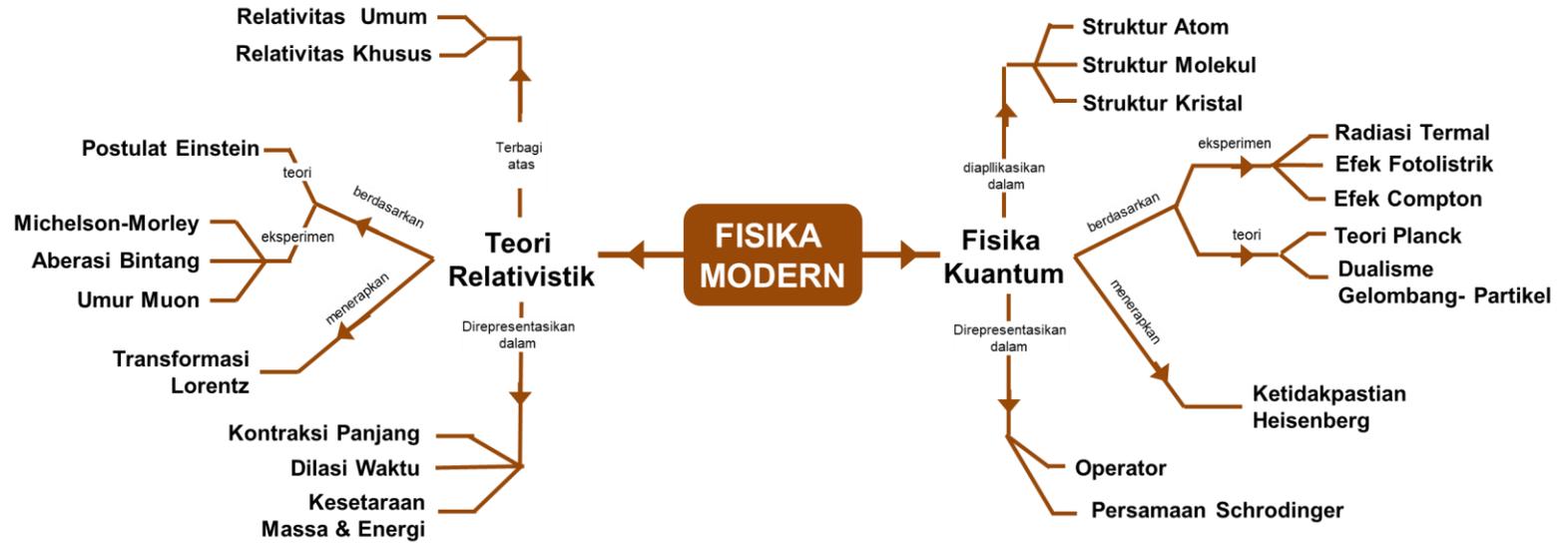
Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
			Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	STUDI KASUS TUGAS MODUL 7 Keg. Pembelajaran 2	
21.		MODUL 8 STRUKTUR MOLEKUL	Kegiatan Pembelajaran 1 IKATAN MOLEKUL Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 8 Keg. Pembelajaran 1	
22.			Kegiatan Pembelajaran 2 SPEKTRUM MOLEKULAR Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 8 Keg. Pembelajaran 1	
23.		MODUL 9 MODEL INTI ATOM	Kegiatan Pembelajaran 1 MODEL INTI ATOM DAN GAYA NUKLIR Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTAS I DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 9 Keg. Pembelajaran 1	

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
24.			Kegiatan Pembelajaran 2 KESTABILAN INTI Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTASI DOSEN & STUDI KASUS TUGAS MODUL 9 Keg. Pembelajaran 2	MS. teams
25.		MODUL 10 RADIOAKTIVITAS	Kegiatan Pembelajaran 1 RADIOAKTIVITAS DAN JENIS JENIS RADIASI NUKLIR Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTASI MAHASISWA TUGAS MODUL 10 Keg. Pembelajaran 1	MS. teams
26.			Kegiatan Pembelajaran 2 SIMULASI PELURUHAN Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRAKTIKUM / SIMULASI TUGAS MODUL 10 Keg. Pembelajaran 2	MS. teams
27.			Kegiatan Pembelajaran 3 REAKSI NUKLIR Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTASI MAHASISWA TUGAS MODUL 10	MS. teams

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
				Keg. Pembelajaran 3	
28.			Kegiatan Pembelajaran 4 SIMULASI REAKSI FISI DAN REAKSI FUSI Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRAKTIKUM / SIMULASI TUGAS MODUL 10 Keg. Pembelajaran 4	
29.		MODUL 11 PARTIKEL ELEMENTER	PARTIKEL ELEMENTER Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTASI MAHASISWA TUGAS MODUL 11 Keg. Pembelajaran 1	
30.			DETECTOR DAN AKSELARATOR Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	PRESENTASI MAHASISWA TUGAS MODUL 11 Keg. Pembelajaran 2	
31.			KUNJUNGAN ILMIAH KE BATAN /	KUNJUNGAN ILMIAH KE BATAN / DESAIN	

Pertemuan Ke	Hari, Tgl & Jam Perkuliahan	Modul ke / Judul	Materi / Pengajar	Metode / Kelompok/ TUGAS*	Ruang Kuliah / Aplikasi
			DESAIN ALAT PERAGA Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	ALAT PERAGA TUGAS MODUL 11 Keg. Pembelajaran 3	
32.		MODUL 6 – 11 UAS	Nama Dosen : Ngia Masta, S.Pd., M.Si.	UJIAN TULIS / WAWANCARA	

PETA KONSEP FISIKA MODERN



MODUL 1

PENGANTAR FISIKA MODERN

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang dan selamat bergabung dalam mata kuliah yang menggoncangkan dunia, yaitu fisika modern. Fisika modern adalah salah satu cabang ilmu fisika yang mendasari perkembangan teknologi informasi, nuklir, nanoteknologi. Fisika modern ini didasari oleh teori relativitas dan kuantum. Modul pertama ini terbagi dalam dua kegiatan pembelajaran, yaitu 1) Sejarah Fisika dan 2) Review Fisika Klasik. Pada kegiatan pembelajaran pertama kita akan mempelajari fisika awal, fisika klasik, dan fisika modern yang akan dibagi kedalam 8 (delapan) tahap. Mulai dari teori geosentris Aristoteles sampai aplikasi teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck. Modul ini akan menjelaskan deskripsi setiap periode, misalnya siapa saja ilmuwan yang berkontribusi, apa eksperimen atau teori yang dihasilkan, bagaimana kelahirannya / kemunculannya, hingga digeser oleh gagasan atau teori berikutnya. Walaupun fisika modern paling mutakhir, ternyata fisika klasik juga tidak sepenuhnya keliru *loh*. Masih ada konsep, hukum, dan persamaan yang masih berlaku hingga saat ini. Nah, review fisika klasik ini ada di kegiatan pembelajaran kedua. Kalau dilihat secara umum, sebenarnya modul 1 ini adalah rangkuman seluruh modul. Lumayan, *kan* untuk membantu pemahaman awal belajar. Jadi, mari kita mempelajari modul ini dengan antusias!

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).

- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).
 - 3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).
 - 4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).
- c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)
- 1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)
 - 2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)
- d. Unsur Pengetahuan (PG)
- 1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)
 - 2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)
 - 3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)
 - 4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	<ol style="list-style-type: none"> a) Mahasiswa mampu menjelaskan proses lahirnya fisika modern. b) Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep fisika klasik yang masih berlaku pada fisika modern.
Sikap	<ol style="list-style-type: none"> a) Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b) Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c) Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu membuat menjelaskan sejarah fisika.

3. Prasyarat Kompetensi

- a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.
- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

3. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang pembelajaran fisika khususnya pada materi Fisika Modern yang diajarkan di kelas XII SMA. Isi dari modul pengantar fisika modern yang berupa uraian sejarah fisika dapat dijadikan sebagai apersepsi atau motivasi sebelum masuk ke dalam fase inti dari pembelajaran. Apersepsi pembelajaran fisika modern dapat dilakukan dengan menjelaskan sejarah fisika mulai dari fisika pada zaman Yunani kuno, sejarah fisika klasik, dan kelahiran fisika modern. Modul pengantar fisika modern ini juga bermanfaat bagi mahasiswa untuk mempelajari modul berikutnya.

4. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
a. Sejarah Fisika	<ol style="list-style-type: none">1) <i>Physica</i> (fisik) pada peradaban Yunani Kuno dan Islam2) <i>Physica</i> pada abad Pertengahan3) <i>Physica</i> pada awal abad modern4) Transformasi <i>Physica</i> menjadi <i>Physics</i> (fisika)5) Fisika Klasik6) Revolusi Teori Relativitas dan Fisika Kuantum7) Fisika pada tahun 1930 an8) Fisika setelah perang dunia kedua
b. Review Fisika Klasik	<ol style="list-style-type: none">4) Mekanika klasik yang masih berlaku pada fisika modern.5) Termodinamika yang masih berlaku pada fisika modern.6) Elektromagnetisme yang masih berlaku pada fisika modern.

Kegiatan Pembelajaran 1 SEJARAH FISIKA

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan proses lahirnya fisika modern	<ul style="list-style-type: none">a) Mahasiswa mampu menjelaskan perkembangan ilmu fisika dalam 8 (delapan) periode menurut Arabatzis (C2)b) Mahasiswa mampu menjelaskan kelemahan fisika klasik (C2).c) Mahasiswa mampu menjelaskan eksperimen-eksperimen dan teori-teori yang mendasari kelahiran fisika modern (C2).d) Mahasiswa mampu menelaah ciri khas dari fisika klasik dan fisika modern (C4)

Uraian Materi

Fisika sebagai salah satu cabang ilmu pengetahuan mengalami perubahan (evolusi) yang dapat dibagi menjadi 3 (tiga) bagian, yaitu fisika lama, fisika klasik dan fisika modern. Sesuai kronologinya, evolusi ilmu fisika dijelaskan dalam 8 (delapan) tahapan yang digambarkan pada Gambar 1.1 yang ditandai dengan terjadinya perubahan istilah *physica* menjadi *physics* (Arabatzis, 2018).

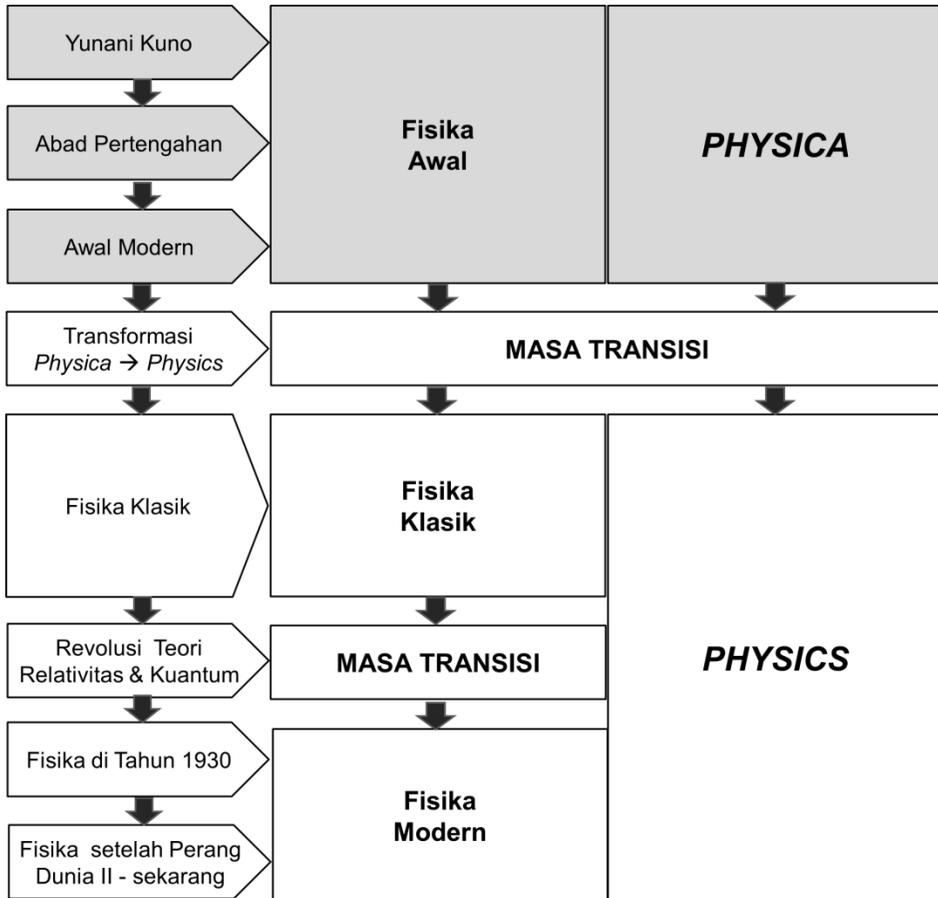
A. Fisika Awal

Fisika awal adalah fisika yang berkembang mulai dari zaman Yunani kuno hingga abad pertengahan (1500 M). Fisika awal sangat dekat dengan istilah *nature* yang didasari oleh intuisi, filosofi dan bukan berdasar pada eksperimen yang sistematis. Fisika awal berkembang pada masa di mana para ilmuwan menggunakan istilah *physica*. Istilah *physica* diambil dari kata “*physis*” yang artinya *nature* atau dalam bahasa Indonesia artinya keadaan alamiah. Fisika awal berlangsung pada:

1. Zaman Yunani Kuno

Sejarah sains modern selalu dikaitkan dengan sejarah peradaban Yunani kuno. Mereka menjelaskan fenomena yang dilihat sehari-hari menggunakan metode sederhana, belum sistematis, jauh dari ketelitian dan menggunakan pendekatan intuisi.

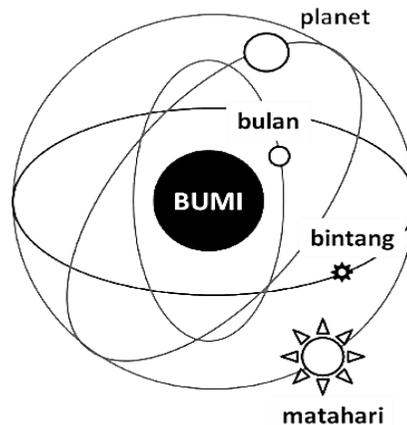
Gambar 1. 1 Evolusi Fisika



Namun mereka telah mengembangkan pengetahuan tanpa menghubungkannya dengan mitos, kepercayaan nenek moyang, atau kekuatan gaib. Bangsa Yunani kuno adalah bangsa yang pertama kali merumuskan tatanan alam semesta dengan menggunakan teori geosentris. Istilah geosentris secara harafiah diambil dari dua kata, yaitu bumi ($\gamma\epsilon\omega$: geo) dan pusat ($\kappa\epsilon\nu\tau\rho\iota\kappa\omicron$: sentris), sehingga jika digabung artinya menjadi “berpusat pada bumi”.

Teori geosentris disebut pertama kali oleh Pythagoras (Diolatzis & Pavlogeorgatos, 2019) untuk menjelaskan bahwa bumi berperan sebagai pusat tata surya yang dikelilingi oleh semua benda langit (Gambar 1.2). Teori ini bahkan dianggap sebagai bagian dari kepercayaan oleh para Pythagorean (sebutan bagi pengikut ajaran Pythagoras). Para Pythagorean menyebarkan teori ini secara terus menerus, sehingga teori geosentris memiliki pengaruh yang sangat kuat, terutama di era Aristoteles (384-322 SM).

Gambar 1. 2 Ilustrasi Teori Geosentris



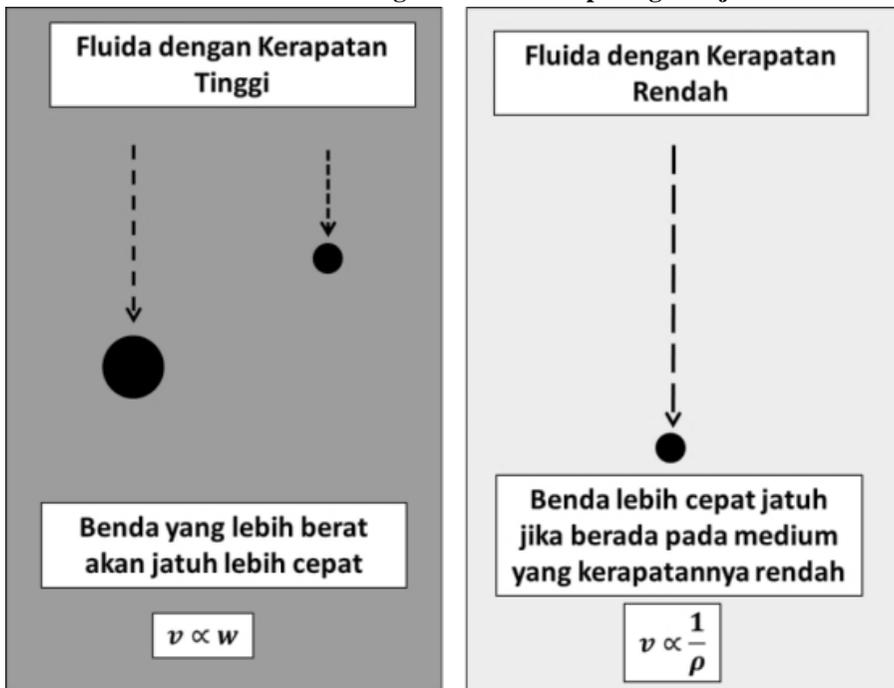
a. Fisika Aristotelian

Aristoteles adalah seorang filsuf di masa Yunani kuno yang mampu memformulasikan gagasan-gagasan bgsi dasar perkembangan ilmu pengetahuan. Gagasannya yang terkenal adalah “*nature*” yang berisi tentang prinsip “kedudukan alamiah” semua materi di alam. Prinsip ini kemudian disebut “ $\Phi\Upsilon\text{Σ}\text{Κ}\text{Η}\text{Σ}$ ” (baca: *physica*), yang selanjutnya lebih dikenal sebagai fisika Aristotelian. Inilah kali pertama bidang ilmu fisika dikenal oleh peradaban manusia. Dua gagasan yang paling terkenal dari *physica* adalah hukum gerak Aristoteles dan teori geosentris, berikut penjelasannya

1) Hukum Gerak Aristoteles

Nature adalah penyebab benda bergerak atau diam (Tipler, Paul A.; Llewellyn, 2012). Salah satu contoh fenomena *nature* adalah gerak jatuh bebas. Jika benda dilepas dari ketinggian tertentu, maka benda itu akan menuju kedudukan alamiahnya yaitu di permukaan bumi. Aristoteles mengamati bahwa saat benda jatuh bebas, ternyata semakin berat suatu benda maka kelajuan jatuhnya akan semakin besar. Jika benda dijatuhkan pada medium yang kerapatannya besar, misalnya minyak, maka kelajuan jatuh benda akan lebih kecil jika dibandingkan dengan jatuh di udara. Dari observasi tersebut, Aristoteles merumuskan hukum gerak, yaitu: kelajuan benda saat jatuh akan sebanding dengan beratnya dan berbanding terbalik dengan kerapatan fluida media jatuh (Gambar 1.3).

Gambar 1. 3 Ilustrasi hukum gerak aristoteles pada gerak jatuh bebas

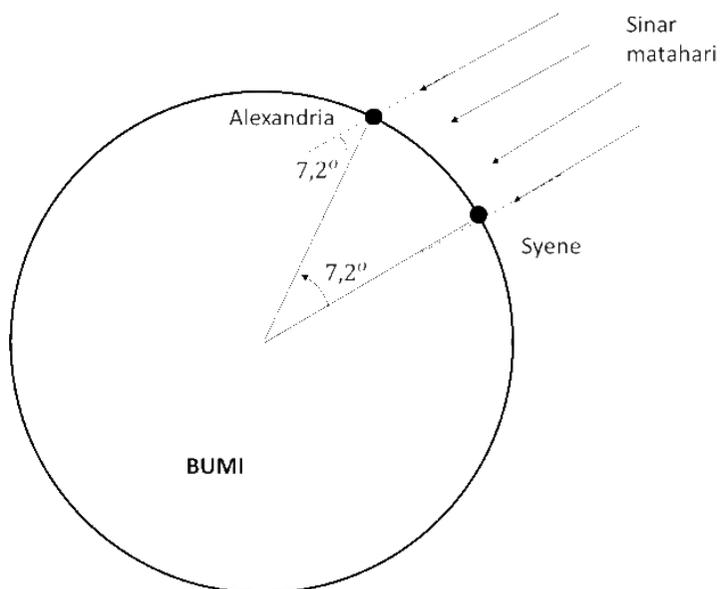


2) Teori Geosentris

Fisika Aristoteles juga banyak berkontribusi pada perkembangan teori geosentris, dengan meletakkan dua hal dasar yaitu: (1) Bumi adalah pusat dari alam semesta; (2) Bumi haruslah bulat sempurna dengan benda – benda langit (termasuk matahari) bergerak mengitari bumi dalam lintasan berbentuk lingkaran sempurna. Aristoteles adalah seorang guru yang aktif mengajar murid-muridnya (para Aristotelian), untuk menggali gagasan-gagasan melalui logika berfikir. Pencapaian para Aristotelian juga terlihat pada sejumlah perumusan matematis yang konsepnya dapat berlaku hingga saat ini.

Salah satu konsep yang masih dapat diterima hingga saat ini adalah konsep yang digunakan dalam formulasi keliling Bumi oleh Eratosthenes (276-194 SM). Eratosthenes berhasil memprediksi keliling Bumi dengan cara menghubungkan perbandingan sudut dan jarak yang dapat dilihat pada Gambar 1.4 (Oh, 2017). Eratosthenes mengukur besar sudut bayangan tongkat yang dibentuk matahari tepat tengah hari di kota Aleksandria adalah sebesar $7,2^{\circ}$. Sementara tepat di tengah hari juga di kota Syene, tidak ditemukan bayangan pada tongkat (0°). Adapun jarak dari kota Aleksandria ke Syene adalah 5000 Stadia ($1 \text{ stadia} = \frac{1}{6} \text{ km}$).

Gambar 1. 4 Sketsa perhitungan keliling bumi menurut Erasthotenes



Perhitungan keliling Bumi oleh Eratosthenes memperkirakan besar keliling bumi mendekati 41.667 km. Hasil perhitungan keliling Bumi kemudian baru dapat dikonfirmasi sebesar 40.300 km, setelah penemuan satelit ruang angkasa di abad 20. Meskipun hasil ini tidak begitu tepat, namun perhitungan Eratosthenes menunjukkan kemampuan berfikir yang sangat brilian dalam menghasilkan pengetahuan di masa itu.

$$\frac{7,2^{\circ}}{360^{\circ}} = \frac{\text{Jarak Aleksandria – Syene}}{\text{keliling Bumi}}$$

$$\frac{1^{\circ}}{50^{\circ}} = \frac{5000 \text{ stadia}}{\text{keliling Bumi}}$$

$$\text{Keliling Bumi} = 250.000 \text{ stadia} \approx 41.666,67 \text{ km}$$

Aristoteles juga merumuskan bahwa matahari mengitari bumi dengan kecepatan yang sama besar. Namun para pemikir di zaman Yunani kuno saat itu telah mengamati bahwa waktu yang diperlukan dari satu musim semi ke musim berikutnya tidak sama. Kecepatan matahari dalam mengitari bumi juga tidak selalu sama besar. Untuk melengkapi gagasan ini, Hipparkhos (190 SM – 120 SM) kemudian merumuskan teorinya tentang lintasan matahari dan planet-planet saat mengitari Bumi. Hipparkhos menjelaskan bahwa benar adanya matahari memiliki lintasan berupa lingkaran sempurna, namun bumi tidak berada di pusat lingkaran tersebut. Bumi memiliki posisi sebesar nilai eksentrisitas (e) terhadap

pusat lingkaran, dengan eksentrisitas (e) adalah jarak dari bumi terhadap pusat lingkaran.

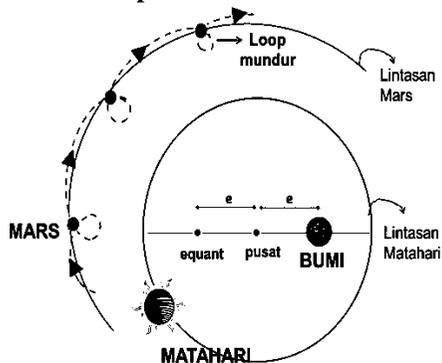
b. Teori Heliosentris pada Zaman Yunani Kuno

Teori heliosentris adalah kebalikan dari teori geosentris, dimana matahari sebagai pusat tata surya dikelilingi oleh planet-planet, termasuk Bumi. Filsuf zaman Yunani Kuno yang terkenal karena mengemukakan teori heliosentris adalah Aristarkus (310 – 230 SM). Aristarkus menjelaskan kedudukan matahari dan bintang adalah tetap, namun bumi berevolusi terhadap matahari dengan lintasan melingkar. Namun penjelasan ini tidak mendapat banyak dukungan dari kalangan masyarakat saat itu.

c. Zaman Romawi

Fisika Aristoteles juga tidak mampuan menjelaskan kejanggalan lintasan planet mars yang muncul setiap 10 minggu. Planet mars tampak berhenti, mundur sedikit, baru kemudian maju kembali. Setelah sekitar 400-an tahun setelah era Aristoteles, seorang Aristotelian bernama Claudius Ptolemy (90-168 M), memberikan koreksi dalam pergerakan planet-planet, sehingga teori geosentris tampak lebih akurat.

Gambar 1. 5 Model lintasan planet mars dan matahari menurut ptolemy



Ptolemy memodelkan lintasan planet Mars terhadap bumi dengan dalam bentuk episiklik (Gambar 1.5). Lintasan episiklik menyebabkan planet bergerak mundur setiap periode tertentu. Dalam model tersebut, matahari mengitari Bumi dengan lintasan berbentuk lingkaran yang lebih kecil daripada lintasan Mars. Koreksi Ptolemy kembali memperkuat teori geosentris. Teori ini bahkan mampu bertahan hingga abad pertengahan (500-1500M) di benua Eropa.

2. Abad Pertengahan

Abad pertengahan (500-1500M) disebut sebagai era kegelapan, karena pada masa ini benua Eropa mengalami kemunduran perkembangan ilmu pengetahuan. Kala itu, kejayaan pemerintahan romawi baru saja runtuh sehingga Eropa terpecah dalam kerajaan-kerajaan yang lebih kecil. Kondisi setelah perang menyebabkan banyak masyarakat kehilangan pekerjaan. Sebagian masyarakat hidup bertani di desa, akibatnya sangat sedikit masyarakat yang menempuh pendidikan. Kondisi ini mengakibatkan minimnya ilmuwan, guru, seniman, dan para pemikir. Di masa ini gereja mendominasi aspek kehidupan, mulai dari ekonomi, politik, pendidikan dan kesehatan. Ilmu pengetahuan menyatu dengan dogma gereja. Sikap kritis terhadap sebuah pengajaran ilmu pengetahuan akan dianggap sebagai tindakan bidat atau sesat.

3. *Physica* Modern Awal

Perkembangan ilmu fisika kembali bergeliat di akhir abad ke 15 setelah Nicolaus Copernicus memformulasikan teori heliosentris pada tahun 1543, melalui bukunya yang berjudul "*On the revolutions of celestial sphere*". Copernicus menjelaskan gerak mundur planet disebabkan kelajuan orbit Bumi terhadap matahari lebih cepat dari planet tertentu dan lebih lambat dari kelajuan orbit planet lainnya. Copernicus berhasil membuktikan bahwa perhitungan fisika Aristotelian yang rumit dalam menggambarkan gerak planet-planet dapat disederhanakan, jika mengasumsikan bahwa planet-planet tersebut bergerak mengitari matahari. Pernyataan ini tentu menimbulkan pertentangan, khususnya kalangan gereja, namun itu adalah awal lahirnya fisika klasik.

Kontroversi dengan fisika lama kembali memanas oleh Galileo Galilei (1564-1642 M). Galileo meletakkan pandangan bahwa perkembangan sains (termasuk fisika) harus melalui pengamatan dan percobaan yang saintifik. Berdasarkan hasil eksperimen, Galileo Galilei menyatakan teori geosentris dan hukum gerak Aristoteles adalah keliru. Galileo melakukan percobaan gerak jatuh bebas menggunakan tabung vakum. Dari pengamatannya ia memperoleh bahwa gerak jatuh bebas sebuah benda tidak dipengaruhi oleh berat dan kerapatan medium. Baik benda berat ataupun ringan akan jatuh pada saat yang bersamaan.

B. Transisi Fisika Lama ke Fisika Klasik

Masa transisi dari fisika lama menjadi fisika klasik terjadi saat akan memasuki abad 18. Masa ini terjadi setelah Isaac Newton (1642-1726) memformulasikan hukum-hukum geraknya berdasarkan eksperimen Galileo

Galilei. Hukum – hukum Newton menandai pentingnya melakukan kuantisasi pada *physica*. Kuantisasi artinya kegiatan mengukur gejala alam dengan metode yang valid. Melalui kegiatan kuantisasi ini, istilah *physica* bertransformasi menjadi *physics* dan menandai kelahiran fisika klasik.

Pada masa ini, pertemuan-pertemuan ilmiah seringkali digelar untuk membahas perkembangan sains dan teknologi. Namun, topik yang dibahas masih terbatas pada hal-hal yang sifatnya makroskopik, dapat diukur melalui penginderaan langsung, eksak, dan memiliki batasan yang jelas. Ada banyak penemuan baru saat itu, misalnya listrik, alat komunikasi, mesin industri dan transportasi. Penemuan tabyng Leyden tahun 1745 membuat listrik menjadi topik yang paling menonjol. Topik yang lebih abstrak, seperti elektromagnetisme dan model atom adalah komponen yang tidak terbayangkan dan tidak ikut diperhitungkan.

Tugas

1. Jelaskan penyebab gerak mundur yang diobservasi pada Planet Mars setiap 10 minggu, berdasarkan konsep saintifik yang berlaku saat ini!

Sebagai salah satu penuntun, kamu dapat membaca artikel dengan menge-*scan* kode QR disamping atau klik tautan berikut <http://bit.ly/gerakmars>



Jawab:

2. Mengapa *physica* harus bertransformasi menjadi *physics*? Jelaskan!

Jawab:

- 3 Sebutkan minimal 5 (lima) penemuan fisika awal yang masih berlaku hingga saat ini! Jelaskan masing-masing deskripsi dari penemuan tersebut!
Jawab:

C. Era Fisika Klasik

Era fisika klasik terjadi sekitar tahun 1800 – 1890. Dalam kurun waktu ini, eksperimentasi berkembang pesat (tabel 1) dan banyak menggugurkan teori-teori dalam fisika lama. Dinamika Lagrangian dan Hamiltonian adalah bentuk lain dari mekanika klasik namun dalam bentuk matematika dan filosofi yang sedikit berbeda. Saking pesat perkembangannya, para fisikawan saat itu bahkan memprediksi konsep-konsep fisika telah selesai ditemukan. Mereka hanya perlu meningkatkan keakuratan alat ukur dan metode pengukuran. Pernyataan ini kemudian kembali dipertanyakan setelah munculnya teori Max Planck (1900) tentang kuantisasi radiasi elektromagnetik dan teori relativitas khusus Albert Einstein (1905).

D. Transisi Fisika Klasik ke Fisika Modern

Transisi fisika klasik ke fisika modern berlangsung sekitar akhir abad 19 dan awal abad 20. Lord Kelvin di tahun 1900 melalui pidatonya yang berjudul “Dua Awan di Cakrawala” mengkritik perkembangan fisika klasik (Thornton & Rex, 2013). Kritikan ini diberikan pada kalangan ilmuwan yang tidak mau berdiskusi tentang teori kuantisasi energi radiasi dan relativistik. Oleh sebab itu

masa transisi fisika klasik ke fisika modern disebut juga revolusi teori kuantum dan relativistik.

Revolusi teori kuantum dan relativistik dilahirkan dari percobaan-percobaan yang tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik (Tabel 2). Percobaan ini menghasilkan fenomena yang bersifat mikroskopik, abstrak, dan memerlukan ketelitian tinggi. Percobaan-percobaan ini berhasil mengobservasi fenomena yang menjadi kelemahan fisika klasik, 3 (tiga) diantaranya yaitu:

Tabel 1 Beberapa Penemuan Fisika Klasik

Bidang	Tahun	Ilmuan	Penemuan
Termodinamika	1824	Nicolas Sadi Carnot	Mesin carnot
	1834	Boyle, Charles, Gay-Lussac	Persamaan gas ideal
	1840	James Joule, Benjamin Thompson	Gagasan ekuivalensi mekanik dan panas, teori kinetik gas
	1847	Herman Helmholtz	Hukum konservasi energi
	1850	Rudolf Clausius	Hukum I dan II Termodinamika, konsep entropi
	1851	Lord Kelvin	Skala mutlak temperatur, Hukum II Termodinamika
	1868	James Maxwell , Ludwig Boltzmann	Distribusi maxwell-boltzmann
Elektromagnetisme	1916	Walter Nernst	Hukum iii termodinamika
	1785	Charles Coulomb	Hukum coulomb
	1820	Hans Christian Oersted	Medan magnet induksi
	1825	Andre Ampere	Hukum ampere
	1831	Michael Faraday	Motor listrik, Hukum Faraday
	1838	Joseph Henry	Induktansi diri
	1862	James Clerk Maxwell	Hukum Maxwell tentang elektromagnet
	1883	Thomas Alfa edison	Listrik arus searah
	1887	Heinrich Hertz	Radiasi elektromagnetik dan efek fotolistrik
Gelombang elektromagnetik	1888	Nikola Tesla	Motor induksi arus bolak balik
	1817	Thomas Young	Eksperimen celah ganda
	1823	Agustin Fresnel	Sifat gelombang pada berkas sinar
	1860	James Clerk Maxwell	Laju gelombang elektromagnetik di ruang hampa.
Teori atom	1887	Heinrich Hertz	Gelombang radio
	1799	Proust	Hukum kesebandingan massa dan elemen
	1803	John Dalton	Atom adalah bagian terkecil dari suatu materi
	1811	Avogadro	Molekul sebagai kombinasi atom-atom
	1827	Robert Brown	Gerak acak pada molekul.
	1860	Cannizaro	Hubungan bilangan Avogadro dengan massa atomik.
	1865	Perrin	Bilangan avogardo

Tabel 2 Percobaan/ fenomena/ simulasi yang Gagal Dijelaskan oleh Fisika Klasik

Tahun	Percobaan / Fenomena	Ilmuwan
1833	Sinar Katoda	Michael Faraday
1885	Spektroskopi Atom hidrogen	Johann Balmer
1887	Mendeteksi Ether menggunakan inferometer	Michelson Morley
1895	Sinar X	Wilhelm Rontgen
1896	Radioaktivitas dari garam uranium	Henri Becquerel
1896	Sinar katoda bermuatan negatif	Perrin
1896	Efek Zeeman	Pieter Zeeman
1897	Rasio e/m elektron dari sinar katoda	J. J. Thomson
1900	UV <i>Cathasthrope</i>	Rayleigh-Jeans

1. Radiasi Benda Hitam

Benda hitam adalah salah satu topik yang belum dapat dijelaskan dengan baik saat itu. Untuk mempermudah pemahaman, benda hitam dijelaskan seperti lubang kecil pada sebuah kotak. Jika dilihat dari luar, lubang tersebut berwarna hitam karena lubang itu menyerap seluruh spektrum radiasi yang mengenainya. Selain menyerap radiasi, benda hitam juga dapat mengemisikan radiasi dan besar emisinya dinyatakan dalam besaran daya (P). Pada pengukuran yang memiliki ketepatan tinggi menunjukkan bahwa daya radiasi benda hitam hanya bergantung pada temperatur dan bukan pada jenis bahan. Para ilmuwan juga telah berhasil mengobservasi spektrum emisi pada frekuensi rendah dan frekuensi tinggi, namun tidak ada satu pun persamaan termodinamika pada fisika klasik yang sesuai dengan seluruh spektrum radiasi.

2. Mendeteksi keberadaan “Ether”

Fisika klasik saat itu telah membuktikan bahwa semua gelombang mekanik merambat melalui medium, misalnya gelombang air merambat melalui air, gelombang suara merambat melalui medium apapun. Para ilmuwan saat itu juga mempercayai bahwa gelombang elektromagnetik juga memerlukan medium untuk merambat yang disebut *ether*. Namun percobaan Michelson-Morley gagal membuktikan keberadaan *ether*.

3. Elektrodinamika

Kesulitan berikutnya ditemukan pada teori gelombang elektromagnetik Maxwell. Saat medan listrik dan medan magnet diamati

oleh dua kerangka yang berbeda, satu kerangka diam dan kerangka lainnya bergerak. Apa yang tampak sebagai medan listrik oleh sebuah kerangka acuan diam dapat menjadi medan magnet oleh kerangka yang bergerak terhadap kerangka acuan diam.

Walaupun hubungan listrik dan magnet dapat dipahami oleh hukum elektrodinamika Maxwell, namun persamaan-persamaannya tidak sama jika menggunakan transformasi galileo. Hendrik Lorentz (1853-1928) kemudian mengajukan tentang kontraksi ruang disepanjang arah gerak benda. Ide ini diperkuat oleh George FritzGerald pada tahun 1892, yang menjadi cikal bakal teori relativitas einstein pada tahun 1905.

Kelahiran fisika modern

Fisika modern lahir pada tahun 1900 setelah penemuan teori kuantisasi energi radiasi benda hitam oleh Max Planck. Teori ini kemudian disusul oleh Elbert Einstein yang mengembangkan teori relativistas khusus pada tahun 1905 Teori relativitas khusus didasarkan pada perbandingan pengukuran dari kerangka acuan yang bergerak dengan kecepata konstan dan dengan kerangka acuan diam. Sementara teori relativitas umum mulai dikembangkan oleh Einstein pada tahun 1916 dengan memperhatikan kerangka acuan yang bergerak dengan percepatan dan gravitasi.

Teori kuantum lebih sulit diterima dari pada teori relativitas. Teori ini baru dapat diterima setelah Eisntein menjelaskan tentang efek fotolistrik pada tahun 1905. Einstein menjelaskan energi radiasi dari sebuah berkas sinar sebagai paket-paket energi. Teori kuantum juga digunakan dalam model atom. Niels Bohr menggunakan teori kuantum untuk mengoreksi model atom Ernest Rutherford. Arnold Sommerfeld mendeskripsikan sub kulit pada atom. Wolfgang Pauli melalui larangan Pauli, menjelaskan bahwa setiap elektron memiliki kedudukannya amasing-masing.

Pada masa transisi ini teori kuantum terbagi dua, yaitu mekanika matriks (oleh Heisenberg, Max Born, dan Pascual Jordan) dan mekanika gelombang (oleh De Broglie dan Erwin Schrodinger). Perdebatan keduanya menemui solusi pada tahun 1927 yang menjadi prinsip umum fisika modern, yaitu komplementer (diajukan oleh Bohr) dan tidak pasti (diajukan oleh Heisenberg).

Tugas

4. Uraikanlah minimal 5 perbedaan fisika klasik dan fisika modern

Jawab:

5. Jelaskan minimal 4 (empat) kelemahan dari fisika klasik!

Jawab:

6. Jelaskan minimal 4 eksperimen yang tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik, sehingga mendasari lahirnya fisika modern.

Jawab:

7. Jelaskan 2 teori yang mendasari lahirnya fisika modern.

Jawab:

E. Era Fisika Modern

1. Fisika pada tahun 1930

Fisika modern pada awal perang dunia kedua, berkembang pesat di Amerika, Jepang, dan Uni Soviet. Perkembangannya sebagian besar pada senjata dan teknologi nuklir untuk memenuhi keperluan perang, pemerintahan, dan politik. Beberapa penemuan dimasa itu, diantaranya: 1) Penemuan positron oleh Anderson; 2) Mekanika kuantum relativistik oleh Dirac; dan 3) Penemuan meson oleh Hideki Yukawa pada tahun 1935. Ketiga penemuan memperkenalkan gaya nuklir kuat dan percobaan nuklir pada tahun 1937. James Chadwick juga menemukan neutron pada tahun 1932. Otto Hahn, Fritz Strassmann, Lisa Meitner, dan Otto Frisch mengembangkan reaksi fisi nuklir.

Pada masa ini juga dimulai era penjelajahan ruang angkasa. Einstein mendeskripsikan alam semesta yang bersifat statis sebagai bentuk *update* dari teori kosmos Aristoteles. Edwin Hubble membangun perangkat untuk mengamati galaksi. Lemaitre Georges juga merumuskan postulat yang digunakan untuk menjelajahi alam semesta.

2. Fisika setelah perang dunia kedua hingga saat ini.

Setelah perang dunia ke-II berakhir, fisikawan asal Amerika dan Eropa saling bekerja sama membentuk *Big Physics*. Pada era ini teori mikroskopi dari superkonduktor, transistor dan ruang gelembung berkembang dengan pesat. Institusi-institusi ilmiah sebagai pemantau aktifitas radioaktif juga banyak yang baru didirikan, misalnya Komisi Energi Atomik dan CERN. Pelacakan partikel-partikel sub atomik, pengklasifikasian partikel, pengembangan model-model standar, dan pendeteksian partikel menjadi

fokus studi yang terus dikembangkan. Bahkan pada tahun 2012 CERN menemukan keberadaan partikel Higgs.

Tugas

8. Berikan minimal 5 contoh alat yang menerapkan teori kuantum! Jelaskan prinsip kerja dan kegunaannya! (SKOR : 25)

Jawab:

9. Berikan minimal 5 contoh alat yang menerapkan teori relativitas! Jelaskan prinsip kerja dan kegunaannya! (SKOR :25)

Jawab:

10. Apa yang dimaksud dengan partikel Higgs ? Jelaskan ! (SKOR : 25)

Jawab:

11. Sebutkan minimal 4 ciri yang mendeskripsikan Fisika Modern! (SKOR :25)

Jawab:

Rangkuman

1. Sejarah fisika menurut Arabatzis terbagi menjadi 8 (delapan) tahapan, yaitu: 1) Yunani kuno; 2) Abad pertengahan; 3) Awal modern; 4) Transformasi *physica* menjadi *physics*; 5) Fisika Klasik; 6) Revolusi teori relativitas dan kuantum; 7) Fisika di tahun 1930; dan 8) Fisika setelah perang dunia kedua hingga sekarang.
2. Fase evolusi fisika dibagi menjadi 5 (lima) yaitu: 1) fisika awal; 2) transisi fisika zaman kuno menjadi fisika klasik; 3) fisika klasik; 4) transisi fisika klasik menjadi fisika modern, dan 5) fisika modern.
3. Fisika awal adalah fisika yang berkembang mulai dari zaman Yunani kuno hingga abad pertengahan, yang didasari oleh intuisi, filosofi dan eksperimen yang belum sistematis.
 - a. Fisika awal banyak dipengaruhi oleh pemikiran Aristoteles, sehingga disebut juga sebagai Fisika Aristotelian.
 - b. Teori geosentris adalah teori yang mendeskripsikan bumi sebagai pusat tata surya. Teori geosentris ini dianut oleh sebagian besar ilmuwan fisika masa awal, diantaranya Pythagoras, Aristoteles, Erathostenes, Hipparkhos, dan Ptolemy.
 - c. Hukum gerak Aristoteles menyatakan bahwa kecepatan jatuh sebuah benda sebanding dengan beratnya dan berbanding terbalik dengan kerapatan mediumnya.
 - d. Teori heliosentris sebenarnya telah ada pada zaman Yunani kuno, melalui Aristarkhus. Namun teori heliosentris saat itu dipandang sepi.

- e. Abad pertengahan disebut juga sebagai abad kegelapan, karena terjadi kemunduran dalam perkembangan ilmu pengetahuan.
 - f. *Physica* baru memasuki awal modern ketika Copernicus mengajukan teori Heliosentris pada tahun 1543.
4. Masa transisi fisika lama ke fisika klasik.
- a. Teori heliosentris kemudian diperkuat oleh Galileo Galilei.
 - b. Menurut Galileo, gerak jatuh bebas tidak dipengaruhi oleh berat dan kerapatan medium, melainkan gravitasi.
 - c. Masa transisi fisika lama ke fisika klasik terjadi saat Newton berhasil memformulasikan hukum-hukum gerak.
 - d. Newton mendasarkan perkembangan ilmu fisika pada eksperimen yang lebih sistematis.
 - e. Pada masa transisi ini terjadi pergeseran istilah *physica* menjadi *physics*.
5. Fisika klasik
- a. Fisika klasik adalah fisika yang didasari oleh prinsip-prinsip yang dikembangkan sebelum kemunculan teori kuantum dan teori relativitas.
 - b. Fisika klasik berkembang pesat pada bidang kelistrikan, termodinamika, elektrodinamika, mekanika, dan bahkan hingga teori atom.
 - c. Kajian fisika klasik terbatas pada topik-topik yang dapat diamati secara langsung menggunakan panca indera, dinyatakan dengan tepat dan pasti.
 - d. Bidang yang elektrodinamika dan model atom dianggap sebagai hal yang tidak dapat diamati.
6. Masa transisi fisika klasik menjadi fisika modern
- Masa transisi fisika klasik menjadi fisika modern terjadi karena adanya percobaan – percobaan dan fenomena yang tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik, diantaranya:
- a. Radiasi benda hitam

- 1) Benda hitam mengemisikan energinya dalam bentuk spektrum. Spektrum radiasi benda hitam ternyata hanya dipengaruhi oleh temperatur dan bukan bahan penyusun material.
 - 2) Terjadinya fenomena UV *cathasthrope* yang menunjukkan kegagalan teori ekipartisi pada frekuensi tinggi.
- b. Kegagalan eksperimen Michelson-Morley
Menunjukkan ketiadaan *ether* sebagai medium rambat gelombang elektromagnetik.
- c. Elektrodinamika
- 1) Transformasi Galileo tidak dapat memformulasikan elektromagnet dari pengamat pada kerangka acuan diam dan pengamat yang bergerak dengan kecepatan konstan.
 - 2) Formulasi gelombang elektromagnetik baru sesuai jika menggunakan transformasi Lorentz.
7. Fisika modern
- a. Kelahiran Fisika modern ditandai dengan munculnya teori kuantisasi Planck dan teori relativitas Einstein.
 - b. Planck merumuskan teori kuantisasi energi pada tahun 1900 untuk menjelaskan spektrum benda hitam.
 - c. Einstein mendukung teori kuantisasi Planck dan merumuskan teori relativitas untuk menjelaskan transformasi Lorentz
 - d. Perkembangan fisika modern di tahun 1930 ditandai dengan berkembangnya teknologi dan senjata nuklir serta dimulainya penjelajahan angkasa
 - e. Perkembangan fisika modern setelah perang dunia kedua ditandai dengan perkembangan nanoteknologi dan fisika partikel.

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Perhatikan pernyataan berikut
 - (1) Didasari oleh filosofi dan intuisi
 - (2) Dibatasi oleh dogma agama / kepercayaan
 - (3) Menghasilkan pengukuran atau perhitungan dengan keakuratan rendah
 - (4) Menggunakan pendekatan yang metodologis dan sistematis
 Pernyataan yang sesuai dengan fisika awal adalah

- A. (1), (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

2. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Menjelaskan besar keliling bumi menggunakan hukum kesebandingan dan trigonometri
- (2) Menggunakan metodologi saintifik dan sistematis
- (3) Berfokus pada penemuan mikroskopik
- (4) Menganut teori Heliosentris

Pernyataan yang sesuai dengan fisika klasik adalah

- A. (1), (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

3. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Berkembang pada topik mikroskopik, misalnya nanoteknologi dan nuklir
- (2) Memerlukan pengukuran dengan tingkat ketelitian tinggi
- (3) Didasari oleh teori kuantum Planck dan teori relativitas Einstein
- (4) Dimulai oleh postulat gerak Aristoteles

Pernyataan yang sesuai dengan fisika modern adalah

- A. (1), (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

4. Perbedaan fisika modern dengan fisika klasik yang benar adalah ...

	Fisika Klasik	Fisika Modern
A.	Berskala mikroskopik	Berskala makroskopik
B.	Bersifatnya eksak	Bersifat probabilitas.
C.	Tidak menggunakan metode ilmiah	Menggunakan metode ilmiah
D.	Tidak dibatasi dogma agama	Dibatasi dogma agama
E.	Didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantisasi energi oleh Planck	Didasari oleh hukum-hukum Newton tentang gerak.

5. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Berkembang pesat pada bidang termodinamika, mekanika, dan elektromagnetisme
- (2) Cahaya adalah gelombang yang perambatan energinya bersifat kontinu.
- (3) Menggunakan metode ilmiah dalam merumuskan ilmu pengetahuan
- (4) Hanya terbatas pada bidang kajian makro, yang dapat diamati dengan panca indra dan selalu dinyatakan dalam nilai eksak

Pernyataan yang sesuai dengan kelemahan fisika klasik adalah

- | | |
|---------------------|----------------|
| A. (1), (2) dan (3) | D. (4) saja |
| B. (1) dan (3) | E. Semua benar |
| C. (2) dan (4) | |

6. Perhatikan penemuan berikut

- (1) Spektrum benda hitam
- (2) Efek fotolistrik
- (3) Kegagalan Michelson-Morley
- (4) Penemuan elektron

Pernyataan yang tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik adalah

- | | |
|---------------------|----------------|
| A. (1), (2) dan (3) | D. (4) saja |
| B. (1) dan (3) | E. Semua benar |
| C. (2) dan (4) | |

7. Bunyi postulat Planck tentang kuantisasi energi adalah ...

- A. Benda hitam mengemisikan energinya secara kontinu
- B. Benda hitam mengemisikan energinya secara diskret
- C. Gelombang elektromagnetik memiliki laju konstan pada ruang hampa
- D. Energi hanya mungkin mengalir dari temperatur tinggi ke rendah
- E. Hukum-hukum fisika adalah invarian dari kerangka acuan manapun.

8. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Hukum-hukum fisika memiliki formulasi yang sama jika dari kerangka acuan manapun.
- (2) Benda hitam meradiasikan energinya dalam bentuk paket-paket.
- (3) Cahaya merambat di ruang hampa dengan laju konstan.

(4) Tidak mungkin dua kerangka acuan yang berbeda menghasilkan pengamatan yang sama.

Pernyataan yang sesuai dengan teori relativitas khusus Einstein adalah

- A. (1), (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

9. Pernyataan yang sesuai dengan perkembangan fisika pada awal perang dunia ke-II adalah

- A. Bersifat makro dan bersifat eksak
- B. Didasari oleh intuisi, filosofi dan eksperimen sederhana
- C. Dibatasi oleh dogma agama/ kepercayaan
- D. Ditandai dengan perkembangan fisika partikel yang pesat
- E. Ditandai dengan perkembangan senjata dan teknologi nuklir serta penjelajahan ruang angkasa

10. Pernyataan yang sesuai dengan fisika setelah perang dunia ke-II adalah

- A. Bersifat makro dan bersifat eksak
- B. Didasari oleh intuisi, filosofi dan eksperimen sederhana
- C. Dibatasi oleh dogma agama/ kepercayaan
- D. Ditandai dengan perkembangan fisika partikel yang pesat
- E. Berkembangnya teknologi nuklir serta penjelajahan ruang angkasa

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Kegiatan Pembelajaran 2 REVIEW FISIKA KLASIK

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep, persamaan, dan hukum-hukum Fisika Klasik yang masih berlaku pada Fisika Modern.	a) Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep, hukum dan persamaan Fisika Klasik yang masih berlaku pada Fisika Modern pada bahan kajian Mekanika.(C4) b) Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep, hukum dan persamaan Fisika Klasik yang masih berlaku pada Fisika Modern pada bahan kajian Elektromagnet (C4) c) Mahasiswa mampu mengaplikasikan konsep, hukum dan persamaan Fisika Klasik yang masih berlaku pada Fisika Modern pada bahan kajian Termodinamika(C4)

Uraian Materi

Meskipun sebagian besar fisika modern sangat berbeda dengan fisika klasik, namun masih ada beberapa konsep dari fisika klasik yang masih kita gunakan hingga saat ini(Kenneth, 2012; Thornton & Rex, 2013; Tipler, Paul A.; Llewellyn, 2012), diantaranya

A. Mekanika

Mekanika adalah kajian dalam bidang ilmu fisika yang mempelajari tentang gerak sebuah objek. Hukum-hukum mekanika klasik dikembangkan Selama ratusan tahun oleh banyak peneliti. Kontribusi terpenting dalam bidang mekanika disumbangkan oleh para ahli astronomi, karena ketertarikan yang sangat kuat terhadap benda-benda langit. Dua ilmuwan yang berhasil mengembangkan teori dan hukum-hukum yang masih berlaku hingga pada era fisika modern seperti saat ini diantaranya Galileo Galilei dan Isaac Newton.

1. Resultan Vektor Kecepatan

Apabila pada sebuah partikel mengalami dua atau lebih vektor kecepatan, maka resultan vektor kecepatan dinyatakan dengan:

$$v_{AC} = v_{AB} + v_{BC} \quad 1.1$$

Dengan demikian vektor resultan yang dialami oleh partikel tersebut merupakan perpaduan arah dari dua vektor yang dialami oleh partikel.

2. Momentum linier dan energi kinetik

Pada Fisika Klasik, sebuah benda bermassa m yang bergerak dengan kecepatan v memiliki energi kinetik sebesar:

$$EK = \frac{1}{2}mv^2 \quad 1.2$$

Dan momentumnya sebesar

$$p = mv \quad 1.3$$

Maka hubungan energi kinetik dengan momentum dinyatakan dalam

$$EK = \frac{1}{2} \frac{p^2}{m} \quad 1.4$$

Dengan

EK : energi kinetik (satuanannya *joule* atau J)

p : momentum (satuanannya $kg \cdot m \cdot s^{-1}$)

m : massa (satuanannya *kilogram* atau kg)

v : kecepatan (satuanannya m/s)

Apabila terjadi tumbukan antara dua atau lebih partikel, maka berlaku:

a. Hukum Kekekalan Energi.

Jumlah energi pada suatu sistem tertutup (tidak dikenai gaya eksternal) adalah konstan. Maka pada kasus tumbukan antar partikel, total energi sebelum dan setelah tumbukan adalah sama. Bentuk matematis dari hukum kekekalan energi adalah:

$$\sum Energi_{awal} = \sum Energi_{akhir} \quad 1.5$$

b. Hukum Kekekalan Momentum linier.

Jumlah momentum linier pada sistem tertutup adalah konstan. Artinya, total momentum linier sebelum dan setelah tumbukan adalah sama besar. Momentum linier adalah sebuah vektor, untuk itu dalam mengaplikasikan

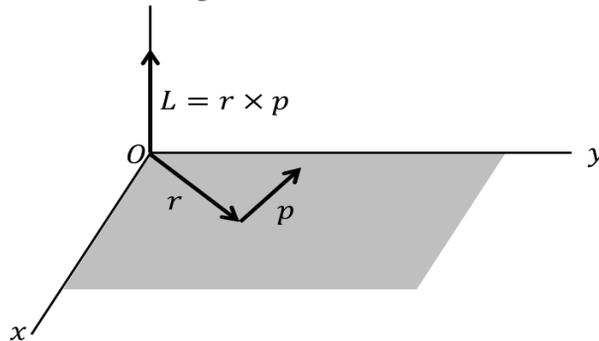
hukum ini, kita perlu menguraikan vektor momentum sesuai komponen-komponennya (x, y, z) .

$$\sum p_{awal} = \sum p_{akhir} \quad 1.6$$

3. Momentum Sudut dan Hukum Kekekalan Momentum Sudut

Ketika sebuah partikel (Gambar 1.6) bergerak dengan momentum linear p dan berpindah sejauh r dari titik origin $(0,0)$.

Gambar 1. 6 Diagram Vektor dari Momentum Sudut



Maka besar momentum sudut terhadap titik origin $(0,0)$ tersebut dinyatakan dengan:

$$L = r \times p \quad 1.7$$

Dengan

L : Momentum sudut (satunya $kg.m^2.s^{-1}$)

r : Jari-jari atau jarak titik terhadap origin (satunya meter atau m)

p : Momentum linier (satunya $kg.m.s^{-1}$)

Analog dengan momentum linier, momentum sudut juga memenuhi hukum kekekalan momentum sudut. Artinya pada sebuah sistem terisolasi (tidak ada gaya eksternal), maka total momentum angular adalah konstan.

4. Partikel yang Dikenai Gaya Eksternal

Pada Fisika Klasik, sebuah benda yang dikenai gaya eksternal memiliki besar energi potensial yang dinyatakan dengan:

$$EP = \int F . dx \quad 1.8$$

Dan total energinya dinyatakan dengan

$$E = EP + EK$$

1.9

Dengan :

EP : Energi Potensial (satuanannya Joule atau J)

F : Gaya eksternal (satuanannya Newton atau N)

dx : elemen perpindahan (satuanannya meter atau m)

EK : Energi Kinetik (satuanannya Joule atau J)

E : Energi Total (satuanannya Joule atau J)

Tugas 2

1. Pada kondisi apakah hukum kekekalan berikut dapat diterapkan ?

- a. Hukum kekekalan energi (SKOR: 10)
- b. Hukum kekekalan momentum linier (SKOR: 10)
- c. Hukum kekekalan momentum anguler (SKOR: 10)

Jawab:

2. Selain besaran energi, momentum linier dan momentum anguler, dapatkan kamu menyebutkan besaran apa lagi yang memiliki hukum kekekalan dan masih berlaku di fisika modern? (SKOR: 10)

Jawab:

3. Sebuah atom hidrogen ($m = 1,674 \times 10^{-27}$ kg) bergerak dengan kecepatan $1,1250 \times 10^7$ m/s. Kemudian bertumbukkan elastik dengan sebuah atom helium ($m = 6,646 \times 10^{-27}$ kg yang awalnya dalam keadaan diam. Setelah bertumbukkan ternyata atom hidrogen bergerak dengan kecepatan $-6,724 \times 10^6$ m/s (dengan arah berlawanan dari arah sebelumnya). Tentukan besar kecepatan atom helium menggunakan:
- a. Hukum kekekalan momentum linier (SKOR: 15)
 - b. Hukum kekekalan energi mekanik(SKOR: 15)

Jawab:

4. Sebuah atom berilium ($m = 8,00 \text{ u}$) pecah menjadi dua atom helium ($m = 4,00 \text{ u}$) dan membebaskan energi $92,2 \text{ keV}$. Jika atom berilium awalnya dalam keadaan diam, maka tentukan :
- besar energi kinetik masing-masing dari kedua atom helium (SKOR: 15)
 - besar kelajuan dari masing-masing kedua atom helium (SKOR: 15)

Jawab:

B. Elektrodinamika

Elektrodinamika mempelajari tentang gaya elektromagnetik, yaitu bentuk interaksi fisis yang terjadi diantara partikel-partikel bermuatan. Gaya elektromagnetik (gaya Lorentz) dibawa oleh medan elektromagnetik yang terdiri atas medan listrik dan medan magnetik, dan berhubungan dengan radiasi elektromagnetik misalnya cahaya tampak. Elektromagnetik dikembangkan dalam periode yang panjang, beberapa ilmuwan yang berkontribusi penting pada bidang kajian ini antara lain Charles Coulomb (1736-1806), Hans Christian Oersted (1777-1851), Thomas Young (1773-1829), Andre Ampere (1775-1836), Michael Faraday (1791-1867), Joseph Henry (1797-1878), James Clerk Maxwell (1831-1879) dan Heinrich Hertz (1857-1894).

Maxwell menemukan bahwa gelombang elektromagnetik adalah gabungan dari osilasi medan listrik dan medan magnetik. Maxwell menyatakan bahwa fenomena kelistrikan dan kemagnetan saling terhubung dan saling mempengaruhi oleh perubahan kerangka acuan inersia. Maxwell juga dapat menjelaskan tentang radiasi elektromagnetik dalam kajian cahaya dan optik. Maxwell merumuskan empat persamaannya, menyempurnakan penjelasan tentang ke-elektromagnet-an dari ilmuwan sebelumnya. Keempat persamaan itu adalah

Tabel 2.1 Empat Persamaan Maxwell tentang Elektrodinamika

Komponen	Formulasi
Hukum Gauss tentang elektrostatik	$\oint E \cdot dA = \frac{q}{\epsilon_0}$
Hukum Gauss tentang kemagnetan	$\oint B \cdot dA = 0$
Hukum Faraday	$\oint E \cdot ds = -\frac{d\Phi_B}{dt}$
Generalisasi Hukum Ampere	$\oint B \cdot ds = \mu_0 \cdot \epsilon_0 \frac{d\Phi_E}{dt} + \mu_0 I$

Dengan gaya lorentz diberikan oleh

$$F = qE + qv \times B$$

Persamaan Maxwell ini mengindikasikan bahwa muatan dan arus menciptakan medan, dan satu sama lain saling menghasilkan. Muatan yang bergerak menghasilkan medan magnet dan perubahan fluks medan magnet akan menghasilkan arus. Dengan demikian listrik dan magnet saling terhubung dan saling mempengaruhi. Beberapa konsep, persamaan dan hukum pada elektromagnetisme klasik yang masih berlaku pada fisika modern yaitu:

1. Gaya Coulomb

Gaya Coulomb atau gaya elektrostatik adalah gaya yang terjadi sebagai interaksi antara dua objek bermuatan listrik yaitu q_1 dan q_2 yang saling terpisah sejauh r . Arah dari gaya coulomb ditentukan oleh jenis muatan yang saling berinteraksi. Apabila kedua muatan memiliki jenis yang sama, maka akan terjadi gaya tolak menolak. Sedangkan jika kedua muatan memiliki jenis muatan yang berbeda, maka akan terjadi gaya tarik-menarik. Besar gaya coulomb adalah

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \quad 1.10$$

Besar energi potensial dari sistem dua muatan ini diberikan oleh:

$$EP = \int_r^\infty \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2} \cdot dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r} \quad 1.11$$

Dengan

F_c : Gaya Coulomb atau gaya elektrostatik (satunya Newton atau N)

q_1, q_2 : besar muatan 1 dan 2 (satunya Coulomb atau C)

r : Jarak antara dua muatan (satunya meter atau m)

$\frac{1}{4\pi\epsilon_0}$: $8,988 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ (dalam SI)

2. Potensial Elektrostatik

Beda potensial dapat timbul akibat adanya perbedaan distribusi muatan, misalnya pada baterai. Kutub positif pada baterai adalah daerah yang memiliki elektron paling sedikit, sementara kutub negatif pada baterai adalah kebalikannya. Akibatnya saat kedua kutub ini dihubungkan oleh kawat konduktor, maka muatan tersebut akan bergerak melalui beda potensial ΔV , dengan besar perubahan energi potensial ΔU adalah sebesar:

$$\Delta U = q \cdot \Delta V \quad 1.12$$

Besar energi potensial elektrostatik pada tingkat atomik biasanya dinyatakan dengan elektron volt atau eV , yang dinyatakan dengan :

$$\Delta U = e \cdot \Delta V = (1,602 \times 10^{-19} \text{C})(1\text{V}) = 1,602 \times 10^{-19} \text{J} \quad 1.13$$

Maka

$$1eV = 1,602 \times 10^{-19} \text{J} \quad 1.14$$

Beberapa satuan pengali pada satuan elektron volt diantaranya:

$$keV = \text{kilo elektron volt} = 10^3 eV$$

$$MeV = \text{mega elektron volt} = 10^6 eV$$

$$GeV = \text{giga elektron volt} = 10^9 eV$$

3. Medan Magnet Induksi

Medan Magnet Induksi B adalah medan magnet yang dihasilkan dari induksi kuat arus listrik I . Medan magnet induksi biasanya terjadi pada sebuah kawat yang dialiri arus listrik, arah medan magnet induksi terhadap arah arus listrik mengikuti kaidah tangan kanan. Besar medan magnet induksi pada sebuah *loop* dinyatakan oleh:

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r} \quad 1.15$$

Dengan

B : medan magnet induksi (satunya Tesla atau T)

i : kuat arus listrik (satunya ampere atau A)

r : jari-jari loop (satunya meter atau m)

μ_0 : $4\pi \times 10^7 \text{ N} \cdot \text{s}^2/\text{C}^2$

Dari medan magnet induksi pada loop juga dapat didefinisikan sebuah besaran magnet, yaitu momen magnet μ (baca: miu) dengan persamaan matematis

$$|\mu| = i A \quad 1.16$$

Dengan

μ : momen magnet (satuanannya $m^2 \cdot A$)

i : kuat arus listrik (satuanannya ampere atau A)

A : Luas penampang yang ditutupi oleh loop (satuanannya m^2)

Adapun arah dari momen magnet adalah tegak lurus terhadap bidang loop dan mengikuti kaidah tangan kanan.

4. Energi Potensial akibat Medan Magnet Eksternal

Sesuai dengan gaya lorentz, maka ketika sebuah *loop* berarus ditempatkan di sebuah medan listrik eksternal, maka akan timbul torsi pada *loop* yang besarnya:

$$\tau = \mu \times B_{ext} \quad 1.17$$

Torsi yang timbul akibat interaksi momen magnet dengan medan magnet ini kemudian akan menghasilkan energi potensial sebesar :

$$U = - \mu \cdot B_{ext} \quad 1.18$$

Dengan

τ : torsi (satuanannya N.m)

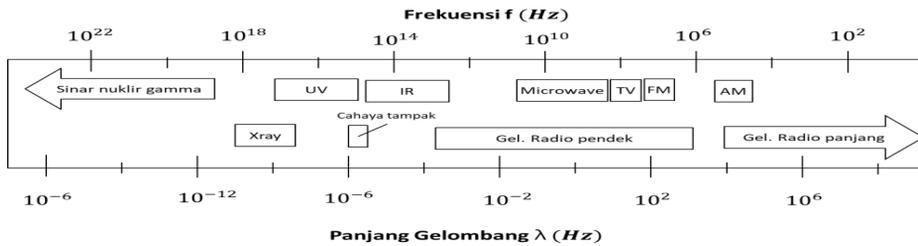
μ : momen magnet

B_{ext} : medan magnet eksternal (satuanannya Tesla atau T)

U : energi potensial (satuanannya joule atau J)

Saat medan eksternal didekatkan pada momen magnet, maka momen magnet tersebut akan berotasi, sehingga energi potensial akan cenderung menjadi minimum yang tampak saat momen magnet dan medan eksternal saling paralel.

Gambar 1. 7 Spektrum Gelombang Elektromagnetik



5. Gelombang Elektromagnetik

Gelombang elektromagnetik merambat dengan kelajuan konstan sebesar c (laju cahaya pada ruang hampa), yang berhubungan dengan konstanta ϵ_0 dan μ_0 , yaitu

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad 1.19$$

Besar $c = 299.792.458 \text{ m/s}$. Gelombang elektromagnetik memiliki panjang gelombang λ dan frekuensi f , yang hubungannya:

$$c = \lambda f \quad 1.20$$

Dengan

c : tetapan laju cahaya \approx (dibaca: hampir mendekati) $3 \times 10^8 \text{ m/s}$

λ : (dibaca: lambda) adalah panjang gelombang (satunya meter atau m)

f : frekuensi (satunya Hertz atau Hz)

Berdasarkan frekuensi atau panjang gelombangnya, gelombang elektromagnetik dapat dibagi kedalam bentuk spektrum (Gambar 2.2). Spektrum gelombang elektromagnetik dimulai dari sinar gamma (frekuensi tertinggi) hingga gelombang radio (frekuensi terendah).

Tugas 2

5. Apa perbedaan energi potensial dan beda potensial? Apakah mereka memiliki dimensi yang berbeda? Apakah mereka memiliki satuan yang berbeda? Jika Ya, sebutkan. (SKOR : 20)

Jawab:

6. Besar dan arah interaksi yang dialami oleh dua partikel bermuatan dinyatakan oleh hukum coulomb.

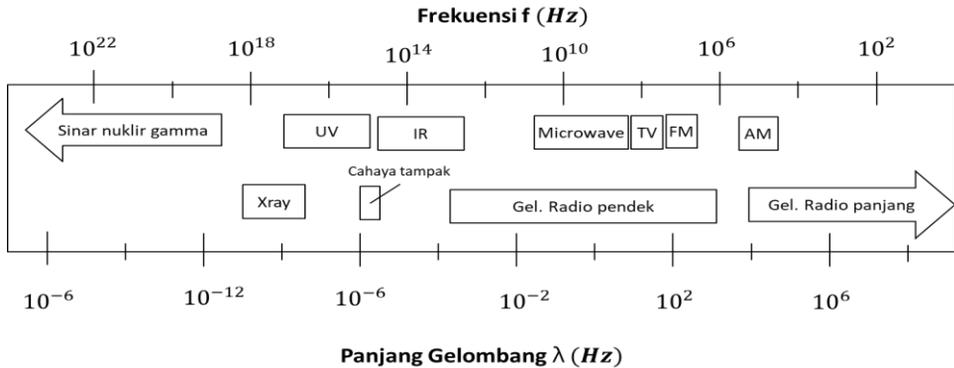
a. Sebutkan dan jelaskan bunyi hukum coulomb. (SKOR : 20)

Jawab:

b. Definisikan medan listrik yang dihasilkan oleh sebuah muatan sumber! (SKOR : 20)

Jawab:

7. Perhatikan gambar berikut!



Dari gambar spektrum gelombang elektromagnetik diatas, analisis lah spektrum gelombang apa saja yang frekuensinya saling beririsan ! Apa kamu bisa menemukan manfaat dari irisan frekuensi tersebut? (SKOR : 20)

Jawab:

8. Sebuah kawat berarus dapat menghasilkan medan induksi yang arahnya mengikuti kaidah tangan kanan. Apabila kemudian ada sebuah partikel bermuatan melintasi medan magnet induksi itu, maka rumuskan dan jelaskan gaya magnet yang dialami oleh partikel tersebut! (SKOR : 20)

Jawab:

C. Teori Kinetik Partikel

Teori kinetik partikel merupakan bagian kajian dari termodinamika. Termodinamika adalah cabang fisika yang mempelajari tentang perpaduan mekanika dengan gejala fisis yang berhubungan dengan suhu dan kalori. Pada fisika klasik, termodinamika dirumuskan dalam bentuk hukum-hukum termodinamika, yaitu

Hukum I Termodinamika:

Perubahan energi dalam dari suatu sistem setara dengan penambahan kalor kedalam sistem ditambah dengan usaha yang dilakukan pada sistem.

Hukum I termodinamika secara matematis dinyatakan dengan:

$$\Delta U = Q + W$$

Hukum I termodinamika ini menunjukkan berlakunya hukum kekekalan energi pada energi panas.

Hukum II Termodinamika

Tidak mungkin mengkonversi kalor seutuhnya menjadi kerja tanpa menghasilkan kalor yang dibuang.

Hukum II termodinamika menyatakan bahwa setiap sistem yang bekerja dengan menyerap kalor pasti memiliki efisiensi. Semua mesin kalor atau kemudian disebut sebagai mesin Carnot tidak ada yang memiliki efisiensi 100% dalam mengkonversi kalor menjadi usaha. Setiap mesin kalor pasti memiliki efisiensi dibawah 100%.

Teori kinetik partikel menghubungkan termodinamika dengan gerak atom atau molekul dengan menggunakan gas sebagai modelnya. Teori kinetik gas mengaplikasikan hukum-hukum gerak Newton untuk menjelaskan

peristiwa tumbukan antar partikel maupun tumbukan antara partikel dengan dinding wadah. Beberapa konsep dan persamaan teori kinetik gas yang masih digunakan dalam fisika modern diantaranya persamaan gas ideal dan energi kinetik rata-rata. Berikut pembahasan lebih rinci :

1. Persamaan pada Keadaan Gas Ideal

Persamaan keadaan gas ideal diberikan oleh

$$PV = nRT = NkT \quad 1.21$$

Dengan :

P : Tekanan (satunya Pascal atau Pa)

V : Volume (satunya m^3)

n : Jumlah mol

R : Tetapan gas universal = 8,32 J/mol. K

T : Suhu mutlak (satunya kelvin atau K)

N : Jumlah molekul atau partikel

k : konstanta Boltzmann = $1,38 \times 10^{-23}$ J/K

2. Energi Kinetik Rata-rata

Pada gas ideal, tumbukan yang terjadi akan mengakibatkan energi yang berbeda-beda pada setiap partikel atau molekul, namun energi rata-rata dari semua partikel atau molekul tersebut nilainya tetap. Besar energi kinetik rata-rata dituliskan:

$$EK_{rata-rata} = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}RT \quad 1.22$$

Dengan

EK : energi kinetik rata-rata (satunya joule atau J)

Tugas

1. Pada kebanyakan gas (misalnya pada hidrogen), molekulnya akan mulai berotasi pada temperatur dibawah temperatur vibrasinya. Dari pernyataan ini, apa sifat molekul gas yang kita peroleh? (SKOR : 50)

Jawab:

2. Sebuah silinder mengandung gas argon ($m = 40,0 \text{ u}$) mengalami peningkatan suhu dari 293K menjadi 373 K. Tentukan besar perubahan energi kinetik rata-rata per atom ! (SKOR : 50)

Jawab:

Rangkuman

Beberapa kajian pada Fisika Klasik yang masih digunakan dalam Fisika Modern diantaranya:

A. Mekanika

Konsep mekanika pada Fisika Klasik yang masih berlaku pada Fisika Modern, diantaranya:

1. Resultan vektor kecepatan dinyatakan dengan:

$$v_{AC} = v_{AB} + v_{BC}$$

2. Benda bermassa m yang bergerak dengan kecepatan v akan memiliki:

a. Momentum linier

$$p = mv$$

b. Energi kinetik

$$EK = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}\frac{p^2}{m}$$

Pada peristiwa tumbukkan akan berlaku:

- a. Hukum kekekalan momentum linier
 - b. Hukum kekekalan energi total
3. Jika sebuah benda m yang bergerak melingkar dengan kelajuan v , maka akan berlaku:
- a. Momentum sudut

$$L = r \times p$$

- b. Hukum kekekalan momentum sudut
4. Pada sebuah benda yang dikenai gaya eksternal maka
- a. Energi potensialnya adalah sebesar:

$$EP = \int F \cdot dx$$

- b. Energi totalnya adalah

$$E = EP + EK$$

B. Elektromagnetik

Beberapa konsep pada bidang kajian elektromagnet Fisika Klasik yang masih berlaku di Fisika Modern adalah:

1. Gaya Coulomb

$$F_c = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|q_1||q_2|}{r^2}$$

2. Potensial elektrostatik

$$\Delta U = q \cdot \Delta V$$

3. Medan magnet induksi

$$B = \frac{\mu_0 i}{2r}$$

4. Energi potensial akibat medan eksternal

$$U = -\mu \cdot B_{ext}$$

5. Laju gelombang elektromagnetik memenuhi

$$c = \lambda f$$

C. Teori kinetik partikel

1. Persamaan Umum Gas Ideal

$$PV = nRT = NkT$$

2. Energi kinetik rata-rata

$$EK_{rata-rata} = \frac{3}{2}kT = \frac{3}{2}RT$$

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1 Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Hukum kekekalan energi mekanik
- (2) Hukum kekekalan momentum linier
- (3) Hukum kekekalan momentum angular
- (4) Hukum kekekalan energi kinetik

Hukum kekekalan pada Mekanika Klasik yang dapat diterapkan pada Fisika Modern diantaranya ...

- A. (1) , (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

2 Pernyataan yang benar tentang hukum fisika klasik yang masih berlaku pada fisika modern adalah ..

- A Hukum kekekalan energi dan momentum berlaku pada sistem yang dikenai gaya luar.
- B Hukum kekekalan energi dan momentum berlaku pada sistem terisolasi.
- C Penjumlahan vektor kecepatan hanya berlaku pada sistem terisolasi
- D Penjumlahan vektor kecepatan dapat mengabaikan komponennya.
- E Momentum angular dihasilkan dari perkalian titik antara momentum linier p dan posisi r terhadap titik *origin*.

3 Perhatikan beberapa besaran berikut

- (1) Momentum sudut
- (2) Energi mekanik
- (3) Momentum angular
- (4) Energi kinetik

Besaran vektor dalam kajian mekanika yang memenuhi hukum kekekalan adalah ...

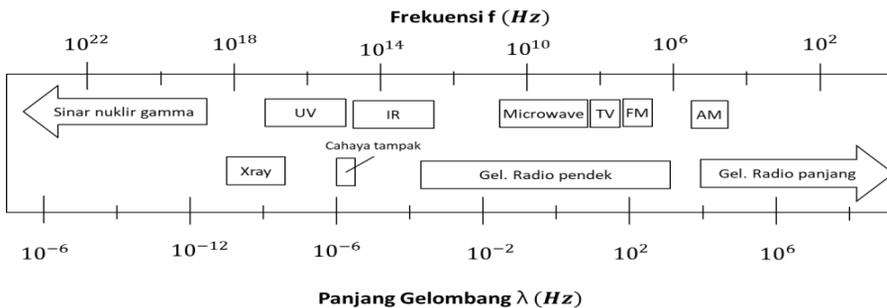
besar medan listrik yang dihasilkan oleh sebuah partikel bermuatan adalah ...

- A Merupakan besar gaya Coulomb yang per muatan uji
- B Besar medan listrik dipengaruhi oleh muatan uji
- C Arah medan listrik dipengaruhi oleh muatan uji
- D Besar medan listrik berbanding terbalik dengan besar muatan sumber.
- E Besar medan listrik tidak dipengaruhi oleh muatan uji

7 Jika sebuah partikel bermuatan Q bergerak melintasi sebuah medan induksi B . Medan induksi tersebut dihasilkan oleh sebuah kawat lurus berarus I . Maka gaya magnet yang dialami oleh partikel tersebut adalah...

- A Berbanding terbalik dengan besar medan induksi B
- B Berbanding terbalik dengan besar muatan partikel Q
- C Arahnya tolak menolak dengan medan induksi B
- D Arahnya mengikuti kaidah tangan kanan
- E Besarnya sebanding dengan konstanta dielektrik

8 Diberikan spektrum gelombang elektromagnetik berikut.



Perbedaan gelombang radio dengan gelombang infra merah adalah ...

- | | |
|---|---|
| RADIO | INFRAMERAH |
| A Tidak dapat dideteksi oleh mata manusia secara langsung | Dapat dideteksi oleh mata manusia secara langsung |
| B Digunakan sebagai pemancar komunikasi | Digunakan sebagai penginderaan malam |
| C Memiliki frekuensi yang dekat dengan sinar merah | Memiliki frekuensi yang dekat dengan radar |

- D Energi radiasinya lebih besar Energi radiasinya lebih kecil
E Sebagaimana frekuensi Spektrum frekuensi inframerah
gelombang radio pendek masih tidak beririsan dengan
beririsan dengan infra merah gelombang radio
- 9 Dalam sebuah gas ideal pada temperatur T , kelajuan rata-rata dari molekul-molekul gas tersebut adalah ...
- A Sebanding dengan kuadrat temperatur mutlak T
 - B Sebanding dengan kenaikan temperatur mutlak T
 - C Sebanding dengan akar kuadrat temperatur mutlak T
 - D Berbanding terbalik dengan temperatur mutlak T
 - E Tidak dipengaruhi oleh temperatur
10. Kapasitas panas molekul hidrogen dapat dinyatakan dengan $3R/2$, $5R/2$, dan $7R/2$ pada temperatur yang berbeda-beda. Besar kapasitas panas molekul hidrogen pada temperatur rendah adalah ...
- A $3R/2$
 - B $5R/2$
 - C $7R/2$
 - D $3R/2$ dan $5R/2$
 - E $5R/2$ dan $7R/2$

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Penutup

Rangkuman

1. Sejarah fisika menurut Arabatzis terbagi menjadi 8 (delapan) tahapan, yaitu: 1) Yunani kuno; 2) Abad pertengahan; 3) Awal modern; 4) Transformasi *physica* menjadi *physics*; 5) Fisika Klasik; 6) Revolusi teori relativitas dan kuantum; 7) Fisika di tahun 1930; dan 8) Fisika setelah perang dunia kedua hingga sekarang.
2. Fisika awal adalah fisika yang berkembang mulai dari zaman Yunani kuno hingga abad pertengahan, yang didasari oleh intuisi, filosofi dan eksperimen yang belum sistematis.
 - a. Fisika awal banyak dipengaruhi oleh pemikiran Aristoteles, sehingga disebut juga sebagai Fisika Aristotelian.
 - b. Abad pertengahan disebut juga sebagai abad kegelapan, karena terjadi kemunduran dalam perkembangan ilmu pengetahuan.
 - c. *Physica* baru memasuki awal modern ketika Copernicus mengajukan teori Heliosentris pada tahun 1543.
3. Masa transisi fisika lama ke fisika klasik.
 - a. Newton mendasarkan fisika pada eksperimen yang lebih sistematis.
 - b. Pada masa transisi ini terjadi pergeseran istilah *physica* menjadi *physics*.
4. Fisika klasik
 - a. Fisika klasik adalah fisika yang didasari oleh prinsip-prinsip yang dikembangkan sebelum kemunculan teori kuantum dan teori relativitas.
 - b. Kajian fisika klasik terbatas pada topik-topik yang dapat diamati secara langsung menggunakan panca indera, dinyatakan dengan tepat dan pasti.
5. Masa transisi fisika klasik menjadi fisika modern
Masa transisi fisika klasik menjadi fisika modern terjadi karena adanya percobaan – percobaan dan fenomena yang tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik, diantaranya:

- a. Radiasi benda hitam
 - b. Kegagalan eksperimen Michelson-Morley
 - c. Elektrodinamika
6. Fisika modern
- a. Kelahiran Fisika modern ditandai dengan munculnya teori kuantisasi Planck dan teori relativitas Einstein.
 - b. Perkembangan fisika modern di tahun 1930 ditandai dengan berkembangnya teknologi dan senjata nuklir serta dimulainya penjelajahan angkasa
 - c. Perkembangan fisika modern setelah perang dunia kedua ditandai dengan perkembangan nanoteknologi dan fisika partikel.
7. Beberapa kajian pada Fisika Klasik yang masih digunakan dalam Fisika Modern diantaranya:
- a. Mekanika
 - 1) Hukum kekekalan momentum linier
 - 2) Hukum kekekalan energi total
 - 3) Hukum kekekalan momentum sudut
 - b. Elektrodinamika
 - 1) Gaya Coulomb
 - 2) Potensial elektrostatik
 - 3) Medan magnet induksi
 - 4) Energi potensial akibat medan eksternal
 - 5) Laju gelombang elektromagnetik memenuhi $c = \lambda f$
 - c. Teori kinetik partikel
 - 1) Persamaan Umum Gas Ideal
 - 2) Energi kinetik rata-rata

Daftar Istilah

Teori relativitas khusus	:	Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein
Teori Kuantum	:	Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
Fisika Modern	:	Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck
Elektrodinamika	:	Cabang fisika yang mempelajari interaksi kelistrikan dan kemagnetan
Invarian	:	Seragam

Referensi

- Arabatzis, T. (2018). How Physica Became Physics. *Science & Education*, 27(1–2), 211–218. <https://doi.org/10.1007/s11191-017-9946-7>
- Diolatzis, I. S., & Pavlogeorgatos, G. (2019). Simulating Kepler’s Geocentric Mars Orbit. *New Astronomy*, 71(March), 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.newast.2019.03.004>
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Oh, J. (Hanyang U. (2017). Understanding the Estimation of Circumference of the Earth by of Eratosthenes based on the History of Science , For Earth Science Education. *대한지구과학교육학회지*, 10(August), 214–225.
- Thornton, S. T. (University O. V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). *Modern Physics - Fifth Edition*. In *Modern Physics Sixth Edition*. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

MODUL 2

TEORI RELATIVITAS

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat kamu telah menyelesaikan Modul 1 dan selamat datang di Modul 2. Modul 2 ini berjudul Teori Relativitas, yang memiliki 4 (empat) kegiatan pembelajaran, yaitu: 1) Relativitas khusus; 2) Gejala- gejala relativitas khusus; 3) Dinamika relativistik; dan 4) Relativitas umum.

Kamu telah mengetahui bagaimana fisika modern bisa lahir dan menggeser sebagian hukum-hukum Fisika klasik. Kamu juga telah mengetahui hukum, konsep dan persamaan- persamaan fisika klasik yang masih berlaku hingga saat ini. Ternyata meskipun teori kuantum diajukan lebih dulu oleh Planck pada tahun 1900, teori relativitas Einstein lebih mudah diterima oleh kalangan ilmuwan saat itu.

Teori relativitas Einstein lebih mudah diterima karena kembali memperkuat prinsip invariant yang diajukan oleh Galileo. Artinya, melalui teori relativistic, semua persamaan fisika dapat memiliki bentuk yang sama pada kerangka acuan mana pun. Melalui teori relativitas, Einstein juga bisa menjelaskan bahwa panjang dan waktu bukan besaran yang eksak (tepat) *loh!*. *Wow*, bagaimana bisa? Mari kita pelajari dengan antusias!

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 3) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 4) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 5) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 4) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 5) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).
- 6) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).
- 7) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

- 1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)
- 2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

- 1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)
- 5) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)
- 6) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)
- 7) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	a) Mahasiswa mampu menjelaskan fenomena, konsep, persamaan dan hukum yang terdapat pada teori relativitas. b) Mahasiswa mampu mengaplikasikan teori relativitas baik dalam pemecahan masalah atau pun dalam membuat bahan ajar.
Sikap	a) Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif.

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
	b) Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c) Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu mengkomunikasikan hasil kegiatan pembelajaran dengan memanfaatkan media sosial

3. Prasyarat Kompetensi

- a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.
- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul 2 Teori Relativitas ini bermanfaat dalam memfasilitasi pembentukan pengetahuan calon pendidik dalam bidang pembelajaran fisika khususnya pada materi Fisika Modern yang diajarkan di kelas XII SMA. Teori relativitas ini juga sangat esensial bagi mahasiswa yang nantinya berkecimpung sebagai peneliti bidang fisika. Modul Teori Relativitas ini juga bermanfaat bagi mahasiswa karena mencakup materi yang diajarkan di SMA hingga setingkat perguruan tinggi. Isi dari Modul Teori Relativitas yang berupa uraian penjelasan teori relativitas dan gejala-gejala yang ditimbulkan. Gejala yang ditimbulkan mulai dari kontraksi Panjang dan dilatasi waktu hingga merumuskan kovarian.

5. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
A. Relativitas Klasik	1. Pengertian kerangka acuan inersial
	2. Transformasi Galileo
B. Teori Relativitas Khusus	1. Percobaan Michelson-Morley
	2. Postulat-postulat relativitas khusus
	3. Transformasi Lorentz

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
C. Gejala- Gejala konsekuensi transformasi Lorentz	1. Kontraksi panjang 2. Dilatasi waktu
D. Simultanitas	1. Relativitas keserempakan atau simultanitas 2. Sinkronisasi
E. Paradoks kembar	1. Paradoks kembar 2. Interval ruang-waktu
F. Eksperimen-eksperimen yang menverifikasi teori relativitas khusus	1. Eksperimen muon 2. Aberasi bintang 3. Pengukuran waktu atomik
G. momentum relativistik	1. Momentum relativistik 2. Massa relativistik 3. Gaya relativistik
H. Energi relativistik	1. energi total dan energi diam 2. kesetaraan massa dan energi 3. hubungan energi dan momentum 4. Partikel tak bermassa
I. Relativitas khusus dan elektrodinamika	1. Penjelasan Einstein tentang elektromagnetisme 2. Universalitas Laju Cahaya
J. Teori Relativitas Umum	1. Teori Relativitas Umum 2. Prinsip-prinsip yang mendasari Teori Relativitas Umum 3. Formulasi Medan Gravitasi Einstein 4. Fenomena-fenomena yang dapat diprediksi menggunakan Teori Relativitas Umum

Kegiatan Pembelajaran 1 RELATIVITAS KHUSUS

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
<p>1. Mahasiswa dapat menjelaskan sejarah singkat tentang lahirnya teori relativitas Einstein.</p>	<ul style="list-style-type: none"> a. Mahasiswa dapat menjelaskan pengertian kerangka acuan inersia. b. Mahasiswa mampu menjelaskan secara singkat sejarah lahirnya teori relativitas einstein berdasarkan kegagalan transformasi galileo dalam memformulasikan kecepatan gelombang elektromagnetik dari dua kerangka acuan yang berbeda. c. Mahasiswa mampu menjelaskan secara singkat sejarah lahirnya teori relativitas einstein berdasarkan kegagalan percobaan Michelson. d. Mahasiswa dapat menjelaskan definisi dari teori relativitas khusus
<p>2. Mahasiswa dapat menjelaskan Postulat Einstein</p>	<ul style="list-style-type: none"> a. Mahasiswa dapat menyebutkan bunyi Postulat Einstein tentang relativitas b. Mahasiswa dapat menjelaskan makna fisis dari Postulat Einstein tentang relativitas
<p>3. Mahasiswa dapat menjelaskan konsep-konsep relativistik yang terdapat di transformasi Lorentz</p>	<ul style="list-style-type: none"> a. Mahasiswa dapat menurunkan persamaan faktor lorentz b. Mahasiswa dapat menjelaskan konsep-konsep relativitas yang terdapat di transformasi Lorentz c. Mahasiswa dapat menjelaskan konsep kontraksi panjang yang terdapat pada transformasi Lorentz d. Mahasiswa dapat menjelaskan konsep pemuluran waktu yang terdapat pada transformasi Lorentz e. Mahasiswa dapat mengaplikasikan gejala kuantum berupa kontraksi panjang yang ditemukan dari transformasi Lorentz

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
	<p>melalui pemecahan masalah berupa kasus / soal.</p> <p>f. Mahasiswa dapat mengaplikasikan gejala kuantum berupa pemuluran waktu yang ditemukan dari transformasi Lorentz melalui pemecahan masalah berupa kasus / soal.</p>

Uraian Materi

A. Teori Relativitas Klasik

Teori relativitas berasal dari penjelasan Galileo tentang perbedaan fenomena gerak oleh pengamat “diam” dan pengamat yang “bergerak”. Besar dan arah kecepatan dan perpindahan sebuah objek ternyata dapat berbeda, tergantung dari keadaan pengamatnya. Contohnya saja, saat kamu bepergian menggunakan bus, dari dalam bus kamu akan melihat bahwa jalan raya, pepohonan, dan bangunan lah yang meninggalkan kamu. Sedangkan menurut orang di tepi jalan, kamu lah yang bergerak terhadapnya. Galileo kemudian mengusulkan sebuah teori bahwa gerak bersifat relatif, tergantung pada kerangka acuan yang digunakan oleh pengamat.

Pada teori relativitas ini, kita akan berkenalan dengan beberapa istilah baru, diantaranya:

1. Fenomena / kejadian

Fenomena atau kejadian adalah peristiwa atau gejala fisika yang diamati, bisa berupa gejala mekanis atau elektromagnetisme. Fenomena fisika ini terjadi pada ruang dan waktu yang spesifik (tertentu). Beberapa contoh fenomena yang dapat diamati diantaranya petir, gerak sebuah benda, dan tumbukan anta dua benda.

2. Pengamat

Pengamat adalah subjek yang melakukan pengukuran terhadap fenomena / kejadian fisika. Pengamat dapat berupa manusia atau alat ukur. Ada banyak besaran yang biasanya diukur oleh pengamat dari sebuah fenomena, diantaranya pengukuran panjang, durasi (waktu), temperature, dan massa.

3. Kerangka acuan

Kerangka acuan adalah koordinat yang digunakan oleh pengamat dalam melakukan kegiatan pengukuran fenomena fisika. Kerangka acuan diam adalah kerangka acuan yang tetap pada titik koordinat tertentu. Sementara kerangka acuan bergerak adalah kerangka yang bergerak terhadap titik koordinat tertentu.

1. Pengertian kerangka acuan inersial

Galileo juga meletakkan prinsip *invariant* yang menjadi dasar bagi teori relativitas. Prinsip invariant adalah berlakunya hukum dan bentuk-bentuk persamaan fisika pada semua kerangka acuan inersia. Artinya, walaupun hasil pengukuran berbeda, namun persamaan dan hukum Fisika pasti berlaku sama pada kerangka acuan manapun. Kerangka acuan dimana hukum dan persamaan fisika berlaku seragam ini oleh Galileo disebut sebagai kerangka acuan inersia.

Sekitar satu abad kemudian, Newton memperkuat kembali usulan Galileo tentang konsep relativitas gerak, terutama tentang kerangka acuan inersia dan prinsip invariant. Newton menjelaskan bahwa kerangka acuan inersia adalah kerangka acuan yang sesuai dengan Hukum I Newton tentang gerak. Lebih lanjut, Newton merumuskan prinsipnya tentang relativitas, yaitu bahwa semua hukum mekanika berlaku seragam pada semua kerangka inersia. Newton juga menjelaskan bahwa apabila hukum fisika valid pada sebuah kerangka acuan diam, maka hukum ini juga akan valid pada kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan relative terhadap kerangka acuan diam.

2. Transformasi Galileo

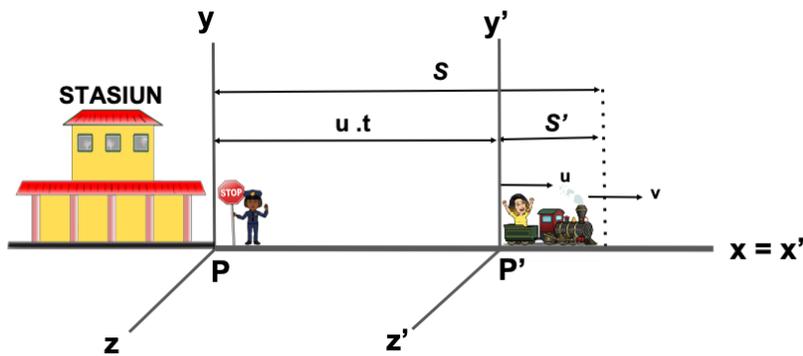
Sependapat dengan usulan Galileo, Newton menekankan bahwa tidak ada kecepatan gerak yang absolut. Kecepatan gerak sebuah benda bergantung pada kerangka acuannya. tidak ada satu pun kerangka acuan yang dapat digunakan untuk menghasilkan pengukuran yang absolut. Sementara hukum-hukum gerak berlaku umum pada semua kerangka acuan. Newton pun menjelaskan hukum-hukum nya menggunakan transformasi galileo.

Transformasi atau alih bentuk adalah suatu konsep berfikir matematis yang mengubah bentuk atau mentransformasikan persamaan matematis dari sudut pandang (kerangka acuan) pengamat yang satu ke sudut pandang pengamat yang lain. Transformasi Galileo dapat digunakan untuk menyatakan hubungan

hasil pengukuran suatu fenomena fisika yang dilakukan oleh pengamat yang berbeda dalam kerangka inersia.

Newton menggunakan relativitas kecepatan pada transformasi Galileo untuk membuktikan prinsip invariant pada hukum-hukum geraknya (Gambar 2.1). Dua pengamat mengamati sebuah fenomena yang sama. Pengamat pertama (P) adalah seorang petugas yang diam di stasiun, dan pengamat kedua (P') adalah seorang penumpang yang berada di dalam kereta yang bergerak searah sumbu $x +$ dengan kecepatan u terhadap stasiun. Keduanya sama sama mengamati arah asap yang keluar dari cerobong kereta.

Gambar 2. 1 Pembuktian sifat invariant hukum – hukum Newton menggunakan transformasi Galileo



Kedudukan asap menurut P dinyatakan dalam koordinat (x, y, z) dan menurut P' dinyatakan dalam (x', y, z') . Awalnya ($t = 0$), P dan P' saling berimpit. Setelah selang waktu t maka P' telah menempuh jarak $u.t$ terhadap P dan asap telah menempuh jarak sejauh S' terhadap P' . Maka transformasi kedudukan untuk koordinat ruang adalah:

$$\begin{aligned}
 x' &= x - u.t \\
 y' &= y \\
 z' &= z \\
 t' &= t
 \end{aligned}
 \tag{2.1}$$

Dari persamaan 2.1 dapat dilihat bahwa teori relativitas Newton memisahkan dimensi panjang (ruang) dan waktu. Kedudukan benda terhadap sumbu x berubah terhadap waktu karena fenomena yang diukur hanya bergerak pada sumbu x , sedangkan di koordinat y dan z tetap. Dari persamaan Persamaan

2.1 juga menunjukkan bahwa waktu bersifat mutlak (absolut) sehingga waktu yang diukur oleh P dan P' adalah sama.

Persamaan 2.1 ini kemudian kita turunkan, sehingga transformasi kecepataannya adalah:

$$\begin{aligned} v'_x &= v_x - u \\ v'_y &= v_y \\ v'_z &= v_z \end{aligned} \tag{2.2}$$

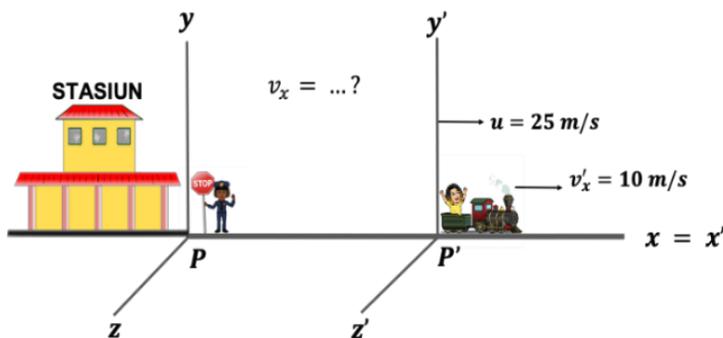
Kecepatan asap menurut pengamat P' dinyatakan dalam v'_x , v'_y , dan v'_z . Persamaan 2.2 menunjukkan penjumlahan kecepatan yang berlaku pada teori relativitas klasik atau teori relativitas Newton. Kecepatan menurut Newton tidak ada yang absolut, karena bergantung pada kerangka acuan pengamat.

Contoh Soal 1

Dengan menggunakan fenomena yang sesuai dengan Gambar 2.1, apabila laju kereta terhadap stasiun adalah 25 m/s dan laju asap meninggalkan kereta adalah 10 m/s. Asumsi saat itu angin sedang bergerak kencang, sehingga asap juga bergerak searah sumbu $x +$. Maka dengan menggunakan persamaan 1.2, berapa besar kecepatan asap yang diukur oleh pengamat P' ?

Jawab

Berikut diberikan sketsa gambar dari pertanyaan diatas.



Karena kecepatan adalah besaran vector, maka pada saat penjumlahan perlu diperhatikan arah dari kecepatan tersebut. Besar kecepatan asap yang diukur dari pengamat P dapat menggunakan persamaan 2.2.

$$v_x = v'_x - u = 10 + 25 = 35 \text{ m/s}$$

Maka kecepatan asap yang diukur oleh P adalah 35 m/s.

Selanjutnya persamaan 2.2 kemudian dapat diturunkan untuk menentukan transformasi percepatan. Apabila kecepatan mengalami perubahan terhadap waktu, maka transformasi percepatannya adalah:

$$\begin{aligned}a'_x &= a_x \\a'_y &= a_y \\a'_z &= a_z\end{aligned}\tag{2.3}$$

Dari persamaan 2.3 terlihat bahwa percepatan menurut P dan P' adalah sama. Hukum Newton akan sama (*invariant*) pada semua kerangka acuan inersia di mana relativitas Newton. Newton berhasil menjelaskan bahwa walaupun kecepatan bersifat relative, namun hukum – hukum geraknya bersifat absolut pada kerangka acuan inersia. Dengan demikian hukum Newton berhasil dijelaskan menggunakan transformasi Galileo.

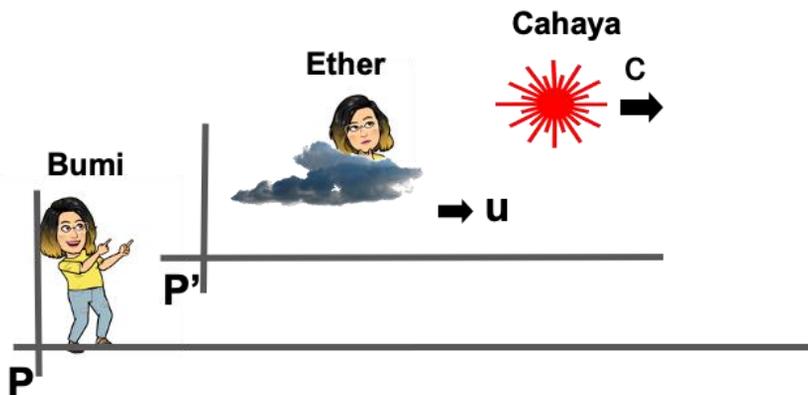
Pertentangan kemudian muncul dari para ahli setelah Maxwell menemukan laju gelombang cahaya di ruang hampa. Maxwell berhasil menurunkan formulasi laju cahaya menggunakan persamaan berikut:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}} = \lambda f\tag{2.4}$$

Penemuan Maxwell ini menimbulkan keguncangan di kalangan ilmuwan saat itu. Konsepsi awal para ilmuwan adalah bahwa gelombang elektromagnetik (cahaya) memerlukan medium untuk merambat. Namun menurut Maxwell ternyata cahaya juga dapat merambat tanpa melalui medium apapun.

Berdasarkan temuan Maxwell, maka ilmuwan kemudian menguji keberadaan *ether* menggunakan teori relativitas Newton. Eter diaanggap seperti sebuah kereta yang membawa gelombang cahaya didalamnya. Eter bergerak dengan kecepatan yang sama dengan laju revolusi bumi terhadap matahari yaitu 30 km/detik. Gelombang cahaya ddi dalam eter juga bergerak terhadap eter. Bisa kita analogikan seperti asap yang keluar dari cerobong kereta. Relativitas kecepatan cahaya pun ikut diterapkan pada Transformasi Galileo (persamaan 2.2).

Gambar 2. 2 Transformasi Galileo pada gelombang cahaya



Menggunakan persamaan 2.2 jika gelombang cahaya dan eter bergerak searah, maka diperoleh besar laju gelombang cahaya menurut pengamat yang diam di Bumi (v_x') adalah $u + c$ dan menurut pengamat yang berada di dalam eter adalah $u - c$. Namun sebaliknya, jika gelombang cahaya berlawanan arah dengan gerak eter, maka laju gelombang cahaya menurut pengamat P adalah sebesar $u - c$ dan $u + c$ menurut pengamat P' .

Hasil temuan ini kembali mengguncangkan kalangan ilmuwan. Percobaan Maxwell menunjukkan laju cahaya pada ruang hampa adalah konstan ($c = 3 \times 10^8$ m/s) dan tidak ditemukan laju cahaya yang melebihi c . Hukum-hukum gerak Newton melalui transformasi Galileo tampak tidak dapat diterapkan (tidak berlaku) untuk menjelaskan gelombang cahaya (gelombang elektromagnetik).

Temuan ini tidak konsisten dengan prinsip invarian yang telah diberikan oleh Galileo. Seharusnya prinsip invarian juga berlaku pada gerak gelombang elektromagnetik yang saat itu dianggap sebagai gelombang mekanik (gelombang yang memerlukan media untuk merambat). Dengan demikian, fisika klasik saat itu belum dapat menjelaskan tentang relativitas gerak gelombang elektromagnetik.

Tugas

1. Apa yang dimaksud dengan pengamat, fenomena, kerangka acuan dan kerangka acuan inersia ? (SKOR : 15)

Jawab

2. Jelaskan kontribusi galileo dan newton pada teori relativitas Einstein!
(SKOR : 15)

Jawab

B. Teori Relativitas Khusus

Teori relativitas khusus adalah teori relativitas yang diformulasikan oleh Einstein. Teori ini lahir dari kegagalan eksperimen Michelson-Morley. Kegagalan ini kemudian dijelaskan oleh Lorentz melalui kontraksi panjang. Einstein kemudian melangkapi penjelasan Lorentz dan memformulasikan postulat relativitas.

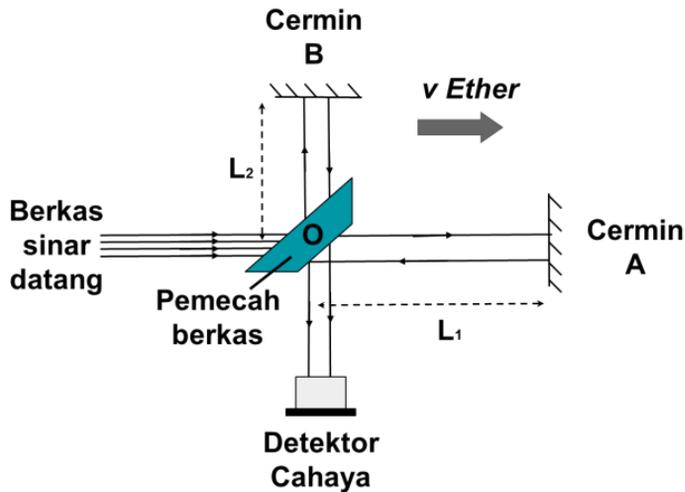
1. Percobaan Michelson-Morley

Melalui percobaan Fresnell tentang polarisasi cahaya, gelombang cahaya diketahui sebagai gelombang transversal. Gelombang transversal adalah gelombang yang memiliki arah rambat tegak lurus dengan arah getarnya. Gelombang transversal biasanya merambat pada zat padat, misalnya gelombang tali dan gelombang yang merambat pada rel kereta api. Maka dari itu, medium *ether* diprediksi juga bersifat seperti zat padat.

Kegagalan transformasi galileo dalam menjelaskan keberadaan *ether* memicu Michelson dan Morley mendesain sebuah alat untuk mengukur kelajuan eter. Alat itu bernama [interferometer](#) (Gambar 2.3) dan ditemukan pada tahun

1997. Prinsip kerja dari alat ini adalah melihat perbandingan laju dua berkas cahaya yang saling tegak lurus. *Ether* dianggap memiliki kecepatan, namun belum diketahui arahnya. Untuk mengetahui arah *ether*, maka berkas cahaya searah sumbu $x +$ akan dianggap searah dengan gerak *ether*.

Gambar 2. 3 Inferometer Michelson-Morley



Untuk membahas hasil percobaan inferometer, laju gelombang cahaya kemudian dianalisis menggunakan penjumlahan vektor komponen.

a. Analisis kecepatan pada arah horizontal

Pada arah horizontal, kecepatan yang dianalisis adalah pada lintasan OA. Panjang lintasan OA dinyatakan dalam L_1 . Kecepatan cahaya pada lintasan OA sekomponen dengan laju *ether* v . Berkas sinar OA memiliki kecepatan $c - v$. Kemudian dipantulkan oleh Cermin A sehingga sinar pantul kembali menuju O dengan laju c . Kecepatan berkas sinar AO adalah $c + v$. Waktu yang ditempuh oleh berkas sinar dengan lintasan O-A-O adalah:

$$\begin{aligned}
 t_1 &= \frac{L_1}{c - v} + \frac{L_1}{c + v} \\
 &= \frac{2L_1c}{c^2 - v^2} = \frac{\frac{2L_1}{c}}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

b. Analisis kecepatan pada arah vertikal

Pada arah horizontal, kecepatan yang dianalisis adalah pada lintasan OB. Panjang lintasan OB dinyatakan dalam L_2 . Berkas sinar datang dari O menuju B kemudian dipantulkan oleh Cermin B sehingga sinar pantul kembali menuju O dengan laju c . Kecepatan cahaya pada lintasan OB tegak lurus dengan komponen laju *ether* v , sehingga penjumlahan vektor kecepatan berkas sinar OB atau BO dapat dinyatakan dengan:

$$c' = \pm c - v \quad 2.5$$

Dan besarnya:

$$c' = \sqrt{c^2 - v^2} \quad 2.6$$

Waktu yang ditempuh oleh berkas sinar dengan lintasan O-B-O adalah:

$$t_2 = \frac{\frac{2L_2}{c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad 2.7$$

Selisih waktu tempuh lintasan O-A-O dan O-B-O adalah

$$t_1 - t_2 = \frac{\frac{2L_1}{c}}{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2} - \frac{\frac{2L_2}{c}}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} \quad 2.8$$

Dari selisih waktu, Michelson dan Morley mengharapkan timbulnya pergeseran frinji (pola garis) yang diamati di detektor sinar. Tidak puas dengan hasil ini, Michelson dan Morley melakukan percobaan ini siang dan malam serta di lokasi yang berbeda-beda. Namun hasilnya selalu menunjukkan bahwa tidak terjadi perbedaan waktu antara lintasan horizontal dan vertikal.

Berdasarkan kegagalan percobaan ini, Michelson dan Morley menyimpulkan bahwa: gelombang cahaya memiliki kecepatan yang absolut pada kerangka acuan inersia apa pun. Michelson dan Morley juga berusaha menjelaskan bahwa konsepsi tentang eter itu keliru. Namun penjelasan ini banyak mendapat pertentangan dari ilmuwan lain yang menanggapi bahwa interferometer tidak cukup sensitif dalam menangkap keberadaan *ether*.

Hendrik Antoon Lorentz, kemudian mengusulkan gagasannya untuk menjelaskan kegagalan Michelson-Morley. Lorentz mengusulkan terjadinya pemendekan pada salah satu kaki alat pengukuran Michelson. Sehingga kecepatan cahaya akan terukur sama ke semua arah. Usul ini kemudian disebut sebagai transformasi Lorentz, yang merupakan awal lahirnya teori relativitas Einstein.

2. Postulat-postulat Einstein

Einstein menjelaskan kebenaran persamaan Maxwell namun dengan ikut melibatkan teori relativitas Newton menggunakan transformasi Lorentz. Einstein menggunakan gagasan Lorentz tentang pemendekan panjang yang terjadi pada interferometer Michelson-Morley. Namun ia tidak menggunakan penjelasan Lorentz dalam mendeskripsikan alasan terjadinya pemendekan itu, karena Lorentz masih menggunakan konsepsi “hembusan eter” sebagai penyebabnya.

Einstein menggunakan penyelesaian matematis yang ditawarkan dari Poincare. Poincare menyajikan penyelesaian dengan menyatakan bahwa ruang dan waktu saling terkait, tidak terpisah seperti yang dijelaskan Newton. Einstein mengajukan postulatnya tentang relativistik di usia ke 26 tahun 1905. Postulat ini diusulkan melalui judul makalah, “*On the Electrodynamics of Moving Bodies*” pada jurnal *Annalen der Physik*. Ada dua postulat utama yang disampaikan Einstein saat itu, diantaranya

a. Postulat I

Bunyi postulat I adalah: “Hukum-hukum fisika adalah invarian untuk setiap kerangka acuan inersia”. Postulat I ini juga disebut sebagai prinsip relativitas. Postulat I ini mendukung prinsip invarian yang diajukan oleh Galileo dan tertuang kembali pada teori relativitas Newton. Bunyi postulat I inilah yang menyebabkan teori relativitas Einstein lebih mudah diterima para ilmuwan saat itu.

b. Postulat II

Bunyi postulat II adalah: “Laju cahaya di ruang hampa adalah konstan pada semua kerangka acuan inersia, tidak bergantung sumber dan pengamatnya”. Postulat II juga disebut sebagai sifat universalitas laju cahaya. Pada postulat II ini, Einstein mendukung penemuan Maxwell tentang laju cahaya yang konstan di ruang hampa. Melalui postulat II ini Einstein menyetakan dengan tegas bahwa konsepsi *ether* adalah keliru dan *ether* itu tidak ada.

3. Transformasi Lorentz

Transformasi atau alih bentuk Lorentz adalah suatu bentuk matematis untuk menyatakan besaran-besaran fisis dari pengamat yang berbeda-beda. Transformasi Lorentz sebagaimana namanya, diajukan oleh Lorentz pada tahun 1904 untuk menjelaskan kegagalan percobaan Michelson-Morley. Sebagaimana telah disebutkan sebelumnya, Lorentz mengajukan gagasan terjadinya kontraksi panjang. Namun kontraksi panjang ini oleh Lorentz, masih dihubungkan dengan keberadaan *ether*.

Setahun kemudian, Einstein menurunkan persamaan-persamaan ini secara independen. Einstein menurunkan persamaan pada transformasi Lorentz menggunakan transformasi Galileo yang ia koreksi. Einstein mengoreksi konsepsi kecepatan bersifat relatif pada transformasi Galileo, konsepsi ini tidak sesuai dengan Postulat II. Bentuk koreksi Einstein terhadap transformasi Galileo adalah bahwa ruang dan waktu tidak bersifat mutlak.

a. Koreksi Einstein dalam bentuk Transformasi Lorentz

Einstein menjelaskan bahwa kecepatan cahaya bersifat universal dikarenakan terjadinya kontraksi panjang dan pemuluran waktu. Gejala ini timbul pada objek yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Koreksi Einstein tentang panjang dan waktu yang relatif diberikan oleh:

$$x' = \gamma(x - u \cdot t) \quad 2.9.a$$

$$y' = y \quad 2.9.b$$

$$z' = z \quad 2.9.c$$

Persamaan 2.9a menunjukkan perubahan jika dibandingkan dengan persamaan 2.1. Persamaan 2.9.a menunjukkan gejala perbedaan hasil pengukuran panjang oleh P dan P' . Variabel gamma γ menunjukkan sebuah faktor pengali yang muncul saat terjadi transformasi gerak yang kemudian disebut sebagai **faktor Lorentz**.

Untuk menurunkan formulasi γ , maka besaran waktu juga perlu dimodifikasi. Bentuk modifikasi persamaan waktu yang diberikan oleh Einstein adalah:

$$t' = \gamma(t - \delta x) \quad 2.10$$

Variabel delta δ muncul sebagai faktor pengali yang muncul saat terjadi transformasi pada koordinat waktu. Transformasi Lorentz untuk persamaan 2.9.a dengan persamaan 2.10 adalah:

$$x = \gamma(x' + u \cdot t') \quad 2.11a$$

$$t = \gamma(t' + \delta x') \quad 2.11b$$

Dari kedua persamaan ini juga menunjukkan relativitas ruang (panjang) akan selalu muncul bersamaan dengan relativitas waktu.

Selanjutnya, Einstein menggunakan koordinat bola dalam melakukan resultan posisi dari fenomena yang diamati. Koordinat bola digunakan karena gelombang elektromagnetik merambat ke segala arah.

$$x'^2 + y'^2 + z'^2 = c^2 t^2 \quad 2.12$$

Kemudian masukkan persamaan 2.9. a dan persamaan 2.10 kedalam persamaan 2.12 dan diperoleh parameter γ dan δ yang dapat dinyatakan sebagai:

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad 2.13. a$$

$$\delta = \frac{u}{c^2} \quad 2.13. b$$

Dengan demikian diperoleh suatu formulasi transformasi baru untuk ruang dan waktu yang memenuhi **teori relativitas Einstein**, yaitu:

$$x' = \frac{x - u \cdot t}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad 2.14.a$$

$$y' = y \quad 2.14.b$$

$$z' = z \quad 2.14.c$$

$$t' = \frac{t - \frac{u}{c^2} x}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad 2.14.d$$

Dengan $\left(\frac{u}{c}\right)^2 = \beta$ selanjutnya disebut parameter kecepatan. Persamaan 2.14 adalah persamaan yang menetapkan transformasi Lorentz. Inverse dari transformasi tersebut dapat dilakukan dengan menukar variabel yang memiliki “aksen” dengan “bukan aksen” dan menukar u dengan $-u$. Bentuk inverse transformasi Lorentz adalah:

$$x = \frac{x' + u \cdot t}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad 2.15.a$$

$$y = y' \quad 2.15.b$$

$$z = z' \quad 2.15.c$$

$$t = \frac{t' + \frac{u}{c^2}x}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad 2.15.d$$

Einstein kemudian melakukan pengujian prinsip invarian transformasi Lorentz pada teori relativitas Newton. Einstein memasukkan kecepatan pengamat P' dengan besar yang jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya di ruang hampa ($u \ll c$). Nilai kecepatan yang kecil ini dimasukkan ke persamaan 2.14.a dan persamaan 2.14.d. ternyata hasil yang diperoleh adalah persamaan transformasi Lorentz berubah menjadi transformasi Galileo. Dengan demikian, transformasi Lorentz berlaku pada kerangka acuan inersial manapun.

b. Relativistik kecepatan berdasarkan transformasi Lorentz

Einstein menjelaskan bagaimana kecepatan cahaya tidak akan melebihi c dengan menerapkan relativitas ruang dan waktu yang sudah diperoleh pada persamaan 2.14. Melalui diferensial, kecepatan relatif menurut teori relativitas einsten diberikan oleh:

$$dx' = \frac{dx - u \cdot t}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad 2.16.a$$

$$dy' = dy \quad 2.16.b$$

$$dz' = dz \quad 2.16.c$$

$$dt' = \frac{dt - \frac{u}{c^2}dx}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \quad 2.16.d$$

Kecepatan kemudian diperoleh dengan membagi persamaan 2.16.a dengan persamaan 2.16.d, sehingga diperoleh:

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - u \cdot dt}{dt - \frac{u}{c^2}dx} \quad 2.17$$

Untuk mempermudah penyederhanaan rumus, persamaan 2.17 dibagi dengan dt' dan mengganti $\frac{dx'}{dt'}$ dengan v_x' , sehingga:

$$v_x' = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u \cdot v_x}{c^2}} \quad 2.18$$

Dari persamaan 2.18, kita dapat menuliskan relativitas kecepatan pada sumbu y dan sumbu z

$$v_y' = \frac{v_y - u}{1 - \frac{u \cdot v_y}{c^2}} \quad 2.19$$

$$v_z' = \frac{v_z - u}{1 - \frac{u \cdot v_z}{c^2}} \quad 2.20$$

Dari persamaan 2.18, persamaan 2.19, dan persamaan 2.20 kemudian dapat diperoleh kaidah transformasi untuk kecepatan yang dinyatakan dengan:

$$v'^2 = c^2 - c^2 \frac{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right) \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)}{\left(1 - \frac{u \cdot v_x}{c^2}\right)^2} \quad 2.21$$

Persamaan 2.21 kemudian dapat kembali diuji menggunakan prinsip invarian. Jika $v = c$ maka berlaku $v' = c$, maka hasil ini sesuai dengan postulat II Einstein yaitu universalitas kecepatan cahaya di ruang hampa. Dengan kata lain untuk semua kerangka acuan inersial, kecepatan cahaya di ruang hampa adalah c .

Namun jika laju P' lebih kecil dari kecepatan cahaya atau $u \ll c$ sehinggalah dapat diabaikan, maka transformasi Lorentz akan berubah bentuk menjadi transformasi Galileo. Dan saat kecepatan P' mendekati c , maka pembahasan masalah mekanika tetap dalam transformasi Lorentz.

Contoh Soal 2

Sebuah pesawat tempur melintasi Bumi dengan kelajuan $0,80 c$ sambil menembakkan misil (peluru) searah dengan gerakannya (lihat gambar) . Misil tersebut bergerak dengan kecepatan $0,6 c$ searah terhadapnya . Berapa kecepatan misil jika diukur oleh pengamat di Bumi ?

Jawab:

Kelajuan pesawat tempur terhadap bumi adalah $= 0,8$. Pengamat yang beradai di pesawat tempur adalah pengamat yang bergerak (P'). Sementara pengamat di Bumi adalah pengamat diam (P).

Kelajuan misil terhadap pesawat tempur dinyatakan sebagai v' , dengan $v' = +0,6 c$. Tanda $+$ digunakan karena misil memiliki arah kecepatan yang sama dengan pesawat tempur. Besar kecepatan misil menurut pengamat di Bumi

(v_x) dapat ditentukan menggunakan persamaan 1.18 dengan menganggap pesawat tempur dan misil sama bergerak searah sumbu x +

$$v_x' = \frac{v_x - u}{1 - \frac{u \cdot v_x}{c^2}} \quad \text{dalam bentuk invers menjadi} \quad v_x = \frac{v_x' + u}{1 + \frac{u \cdot v_x'}{c^2}}$$

Maka

$$v_x = \frac{(0,6 c) + (0,8 c)}{1 + \frac{(0,6 c) \cdot (0,8 c)}{c^2}} = \frac{1,4 c}{1,48} = 0,95 c$$

Besar kecepatan misil yang diukur oleh pengamat di Bumi adalah sebesar $0,95 c$ (tidak lebih besar dari c).

Sebagai perbandingan, jika kamu menggunakan teori relativitas Newton maka diperoleh nilai $1,4 c$. Tentu hasil ini keliru, karena tidak ada kecepatan yang lebih besar dari c .

Tugas

1. Tuliskan kembali postulat Einstein tentang relativitas dan jelaskan maknanya !

Jawab:

2. Turunkanlah secara detil hingga memperoleh persamaan tentang faktor Lorentz γ , mulai dari persamaan 1.9 hingga persamaan 1.13

Jawab

3. Sebuah pesawat ruang angkasa mendekati bumi dengan kecepatan $0,3 c$. Pesawat tersebut kemudian menembakkan roket ke arah bumi dengan laju $0,6 c$ relatif terhadap pesawat. Hitunglah laju roket menurut acuan di Bumi.

Jawab

4. Gejala- Gejala Konsekuensi Transformasi Lorentz

Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, transformasi Lorentz akan menimbulkan gejala relativistik berupa kontraksi panjang dan pemuluran waktu. Dua gejala ini ternyata menimbulkan gejala – gejala berikutnya, diantaranya simultanitas, paradoks kembar, relativitas momentum, dan relativitas energi. Bentuk gejala-gejala yang lain ini akan dibahas pada kegiatan pembelajaran 2. Saat ini kita akan fokus pada gejala kontraksi panjang dan pemuluran (dilatasi) waktu.

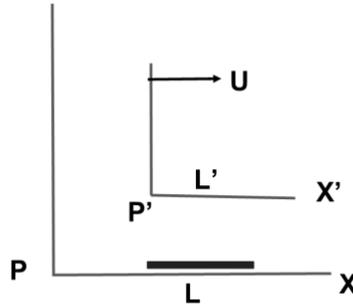
a. Kontraksi Panjang

Gagasan kontraksi panjang yang diusulkan oleh Lorentz diterima dengan baik oleh Einstein. Dengan catatan, penjelasan Lorentz mengenai gagasannya sendiri bukan hal yang diterima baik oleh Einstein saat itu. Einstein menyetujui gagasan mengenai kontraksi panjang melalui intuisinya.

Ia mencoba menganalogikan saat dirinya menaiki kereta menjauhi sebuah menara jam. Saat berada di dalam kereta, ia mengamati bangunan-bangunan dibelakangnya menjadi lebih pendek. Pemendekan (kontraksi) panjang itu pasti akan terjadi pada transformasi gerak, apalagi jika ia sedang bergerak dengan laju mendekati cahaya.

Lorentz menjelaskan bahwa pengukuran panjang sebuah benda bersifat relatif, bergantung pada kerangka acuan pengamatnya. Sebuah batang dengan diletakkan searah sumbu x , kemudian diamati oleh dua pengamat yang berbeda (Gambar 2.4). Panjang batang itu dinyatakan dalam L jika diukur oleh pengamat yang diam (P). Namun oleh pengamat yang bergerak (P'), panjang batang tersebut adalah L' .

Gambar 2. 4 Kontraksi (pemendekan) panjang pada Transformasi Lorentz



Oleh pengamat P , ujung batang diukur mulai dari titik x_1 hingga x_2 pada waktu t_1 hingga t_2 . Waktu t_1 hingga t_2 tidak harus sama, karena letak titik-titik tersebut tidak berubah posisinya pada kerangka P . Sementara oleh pengamat P' , pengukuran terjadi di titik x'_1 dan x'_2 yang harus diukur pada waktu yang sama, yaitu $t'_1 = t'_2$. Kontraksi panjang kemudian dapat diformulasikan menggunakan transformasi Lorentz, sebagai berikut:

$$x_1 = \gamma(x'_1 + u \cdot t'_1) \quad 2.22.a$$

$$x_2 = \gamma(x'_2 + u \cdot t'_2) \quad 2.22.b$$

Kemudian masukkan $t'_1 = t'_2 = t'$ sehingga jika persamaan 2.22.a dan 2.22.b diselisihkan kemudian akan diperoleh:

$$x_1 - x_2 = \gamma(x'_1 - x'_2) \quad 2.23$$

Karena $x_1 - x_2$ adalah L dan $x'_1 - x'_2$ adalah L' , maka persamaan 2.23 dapat dituliskan sebagai

$$L = \gamma \cdot L' \quad 2.24$$

Atau

$$L' = \frac{L}{\gamma} = L_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \quad 2.25$$

Keterangan:

L' : panjang benda yang diukur oleh pengamat bergerak

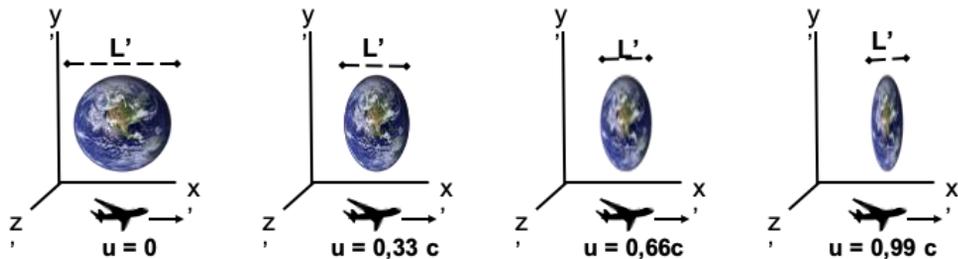
L_0 : panjang benda yang diukur oleh pengamat yang diam

u : kecepatan relatif P' terhadap P

c : kecepatan cahaya

Panjang L selanjutnya dapat ditulis sebagai L_0 untuk menunjukkan sebagai panjang sejati atau *proper length*. Panjang sejati L_0 adalah panjang yang diukur oleh pengamat yang berada dalam keadaan diam (P). Sementara L' adalah panjang relatif, yaitu panjang yang diukur oleh pengamat yang bergerak (P').

Gambar 2. 5 Pengerutan diameter bumi terhadap kecepatan pengamat bergerak

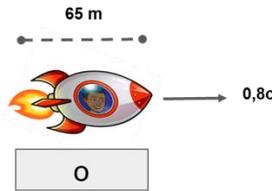


Berdasarkan persamaan 2.24 karena u selalu lebih kecil dari c , maka panjang relatif (L') akan lebih pendek dari pada panjang sejati. Hal ini menunjukkan terjadinya kontraksi / pemendekan / penyusutan batang pada arah geraknya. Kontraksi panjang berlaku secara umum, hasil pengukuran oleh pengamat yang bergerak akan selalu lebih kecil dari pada pengamat yang diam. Dengan demikian besaran panjang bukanlah suatu besaran yang bernilai eksak (pasti) melainkan relatif.

Contoh Soal 3

Seorang petugas di stasiun ruang angkasa (O) berada tepat di tengah menara pengawas yang memiliki panjang $d_0 = 65\text{m}$. Sebuah roket kemudian melewatinya dengan kelajuan $0,8 c$ paralel terhadap batas menara pengawas (Gambar 2.7). Petugas tersebut kemudian mengamati roket tersebut dari ujung ke ujung secara simultan dan mendapati panjang roket adalah sama dengan panjang menara pengawas tersebut.

Gambar 2. 6 Gerak pesawat terhadap Stasiun Ruang Angkasa



- Berapakah panjang sejati roket?
- Menurut pilot roket (O'), berapakah panjang menara pengawas?

Jawab:

a. Pengukuran panjang roket yang dilakukan petugas adalah panjang relatif, karena petugas bergerak relatif terhadap roket. Besar kecepatan petugas terhadap roket adalah $u = 0,8 c$. Dengan menggunakan persamaan 1.24, maka besar panjang sejati roket adalah

$$L_0 = \frac{L'}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} = \frac{65}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2}} = 108 \text{ m}$$

Panjang sejati roket adalah 108 m, panjang ini harus diukur oleh pengamat yang diam, misalnya diukur oleh pilot roket itu sendiri saat ia dalam keadaan diam.

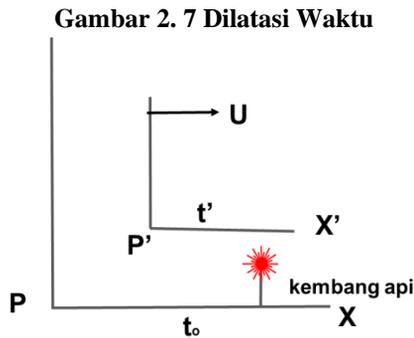
b. Menurut pilot roket, pos pengamatan bergerak dengan kecepatan $u = 0,8 c$ terhadapnya. Dengan demikian, hasil pengukuran panjang pos pengamatan yang ia lakukan adalah panjang relatif. Sementara petugas pos berada dalam keadaan diam terhadap pos pengamatan. Maka hasil pengukuran panjang yang dilakukan petugas adalah panjang sejati (*proper length*) atau $L_0 = 65\text{m}$.

Maka panjang menara pengawas menurut pilot roket adalah :

$$L' = L_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} = 65 \text{ m} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2} = 65 \text{ m} \cdot 0,6 = 39 \text{ m}$$

b. Dilatasi Waktu

Dilatasi waktu atau pemuluran waktu adalah sebuah gejala relativistik yang menyebabkan besaran waktu menjadi mulur atau mengembang berdasarkan pengamat yang bergerak. Einstein menjelaskan bahwa pada besaran waktu bukanlah besaran absolut. Waktu adalah relatif, bergantung pada pengamatnya. Untuk menjelaskan gejala dilatasi waktu (Gambar 1.6), kita misalkan fenomena kembang api, mulai dari saat menyala hingga padam, diamati oleh pengamat diam (P) dan pengamat yang bergerak dengan kelajuan konstan (P').



Sesaat sebelum memulai pengukuran, kedua pengamat saling menyinkronkan *stopwatch*-nya. Pengamat P berhasil mengamati durasi kembang api dari waktu t_1 hingga t_2 . Karena kembang api tidak bergerak terhadap pengamat P , maka berlaku $x_1 = x_2$. Pengamat P' berhasil mengukur kembang api mulai dari menyala hingga padam terjadi pada t'_1 hingga t'_2 . Karena pengamat P' adalah pengamat yang bergerak, maka menurut P' kembang api tersebut mengalami perubahan koordinat dari x'_1 hingga x'_2 .

Transformasi Lorentz yang berlaku pada fenomena ini adalah:

$$t'_1 = \gamma \left(t_1 - \frac{u}{c^2} x_1 \right) \quad 2.26.a$$

$$t'_2 = \gamma \left(t_2 - \frac{u}{c^2} x_2 \right) \quad 2.26.b$$

Persamaan 2.26.a dan 2.26.b kemudian diselisihkan, sehingga diperoleh

$$t'_1 - t'_2 = \gamma \left((t_1 - t_2) - \frac{u}{c^2} (x_1 - x_2) \right)$$

$$\Delta t' = \gamma \left((t_1 - t_2) - \frac{u}{c^2} \Delta x \right)$$

Karena $x_1 - x_2 = 0$, maka

$$t'_1 - t'_2 = \gamma (t_1 - t_2) \quad 2.27$$

Selanjutnya $t'_1 - t'_2$ dinyatakan sebagai $\Delta t'$ dan $t_1 - t_2$ dinyatakan sebagai Δt_0 . Simbol $\Delta t'$ menunjukkan waktu relatif dan Δt_0 adalah waktu proper atau waktu sejati. Waktu relatif adalah waktu yang diukur dengan menggunakan dua *stopwatch*, yaitu *stopwatch P* dan *P'*. Sementara waktu *proper* adalah waktu yang diukur dari *stopwatch P* saja. Selang waktu proper Δt_0 akan lebih pendek dari $\Delta t'$, karena

$$\Delta t' = \gamma \cdot \Delta t_0 = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \quad 2.28$$

dengan:

- Δt_0 : selang waktu yang diukur oleh pengamat yang diam terhadap kejadian
- Δt : selang waktu yang diukur oleh pengamat yang bergerak terhadap kejadian,
- u : kecepatan relatif pengamat bergerak terhadap kejadian yang diamati
- c : kecepatan cahaya

Contoh Soal 4

Seorang astronot melakukan perjalanan ke luar angkasa. Menurut astronot, pesawatnya bergerak dengan kecepatan $0,6 c$ dan baru sampai di sebuah pos pengamatan di luar angkasa setelah 10 tahun. Setelah sampai, astronot langsung melakukan putaran balik dan pulang ke bumi. Astronot tersebut mengukur perjalanan pulangnya juga terjadi dengan kecepatan sama besar dan dalam kurun waktu 10 tahun. Berapa lamakah waktu pulang-pergi astronot tersebut menurut pengamat di bumi?

Jawab:

Perhatikan, pengukuran waktu ini dilakukan oleh dua pengamat, yaitu pengamat di bumi dan pengamat di dalam pesawat (astronot itu sendiri).

Perjalanan astronot dapat dibagi menjadi dua, yaitu dari bumi ke pos pengamatan dan dari pos pengamatan kembali lagi ke bumi.

Hasil pengukuran waktu oleh astronot adalah 10 tahun dari bumi ke pos pengamatan dan 10 tahun dari pos pengamatan ke bumi. Pengukuran waktu yang dilakukan oleh astronot adalah waktu sejati (Δt_0), karena astronot dapat dianggap tidak bergerak terhadap pesawatnya. Sementara waktu yang diukur oleh pengamat di bumi adalah waktu relatif (Δt).

Karena pengamat di Bumi melakukan pengukuran waktu relatif, maka waktu yang diukur oleh pengamat di Bumi akan lebih besar dibandingkan Δt_0 . Besar interval waktu relatif dalam perjalanan menuju pos pengamatan dapat dihitung menggunakan persamaan 2.28, yaitu

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$
$$\Delta t' = \frac{10}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,6c}{c}\right)^2}} = \frac{10}{0,8} = 12,5 \text{ tahun}$$

Saat perjalanan pulang ke bumi, astronot mengalami keadaan dan data yang sama, maka perjalanan pulang juga memerlukan waktu 12,5 tahun. Dengan demikian total waktu pulang pergi astronot menurut pengamat di Bumi adalah $\Delta t'_{total} = (2)(12,5 \text{ tahun}) = 25 \text{ tahun}$

Artinya, menurut orang di Bumi astronot tersebut telah bepergian selama 25 tahun. Sementara menurut astronot itu sendiri, ia hanya bepergian selama 10 tahun.

Tugas 3

1. Sebuah kawat lurus dengan panjang L berada pada bidang xy membentuk sudut 45° terhadap sumbu x . Berapakah panjang batang dan bagaimana kedudukannya terhadap pengamat yang bergerak dengan laju u sejajar terhadap sumbu x ?

Jawab:

2. Jika diameter galaksi adalah 10^5 tahun cahaya. Maka :

a. Berapa besar diameter menurut partikel sinar kosmis yang bergerak dengan laju relatif $=0,99$? (SKOR : 10)

Jawab

b. Berapa waktu yang diperlukan oleh partikel untuk menempuh jarak tersebut menurut arloji yang di-“bawa” oleh partikel? (SKOR : 10)

Rangkuman

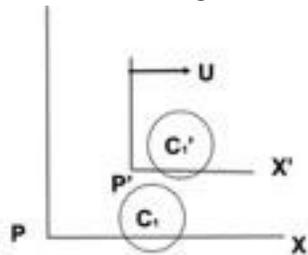
1. Kerangka acuan inersia adalah kerangka acuan yang memberlakukan teori relativitas khusus.

2. Transformasi Galileo berlaku pada hukum-hukum Newton, namun tidak pada hukum-hukum elektromagnet.
3. Kegagalan percobaan Michelson-Morley membuktikan bahwa *ether* itu tidak ada.
4. Postulat postulat Einstein adalah hukum yang berlaku pada teori relativitas khusus.
 - a. Postulat I : Hukum-hukum fisika bersifat sama pada semua kerangka acuan inersia.
 - b. Postulat II : Laju cahaya di ruang hampa adalah konstan, yaitu sebesar $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$
5. Transformasi Lorentz berlaku pada gelombang elektromagnetik.
6. Gejala relativitas yang timbul sebagai konsekuensi transformasi Lorentz adalah
 - a. Kontraksi panjang
 - b. Dilatasi waktu

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Perhatikan gambar dibawah ini



Terdapat dua jam dalam kerangka stasioner S dan kerangka bergerak S'. Kedua jam tersebut saling disinkronkan sebelum mengukur fenomena yang sama. Pernyataan yang tepat saat jam C_1' melewati C_1 adalah ...

- A. Jam C_1' menunjukkan waktu yang sama dengan C_1
- B. Jam C_1' menunjukkan waktu yang lebih awal dari C_1
- C. Jam C_1 menunjukkan waktu yang lebih awal dari C_1'
- D. Jam C_1' menunjukkan waktu proper (waktu sejati)
- E. Tidak dapat ditarik kesimpulan

2. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Hukum- hukum fisika adalah sama pada semua kerangka acuan inersia.
 - (2) Kecepatan cahaya pada ruang hampa bersifat relatif.
 - (3) Kecepatan cahaya pada ruang hampa memiliki nilai c yang sama pada semua kerangka acuan inersia.
 - (4) hukum-hukum fisika adalah sama pada semua kerangka acuan
- Pernyataan yang benar tentang postulat Einstein adalah ...

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. semua benar

3. Pernyataan yang benar untuk menjelaskan postulat Einstein adalah...

- A. gerak gelombang cahaya dipengaruhi oleh *ether*
- B. panjang adalah besarn yang mutlak
- C. waktu adalah besaran yang bergantung pada pengamatnya
- D. ruang dan waktu terpisah
- E. kecepatan cahaya bergantung pada pengamat

4. Dua pesawat bergerak relatif terhadap pengamat di Bumi dengan kelajuan yang sama tapi berlawanan arah. Perbandingan laju relatif pesawat terhadap satu sama lain adalah 3 : 2 terhadap laju pesawat kedua menurut pengamat di Bumi. Besar kecepatan pesawat pertama terhadap Bumi adalah ...

- A. $\frac{1}{2} c$
- B. $\frac{2}{3} c$
- C. $\frac{1}{2} \sqrt{2} c$
- D. $\frac{1}{2} \sqrt{3} c$
- E. $\frac{1}{3} \sqrt{3} c$

5. Seorang astronot mengamati pesawat angkasa yang berada dalam keadaan diam relatif memiliki penampang berbentuk lingkaran dengan jari-jari R . Apabila kemudian pesawat angkasa tersebut bergerak mendekati astronot dengan kelajuan relatif $0,8 c$, maka penampang yang akan tampak adalah berbentuk ...

- A. lingkaran dengan jejari $< R$
- B. lingkaran dengan jejari $= R$
- C. oval dengan diameter kecil $< R$ dan diameter besar $> R$
- D. oval dengan diameter besar $> R$ dan diameter kecil $= R$

E. Lingkaran dengan jejari $> R$

6. Perbandingan dilatasi waktu untuk sistem yang bergerak dengan kecepatan $0,6 c$ dengan sistem yang bergerak dengan kecepatan $0,3 c$ adalah...

- A. 1 : 2
B. 2 : 1
C. 3 : 5
D. 1 : 8
E. 8 : 1

7. Perhatikan pernyataan berikut ini

- (1) interval waktu sejati selalu terpendek.
- (2) interval waktu relatif selalu terpendek
- (3) ruang dan waktu tidak dapat dipisahkan.
- (4) ruang dan waktu dapat dipisahkan koordinatnya.

Pernyataan yang benar tentang konsep pemuluran waktu berdasarkan transformasi Lorentz adalah ...

- A. (1) (2) dan (3)
B. (1) dan (3)
C. (2) dan (4)
D. (4) saja
E. semua benar

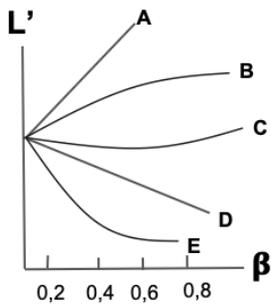
8. Pada sebuah dinding tegak terdapat gambar sebuah persegi dengan panjang sisi $3,00$ m. Apabila gambar tersebut diamati oleh orang yang berada di dalam pesawat yang bergerak sejajar dengan dinding dengan kecepatan $0,60 c$. keliling persegi yang diamati oleh orang dalam pesawat adalah

- A. 1,80 m
B. 2,40 m
C. 10,8 m
D. 12,0 m
E. 14,4 m

9. Perhatikan gambar berikut.

Kurva manakah yang paling baik dalam menjelaskan hubungan antara panjang relatif terhadap parameter kecepatan yang dinyatakan dalam

$$\beta = \left(\frac{v}{c}\right)^2$$



- A. Garis A
 B. Garis B
 C. Garis C
 D. Garis D
 E. Garis E

10. Apabila pengukuran panjang sebuah batang sebesar sepertiga panjang sejatinya, maka besar parameter kecepatan yang dinyatakan dalam $\left(\frac{v}{c}\right)^2$ adalah ...

- A. $\frac{1}{3}$
 B. $\frac{3}{1}$
 C. $\frac{1}{9}$
 D. $\frac{8}{9}$
 E. $\frac{10}{9}$

Essay

1. jelaskan pengertian kerangka acuan inersia.

Jawab:

2. jelaskan secara singkat sejarah lahirnya teori relativitas einstein berdasarkan kegagalan transformasi galileo dalam memformulasikan kecepatan gelombang elektromagnetik dari dua kerangka acuan yang berbeda.

Jawab

3. jelaskan secara singkat sejarah lahirnya teori relativitas einstein berdasarkan kegagalan percobaan Michelson.

Jawab

4. jelaskan definisi dari teori relativitas khusus

5. Seorang astronot melakukan perjalanan ke sebuah planet yang jauhnya 200 tahun cahaya dari bumi. Rencananya astronot akan langsung melakukan putaran balik sesaat setelah sampai di planet tersebut. Astronot ingin agar perjalanan pulangperginya hanya berlangsung selama 10 tahun. Berapa besar kecepatan pesawat astronot ?

Jawab

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik

Referensi

Beiser, Arthur. (2003). Concepts of Modern Physics 6th Edition. Mc Graw Hill.
Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). Fisika Dasar 1 Edisi 7 Jilid 3. Jakarta: Erlangga.
Kanginan, Marthen. (2018). Fisika untuk SMA/MA Kelas XII. Erlangga: Jakarta.
Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). Modern Physics Third Edition (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
Kusminarto (2011). Esensi Fisika Modern. Andi: Yogyakarta.
Surya, Yohanes. (2003). Fisika itu Mudah SMU 3C. Bina Sumber Daya MIPA: Jakarta.

- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013).
Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition (Third).
Boston: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). Modern Physics - Fifth Edition. In
Modern Physics Sixth Edition. W.H.Freeman and Company: New
York.

Kegiatan Pembelajaran 2 GEJALA-GEJALA RELATIVITAS KHUSUS (PART 1)

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
1. Mahasiswa dapat menjelaskan konsep relativitas yang diperoleh dari paradoks kembar	a. Mahasiswa menjelaskan fenomena simultanitas yang terjadi pada paradoks kembar b. Mahasiswa dapat mengaplikasikan persamaan dan konsep pemuluran waktu untuk menjelaskan paradox kembar
2. Mahasiswa dapat menjelaskan eksperimen-eksperimen yang memverifikasi kebenaran teori relativitas khusus	a. Mahasiswa dapat menghitung umur muon berdasarkan eksperimen muon. b. Mahasiswa dapat melakukan perhitungan umur bintang menggunakan teori relativitas khusus. c. Mahasiswa dapat mengaplikasikan konsep pemuluran waktu pada eksperimen pengukur waktu atomic.

Uraian Materi

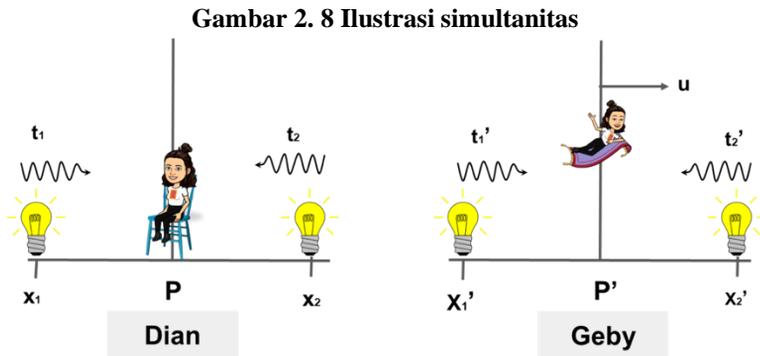
A. Simultanitas

Simultanitas atau keserempakan menurut teori relativitas adalah sebuah fenomena yang menjadi relatif. Mungkin gagasan ini agak sulit diterima, bagaimana sebuah simultanitas bisa dikatakan tidak simultan?

1. Relativitas Keserempakan / Simultanitas

Timbulnya kontraksi panjang dan pemuaiian waktu, maka dua fenomena yang terjadi bersamaan menurut seorang pengamat belum tentu terjadi secara bersamaan (simultan) juga oleh pengamat yang lain. Untuk memahaminya, maka kita pelajari dengan seksama.

Dian dan Geby sama-sama mengamati dua bola lampu yang dihidupkan bersamaan. Dian adalah pengamat diam (P) dan Geby adalah pengamat bergerak (P'). Geby bergerak dengan kecepatan konstan pada arah sumbu x^+ . Baik Dian maupun Geby sama-sama berdiri tepat diantara dua bola lampu (Gambar 2.8)



Semua bola lampu kemudian dinyalakan bersamaan. Menurut Dian, kedua bola lampu akan terlihat menyala secara bersamaan. Namun menurut Geby, ia akan melihat bola lampu di sebelah kanannya lah yang menyala terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan Geby bergerak menuju bola lampu di sebelah kanan.

Semua bola lampu kemudian dinyalakan bersamaan. Menurut Dian, kedua bola lampu akan terlihat menyala secara bersamaan. Namun menurut Geby, ia akan melihat bola lampu di sebelah kanannya lah yang menyala terlebih dahulu. Hal ini dikarenakan Geby bergerak menuju bola lampu di sebelah kanan.

Terdapat dua fenomena (fenomena 1 dan fenomena 2) yang masing-masing terjadi pada kerangka P dan P' . Menurut pengamat yang diam (P), fenomena 1 dan 2 masing-masing terjadi di koordinat x_1 dan x_2 dan pada waktu t_1 dan t_2 . Menurut pengamat yang bergerak (P'), fenomena 1 dan 2 masing-masing terjadi di koordinat x'_1 dan x'_2 dan pada waktu t'_1 dan t'_2 .

Selang waktu yang terjadi antara fenomena 1 dan 2 oleh pengamat P dinyatakan dengan $\Delta t_0 = t_1 - t_2$. Sedangkan menurut pengamat P' selang waktu antar fenomena 1 dan 2 dinyatakan dalam $\Delta t' = t'_1 - t'_2$. Fenomena 1 dan 2 dapat dikatakan simultan jika $\Delta t_0 = 0$. Adapun untuk selang waktu relatif memenuhi transformasi Lorentz yang dinyatakan dengan:

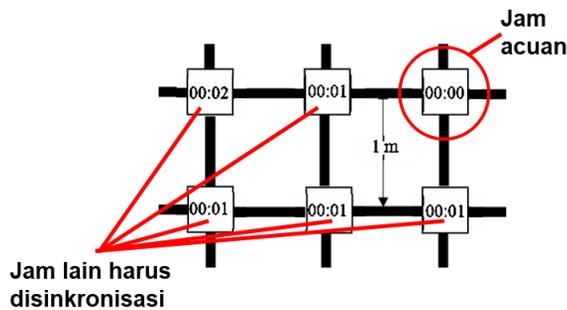
$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{u}{c^2} \Delta x \right) \quad 2.29$$

Apabila dua fenomena tersebut terjadi pada kerangka yang sama, maka dua fenomena tersebut dikatakan serempak / simultan. Sedangkan jika terjadi pada kerangka yang berbeda, maka tidak dapat dikatakan serempak. Jika dua pengamat saling bergerak relatif maka dua fenomena dinyatakan simultan, maka pengamat yang lain akan mendapati dua fenomena itu simultan juga.

2. Sinkronisasi

Sinkronisasi adalah kegiatan penyetaraan alat ukur waktu untuk mengamati terjadinya keserempakan. Sinkronisasi alat ukur waktu dilakukan pada kerangka yang sama, sebelum salah satu pengamat bergerak terhadap pengamat yang lain. Kerangka yang sama ini artinya bukan pada lokasi yang sama, namun pada kecepatan kerangka pengamatan yang sama. Kedua alat ukur waktu (misalnya jam) dikatakan sudah tersinkron satu sama lain jika pada kerangka yang sama, kedua alat ukur menunjukkan hasil pengukuran yang sama.

Gambar 2. 9 Sinkronisasi terhadap jam acuan



Sinkronisasi juga dapat dilakukan dengan memilih salah satu alat ukur waktu (misalnya jam) menjadi jam acuan (Gambar 2.9). Namun dengan metode kita akan mengabaikan laju cahaya dari jam acuan untuk sampai ke mata kita. Misalkan jarak kita terhadap jam acuan adalah 1 m, maka kita harus memperhitungkan tambahan waktu sekitar 3 ns saat mengatur jam yang kita gunakan. Selisih waktu yang terlihat kecil bagi kita, namun bagi pengukuran yang berhubungan dengan teori relativitas, selisih waktu ini berdampak cukup besar. Dengan demikian jam yang disinkronisasi akan menunjukkan waktu yang lebih awal jika dibandingkan jam acuan.

Contoh Soal

Dengan menggunakan fenomena yang telah dituliskan pada Contoh Soal 1.3., terjadi dua kejadian simultan terjadi terhadap O, tapi tidak simultan menurut O'. Petugas di pos pengawasan (O) mengamati ujung dan ekor pesawat secara serempak, namun tidak menurut awak pesawat. (O') Tentukan besar interval waktu yang diukur O' untuk melihat menara pengawas dari ujung ke ujung!

Jawab:

Menurut pengamat O, maka dua kejadian simultan tersebut saling terpisah sejauh $L = 50$ m. Apabila laju O' terhadap O adalah $u = 0,6 c$, maka kita dapat menggunakan persamaan 2.1

$$\Delta t' = \gamma \left(\Delta t - \frac{u}{c^2} \Delta x \right) = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,6c}{c}\right)^2}} \left((0) - \frac{0,6c}{c^2} (50m) \right) = 0,125 \mu s$$

Mari kita perhatikan interval waktu yang terjadi, yaitu sebesar 0,125 mikro sekon. Durasi ini sangat kecil, sehingga pada kecepatan yang jauh dibawah kecepatan cahaya relativitas kesimultanan atau keserempakan seringkali tidak teramati.

Tugas

1. Dua ledakan yang terpisah 200 menit cahaya di ruang angkasa tampak simultan oleh pengamat di Bumi. Bersamaan dengan itu, pengamat di Bumi juga melihat seorang alien sedang bergerak 0,8 c paralel terhadap garis penghubung dua ledakan tersebut

a. Gambarkan permasalahan diatas dalam bentuk sketsa (SKOR : 10)

Jawab:

b. Berapa selang waktu antara dua ledakan tersebut menurut alien? Apakah Alien juga mengamati dua ledakan tersebut simultan? (SKOR : 10)

Jawab:

2. Dua pengamat melakukan sinkronisasi jam. Pengamat bergerak menemukan selang waktu yang terukur antara mereka adalah sebesar 10%.

Sehingga $\frac{(\Delta t_0 - \Delta t')}{\Delta t_0} = 0,10$.

a. Berapakah kecepatan relative seorang pengamat terhadap pengamat diam? (SKOR : 10)

Jawab:

b. Jika jam acuan menunjukkan pukul 09.30 , maka pada waktu berapa yang ditunjukkan oleh jam pengamat bergerak? (SKOR : 10)

Jawab:

B. Paradoks Kembar

Paradoks kembar menjadi topik yang sangat menarik untuk dibicarakan saat Einstein menjelaskan teori relativitas khususnya pada tahun 1905. Paradoks kembar dalam bahan-bahan ajar banyak ditulis ulang dalam berbagai variasi. Untuk memahaminya mari kita pelajari dengan seksama!

1. Paradoks Kembar

Dian dan Geby adalah saudara kembar, mereka masing-masing memilih karir yang berbeda. Dian memilih menjadi guru fisika. Geby memilih menjadi astronot. Pada tahun 2050 mereka berdua sama sama berusia 25 tahun. Saat itu Geby saat itu terpilih sebagai astronot pertama dari Indonesia yang melakukan perjalanan ke luar angkasa.

Geby pun berangkat luar angkasa, tujuannya adalah sebuah system bintang baru yang perlu diukur lama perjalanannya. Sistem bintang baru ini berjarak 12 tahun cahaya terhadap bumi. Kecepatan pesawat Geby adalah $0,8 c$, diukur oleh para petugas yang berada di stasiun ruang angkasa di Bumi. Variable c menunjukkan kecepatan cahaya di ruang hampa ($c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$).

Lama perjalanan Geby kemudian dapat dikonversi menjadi system satuan tahun atau bulan, serta dapat dinyatakan dalam besaran jarak dengan cara:

Konversi tahun cahaya menjadi cahaya (tahun)

$$\text{satuan Waktu} = \frac{\text{tahun cahaya}}{\text{kecepatan dalam } c} \quad 2.30a$$

Satuan Waktu = dalam satuan tahun

Jika kamu menemukan fenomena yang dinyatakan dalam bulan cahaya, maka:

$$\text{satuan Waktu} = \frac{\text{tahun cahaya}}{\text{kecepatan dalam } c} \quad 2.30b$$

$\text{satuan Waktu} =$ dalam satuan bulan

Konversi tahun cahaya menjadi jarak

$$\begin{aligned}
 1 \text{ tahun cahaya} &= 1 \times 60 \frac{\text{detik}}{\text{menit}} \times 60 \frac{\text{menit}}{\text{jam}} && 2.30c \\
 &\quad \times 24 \frac{\text{jam}}{\text{hari}} \\
 &\quad \times 365,24 \frac{\text{hari}}{\text{tahun}} \times 300.000 \frac{\text{km}}{\text{s}} \\
 &= 9,46 \times 10^{12} \text{ km}
 \end{aligned}$$

Dengan menggunakan persamaan 2.30a maka waktu perjalanan Geby dapat dihitung sebagai berikut:

$$\Delta t_0 = \frac{(12 \text{ tahun cahaya})}{0,8 c} = 15 \text{ tahun}$$

Perjalanan Geby dari Bumi ke system bintang adalah selama 10 tahun. Lama waktu 15 tahun ini diukur oleh pengamat yang ada di Bumi, karena kecepatan yang digunakan adalah kecepatan Geby terhadap Bumi. Setelah sampai di system bintang, ia melambat kemudian melakukan putaran balik, dan melakukan perjalanan pulang ke Bumi dengan kecepatan yang sama saat berangkat. Waktu yang terjadi saat Geby melakukan percepatan dapat diabaikan, karena nilainya sangat kecil jika dibandingkan waktu perjalanan pulang perginya.

Karena bergerak dengan kecepatan yang sama, maka perjalanan pulangnya ke Bumi dilakukan selama 15 tahun. Sehingga total perjalanan Geby selama 30 tahun Bumi. Tahun Bumi maksudnya ukuran tahun menurut pengamat di Bumi. Setelah sampai ke Bumi, Ia kemudian menemui saudara kembarnya Dian. Saat Dian dan Geby bertemu, mereka berdua terkejut karena usia mereka tidak sama. Geby terlihat lebih muda daripada Dian (Gambar 2.10). Bagaimana bisa?

Dian adalah pengamat diam (P), dan Geby adalah pengamat yang bergerak relative (P'). Geby bergerak relative terhadap bumi dengan kelajuan mendekati c , sehingga Geby akan mengalami pemuluran waktu dengan factor Lorentz sebesar

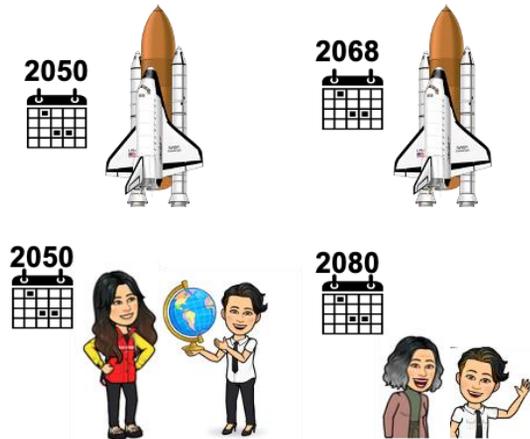
$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{0,8c}{c}\right)^2}} = \frac{1}{3/5} = \frac{5}{3}$$

Sehingga waktu yang dialami oleh Geby menggunakan persamaan 2.28 adalah sebesar

$$\Delta t' = \frac{\Delta t_0}{\gamma} = \left(\frac{3}{5}\right)(15 \text{ tahun}) = 9 \text{ tahun}$$

Perhitungan diatas memperlihatkan bahwa dengan bergerak sebesar $0,6 c$ Geby akan mengukur bahwa ia melakukan perjalanan pulang -pergi selama $9 \times 2 = 18$ tahun. Maka Dian berumur $25 + 30$ tahun = 55 tahun sementara Geby berumur $25 + 18 = 43$ tahun. Geby lebih muda dibandingkan Dian karena selama melakukan perjalanan dengan kecepatan $0,6 c$, pemuluran waktu juga dialami oleh tubuhnya. Proses biologi dalam tubuh Geby mengalami perlambatan sehingga penuaannya juga mengalami perlambatan.

Gambar 2. 10 Ilustrasi Paradoks kembar



Dari fenomena ini sangat wajar muncul pertanyaan, “Kembaran mana yang bergerak dengan kelajuan mendekati cahaya, sehingga ia mengalami selang waktu terpendek?” disinilah letak paradoksnya, menurut Dian, Geby lah yang bergerak dengan kecepatan mendekati c , sementara menurut Geby , Dian lah yang bergerak terhadapnya. Gagasan tentang siapa yang bergerak terhadap siapa ini memang menimbulkan pertanyaan.

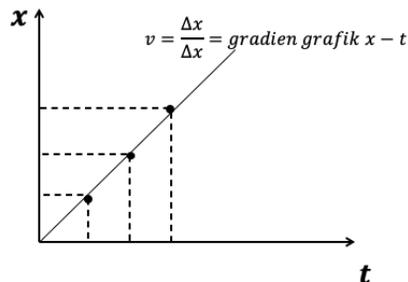
Masalah ini dapat dijawab melalui ketidaksimetrisan kehidupan saudara kembar ini. Selama hidupnya, Dian selalu berada dalam kerangka acuan inersia (yaitu Bumi). Ini membuat perhitungan yang dilakukan oleh Dian akan menjadi perhitungan yang *proper* (sejati). Sehingga waktu dan Panjang yang diamati oleh Dian adalah waktu yang sejati dan Panjang yang sejati menurut teori relativitas khusus.

Sementara pengukuran waktu dan panjang yang dilakukan oleh Geby adalah waktu relatif dan panjang relatif. Dalam perjalanan mengarungi angkasa, Geby juga mengalami percepatan dan perlambatan, tidak selamanya Geby mengalami kecepatan konstan terus menerus. Keadaan ini mengakibatkan Geby tidak memenuhi syarat sebagai kerangka acuan inersia. Akibatnya, semua pengukuran yang dihasilkan oleh Geby tidak sah menurut teori relativitas khusus. Dengan demikian, petualang angkasa akan selalu lebih muda saat kembali ke bumi.

2. Diagram ruang-waktu

Gerak sebuah benda selalu melibatkan ruang dan waktu. Dari fisika dasar kita telah mengetahui bahwa apabila benda bergerak, maka kedudukannya akan berubah terhadap waktu. Artinya benda / objek hanya bisa berada pada satu koordinat pada satu waktu. Di fisika dasar kita menggambarkan hubungan posisi terhadap waktu menggunakan koordinat Euclidean pada bidang kartesius. Jika dilihat 1 dimensi, posisi dinyatakan sebagai x yang diposisikan pada sumbu vertikal dan waktu diposisikan pada sumbu horizontal (Gambar 2.11).

Gambar 2. 11 Koordinat Euclidean pada gerak benda

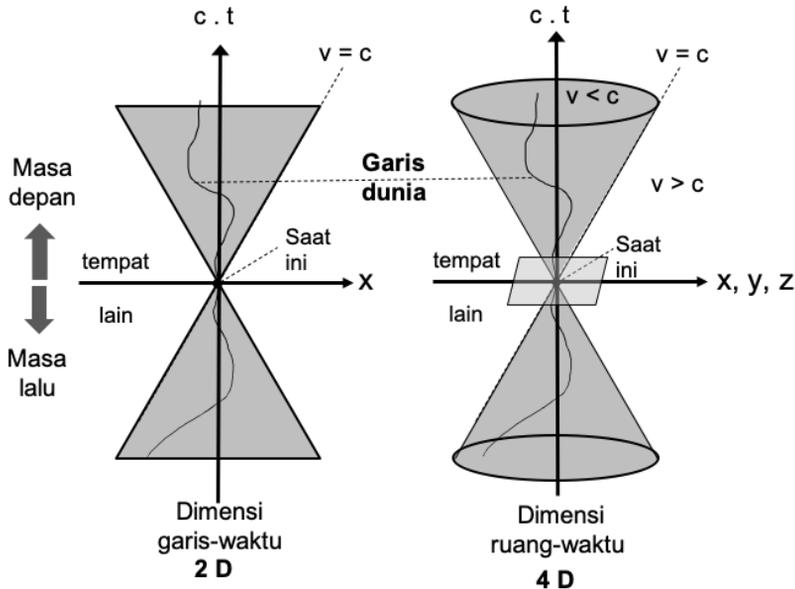


Pada Gambar 2.11 menunjukkan gerak lurus beraturan dari sebuah benda/ objek. Antara posisi dan waktu dihubungkan dengan sebuah garis miring. Gradien garis miring tersebut adalah kecepatan (v). Namun koordinat Euclidean menunjukkan kelemahannya, yaitu tidak dapat menunjukkan gerak benda dalam 4 dimensi. Kkoordinat 4 dimensi memiliki definisi bahwa sebuah fenomena dilihat dari ruang 3 dimensi (x, y, z) dan dimensi waktu (t).

Alih-alih menggunakan koordinat Euclidean (x, y, z) yang biasa dipakai untuk menyatakan gerak sebuah objek, Einstein lebih memilih untuk

menggunakan koordinat ruang dan waktu (*spacetime*) yang digagas oleh Hermann Minkowski pada tahun 1907 Diagram ruangwaktu minkowski dapat menunjukkan ruang dan waktu sebagai dua parameter yang tidak terpisahkan (Gambar 2.12). Diagram ruang dan waktu dapat dinyatakan dalam 2 dimensi (panjang dan waktu) dan 4 dimensi (x,y,z dan t) .

Gambar 2. 12 Diagram ruang-waktu Minkowski



Ide dasar dari diagram ruang-waktu Minkowski adalah menempatkan koordinat ruang pada bagian horizontal dan dimensi waktu pada bagian vertical. Jika gerak yang dilihat hanya terhadap sumbu x , maka diagramnya akan berbentuk 2 dimensi. Jika mempertimbangkan gerak dalam dimensi ruang (melibatkan juga y dan z) maka diagram ruang-waktu akan membentuk kerucut. Diagram ruang waktu akan dibatasi oleh garis miring $v = c$. Garis $v = c$ akan membentuk sudut 45° terhadap sumbu ct karena laju cahaya adalah konstan.

Gerak semua benda di alam semesta akan berada dalam kerucut ini. Hal ini dikarenakan tidak ada benda yang memiliki kecepatan diatas kecepatan cahaya ($v < c$). Jika benda bergerak dengan kecepatan cahaya, maka geraknya dibatasi oleh selimut kerucut. Dari diagram ruang-waktu Minkowski juga terlihat gerak benda adalah absolut menuju masa depan. Semakin cepat

objek bergerak (mendekati c) maka ia dapat menembus masa depan. Namun jika objek itu ingin kembali ke masa lalu, maka objek ini harus bergerak dengan kecepatan melebihi c ($v > c$) (yang mana belum ditemukan hingga saat ini).

Garis dunia adalah garis gerak yang dilalui semua objek di alam semesta. Diagram ruang waktu juga menunjukkan kemiringan, kebalikan dari kemiringan ini adalah kecepatan gerak benda. Garis vertikal ct mewakili benda yang berada dalam keadaan diam terhadap waktu. Minkowski menjelaskan bahwa posisi sebuah objek memang relatif, namun besar perpindahannya adalah absolut pada kerangka inersia manapun. Sehingga ia menggunakan besaran interval ruang waktu untuk menggunakan diagramnya.

Titik henti

Diagram ruangwaktu mungkin akan sedikit abstrak. Apabila kamu merasa kebingungan, silahkan lihat video penjelasannya dengan menge-*scan* kode QR disamping, atau klik *link* berikut

<http://bit.ly/ruangwaktu1>



Untuk menjelaskan interval pada diagram ruang-waktu, Minkowski menggunakan analogi sebuah benda yang bergerak. Pada keadaan awal, benda diobservasi berada koordinat (x_1, y_1, z_1, t_1) . Pada keadaan akhir, benda berada di (x_2, y_2, z_2, t_2) . Minkowski menjelaskan bahwa posisi benda adalah relatif, tapi besar perpindahannya adalah absolut. Sehingga dalam diagramnya, Minkowski menggunakan interval ruang dan waktu. Interval ruang dinyatakan dalam Δx , Δy , dan Δz . Interval waktu dinyatakan dalam Δt . Dengan $\Delta x = x_1 - x_2$, $\Delta y = y_1 - y_2$, $\Delta z = z_1 - z_2$ dan $\Delta t = t_1 - t_2$

Titik henti

Apa yang dimaksud dengan posisi / kedudukan benda adalah relatif, namun perpindahan (perubahan posisi) atau intervalnya adalah mutlak ? Apabila kamu merasa kebingungan, silahkan lihat video penjelasannya dengan menge-*scan* kode QR disamping, atau klik *link* berikut

<http://bit.ly/ruangwaktu2>



Minkowski menggunakan teorema pythagoras sebagai berikut:

$$\begin{aligned}\Delta s^2 + (c \cdot \Delta t)^2 &= \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 \\ \Delta s^2 &= \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - (c \cdot \Delta t)^2\end{aligned}\quad 2.3$$

atau jika dalam tinjauan elemental (interval yang kecil mendekati nol) dinyatakan sebagai:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - (c \cdot dt)^2 \quad 2.4$$

Dengan catatan bahwa besar selang / interval ruang adalah besarran (kuantitas) invariant (sama/ seragam) untuk semua kerangka acuan inersia

$$ds^2 = ds'^2 \quad 2.5$$

Maka selanjutnya interval ruang Δs^2 disebut sebagai kuantitas invariant. Kuantitas invarian ini selanjutnya dapat dipakai untu menjelaskan hubungan antara dua fenomena berbeda, apakah simultan atau tidak. Kuantitas invarian (Δs^2) memberikan 3 (tiga) kemungkinan yang terjadi dalam menjelaskan hubungan 2 peristiwa, yaitu:

a. Dua peristiwa terpisahkan cahaya (*lightlike*)

Hubungan terjadinya dua peristiwa bersifat seperti cahaya *lightlike* terjadi jika $\Delta s^2 = 0$, sehingga $\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 = (c \cdot \Delta t)^2$. Karena interval ruang antara dua fenomena setara dengan perubahan waktu terhadap laju cahaya, maka kedua fenomena ini berada pada daerah batas kerucut. Artinya kedua fenomena terjadi pada objek yang bergerak dengan kelajuan sama dengan c .

b. Dua peristiwa terpisahkan ruang (*spacelike*)

Dua peristiwa terpisahkan ruang artinya dua peristiwa terjadi pada kerangka inersia yang sama, namun terdapat perbedaan koordinat ruang satu sama lain. Hubungan ini dinyatakan dengan $\Delta s^2 > 0$ dan $\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 > (c \cdot \Delta t)^2$. Perubahan posisi pada ruang lebih besar dari perubahan waktunya, sehingga tidak terjadi runtunan waktu. Contoh dari dua peristiwa *spacelike* adalah:

- 1) Pada saat perayaan menyongsong tahun baru, Dian di kota Yogyakarta dan Geby di kota Solo secara bersamaan menyalakan kembang api di halaman rumah masing masing.
- 2) Pada saat musim panen, dua petani petani memanen padinya di desa masing masing pada saat bersamaan.

c. Dua peristiwa terpisahkan waktu (*timelike*)

Dua peristiwa terpisahkan waktu artinya dua peristiwa itu melibatkan kronologi (runtutan waktu). Hubungan dua fenomena bersifat seperti waktu (*timelike*) dinyatakan dengan $\Delta s^2 < 0$ dan $\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 < (c \cdot \Delta t)^2$. Contohnya adalah peristiwa sinkronisasi jam (waktu). Pada peristiwa ini tidak terjadi perpindahan, setiap pengamat diam di posisinya masing-masing namun terdapat interval waktu antara pengamat dan jam acuan.

Tugas

Berikut diberikan kode QR dan link untuk men-*download* sebuah artikel. Bacalah artikel tersebut, kemudian buatlah essay tentang “Simultanitas dan Sinkronisasi” menggunakan bahasamu sendiri . Essay dibuat minimal 700 halaman.

<http://bit.ly/ruangwaktu3>



Plagiasi akan mengakibatkan ketidaklulusan pada kegiatan pembelajaran ini.

C. Eksperimen-eksperimen yang memverifikasi teori relativitas khusus

Teori relativitas khusus yang diusulkan oleh Einstein sangat berbeda dengan teori relativitas Newton. Teori ini tidak serta merta diterima oleh para ahli. Ada beberapa percobaan yang membuktikan kebenaran teori relativitas khusus, diantaranya 1) Eksperimen penentuan muon oleh J Bailey pada tahun 1977; 2) Aberasi bintang di tahun 1728 oleh James Bradley; 3) Jam atomic oleh J.C. Hafele dan R.E Keating pada tahun 1972 yang kemudian diperkuat kembali oleh H.E. Ives dan G.R. Stilwell pada tahun 1941; 4) Pengukuran simetri Lorentz oleh Maxim Popelov dan Michael Romalis (2004); dan 5) Eksperimen penjumlahan kecepatan pada percobaan peluruhan pion oleh T. Alvager, dkk tahun 1964.

1. Eksperimen muon

Eksperimen peluruhan muon adalah salah satu percobaan yang menarik. Pada percobaan ini kontraksi panjang dan pemuluran waktu dapat diamati secara bersamaan. Muon mengalami peluruhan yang sesuai dengan persamaan

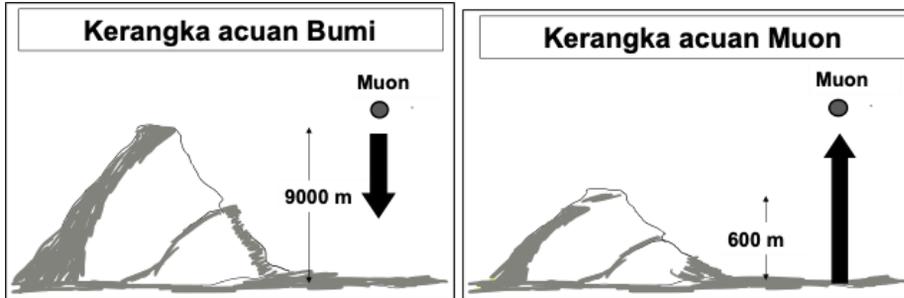
$$N(t) = N_0 e^{\left(\frac{-t}{\tau}\right)} \quad 2.31$$

Dengan N_0 adalah jumlah awal partikel muon, $N(t)$ adalah jumlah partikel muon setelah waktu ke t , dan τ adalah waktu paro. Waktu paro adalah waktu atau umur sebuah partikel sebelum meluruh hingga tinggal separuhnya. Waktu paro dari muon adalah $2\mu\text{s}$.

Muon alami dihasilkan dari peluruhan pion di atmosfer dengan ketinggian beberapa ribu meter dari permukaan laut. Dari hasil percobaan laboratorium, sebuah muon dapat bergerak dengan kecepatan hingga $0,998 c$

dengan jarak 600 m selama $2\mu\text{s}$ sebelum meluruh. Namun saat muon diukur dari ketinggian tertentu (atmosfer) (Gambar 2.13) menuju permukaan bumi, pengamat menemukan umur muon mengalami peningkatan. Menurut pengamat di Bumi, muon yang bergerak dengan kecepatan hingga $0,998 c$ dapat menempuh jarak 9000 m selama $30\mu\text{s}$ sebelum meluruh.

Gambar 2. 13 Ilustrasi eksperimen menghitung umur muon



Bagaimana umur muon dapat mengalami perubahan? Umur muon di laboratorium yang hanya $2\mu\text{s}$ dapat dijelaskan dengan menggunakan kerangka acuan muon (Gambar 2.13). Berdasarkan kerangka acuan Muon, bumi lah yang mendekatinya dengan kelajuan $0,998 c$, jarak tempuhnya menjadi 600 m, dan umurnya menjadi $2\mu\text{s}$.

Asumsikan jumlah muon saat berada di ketinggian 9000 m adalah sebanyak 10^8 partikel. Dari penjelasan diatas kita telah mengetahui umur muon menurut pengamat di Bumi adalah $30 \mu\text{s}$ dan waktu paro muon adalah $30 \mu\text{s}$. Dengan demikian kita dapat memperoleh $\frac{t}{\tau} = \frac{30}{2} = 15$, sehingga jumlah partikel muon yang tersisa adalah

$$N(t) = (10^8)e^{-15} = 30,6 \text{ partikel}$$

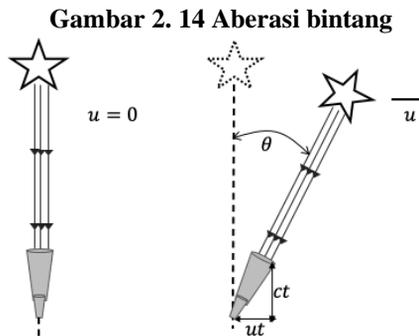
Menurut prediksi pengamat nonrelativistic (pengamat di bumi), kita akan memprediksikan ada sebanyak 30,6 partikel muon yang dapat mencapai permukaan laut. Namun berdasarkan kerangka acuan muon, diperoleh $\frac{t}{\tau} = 1$ dan jumlah partikel yang tersisa adalah

$$N(t) = (10^8)e^{-1} = 3,68 \times 10^7 \text{ partikel}$$

Prediksi relativistic ini menunjukkan kita akan memperoleh $3,68 \times 10^7$ partikel selama kurun waktu $2\mu\text{s}$.

2. Aberasi bintang

Aberasi bintang adalah fenomena yang mengamati bahwa bintang-bintang tampak bergerak mengitari bumi dengan bentuk seperti lintasan lingkaran. James Bradley mengamati bahwa kedudukan bintang-bintang seperti mengelilingi bumi dengan lintasan yang periodik dari tahun ke tahun, namun ia mengamati bahwa teleskop yang dia gunakan harus mengalami perubahan kedudukan terhadap bintang tersebut (Gambar 2.6).



Apabila bintang yang bergerak terhadap bumi, maka seharusnya arah teleskop tidak mengalami perubahan. Bradley menjelaskan menggunakan arah berkas sinar dari bintang yang lurus menuju teleskop. Karena teleskopnya yang harus mengalami rotasi untuk bisa mengamati bintang, maka sebenarnya teleskop (bumi-lah) yang bergerak terhadap bintang.

3. Pengukuran waktu atomic

Pengukuran waktu yang akurat ditemukan menggunakan jam atom cesium, dengan menggunakan 1 detik sebagai waktu yang diperlukan oleh atom cesium bergetar 9,192,631,770 kali. Pada tahun 1971, J.C Hafele dan E. Keating kemudian menggunakan jam atomic ini untuk mengukur dilatasi waktu. Mereka melakukan perjalanan mengitari bumi dengan arah yang berbeda, yaitu dengan puritan dari belahan bumi timur dan belahan bumi barat.

Sebagai hasilnya ditemukan bahwa perbandingan waktu tempuh dengan arah yang berbeda akan menimbulkan efek baru yang belum dapat dijelaskan oleh teori relativitas khusus Einstein. Karena hasil pengamatan ini dipengaruhi juga efek gaya gravitasi yang belum dijelaskan oleh Einstein melalui teori relativistiknya. Hasil pengamatan ini kemudian mengantarkan

kita pada teori relativitas umum. Adapun teori relativitas umum belum dibahas pada buku ajar ini.

Rangkuman

1. Simultanitas adalah fenomena relativistic dan bukan absolut.
2. pada fenomena paradoks kembar, pengamat di bumi adalah kerangka acuan inersia. Orang yang melakukan perjalanan ke luar angkasa akan pulang ke bumi dengan usia yang lebih muda sesuai tahun yang berlakun Bumi.
3. Teori relativitas khusus dijelaskan menggunakan diagram ruang-waktu Minskowski. Pada diagram ini digunakan kuantitas invariant berupa interval ruang dan waktu.
4. Hubungan antara dua kejadian dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan interval ruang-waktu, yaitu *lightlike*, *spacelike*, dan *timelike*,

Evaluasi Formatif

Pilihan ganda

1. Waktu hidup rata-rata sebuah partikel pada keadaan diam di laboratorium adalah $4,0 \mu\text{s}$. berapakah kelajuan partikel relatif terhadap pemngamat di Bumi di mana partikel akan menempuh jaran 1200 m (diukur pengamat bumi) sebelum partikel itu meluruh?

A. $\frac{2}{3} \times 10^8 \text{ m/s}$

D. $\frac{2}{3}\sqrt{3} \times 10^8 \text{ m/s}$

B. $1,5 \times 10^8 \text{ m/s}$

E. $2 \times 10^8 \text{ m/s}$

C. $\frac{3}{2}\sqrt{2} \times 10^8 \text{ m/s}$

2. Partikel meson yang hidup di laboratorium memiliki panjang x dan kelajuan v . partikel ini meluruh setelah waktu T jika diukur oleh pengamat yang diam dalam laboratorium. Jika meson dian di dalam laboratorium , berapakah umur meson menurut kerangka acuan meson?

A. $T \left(1 - \frac{v}{c}\right)$

D. $T \left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-\frac{1}{2}}$

B. $T \left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-1}$

E. $\left(T - \frac{v \cdot x}{c}\right) \left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-\frac{1}{2}}$

C.
$$T \left(1 - \frac{v}{c}\right)^{-\frac{1}{2}}$$

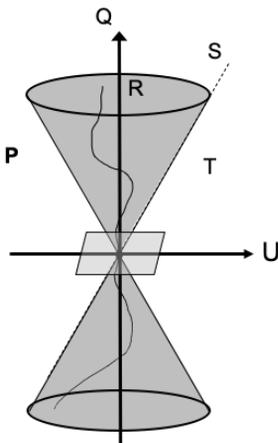
3. Dua kembaran berpisah pada saat berumur 20 tahun. A tinggal di Bumi dan B bepergian di luar angkasa. B menggunakan pesawat dengan kelajuan $0,8c$. Setelah 12 tahun berkelana, B pulang ke bumi. Jika A masih hidup, usia A pada saat B pulang ke Bumi adalah ...

- A. 20 tahun
- B. 26 tahun
- C. 30 tahun
- D. 32 tahun
- E. 40 tahun

4. Pernyataan yang benar tentang diagram ruang waktu adalah ...

- A. ruang dan waktu dapat dipisahkan
- B. hanya berlaku untuk $v = c$
- C. diperlukan $v > c$ untuk menuju masa depan
- D. dapat menjelaskan gerak dalam empat dimensi
- E. berupa koordinat silinder dan bola

5. Perhatikan gambar berikut:



Titik yang menunjukkan garis dunia adalah

- A. Titik P
- B. Titik Q
- C. Titik R
- D. Titik S
- E. Titik T

6. Persamaan yang menunjukkan kuantitas invariant dari diagram minkowski adalah

- A. $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 + (c \cdot \Delta t)^2$
- B. $ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - (c \cdot \Delta t)^2$
- C. $ds^2 \neq ds'^2$
- D. $dx^2 + dy^2 = dz^2$
- E. $ds^2 \neq (c \cdot \Delta t)^2$

7. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Petani memanen padi di ladangnya masing-masing di desa yang sama
- (2) Sinkronisasi waktu
- (3) Dito dan doni meniup terompet besarmaan masing-masing di kota padang dan riau
- (4) Satelit menerima dan meneruskan sinyal dari angkasa ke bumi

Pernyataan yang memenuhi hubungan dua fenomena seperti ruang adalah

- A. (1), (2), dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

8. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Petani memanen padi di ladangnya masing-masing di desa yang sama
- (2) Sinkronisasi waktu
- (3) Dito dan doni meniup terompet besarmaan masing-masing di kota padang dan riau
- (4) Satelit menerima dan meneruskan sinyal dari angkasa ke bumi

Pernyataan yang memenuhi hubungan dua fenomena seperti waktu adalah

- A. (1), (2), dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

9. Percobaan yang membuktikan kevalid-an teori relativitas khusus Einstein adalah

- A. aberasi bintang, eksperimen muon, dan pengukuran jam atom
- B. Peneman mesin uap, gelombang radio, dan kereta api
- C. Penemuan kereta api, penemuan listrik, dan interferensi young
- D. Interferensi celah ganda young, Fresnel, dan kereta

E. Polarisasi cahaya, listrik, dan interferensi Young

10. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Keserempakan bersifat relatif
- (2) sinkronisasi pengukur waktu dilakukan sesuai dengan jarak dengan jam acuan
- (3) si kembar yang melakukan petualangan ke luar angkasa selalu lebih muda daripada saudaranya yang diam di bumi
- (4) interval ruang adalah sebuah kuantitas invariant

Pernyataan yang benar tentang relativitas khusus Einstein adalah ...

- A. (1), (2), dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

Essay

1. Sebuah partikel meson bergerak vertikal di atmosfer dengan laju $0,99c$. umur meson menurut kerangka acuan meson adalah $2,22\mu s$. berapa waktu hidupnya menurut pengamat di Bumi? (SKOR : 25)

Jawab:

2. Sebuah inti radioaktif bergerak relatif terhadap laboratorium dengan laju $0,3 c$ searah $X+$. Apabila inti memancarkan electron dengan laju $0,8 c$ relatif terhadap inti, maka hitung kecepatan electron relatif terhadap laboratorium jika:

a. electron dipancarkan searah sumbu $X+$ (SKOR : 25)

Jawab:

b. electron dipancarkan ke arah sumbu X- (SKOR : 25)

Jawab:

c. Elektron dipancarkan searah sumbu Y (SKOR : 25)

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan

menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

- Beiser, Arthur. (2003). Concepts of Modern Physics 6th Edition. Mc Graw Hill.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). Fisika Dasar 1 Edisi 7 Jilid 3. Jakarta: Erlangga.
- Kanginan, Marthen. (2018). Fisika untuk SMA/MA Kelas XII. Erlangga: Jakarta.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). Modern Physics Third Edition (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto (2011). Esensi Fisika Modern. Andi: Yogyakarta.
- Surya, Yohanes. (2003). Fisika itu Mudah SMU 3C. Bina Sumber Daya MIPA: Jakarta.
- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition (Third). Boston: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). Modern Physics - Fifth Edition. In Modern Physics Sixth Edition. W.H. Freeman and Company: New York.

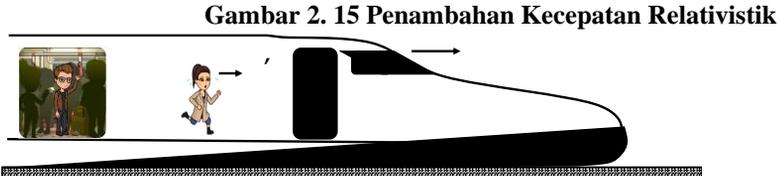
Kegiatan Pembelajaran 3 GEJALA – GEJALA RELATIVITAS KHUSUS (PART 2)

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
1. Mahasiswa dapat mengaplikasikan gejala momentum relativistik dalam media ajar.	a. Mahasiswa dapat menjelaskan deskripsi gejala momentum relativistic dalam bentuk bahan presentasi ajar. b. Mahasiswa dapat mengaplikasikan persamaan momentum relativistic dalam pemecahan masalah.
2. Mahasiswa dapat mengaplikasikan gejala energi relativistic dalam media ajar.	a. mahasiswa dapat menjelaskan deskripsi gejala energi berdasarkan teori relativistik dalam bentuk bahan presentasi ajar. b. mahasiswa dapat membedakan energi total dan energi diam berdasarkan teori relativistic. c. Mahasiswa dapat menjelaskan konsep kesetaraan massa dan energi sesuai teori relativistic dalam bahan ajar berupa media presentasi d. mahasiswa dapat melakukan perhitungan dengan menggunakan konsep kesetaraan massa dan energi pada penyelesaian masalah yang berhubungan dengan teori relativistik. e. mahasiswa dapat menjelaskan gejala energi relativistic pada partikel tak bermassa. f. mahasiswa dapat melakukan perhitungan dengan menggunakan energi pada partikel tak bermassa dalam pemecahan masalah.

Uraian Materi

A. Penambahan Kecepatan Secara Relativistik

Mari kita anggap ada sebuah kereta super cepat (abad 22) bergerak dengan kecepatan v relatif terhadap tanah. Kemudian di dalam kereta terdapat seorang penumpang yang berlari dengan kecepatan u' relatif terhadap kereta (Gambar 2.15).



Menurut pengamat di kereta posisi penumpang yang berlari tersebut setelah waktu t' adalah sebesar

$$x' = u't' \quad 2.32$$

Kemudian, berapakah kecepatan penumpang yang lari tersebut menurut pengamat yang diam di sisi jalan (tanah)?

Untuk menjawabnya, kita gunakan transformasi Lorentz sebagai berikut

$$\begin{aligned} x' &= \gamma(x - vt) \\ u't' &= \gamma(x - vt) \\ u'\gamma\left(t - \frac{vx}{c^2}\right) &= \gamma(x - vt) \\ (u' + v)t &= x\left(1 + \frac{u'v}{c^2}\right) \\ \frac{x}{t} = u &= \frac{v + u'}{1 + \frac{u'v}{c^2}} \quad 2.33 \end{aligned}$$

Dengan x adalah posisi yang diukur oleh pengamat di tanah dan t adalah waktu yang diukur pengamat di tanah. Komponen $\frac{x}{t}$ adalah kecepatan menurut pengamat di tanah, yang kemudian disimbolkan u , sehingga diperoleh persamaan 2.33.

$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

Persamaan 2.33 adalah *persamaan kecepatan yang diukur oleh pengamat diam*. Persamaan ini disebut penjumlahan kecepatan relativistik. Sekarang mari kita uji persamaan ini dengan menggunakan beberapa kasus tertentu yang telah kita ketahui jawabannya.

1. Jika $u' = 0$, maka $u = v$, ini cocok dengan intuisi kita yaitu jika penumpang diam, maka kecepatan penumpang terhadap tanah sama dengan kecepatan kereta terhadap tanah.
2. Jika $v = 0$ maka $u = u'$, ini juga sesuai dengan intuisi kita yaitu jika kereta diam, maka kecepatan penumpang terhadap kereta sama dengan kecepatan penumpang terhadap tanah.
3. Jika u' dan v sangat kecil dibandingkan dengan c maka $u = u' + v$, ini sesuai dengan penjumlahan kecepatan menggunakan transformasi Galileo.
4. Jika $u' = c$ (penumpang diganti cahaya) maka $u = c$, ini cocok dengan rumus Maxwell bahwa kecepatan cahaya pada tiap kerangka inersial sama.

Contoh Soal – Penjumlahan Kecepatan Relativistik 1 Dimensi

Dua electron dipancarkan oleh dua sumber diam. Kecepatan electron masing – masing $0,8c$ dalam arah berlawanan (Gambar 2.16). Hitung kecepatan electron yang satu relatif terhadap yang lain secara relativistik!



Jawab:

Kita anggap electron A sebagai acuan. Secara intuitif, kita harapkan kecepatan B menurut A akan lebih besar dari $0,8c$. Karena A dianggap sebagai acuan, maka A adalah pengamat diam (*kerangka S*). Sumber yang memancarkan

elektron seolah – olah bergerak mendekati elektron A dengan kecepatan $v = 0,8 c$. Sumber ini kemudian dianggap sebagai pengamat bergerak (kerangka S'). Elektron B bergerak dengan kecepatan $u'=0,8c$ relatif terhadap sumber (menjauhi sumber).

Menurut penjumlahan kecepatan Galileo, kecepatan electron B relatif terhadap A adalah

$$u = v + u' = 1,6 c$$

tapi secara relativistik, kecepatan u (kecepatan elektron B relatif terhadap elektron A) adalah:

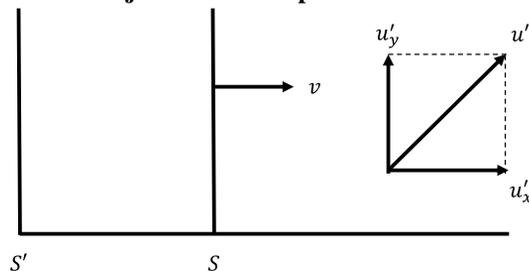
$$\begin{aligned} u &= \frac{v + u'}{1 + \frac{u'v}{c^2}} \\ &= \frac{(0,8 c) + (0,8c)}{1 + \frac{(0,8 c)(0,8 c)}{c^2}} \\ &= \frac{1,6 c}{1,64} = 0,976 c = 2,93 \times 10^8 \text{ m/s} \end{aligned}$$

Dengan demikian besar kecepatan B menurut A adalah $0,976 c$ dan berlaku juga sebaliknya, kecepatan A menurut B juga sebesar $0,976 c$.

Contoh Soal – Penjumlahan Kecepatan Relativistik 3 Dimensi

Selama ini kita hanya menganggap partikel bergerak sejajar dengan arah kecepatan v (arah $x - x'$). Bagaimana jika partikel juga bergerak pada komponen y dan z (Gambar 2.17) ?

Gambar 2. 17 Penjumlahan Kecepatan Relativistik 3 Dimensi



Penyelesaian:

Bayangkan benda bergerak miring dan mempunyai komponen horizontal dan vertikal seperti Gambar 2.17. Anggap kerangka S' bergerak dengan

kecepatan v sejajar dengan sumbu $x'x'$ dan anggap komponen vertikal dan komponen horizontal dalam kerangka S' adalah u'_x dan u'_y . Besar komponen kecepatan horizontal menurut kerangka S berdasarkan persamaan 2.33 adalah

$$u_x = \frac{u'_x + v}{1 + \frac{u'_x v}{c^2}} \quad 2.34$$

Menurut pengamat di S , benda berapada pada posisi y_1 pada waktu t_1 dan pada posisi y_2 pada waktu t_2 . Besar komponen kecepatan pada arah y dalam kerangka S adalah

$$u_y = \frac{y_2 - y_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta y}{\Delta t} \quad 2.35$$

Dari transformasi Lorentz kita telah mengetahui

$$\begin{aligned} \Delta y &= \Delta y' \\ \Delta t &= \gamma \left(\Delta t' + \frac{v \Delta x'}{c^2} \right) \end{aligned}$$

Sehingga komponen kecepatan vertikal (u_y) dituliskan

$$\begin{aligned} u_y &= \frac{\Delta y}{\Delta t} = \frac{\Delta y'}{\gamma \left(\Delta t' + \frac{v \Delta x'}{c^2} \right)} \\ &= \frac{\Delta y'}{\left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right) \left(\Delta t' + \frac{v \Delta x'}{c^2} \right)} \times \left(\frac{\Delta t'}{\Delta t'} \right) \\ &= \frac{\left(\frac{\Delta y'}{\Delta t'} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}{\frac{1}{\Delta t'} \left(\Delta t' + \frac{v \Delta x'}{c^2} \right)} \\ u_y &= \frac{u'_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v \Delta x'}{c^2 \Delta t'}} = \frac{u'_y \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x} \quad 2.36 \end{aligned}$$

Dan untuk u_z kita gunakan argument yang sama,

$$u_z = \frac{u'_z \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 + \frac{v}{c^2} u'_x} \quad 2.37$$

B. Momentum Relativistik

Kita telah mempelajari bahwa pada fenomena yang melibatkan kecepatan sangat tinggi, maka transformasi Galileo (Fisika Klasik) harus diubah ke dalam transformasi Lorentz (Fisika Relativistik). Perubahan ini juga harus diterapkan pada besaran fisika lainnya, terutama yang berhubungan dengan dinamika misalnya momentum dan energi. Momentum adalah besaran yang muncul untuk menunjukkan benda bergerak. Setiap objek yang memiliki kecepatan maka objek tersebut juga memiliki momentum. Pada fisika klasik, momentum ditunjukkan dengan hasil perkalian massa dan kecepatan. Dengan mempelajari momentum, kita telah memasuki bagian dinamika. Jadi, bagaimana dengan momentum relativistic? Mari kita pelajari dengan seksama!

1. Deskripsi Momentum relativistic

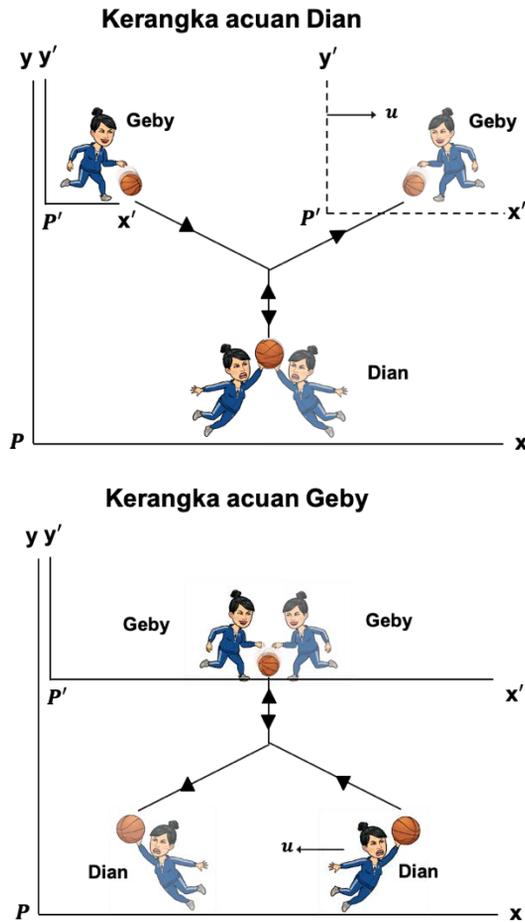
Momentum dalam fisika klasik didefinisikan sebagai hasil perkalian massa dengan kecepatannya $p = mu$, dengan momentum dan kecepatan adalah besaran vektor. Jika kita menggunakan definisi momentum pada fisika klasik ini, maka hukum kekekalan momentum tidak dapat berlaku pada peristiwa tumbukan yang melibatkan kecepatan sangat tinggi. Padahal menurut Einstein, semua hukum Fisika (termasuk hukum kekekalan momentum) adalah invariant (selalu sama) pada semua kerangka inersia.

Momentum relativistic kemudian diformulasikan juga menggunakan transformasi Lorentz. Momentum relativistic diturunkan dari formulasi relativitas kecepatan menurut Lorentz. Setiap objek yang memiliki kecepatan maka akan memiliki momentum. Fenomena momentum relativistic secara sederhana diberikan oleh Gambar 2.18. Geby adalah pengamat dengan kerangka acuan bergerak (P') dan Dian adalah pengamat pada kerangka acuan diam (P).

Dian dan Geby adalah anak kembar yang sedang bermain basket. Mereka masing-masing memainkan bola basket yang identic dengan massa m . Pada keadaan awal, Dian memegang bola pada keadaan diam, sementara Geby bergerak dengan kecepatan u searah sumbu $x +$ terhadap Dian. Pada saat yang sama, Dian melemparkan bolanya ke atas dan Geby melemparkan bolanya ke bawah. Kedua bola kemudian mengalami tumbukan lenting

sempurna secara bersamaan. Dian dan Geby juga menangkap bola mereka masing-masing pada saat bersamaan.

Gambar 2. 18 Momentum relativistik



Laju bola setelah mengalami lentingan sempurna juga sama dengan laju awal bola dilempar, yaitu sebesar v_0 . Gambar 2.18 menunjukkan terjadinya tumbukan dari sudut pandang Dian dan Geby. Dian melempar bola ke atas (searah sumbu x) dengan kecepatan v_0 , sehingga besar kecepatan lemparan bola oleh dian terhadap sumbu x adalah nol. Maka pada kerangka P berlaku :

$$v_{x_0} \text{ dian} = 0 \quad 2.38 \text{ a}$$

$$v_{y_0} \text{ dian} = 0 \quad 2.38. \text{b}$$

Dengan menggunakan momentum klasik, kita dapat menentukan momentum total yang dimiliki oleh Dian saat melempar bola ke atas adalah

$$p_{\text{dian}} = mv_0 \quad 2.39$$

Karena bola mengalami lenting sempurna, maka bola akan kembali ke dian dengan kecepatan yang sama, namun arahnya berlawanan. Sehingga perubahan momentum bola yang diamati Dian adalah:

$$\Delta p_{\text{dian}} = -2mv_0 \quad 2.40$$

Kemudian kita akan menghitung momentum pada bola Geby. Menurut Dian, Geby bergerak ke arah sumbu $x+$ dengan kecepatan U , sambil melemparkan bolanya searah sumbu $y-$, sehingga:

$$v_x \text{ Geby} = u \quad 2.41.a$$

$$v_y \text{ Geby} = -v_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \quad 2.41.b$$

Momentum bola Geby menurut Dian sebelum tumbukan adalah

$$\text{Awal } p_x \text{ Geby} = m \cdot u \quad 2.42.a$$

$$\text{Awal } p_y \text{ Geby} = -mv_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \quad 2.42.b$$

Dan momentum bola Geby menurut Dian setelah tumbukan adalah

$$\text{Akhir } p_x \text{ Geby} = m \cdot u \quad 2.43.a$$

$$\text{Akhir } p_y \text{ Geby} = +mv_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \quad 2.43.b$$

Besar perubahan momentum Geby menurut Dian adalah

$$\Delta p_{\text{Geby}} = \Delta p_y \text{ Geby} = +2mv_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} \quad 2.44$$

Telah dibahas pada kegiatan pembelajaran 2 bahwa hukum kekekalan momentum masih berlaku di fisika modern. Sehingga

$$\Delta p_{\text{Dian}} + \Delta p_{\text{Geby}} = 0 \quad 2.45$$

Saat kita menjumlahkan persamaan 3.3 dengan 3.8, ternyata jumlahnya bukan nol. Dengan demikian, apabila kita menggunakan relativitas kecepatan maka hukum konservasi momentum sendiri tidak dapat dipenuhi. Bahkan jika kita menerapkan relativitas kecepatan berdasarkan teori relativitas klasik pun hukum kekekalan momentum belum dapat dipenuhi.

Untuk itu daripada mengabaikan hukum kekekalan momentum, maka definisi momentum linier pun harus dimodifikasi. Tujuannya adalah supaya sesuai dengan hukum kekekalan momentum dan hukum II Newton. Dengan melakukan hal yang sama saat meninjau kontak panjang, maka formulasi momentum relative juga akan melibatkan factor Lorentz (γ).

Momentum relativistik diformulasikan sebagai

$$\vec{p} = \gamma \cdot m \cdot \vec{u} \tag{2.46}$$

Perhatikan bahwa momentum relativistik tidak dinyatakan dengan $\vec{p} = m\vec{u}$, melainkan dengan $\vec{p} = \gamma \cdot m \cdot \vec{u}$. Dengan γ : *baca gamma* adalah faktor Lorentz yang dinyatakan dengan

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \tag{2.47}$$

Untuk mendefinisikan momentum relativistic ada 2 hal yang perlu diingat :

1. Momentum relativistic harus mendekati nilai $m \cdot \vec{u}$ Ketika kecepatan benda kecil dibandingkan c.
2. Momentum relativistic harus memenuhi hukum kekekalan momentum saat diterapkan pada proses tumbukan relativistic (tumbukan dengan kecepatan sangat tinggi).

Contoh soal – Pembuktian Hukum Kekekalan Momentum

Buktikan bahwa fenomena yang di gambarkan pada Gambar 2.18 memenuhi hukum kekekalan momentum

Jawab

Kita tulis ulang persamaan 2.45 sebagai syarat memenuhi hukum kekekalan momentum:

$$\Delta p \text{ Dian} + \Delta p \text{ Geby} = 0$$

Sekarang kitanyatakan besar perubahan momentum Dian dan Geby masing-masing menurut teori relativitas khusus adalah:

$$\Delta p \text{ Dian} = -2\gamma m v_0 = -\frac{2m v_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v_0}{c}\right)^2}}$$

$$\Delta p \text{ Geby} = \gamma m v_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2} = \frac{m v_0 \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u_{geby}}{c}\right)^2}}$$

Kecepatan total geby dinyatakan dengan

$$u_{geby} = \sqrt{u_x^2 + u_y^2} = \sqrt{u^2 + v_0^2} \sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}$$

Sehingga

$$\Delta p_{\text{Geby}} = \frac{-mv_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}}$$

Kemudian diperoleh

$$\Delta p_{\text{Dian}} + \Delta p_{\text{Geby}} = 0$$

Dengan demikian, menurut pengamatan Dian hukum kekekalan momentum terpenuhi.

Contoh soal – Momentum Relativistik

Sebuah electron dengan massa $9,1 \times 10^{-31}$ kg bergerak dengan kecepatan $0,8$ c. hitung momentum relativistiknya dan bandingkan dengan momentum klasiknya!

Penyelesaian:

Momentum relativistic dicari dengan persamaan 2.46, sedangkan momentum klasik dicari dengan persamaan $p = mu$.

Diketahui :

$$m = 9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$u = 0,8 \text{ c}$$

Ditanya

a. momentum relativistic p

b. momentum klasik p_0

Jawab :

a. momentum relativistic p

$$\begin{aligned} \vec{p} &= \gamma \cdot m \cdot \vec{u} \\ &= \left(\sqrt{\frac{1}{1 - \frac{u^2}{c^2}}} \right) (9 \times 10^{-31})(0,8)(3 \times 10^8) \\ &= \frac{(9 \times 10^{-31})(2,4 \times 10^8)}{0,6} \end{aligned}$$

$$= 3,64 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s}$$

b. momentum klasik

$$p_0 = mu = (9 \times 10^{-31})(0,8)(3 \times 10^8) = 2,184 \times 10^{-22} \text{ kg.m/s}$$

2. Massa relativistik

Beberapa buku fisika menggunakan persamaan 2.45 untuk mendefinisikan massa relativistic. Istilah massa relativistic sering kamu dapatkan di buku-buku fisika SMA. Di buku tersebut mungkin kamu akan mendapatkan istilah massa diam dan massa relativistic. Massa dijelaskan sebagai besaran yang dapat mengembang / meningkat seiring dengan kenaikan kecepatan.

Tapi ada juga pandangan beberapa fisikawan yang tetap menggunakan besaran massa sebagai besaran yang invariant. Massa menjadi sifat intrinsic sebuah benda yang tidak berubah. Pandangan ini disebut dengan paham kekekalan massa. Modul ini menggunakan pandangan massa sebagai sesuatu yang invariant. Massa tidak mengalami perubahan oleh kerangka acuan manapun. Massa akan selalu sama dengan massa yang diukur soleh pengamat diam. Massa diam sama dengan massa benda di semua kerangka acuan. Sehingga massa yang digunakan adalah massa diam.

Massa adalah invariant, massa tidak mengalami perubahan oleh kerangka acuan manapun

B. Energi Relativistik

Besaran energi relativistic dapat diturunkan menggunakan konsep gaya relativistic. Gaya relativistic diturunkandari hukum II Newton dengan menggunakan momentum relativistic. Persamaannya diberikan oleh:

$$\vec{F} = \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d}{dt}(\gamma m \cdot \vec{u}) = \frac{d}{dt} \left(\frac{m\vec{u}}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} \right) \quad 2.48$$

Daripersamaan 3.11 kemudian kita dapat menghubungkan besaran gaya dengan besaran enrgi kinetic yang diberikan oleh persamaan

$$W_{12} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = K_2 - K_1 \quad 2.49$$

Dengan K_1 dan K_2 masing-masing menunjukkan energi kinetik pada keadaan awal dan akhir. Apabila keadaan awal benda adalah diam, maka kita dapat menentukan $K_1 = 0$ dan $K_2 = K$, sehingga berlaku :

$$W = K = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int_1^2 \vec{F} \cdot d\vec{s} = \int \frac{d}{dt} (\gamma m \vec{u}) \cdot \vec{u} dt \quad 2.50$$

Tentu saja dengan mengganti $d\vec{s} = \vec{u} \cdot dt$

$$K = m \int \frac{d}{dt} (\gamma \vec{u}) \cdot \vec{u} dt = m \int \vec{u} \cdot d(\gamma \vec{u}) \quad 2.51$$

Karena massa adalah invariant, maka variable m dapat dikeluarkan dari integral. Faktor relativistic atau factor Lorentz γ bergantung pada kecepatan \vec{u} sehingga tidak bisa dikeluarkan dari integral.

Limit integral adalah dari nilai 0 hingga $\gamma \vec{u}$, sehingga

$$K = m \int_0^{\gamma u} \vec{u} \cdot d(\gamma \vec{u}) \quad 2.52$$

Integral pada persamaan 2.52 dapat diselesaikan dengan melakukan integral sebagian. Hasilnya adalah

$$K = \gamma mc^2 - mc^2 = mc^2 (\gamma - 1) \quad 2.53.a$$

$$K = mc^2 \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} - 1 \right) \quad 2.53.b$$

Persamaan 2.53 adalah persamaan untuk energi kinetik relativistic. Persamaan ini telah dikonfirmasi dalam sebuah eksperimen yang menggunakan akselerator (pemercepat partikel energi tinggi).

Dari persamaan 2.53 kita dapat memperoleh:

a. untuk kecepatan $u \ll c$,

Untuk kecepatan rendah ($u \ll c$) kita dapat mengekspansikan γ sebagai deret binomial sebagai berikut:

$$K = mc^2 \left(1 - \left(\frac{u}{c} \right)^2 \right)^{1/2} - mc^2$$

$$K = mc^2 \left(1 + \frac{1}{2} \left(\frac{u}{c} \right)^2 + \dots \right) - mc^2 \quad 2.54$$

karena $u \ll c$, maka semua suku $\left(\frac{u}{c} \right)^4$ dan pangkat yang lebih tinggi akan diabaikan. Sehingga diperoleh

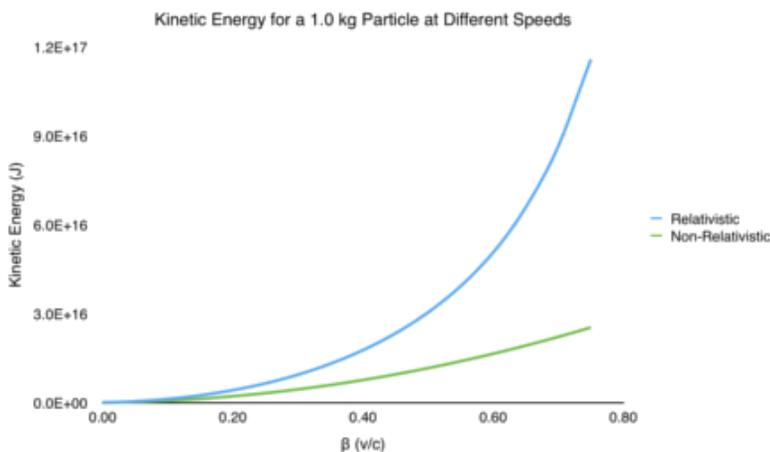
$$K = mc^2 + \frac{1}{2} mu^2 - mc^2$$

$$K = \frac{1}{2} mu^2 \quad 2.55$$

Persamaan 2.54 menunjukkan besar energi kinetik pada kecepatan rendah. Pada kecepatan rendah akan berlaku $K = \frac{1}{2} mu^2$ (persamaan 2.55) persamaan ini dikenal juga sebagai persamaan energi kinetik non relativistic.

b. untuk kecepatan tinggi ($u \rightarrow c$) berlaku sesuai dengan persamaan 2.53. persamaan ini disebut juga sebagai persamaan energi kinetik relativistik. Perbandingan energi kinetik relativistik dengan energi kinetik non relativistik (Gambar 2.19) menunjukkan perbedaan yang sangat besar. Energi kinetik relativistik jauh lebih besar dibandingkan dengan energi kinetik non relativistik.

Gambar 2. 19 Perbandingan Energi Kinetik Relativistik dan Non Relativistik



Sumber: <https://physics.stackexchange.com/questions/414787/under-which-circumstances-relativistic-kinetic-energy-tends-to-classical-kinetic>

Contoh Soal- Energi Kinetik Relativistik

Elektron yang digunakan untuk memproduksi sinar X mengalami percepatan dari keadaan diam menjadi bergerak saat melalui potensial 250.000 volt. Electron kemudian menumbuk sebuah lempeng logam.

- hitung kelajuan electron saat menumbuk lempeng logam
- hitung besar kekeliruan jika dihitung menggunakan energi kinetic klasik

Jawab

a. besar energi kinetic diberikan oleh

$$\begin{aligned} K = W = qV &= (1,6 \times 10^{-19} \text{ C})(250.000) \\ &= 4,0 \times 10^{-15} \text{ J} \end{aligned}$$

Hubungan factor Lorentz dengan energi kinetic dari persamaan 2.53.a diberikan oleh

$$\gamma = 1 + \frac{K}{mc^2} \quad 2.56$$

Kuantitas mc^2 diberikan oleh

$$\begin{aligned} mc^2 &= (9,11 \times 10^{-31})(3 \times 10^8)^2 \\ &= 8,19 \times 10^{-14} \text{ J} \end{aligned}$$

Factor Lorentz kemudian sebesar:

$$\gamma = 1,4049$$

Dengan menggunakan parameter kecepatan $\beta = \left(\frac{v}{c}\right)^2$, maka hubungan factor Lorentz dan parameter kecepatan dapat dinyatakan sebagai berikut

$$\beta = \frac{\gamma^2 - 1}{\gamma^2} \quad 2.57$$

Dengan memasukkan nilai γ , selanjutnya kita akan memperoleh

$$\beta = 0,3$$

Dan

$$u = \beta c = 0,90 \times 10^8 \text{ m/s} \quad 2.58$$

b. jika menggunakan perhitungan energi kinetic klasik diperoleh

$$u = \sqrt{\frac{2K}{m}} = 0,94 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Terdapat selisih sebesar 4×10^6 m/s, sekitar 4% dari kecepatan yang dihitung menggunakan teori relativitas.

1. Energi total Total energi dan dan energi diam

Hubungan factor Lorentz dan energi kinetik relativistik diberikan oleh:

$$\gamma mc^2 = K + mc^2 \quad 2.59$$

Selanjutnya, suku mc^2 disebut sebagai Energi diam yang disimbolkan dengan E_0 .

$$E_0 = mc^2 \quad 2.60$$

Persamaan $E_0 = mc^2$ sangat familiar bagi kita. Persamaan ini sendiri seringkali dikaitkan dengan Einsterin. Persamaan energi diam menunjukkan bahwa walaupun partikel tidak memiliki kecepatan dan bahkan energi kinetic, namn partikel tersebut masih memiliki enrgi akibat massanya.

Persamaan 2.59 dan 2.60 dapat ditulis ulang sebagai

$$E = \gamma mc^2 = E_0 + K \quad 2.61$$

Persamaan 2.61 menunjukkan persamaan total dari partikel atau biasa disebut sebagai energi total. Energi total dinyatakan dengan

$$E = \gamma mc^2 \quad 2.62$$

2. Kesetaraan massa dan energi

Telah disebutkan diatas bahwa persamaan energi diam menunjukkan bahwa massa memiliki kontribusi bagi energi total partikel. Untuk memperoleh kesetaraan energi dan massa ini, maka kita perlu melakukan bebrapa modifikasi, agar disesuaikan dengan teori relativitas. Sebagaimana ruang dan waktu tak terpisahkan, maka dalam dinamika relativitas ini kita akan mengenal bahwa massa dan energi juga tidak dapat dipisahkan. Hubungan massa dan energi dirumuskan dalam hukum kekekalan massa – energi. Untuk lebih memahami hukum ini, mari kita perhatikan uraian berikut.

Terdapat dua balok kayu yang masing-masing bermassa m dan memiliki energi kinetic K . kedua balok bergerak mendekati satu sama lain (Gambar 2.19). kemudian sebuah pegas ditempatkan diantara keduanya. Pegas tersebut tertekan dan mengunci di saat terjadi tumbukan antar kedua balok. Maka menurut hukum kekekalan massa energi berlaku:

a. Energi sebelum tumbukan

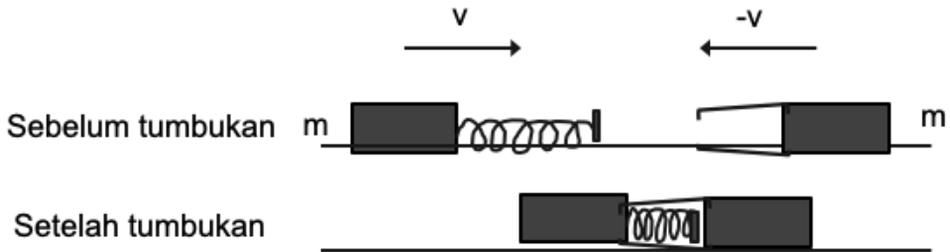
$$E = 2mc^2 + 2K \quad 2.62$$

b. Energi setelah tumbukan diberikan oleh

$$E = Mc^2 \quad 2.63$$

M adalah massa setelah tumbukan dan m adalah massa balok masing-masing sebelum tumbukan. M lebih besar daripada m.

Gambar 2. 20 Kesetaraan Massa dan Energi



Energi kinetic dalam pegas mengakibatkan pegas termampat. Pegas kemudian mengalami peningkatan energi potensial. Dalam tinjauan pegas saat ini, energi kinetic dikonversi dalam bentuk tambahan massa. Tambahan massa inilah yang menyebabkan kenaikan energi potensial pegas. Secara matematis kita tuliskan

$$\Delta M = (M - 2m) = \frac{2K}{c^2} \quad 2.64$$

Persamaan 2.63

$$E = mc^2$$

Adalah persamaan terkenal Einstein tentang hubungan massa dengan energi atau biasa disebut sebagai persamaan **kesetaraan massa – energi**. Hasil ini menunjukkan bahwa pada massa yang kecil dapat menghasilkan energi yang sangat besar jika bergerak dengan kecepatan mendekati c.

3. Hubungan energi dan momentum

Ada kalanya kita harus menghubungkan energi dengan momentum karena setiap benda yang bergerak pasti memiliki momentum. Dan setiap benda yang memiliki momentum pasti memiliki energi kinetic. Tidak ada hukum kekekalan energi kinetic, yang ada adalah hukum kekekalan momentum linear. Hukum kekekalan momentum linear berlaku pada system terisolasi. System terisolasi adalah sistem yang tidak dikenai gaya luar.

Telah diperoleh bahwa momentum relativistic diberikan oleh persamaan

$$\vec{p} = \gamma \cdot m \cdot \vec{u} = \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} m \cdot \vec{u}$$

Persamaan diatas kita kuadratkan dan dikalikan dengan c^2 sehingga

$$p^2 = \gamma^2 m^2 u^2 \quad 2.65$$

Dengan menggunakan parameter kecepatan $\beta^2 = \frac{u^2}{c^2}$ dan kalikan kedua persamaan dengan c^2 maka diperoleh

$$\begin{aligned} p^2 c^2 &= \gamma^2 m^2 u^2 c^2 \\ &= \gamma^2 m^2 \beta^2 c^4 \end{aligned} \quad 2.66$$

Gunakan hubungan factor Lorentz dan parameter kecepatan :

$$\beta^2 = 1 - \frac{1}{\gamma^2}$$

Maka diperoleh:

$$\begin{aligned} p^2 c^2 &= (\gamma^2 - 1) m^2 c^4 \\ &= \gamma^2 m^2 c^4 - m^2 c^4 \\ p^2 c^2 &= E^2 - E_0^2 \end{aligned} \quad \begin{array}{l} 2.67 \\ 2.68 \end{array}$$

Persamaan 2.68 memberika hubungan energi dan momentum yang dapat ditulis ulang menjadi

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2$$

4. Partikel tak bermassa

Persamaan 2.68 juga dapat digunakan untuk menentuk energi partikel tak bermassa, misalnya foton. Foton tidak memiliki energi diam, karena foton tidak bermassa. Dengan sedikit memodifikasi persaman 2.68 , maka besar energi foton adalah

$$E = pc \quad 2.69$$

Contoh Soal – menghitung besar energi total dan energi kinetik electron

Suatu electron mempunyai kecepatan 0,8 c. tentukan besar energi diam, energi total dan energi kinetiknya. Massa Elektron adalah $0,511 \text{ MeV}/c^2 = 9,31 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

Jawaban

Energi diam electron diberikan oleh

$$E_0 = mc^2 = 0,511 \frac{MeV}{c^2} \cdot c^2 = 0,511 MeV$$

Energi total yang dimiliki electron

$$E = \gamma mc^2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{0,8^2 c^2}{c^2}}} 0,511 MeV = 0,852 MeV$$

Energi kinetik electron adalah sebesar

$$K = E - E_0 = 0,852 - 0,511 = 0,341 MeV$$

Catatan: $1 MeV = 10^6 eV = 1,6 \times 10^{-13} J$

C. Bukti Momentum dan Energi Relativistik Einstein

1. Bukti momentum relativistik

Eksperimen yang dilakukan pada electron – electron dipercepat mendekati kecepatan cahaya menunjukkan bahwa momentum electron tidak sama dengan mc . Hasil eksperimen menunjukkan persamaan yang tepat adalah persamaan untuk momentum relativistik dari electron, yaitu $p = \gamma mu$

2. Bukti Energi Relativistik

Dalam reaksi fisi dan fusi yang adalah manifestasi dari persamaan massa – energi terjadi pelepasan sejumlah energi. Adanya pelepasan energi ini adalah bukti kuat yang menyokong persamaan energi relativistik Einstein. Pengubahan massa menjadi energi merupakan konsep dasar dari pembuatan bom atom.

Contoh Soal- Kesetaraan Massa-Energi pada Bom Atom

Bom atom yang meledak di Hiroshima memiliki energi $8,4 \times 10^{15} J$. Berapa kilogram massa yang diubah untuk menghasilkan energi sebesar ini?

Jawab

Gunakan hubungan massa-energi untuk memperoleh informasi massa yang diperlukan

$$\begin{aligned} E &= mc^2 \\ 8,4 \times 10^{15} &= m(3 \times 10^8)^2 \\ m &= 0,09 kg \end{aligned}$$

Hanya diperlukan 0,09 kg untuk menghasilkan energi yang besar ini.

RANGKUMAN

1. Persamaan kecepatan yang diukur oleh pengamat diam diberikan oleh

$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

2. Momentum relativistic kemudian diformulasikan juga menggunakan transformasi Lorentz

$$\vec{p} = \gamma m \vec{u}$$

3. Massa adalah invariant, massa tidak mengalami perubahan oleh kerangka acuan manapun.
4. Energi kinetik relativistic diberikan oleh

$$K = mc^2(\gamma - 1)$$
$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} - mc^2$$

Dengan suku mc^2 disebut sebagai Energi diam yang disimbolkan dengan E_0 . Dan γmc^2 disebut sebagai energi total.

5. Kesetaraan massa dan energi diberikan oleh

$$E = mc^2$$

6. Hubungan energi dan momentum diberikan oleh

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2$$

7. Besar partikel tak bermassa diberikan oleh

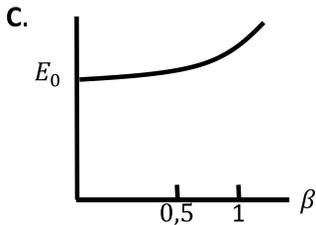
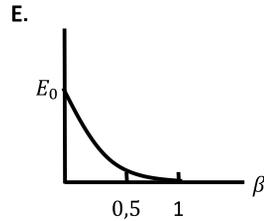
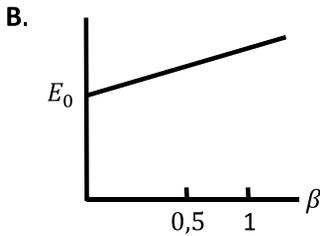
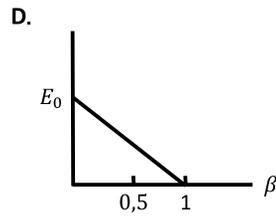
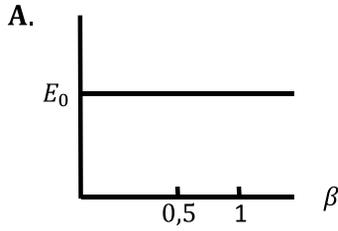
$$E = pc$$

Uji Formatif

Pilihan Ganda

1. Dua roket saling mendekat dengan kelajuan relatif sama terhadap bumi. Jika kelajuan relatif roket satu terhadap roket lain adalah $0,8 c$ maka kelajuan roket terhadap bumi adalah ...
 - a. $0,40 c$
 - b. $0,50 c$
 - c. $0,60 c$
 - d. $0,70 c$
 - e. $0,75 c$

2. Dua pesawat terbang yang cukup canggih menemui jalur terbang yang sama berupa garis lurus. Pesawat pertama memiliki kecepatan $0,8 c$ terhadap bumi dan pesawat kedua (berada di belakang pesawat pertama) memiliki kecepatan $0,2 c$ terhadap Bumi. Sebuah benda bergerak lurus sejajar dengan kedua pesawat tersebut dengan kecepatan $0,5c$ terhadap pesawat pertama. Jika diukur dari pesawat yang kedua, kecepatan benda adalah ...
- a. $0,80 c$
 - b. $0,84 c$
 - c. $0,89 c$
 - d. $0,94 c$
 - e. $0,98 c$
3. Daya yang dipancarkan oleh matahari ke Bumi adalah $1,5 \times 10^{16}$ watt. Massa materi yang diproses di matahari untuk menyinari Bumi dalam satu hari adalah ...
- a. 84.500 kg
 - b. 62.300 kg
 - c. 43.200 kg
 - d. 38.600 kg
 - e. 14.400 kg
4. Suatu partikel bertenaga rehat (diam) E_0 sedang bergerak dengan tenaga kinetik E_K dan kecepatan v sedemikian rupa sehingga $\frac{v}{c} = 0,99$. Besar $\frac{E_K}{E_0}$ untuk partikel adalah ...
- a. 2
 - b. 4
 - c. 5
 - d. 6,1
 - e. 9
5. Grafik yang menunjukkan variasi energi kinetik relativistik terhadap β adalah ... ($\beta = \text{parameter kecepatan} = \frac{v}{c}$, dengan c adalah laju cahaya di vakum).



6. Agar energi kinetik benda bernilai 20% energi diamnya dan c adalah kelajuan cahaya dalam ruang hampa, maka benda harus bergerak dengan kelajuan ...

a. $\frac{c}{4}$

b. $\frac{c}{2}$

c. $\frac{c\sqrt{11}}{6}$

d. $\frac{c\sqrt{2}}{3}$

e. $\frac{c\sqrt{13}}{6}$

7. Sebuah electron dipercepat melalui sebuah beda potensial V . kelajuan yang dicapainya secara pendekatan adalah

a. sebanding dengan v untuk v kecil dan \sqrt{v} untuk v besar

b. sebanding dengan \sqrt{v} untuk v kecil dan tetap untuk v besar

c. sebanding dengan v untuk v kecil dan tetap untuk v besar

d. sebanding dengan \sqrt{v} untuk v kecil dan v besar

e. sebanding dengan \sqrt{v}

8. Jika energi total proton adalah empat kali energi diamnya, maka kelajuan proton adalah ... (c= kelajuan cahaya di ruang hampa)
- | | |
|-----------------------------|-----------------------------|
| a. $\frac{2}{3}\sqrt{2} c$ | d. $\frac{1}{2}\sqrt{11} c$ |
| b. $\frac{1}{4}\sqrt{15} c$ | e. $\frac{1}{6\sqrt{5}} c$ |
| c. $\frac{3}{5}\sqrt{3} c$ | |
9. Energi total sebuah partikel adalah $\sqrt{10}$ energi diamnya. Momentumnya adalah...
- | | |
|-------------------|-------------------|
| a. $2 mc$ | d. $3\sqrt{2} mc$ |
| b. $2\sqrt{2} mc$ | e. $4 mc$ |
| c. $3 mc$ | |
10. Sebuah electron dengan energi kinetik $2mc^2$ bertumbukan sentral dengan electron lain yang memiliki energi kinetik $2mc^2$. Jika diamati dari electron lainnua sesaat sebelum tumbukan, besar energi kinetik electron tersebut adalah ..
- | | |
|-------------|--------------|
| a. mc^2 | d. $8 mc^2$ |
| b. $2mc^2$ | e. $16 mc^2$ |
| c. $4 mc^2$ | |

Essay

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan massa adalah invariant!

Jawab:

2. Dua electron dipancarkan oleh dua sumber. Kecepatan electron satu sama lain adalah $0,99c$ dalam arah berlawanan. Hitung kecepatan electron yang satu relatif terhadap yang lain!

Jawab:

3. Anggap suatu pesawat ruang angkasa bergerak menuju bumi dengan kecepatan $0,3 c$ relatif terhadap bumi. Sebuah meteorit bergerak dengan kecepatan $0,1 c$ relatif terhadap bumi menuju bumi. Hitung kecepatan meteorit relatif terhadap pesawat.

Jawab:

4. Anggap suatu partikel bermassa $0,05 \text{ kg}$ bergerak dengan kecepatan $0,3 c$. Hitunglah berapa energi kinetik partikel itu!

Jawab:

5. Suatu partikel bergerak sedemikian sehingga energi kinetiknya sama dengan energi diamnya. Hitung berapa kecepatan partikel tersebut (dalam m/s)

Jawab:

6. Hitung momentum electron yang energi kinetiknya 2 kali energi diamnya!

Jawab:

7. Pada suatu alat pemercepat proton yang bernama SSC, sebuah proton direncanakan memiliki energi kinetik hingga 3×10^{-6} J. Berapa kecepatan proton ini!

Jawab:

8. Berapa kilogram massa harus diubah untuk menghasilkan energi $9,0 \times 10^{10}$ J ?

Jawab:

9. Massa matahari 2×10^{30} kg. energi panas matahari adalah 2×10^{41} J. berapa massa yang diubah menjadi energi panas ini? Berapa perbandingan mass aini jika dibandingkan dengan massa matahari?

Jawab:

10. Tentukan energi yang diperlukan untuk mempercepat sebuah elektron dari $0,6c$ menjadi $0,8c$!

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

<https://physics.stackexchange.com/questions/414787/under-which-circumstances-relativistic-kinetic-energy-tends-to-classical-kinetic>

Beiser, Arthur. (2003). Concepts of Modern Physics 6th Edition. Mc Graw Hill.

Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). Fisika Dasar 1 Edisi 7 Jilid 3. Jakarta: Erlangga.

Kanginan, Marthen. (2018). Fisika untuk SMA/MA Kelas XII. Erlangga: Jakarta.

Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). Modern Physics Third Edition (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.

Kusminarto (2011). Esensi Fisika Modern. Andi: Yogyakarta.

Surya, Yohanes. (2003). Fisika itu Mudah SMU 3C. Bina Sumber Daya MIPA: Jakarta.

- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013).
Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition (Third).
Boston: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). Modern Physics - Fifth Edition. In
Modern Physics Sixth Edition. W.H.Freeman and Company: New
York.

Kegiatan Pembelajaran 4 GEJALA RELATIVITAS KHUSUS (PART 3) DAN RELATIVITAS UMUM

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
<p>1. Mahasiswa dapat menjelaskan gejala relativitas dalam perambatan gelombang elektromagnetik</p>	<p>a. Mahasiswa dapat menjelaskan fenomena perambatan gelombang elektromagnetik kerangka acuan diam dan kerangka acuan yang bergerak berdasarkan teori relativitas.</p> <p>b. Mahasiswa dapat melakukan penurunan laju cahaya menggunakan hukum maxwell dan teori relativitas Einstein.</p> <p>c. Mahasiswa dapat menjelaskan universalitas laju cahaya berdasarkan teori relativitas Einstein.</p> <p>d. Mahasiswa bisa menggambarkan dan menjelaskan interaksi medan listrik dan medan magnet pada gelombang elektromagnetik.</p>
<p>2. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang teori relativitas umum</p>	<p>a. Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana lahirnya teori relativitas umum.</p> <p>b. Mahasiswa dapat menjelaskan prinsip-prinsip dasar teori relativitas umum</p> <p>c. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang formulasi medan gravitasi Einstein mulai dari tensor ricci hingga tensor Einstein</p> <p>d. Mahasiswa dapat menjelaskan fenomena-fenomena yang dapat diprediksi menggunakan teori relativitas umum</p>

Uraian Materi

A. Relativitas Khusus dan Elektrodinamika

Maxwell telah menunjukkan bahwa gelombang elektromagnetik terdiri dari medan listrik dan medan magnet. Namun semuanya belum dapat menjelaskan bagaimana hubungan atau interaksi sebenarnya yang terjadi antara medan listrik dan medan magnet. Para ilmuwan saat itu bingung bagaimana menjelaskan gelombang elektromagnetik. Bagaimana gelombang tersebut dapat dilihat sebagai medan listrik menurut pengamat yang satu dan sebagai medan magnet pada pengamat yang lain pada saat bersamaan. Fenomena ini kemudian didiskusikan pada kelas-kelas fisika lanjut.

Pada usia 26 tahun, Einstein menggunakan teori relativistic untuk menjelaskan hubungan listrik dan magnet pada gelombang elektromagnetik. Ia menekankan bahwa medan listriklah yang menyebabkan terjadinya medan magnet. Keyakinan ini berdasar pada percobaan Faraday dan Gaya Lorentz. Penjelasan ini tertulis dalam makalahnya yang berjudul “On The electrodynamic of Moving Bodies”. Ia tetap menggunakan persamaan Maxwell dalam mendeskripsikan gelombang elektromagnet. Dalam makalah ini Einstein tetap bertahan bahwa persamaan Maxwell juga berlaku pada kerangka inersia.

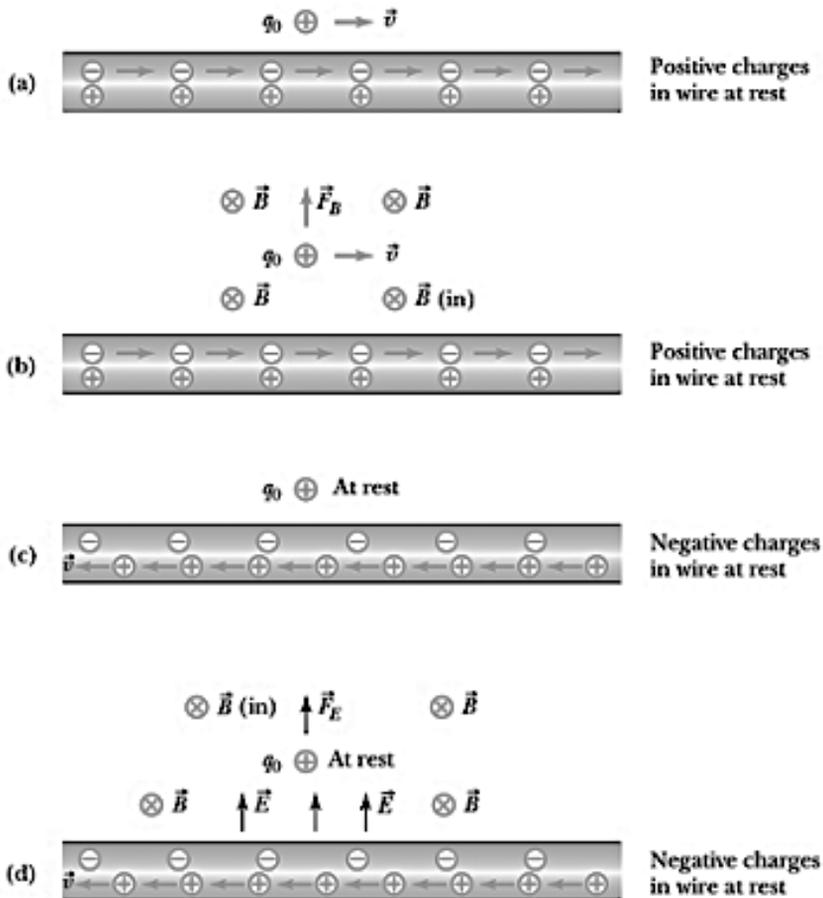
1. Penjelasan Einstein tentang Elektromagnetisme

Penjelasan Einstein tentang gelombang elektromagnetik saat itu menggunakan penjelasan gerak antar muatan (Gambar 2.21). Sebuah muatan q_0 yang berada di dekat kabel bermuatan. Di dalam kabel terdapat muatan positif dan muatan negatif. Muatan positif dalam keadaan diam sehingga menjadi kerangka acuan diam (P), sedangkan muatan negatif dalam kerangka bergerak (P'). Muatan negatif bergerak searah sumbu $x +$ juga, searah dengan muatan q_0 yang berada di luar kabel.

Pengamatan kerangka acuan diam (P) dilakukan berdasarkan sudut pandang muatan positif. Menurut kerangka acuan muatan positif, muatan negative bergerak terhadapnya (Gambar 2.21 a). Muatan yang bergerak menghasilkan medan magnet. Medan magnet B tersebut kemudian berinteraksi dengan muatan q_0 yang bergerak dengan kecepatan v . Interaksi tersebut menghasilkan gaya magnet atau gaya Lorentz dengan arah ke atas kabel (Gambar 2.21 b). Maka berdasarkan kerangka acuan diam, gelombang electromagnet yang teramati adalah dalam bentuk medan magnet.

Kemudian dari kerangka acuan bergerak (P') yang diwakili oleh electron, maka muatan q_0 dalam keadaan diam dan muatan positif bergerak searah sumbu x negative (Gambar 2.21 c dan d). Muatan q_0 dalam keadaan diam karena bergerak dengan kecepatan arah yang sama dengan muatan negatif. Muatan positif bergerak kearah kiri, sehingga terlihat jarak antara muatan negative dan muatan positif menjadi lebih dekat (akibat pemendekan panjang).

Gambar 2. 21 Elektromagnetisme pada teori relativistik



Sumber: Thronton & Rex (2013)

Pada sudut pandang ini, gerak muatan positif juga menghasilkan medan magnet B . Namun karena muatan uji q_0 dalam keadaan diam, maka tidak ada gaya Lorentz yang dihasilkan. Sehingga saat itu muatan uji malah

mengalami gaya elektrostatik berupa gaya tolak antar muatan yang sejenis yang arahnya juga keatas. Berdasarkan pengamatan kerangka bergerak diperoleh gelombang electromagnet dalam bentuk medan listrik (Gambar 2.21 c dan d).

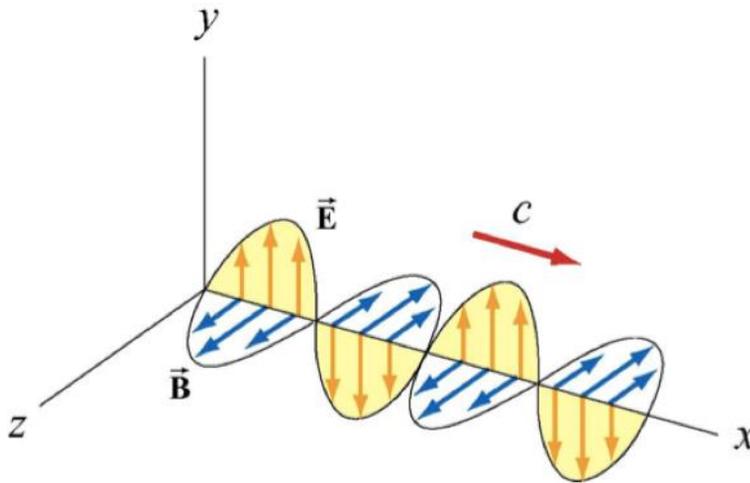
Masing-masing bentuk interaksi berupa gaya magnet F_B dan gaya listrik F_E ini kemudian digabung dalam bentuk persamaan gaya magnet setara dengan gaya listrik.

$$\vec{F}_B = \vec{F}_E \quad 2.70.a$$

$$\vec{B} q v = \vec{E} \cdot q$$

$$v = \frac{\vec{E}}{\vec{B}} \quad 2.70.b$$

Gambar 2. 22 Gelombang Elektromagnetik



Sumber:

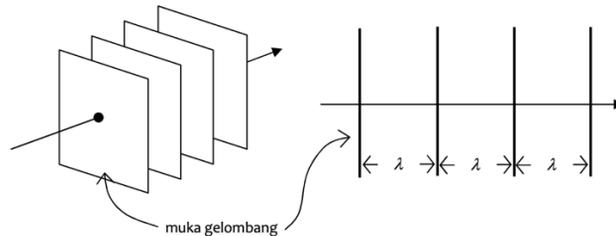
<http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide13.pdf>

Persamaan 2.70.a dan 2.70.b adalah persamaan kecepatan gelombang elektromagnetik (gelombang cahaya), yang jika digambarkan sebagai gelombang bidang (Gambar 2.22) perpaduan medan listrik dan medan magnet. Perpaduan ini timbul akibat ada dua kerangka pengamat berbeda yang mengamati sebuah fenomena, sehingga menimbulkan hasil pengamatan yang berbeda juga. Satu kerangka mengamati bahwa yang ditimbulkan adalah

medan listrik dan kerangka lain mengamati gelombang tersebut adalah medan magnet.

Gelombang bidang adalah gelombang satu dimensi dengan gangguan (osilasi) yang terdistribusi merata pada bidang datar (Gambar 2.23) gelombang bidang adalah sebuah pendekatan yang lebih realistic untuk menjelaskan gelombang sferis (bola) yang merambat 3 dimensi (ruang). Gelombang bidang biasanya juga dipakai untuk menjelaskan keadaan gelombang pada jarak yang jauh dari sumber gelombang, misalnya gelombang cahaya dari matahari dan gelombang radio yang telah ditransmisikan beberapa kilometer jauhnya. Gelombang bidang memiliki muka gelombang dengan bentuk sebuah bidang datar.

Gambar 2. 23 Gelombang bidang dengan muka gelombang dan arah rambat



Sumber: <https://nurma.staff.uns.ac.id/wp-content/blogs.dir/406/files/2009/05/bab-iii-gelombang-bunyi.pdf>

Muka gelombang adalah permukaan gelombang yang terbentuk akibat usikan/gangguan (osilasi) yang memiliki fase sama. Jika dimisalkan, sebuah gelombang merambat pada sumbu x, maka dapat kita nyatakannya (ϕ , baca: phi) sebagai:

$$\phi = kx - \omega t + \phi_0 \quad 2.71$$

Persamaan diatas juga dapat dinyatakan dalam vektor gelombang **k**. **Vektor gelombang k** adalah besaran yang amplitudonya merupakan angka gelombang dan arahnya menunjukkan arah rambat gelombang. Persamaan fasa dalam vektor gelombang dinyatakan dengan

$$\phi = \mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi_0 \quad 2.72$$

Dengan r adalah vektor posisi dari muka gelombang dalam sistem koordinat yang bersesuaian. Dengan demikian fungsi gelombang secara umum dapat dinyatakan dengan persamaan sinusoidal

$$\psi = \psi_0 \sin \phi$$

$$\psi(x, t) = \psi_0 \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi_0) \quad 2.73$$

Dengan $\psi(x, t)$, ψ (baca: psi) adalah gelombang sebagai fungsi posisi (x) dan waktu (t), ψ_0 adalah amplitudo gelombang. Sehingga medan listrik \vec{E} dan medan magnet \vec{B} yang merambat dapat dinyatakan juga sebagai fungsi gelombang sebagai berikut

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi_0) \quad 2.74$$

$$\vec{B}(x, t) = \vec{B}_0 \sin(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t + \phi_0) \quad 2.75$$

Gambar 2.22 menunjukkan bahwa antara medan listrik \vec{E} dan medan magnet \vec{B} saling tegak lurus. Kedua medan ini juga saling tegak lurus dengan arah rambatnya, sehingga ini lah yang membuat gelombang elektromagnetik adalah sebuah **gelombang transversal**.

Dari Gambar 2.22 kita dapat memisalkan sebuah gelombang elektromagnetik yang merambat pada sumbu x , sehingga sumbu x adalah **arah propagasinya**, sumbu z adalah arah osilasi medan magnet dan sumbu y adalah arah osilasi medan listrik. Persamaan gelombang E dan B juga dapat ditulis

$$\vec{E}(x, t) = \vec{E}_0 \sin(kx - \omega t + \phi_0) \hat{j} \quad 2.76$$

$$\vec{B}(x, t) = \vec{B}_0 \sin(kx - \omega t + \phi_0) \hat{k} \quad 2.77$$

Dengan $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ dan $\omega = 2\pi f$. Persamaan gelombang pada medan listrik (Pers. 2.76) dan medan magnet (Pers 2.77) ini juga menunjukkan juga bahwa medan listrik dan medan magnet saling tegak lurus, kedua medan ini juga memiliki arah rambat yang tegak lurus dengan arah osilasinya dan memiliki fase yang sama (**sefase**). Dua gelombang atau lebih dikatakan memiliki fase yang sama (sefase) apabila puncak-puncak dan lembah-lembah gelombangnya saling berimpitan.

Gelombang elektromagnetik menurut teori relativitas khusus menunjukkan bahwa medan magnet timbul dari arus (saat electron bergerak) dan medan listrik timbul dari muatan (saat electron diam). Timbulnya medan magnet dan medan listrik ini tidak independen, namun saling berhubungan, sebagai sebuah fenomena namun terdiri atas dua aspek. Teori relativitas juga menekankan bahwa tidak mungkin medan listrik dihasilkan jika tidak ada medan magnet, dan sebaliknya. Teori Relativitas dapat menjelaskan dengan baik adanya unifikasi (kesatuan) listrik dan magnet pada gelombang elektromagnetik.

Dari penjelasan diatas, kemudian kita dapat menyatakan 4 (empat) ciri gelombang elektromagnetik, diantaranya:

- a) Merupakan gelombang transversal, arah osilasi medan magnet dan medan listrik selalu tegak lurus dengan arah rambatnya.
- b) Medan magnet dan medan listrik selalu tegak lurus
- c) Hasil perkalian silang (cross product) Medan listrik dan Medan magnet selalu menyatakan arah rambat gelombang
- d) Medan listrik dan medan magnet bervariasi secara sinusoidal namun saling sefase dan sefrekuensi satu sama lain.

2. Universalitas Laju Cahaya

Perbandingan antara vektor medan listrik dan vektor medan magnet adalah besar kecepatan gelombang elektromagnetik. Dengan $\epsilon_0 =$ permitivitas pada ruang hampa $= 8,85 \times 10^{-12} \frac{C^2}{Nm^2}$ dan $\mu_0 =$ permeabilitas pada ruang hampa $= 4\pi \times \frac{10^{-7}Wb}{A.m}$. Hubungan antara medan magnet dan medan listrik ini bisa kita selesaikan dengan menggunakan hukum-hukum Maxwell. Hukum Faraday tentang induksi medan listrik akibat perubahan fluks medan magnet (persamaan 2.71) dan Hukum Ampere tentang induksi medan magnet akibat arus listrik dan perubahan fluks medan listrik (persamaan 2.72)

$$\nabla \times \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad 2.71$$

$$\nabla \times \vec{B} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \mu_0 \vec{J} \quad 2.72$$

Kemudian kita gunakan operasi vektor *curl curl* pada persamaan 2.71

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{V}) = \nabla(\nabla \cdot \vec{V}) - \nabla^2 V$$

Sehingga dalam keadaan vakum akan berlaku:

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \nabla \times \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$$

$$\nabla \times (\nabla \times \vec{E}) = \frac{\partial (\nabla \times \vec{B})}{\partial t}$$

$$\cancel{\nabla(\nabla \cdot \vec{E})} - \nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} + \cancel{\mu_0 \vec{J}} \right)$$

$$-\nabla^2 \vec{E} = \frac{\partial}{\partial t} \left(\epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} \quad 2.73$$

Persamaan 2.73 adalah persamaan gelombang, yang dinyatakan dengan bentuk

$$\frac{\partial^2 \varphi}{\partial x^2} = v^2 \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2}$$

Untuk membuktikannya, kita kembali menuliskan persamaan 2.73 dengan mengcancel suku $\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2}$ pada ruas kiri dan kanan.

$$\frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial x^2} = \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2}$$

Kemudian gabungkan suku ∂t^2 dengan ∂x^2 pada ruas yang sama, sehingga diperoleh

$$\frac{\partial t^2}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} = \epsilon_0 \mu_0$$

Demikian, sehingga diperoleh laju gelombang cahaya di ruang hampa adalah

$$v^2 = \frac{1}{\epsilon_0 \mu_0}$$

$$c = v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \quad 2.74$$

Hasil yang ditemukan juga Persamaan 2.74 ini menunjukkan hasil yang sama dengan persamaan maxwell tentang laju cahaya sama dengan temuan maxwell, yaitu $c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \approx 3 \times 10^8 \text{ m/s}$.

Penjelasan Einstein tentang relativitas fenomena elektromagnetisme juga mendukung persamaan Maxwell tentang laju cahaya. Sejalan dengan penjelasan Einstein ini juga terdapat beberapa eksperimen yang mendukung besar laju cahaya di ruang hampa. Hingga saat ini, ilmuwan masih menggunakan laju cahaya di ruang hampa adalah konstan dan tidak ada kecepatan yang melebihi kecepatan cahaya. Eksperimen-eksperimen yang membuktikan universalitas cahaya diantaranya:

- (1) eksperimen Laser He-Ne oleh Joint Institute untuk laboratorium Astrofisika di Boulder, Colorado
- (2) eksperimen laser He-Ne oleh Kennedy-Thorndike
- (3) eksperimen peluruhan pion menjadi sinar gamma
- (4) Eksperimen emisi sinar X oleh pulsar binary

(5) Sinkronisasi waktu oleh GPS

Ketika teori relativitas diterima, yaitu setelah Einstein mengemukakan gagasannya tahun 1905, khususnya pada postulat kedua, yaitu tentang universalitas laju cahaya di ruang hampa. Kecepatan gelombang cahaya menjadi penting, karena cahaya memiliki kecepatan yang seragam meskipun diukur oleh pengamat berbeda. Jika kita mengirim cahaya sepanjang suatu sumbu dan meminta beberap apengamat untuk mengukur kecepatannya sementara mereka juga bergerak dengan kecepatan berbeda terhadap sumbu itu, baik dengan arah berlawanan, maka mereka akan memperoleh kecepatan yang sama besar.

Hasil ini sangat menakjubkan, karena untuk gelombang yang lain, kerangka pengamat akan menentukan kecepatan gelombang yang diukurnya. Cahaya dianggap sebagai gelombang yang paling aneh, karena dapat merambat di ruang vakum, tidak memerlukan medium rambat dan merambat dengan kecepatan yang konstan di ruang hampa. Kecepatan cahaya di ruang hampa yang nilainya universal ini kemudian digunakan sebagai standar. Jika kita mengukur waktu berjalannya suatu cahaya dari satu titik ke titik lain, maka kita tidak akan menghitung kecepatan cahayanya, namun jarak antara dua titik tersebut.

Tugas

Pilihlah salah satu eksperimen yang mendukung tentang universalitas laju cahaya. Kemudian buatlah essay yang menjelaskan eksperimen tersebut (minimal 700 kata

Jawab

B. Medan Gravitasi Einstein

1. Teori Relativitas Umum

Teori Relativitas Khusus Einstein yang diajukan tahun 1905 telah mengantarkan kita pada dimensi ruang-waktu. Namun, teori ini belum mampu

menjelaskan hukum gravitasi dengan baik. Teori relativitas khusus menjelaskan bahwa semua hukum fisika adalah invariant (seragam) hanya berlaku pada kerangka inersia. Kerangka acuan inersia adalah kerangka acuan yang berada dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan konstan. Sekarang bagaimana jika menggunakan kerangka non inersia? Kerangka acuan non inersia maksudnya adalah kerangka acuan yang bergerak dengan percepatan tetap terhadap kerangka acuan diam.

Kenapa perlu mempelajari tentang kerangka acuan non inersia (mengalami percepatan)? Karena pada saat itu konsep gravitasi sudah dikenal oleh para ilmuwan. Benda – benda yang mengalami gravitasi akan mengalami gerak dipercepat, sehingga jika benda- benda dipercepat ini menjadi kerangka acuan, maka bagaimana gejala – gejala fisis yang terjadi? Apakah sama atautkah berbeda dari kerangka acuan inersia? Sebagai upaya untuk menjawab pertanyaan-pertanyaan ini, Einstein kemudian mengembangkan teori relativitas nya menjadi lebih umum, dengan tujuan agar dapat menjelaskan seperti apakah fenomena gravitasi?

Teori relativitas yang dikembangkan ini kemudian disebut sebagai **teori relativitas umum**, teori ini dipublikasikan pada tahun 1916. Perlu waktu sekitar 10 tahun bagi Einstein untuk membangun teori ini. Dalam proses pengembangan teori relativitas yang baru ini ia juga bekerja sama dengan beberapa matematikawan, diantaranya Ricci dan Levi Civita, yang saat itu sedang mengembangkan teori tentang **tensor**. Dengan menggunakan tensor, Einstein dapat menghubungkan kesetaraan massa dan energi dengan pelengkungan ruang-waktu. Sebagai hasilnya, melalui teori relativitas umum ini Einstein mau menjelaskan bahwa **hukum-hukum fisika adalah invariant pada semua kerangka acuan baik yang inersia maupun non inersia**. Keberadaan teori relativitas umum ini kemudian membantu kita untuk memahami fenomena gravitasi pada alam semesta dan mendorong **kosmologi** menjadi cabang ilmu Fisika yang berkembang pesat hingga saat ini.

2. Prinsip -Prinsip yang berlaku pada Teori Relativitas Umum

a. Prinsip Ekuivalensi

Teori Relativitas Umum (TRU) mulai disusun pada tahun 1907 dengan didasari oleh pemikiran Einstein tentang hubungan antara gravitasi dan percepatan. Untuk merumuskannya, Einstein melakukan *gedankenexperiment* (:Bahasa Jerman, yang artinya eksperimen pikiran atau

thought experiment). Eksperimen yang dilakukan oleh Einstein adalah eksperimen yang disimulasikan pada pikiran saja dan tidak dalam eksperimen nyata. Tunggu! Bagaimana bisa?

Sebelum melanjutkan membaca, tonton terlebih dahulu video pada link berikut:

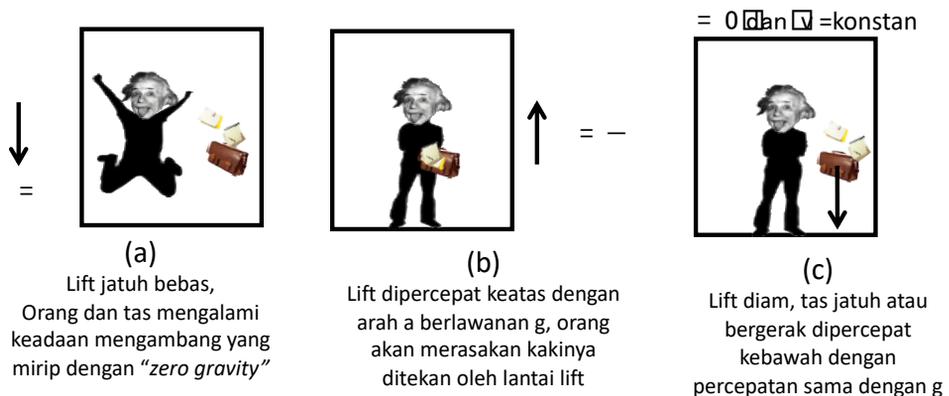
<https://www.youtube.com/watch?v=jx3wcdCtL58>



1) Gedankenexperiment, Pemikiran Paling Membahagiakan bagi Einstein

Gedankenexperiment ini kemudian Einstein sebut sebagai pemikiran paling bahagia selama hidupnya. Dalam *gedankenexperiment* ini, Einstein membayangkan ia sedang berada di dalam sebuah lift yang sedang jatuh bebas. Ia dalam keadaan diam, namun ruang yang ia tempati sedang dalam keadaan jatuh bebas. Maka apa yang terjadi? Ia akan mengalami keadaan “mengambang” di dalam lift, kakinya tidak akan merasakan tekanan dari lantai lift (Gambar 2.24.a).

Gambar 2. 24 Keadaan "mengambang" saat observer ada pada objek yang sedang jatuh bebas, menurut observer, dirinya tidak mengalami medan gravitasi



Tas dan kertas-kertas dalam lift yang sedang jatuh bebas (Gambar 2.24.a) yang ia bawa juga akan ikut “mengambang” seperti yang ia rasakan. Tas dan kertas-kertas yang ia bawa akan diam terhadapnya. Badan, tas dan kertas-kertas seperti tidak memiliki berat. Pada keadaan seperti ini, ia seperti merasakan nol gravitasi atau tidak merasakan efek gravitasi. Jika saat ini kita analogikan keadaan mengambang Einstein dalam lift yang sedang jatuh bebas

ini (Gambar 2.24.a), keadaan ini sama dengan keadaan saat astronot mengambang di gravitasi nol di ruang hampa (Gambar 2.25).

Gambar 2. 25 Gravitasi nol pada astronot saat di ruang angkasa



Sumber: <https://www.flickr.com/photos/nasafo/31232048890>

Kemudian bagaimana jika lift tersebut ditarik keatas, sehingga bergerak dengan percepatan $a = -g$? Jika lift bergerak dipercepat dengan arah sebaliknya (yaitu keatas) (Gambar 2.24.b), maka kita akan merasakan efek yang sebaliknya. Kaki kita akan menyentuh lantai lift dan merasakan tekanan dari lantai lift, seperti direkatkan (atau menempel) pada lantai, sebagaimana kaki kita sehari-hari yang senantiasa menyentuh lantai disaat berdiri, berlari atau berjalan. Keadaan sebagaimana Gambar 2.24.b ini adalah keadaan yang menggambarkan keadaan kita sehari-hari yang berada dalam gravitasi bumi. Dengan demikian keadaan yang dialami pada gambar 2.24. a dan 2.24.b menunjukkan bahwa gravitasi dan percepatan adalah hal yang sama.

Dari Gambar 2.24.b kemudian apabila Einstein menjatuhkan tas dan kertas-kertasnya, maka tas dan kertas-kertas itu akan jatuh bebas. Keadaan jatuh bebas ini juga dialami jika ia berada pada sebuah lift yang berada dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan konstan dan kemudian menjatuhkan buku dan kertas-kertas. Buku dan kertas-kertas yang jatuh bebas di Gambar 2.24.c juga mengalami keadaan yang sama dengan keadaan

“mengambang” di Gambar 2.24.a. Dari pemikiran inilah Einstein merumuskan Postulat III tentang Relativitas, yang kemudian dikenal sebagai prinsip ekivalensi:

‘ A homogenous gravitational field is completely equivalent to a uniformly accelerated reference frame ’

Atau dalam Bahasa Indonesia dapat diterjemahkan

“Sebuah medan gravitasi homogen adalah sepenuhnya ekuivalen terhadap sebuah kerangka acuan yang dipercepat seragam”.

Postulat III ini bisa dikatakan sebagai bentuk modifikasi terhadap Hukum II Newton. Sebuah medan gravitasi homogen adalah ekuivalen (setara) pada semua kerangka acuan dipercepat seragam. Postulat ketiga ini mengawali kelahiran Teori relativitas Umum dan dipublikasikan pertama kali pada tahun 1907. Paper ini menjabarkan tentang pengembangan prinsip ekivalensi yang terjadi pada kerangka acuan dipercepat.

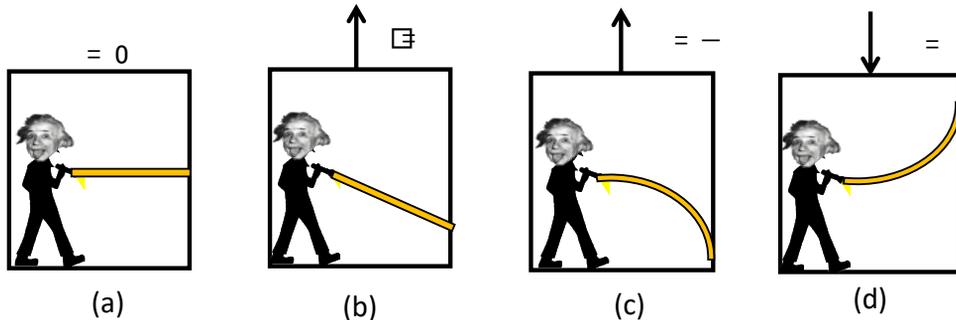
2) Pelengkungan Cahaya pada Medan Gravitasi

Setelah merumuskan prinsip ekivalensi, Einstein kemudian menggunakannya untuk menjelaskan perilaku cahaya pada kerangka yang dipercepat (noninersia). Eksperimen yang digunakan masih merupakan eksperimen dengan pikiran atau *gedankenexperiment* yang telah digunakan sebelumnya di Gambar 2.24, namun kini ia tidak membawa tas, melainkan sebuah senter. Setiap pengamat yang berada di kerangka acuan yang berbeda beda menyalakan senternya dan mengamati berkas sinar yang terjadi pada dinding diseberrangnya (Gambar 2.26).

Cahaya mengalami pembengkokan menurut pengamat pada kerangka acuan non inersia? Bagaimana bisa? Simak animasi penjelasannya pada link berikut
https://www.youtube.com/watch?v=mAtRD9_4Oa0



Gambar 2. 26 Pelengkungan Berkas Sinar menurut Kerangka Acuan (a) Diam (b) Bergerak dengan kecepatan Konstan (c) Dipercepat ke atas (d) dipercepat ke bawah



Fenomena melengkungnya berkas sinar menurut kerangka acuan noninersia ini kemudian menjadi penemuan baru: Berkas cahaya akan dibengkokkan jika berada pada kerangka acuan dipercepat. Karena menurut prinsip ekuivalensi menyebutkan bahwa medan gravitasi ekuivalen dengan percepatan, maka diperoleh gagasan baru, yaitu berkas sinar (atau gelombang cahaya) akan mengalami pembengkokan jika mengalami medan gravitasi. Dengan kata lain, medan gravitasi (daerah yang mengalami percepatan) dapat membengkokkan berkas sinar (arah rambat gelombang cahaya).

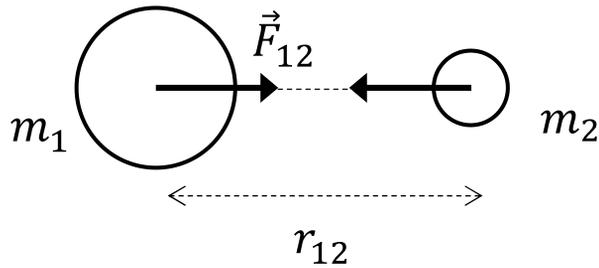
Gelombang cahaya dapat dibengkokkan oleh medan gravitasi

b. Deviasi Geodesi

Dari prinsip ekuivalensi (Postulat III Einstein tentang relativitas), kita telah menemukan bahwa cahaya akan mengalami pembengkokan jika melalui medan gravitasi. Pada bagian ini kita akan mempelajari apa yang menjadi sumber atau penyebab terjadinya Gravitasi? Apa sebenarnya gravitasi itu? Untuk menjelaskan gravitasi, Einstein menggunakan bentuk Hukum II Newton yang berhubungan dengan percepatan (kerangka acuan non inersia), massa inersia dan gaya gravitasi.

Newton mendefinisikan gravitasi sebagai gaya tarik menarik yang muncul akibat dua benda bermassa saling berdekatan (atau berada pada posisi tertentu) (Gambar 2.27). Gaya gravitasi menurut Newton ini akan dialami oleh semua benda bermassa.

Gambar 2. 27 Konsep Gravitasi menurut Newton



Besar gaya gravitasi ini setara dengan hasil kali kedua massa objek dan berbanding terbalik dengan kuadrat jarak antar keduanya. Dengan menggunakan neraca cavendish, konstanta gravitasi universal (G) ini ditemukan sebesar $G = 6,67 \times 10^{-11} \text{ Nm}^2\text{kg}^{-2}$.

$$\vec{F}_{1,2} = G \frac{m_1 m_2}{r_{12}^2} \hat{r} \quad 2.75$$

Berbeda dengan Newton, Einstein menjelaskan bahwa gravitasi bukanlah gaya, melainkan efek atau fenomena yang timbul akibat melengkungnya ruang dan waktu (Gambar 2.28). Dinamika atau gerak setiap objek di alam semesta dinyatakan dalam 4 (empat) dimensi, yaitu ruang-waktu (t, x, y, z) oleh Teori Relativitas Khusus sebelumnya. Ruang dan waktu diilustrasikan sebagai koordinat dinamika objek dalam 4 dimensi oleh Minkowski, namun ruang dan waktu ini masih belum dijelaskan dapat mengalami pelengkungan.

Ruang-waktu ini dapat melengkung karena adanya massa inersia atau massa lembam. Dari kegiatan pembelajaran sebelumnya kita telah mempelajari tentang kesetaraan massa dan energi. Massa memberikan bentuk energi bagi sebuah benda, bahkan saat benda dalam keadaan diam.

$$E_0 = mc^2$$

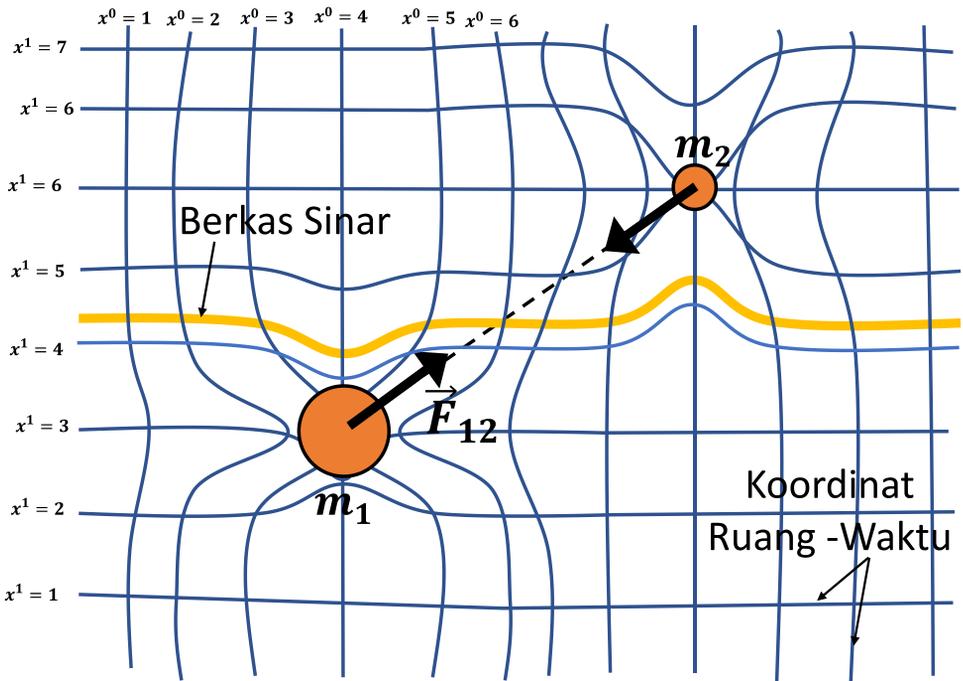
Energi yang berasal dari massa inilah yang menyebabkan pelengkungan ruang dan waktu. disekitar *body of matter* atau benda bermassa (Gambar 2.28).

Sebelum melanjutkan ke uraian berikutnya, tonton terlebih dahulu video simulasi pelengkungan ruang-waktu pada link berikut:

<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg>



Gambar 2. 28 Penjelasan gaya gravitasi berdasarkan pelengkungan ruang waktu oleh massa



Dalam menjelaskan pelengkungan ini, kita dapat menganalogikan ruang-waktu seperti sebuah lembaran karet yang sangat lentur. Jika sebuah benda bermassa diletakkan di atasnya, maka benda itu akan bergulir hingga memperoleh posisi setimbangnya. Daerah disekitar benda bermassa ini kemudian akan tampak lebih lengkung dibanding daerah lainnya. Jika kemudian kita masukkan kembali benda bermassa yang kedua, dengan massa yang lebih kecil dari sebelumnya, maka benda bermassa kedua ini akan meluncur terhadap massa pertama dengan lintasan nyaris elips. Perhatikan juga saat kita tepatkan benda bermassa kedua itu ia akan bergerak dipercepat dan mendekati atau mengitari benda bermassa kedua.

Lintasan benda bermassa kedua saat mengitari massa pertama inilah yang digunakan untuk menjelaskan kenapa planet-planet yang lebih kecil massanya mengitari matahari yang lebih besar massanya. Jawabannya adalah karena matahari dengan massa yang lebih besar menghasilkan pelengkungan ruang-waktu yang lebih besar, sehingga benda-benda yang bermassa lebih kecil ini akan bergerak menuju matahari dalam lintasan elips. Kenapa bisa muncul lintasan elips? Karena benda bermassa yang kedua, walaupun lebih

kecil dari yang pertama, namun ia juga menciptakan medan gravitasinya sendiri. Keadaan inilah yang membuat planet-planet meskipun “ditarik” matahari, namun tidak sampai terhisap kedalamnya.

Sebagai hasilnya dari pelengkungan ruang waktu ini, maka sebuah benda yang bergerak pada ruang akan menghasilkan kurva melengkung dan bukan kurva lurus. Gravitasi yang semula dianggap sebagai gaya kemudian direvisi pemahamannya, yaitu sebagai sebuah efek yang muncul akibat pelengkungan ini. Peristiwa pelengkungan ruang-waktu ini kemudian dikenal sebagai deviasi geodesi. Prinsip ini juga mengikuti sesuai dengan eksperimen massa inersia sebuah benda, dimana semua benda bermassa akan selalu mematuhi gaya gravitasi yang ada disekitarnya. Artinya semua benda bermassa akan bergerak sesuai dengan efek pelengkungan ruang-waktu yang ada disekitarnya.

Simpulan dari terori medan gravitasi Einstein adalah:

- a. Massa-Energi menentukan bagaimana ruang-waktu melengkung
- b. Pelengkungan ruang-waktu menentukan bagaimana materi bergerak

Massa-Energi menentukan bagaimana Ruang-Waktu melengkung.
&
Pelengkungan Ruang-Waktu menentukan bagaimana Materi bergerak

Melalui penjelasan ini, Einstein menjelaskan fenomena jatu bebas pada benda. Benda – benda akan mengalami jatuh bebas bukan karena pada benda mengalami gaya gravitasi, melainkan ketiadaan gayalah yang mengakibatkan benda dapat jatuh bebas. Jika kita memperhatikan kembali Gambar 2.24.b dan 2.24.c. Jika tas orang itu dilepaskan dari tangan orang yang berada dalam lift yang dipercepat keatas, maka tas itu akan mengalami jatuh bebas. Fenomena ini sama dengan tas yang dilepas oleh seseorang yang berada dalam lift diam atau lift yang bergerak dengan kecepatan konstan. Melalui pengamatan ini, Einstein merumuskan Teori Relativitas Umumnya bahwa: hukum-hukum fisika adalah invariant pada semua kerangka acuan baik yang inersia maupun non inersia.

Hukum-hukum fisika adalah invariant pada semua kerangka acuan baik yang inersia maupun non inersia.

3. Formulasi Medan Gravitasi Einstein

Teori gravitasi klasik telah dirumuskan oleh Newton. Newton mendefinisikan gravitasi sebagai sebuah gaya yang timbul sebagai akibat interaksi dua benda bermassa. Teori gravitasi klasik ini kemudian secara matematis dinyatakan dalam persamaan Poisson sebagai berikut:

$$\nabla^2 \phi = 4\pi G \rho(\vec{x}) \quad 2.76$$

Dengan ϕ adalah potensial gravitasi yang merupakan fungsi scalar, G adalah konstanta gravitasi umum atau konstanta gravitasi semesta, dan $\rho(\vec{x})$ adalah fungsi densitas massa lokal. Densitas massa lokal adalah besar kerapatan jenis massa pada suatu lokasi tertentu.

Semenjak Einstein mempublikasikan fenomena deviasi Geodesi akibat massa, maka para ilmuwan saat itu kembali mempertanyakan persamaan Poisson untuk menjelaskan Gravitasi. Bagaimana menyatakan pelengkungan ruang-waktu ini secara matematis? Karena dalam persamaan gravitasi klasik tidak memuat fenomena deviasi geodesi ini. Untuk menjawab pertanyaan ini, Einstein bersama dua matematikawan yaitu Ricci dan Levi Civita, menyusun persamaan-persamaan untuk menjelaskan atau menguraikan Teori relativitas Umum. Ricci dan Levi Civita adalah matematikawan yang saat itu sedang mempelajari tentang **Tensor**.

Untuk menunjukkan deviasi Geodesi akibat massa inersia, maka Einstein berpendapat bahwa semestinya persamaan potensial gravitasi tidak dinyatakan dalam fungsi skalar seperti pada persamaan Poisson, melainkan harus dalam **Tensor**.

Apa itu Tensor? Seorang professor menjelaskan tensor menggunakan alat peraga yang sederhana secara singkat dan mudah dipahami. klik link berikut

<https://www.youtube.com/watch?v=f5liqUk0ZTw>



a. Tensor Lengkungan Ricci

Oleh Ricci, tensor gravitasi dinyatakan sebagai berikut

$$R_{\mu\nu} = \alpha T_{\mu\nu} \quad 2.77$$

Dengan $R_{\mu\nu}$ adalah tensor yang menyatakan pelengkungan ruang-waktu dan $T_{\mu\nu}$ adalah tensor energi atau tensor energi tegangan. Fungsi $\nabla^2\phi$ dari persamaan Poisson diganti dengan tensor $R_{\mu\nu}$ dan densitas massa lokal $\rho(\vec{x})$ digantikan dengan tensor $T_{\mu\nu}$. Dalam persamaan ini menunjukkan densitas massa lokal akan menghasilkan energi atau momentum. Densitas massa lokal dalam 4 (empat) dimensi dinyatakan sebagai tensor energi. Konstanta α adalah sebuah tetapan yang menggantikan nilai $4\pi G$.

b. Tensor Einstein

Einstein memperoleh bahwa ternyata tensor Ricci tidak memenuhi semua keadaan. Sehingga Einstein mengembangkan persamaan tensor energi gravitasi di tahun 1915. Persamaan tensor energi Einstein merevisi konstanta α dari persamaan gravitasi Ricci, yaitu

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4} G T_{\mu\nu} \quad 2.78$$

Dengan $G_{\mu\nu}$ = Tensor Einstein, G adalah konstanta gravitasi semesta dan c adalah laju cahaya di ruang hampa. Einstein juga memberikan hubungan tensor Einstein dengan Tensor Ricci, yang diberikan sebagai berikut:

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} \quad 2.79$$

Telah disebutkan sebelumnya, Tensor Ricci digunakan untuk menyatakan pelengkungan ruang-waktu. Penggabungan persamaan 2.78 dan 2.79 kemudian menghasilkan persamaan yang kemudian disebut sebagai persamaan Medan Gravitasi Einstein.

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad 2.80$$

Teori relativitas umum kemudian dipublikasikan tahun 1916. Persamaan 2.80 ini kemudian ternyata masih berlaku terbatas, hanya pada keadaan tertentu, sehingga kembali direvisi dengan menambahkan konstanta kosmologi (Λ : *baca: lambda (huruf kapital)*)

Persamaan medan gravitasi ini kemudian secara umum dapat dinyatakan dengan:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad 2.81$$

Dari persamaan 2.81 kita telah memperoleh persamaan Medan Gravitasi semesta dalam bentuk tensor. Ruas sebelah kiri, yaitu $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda$ menunjukkan tensor ruang-waktu, yaitu bagaimana ruang-waktu itu

melengkung. Ruas disebelah kanan, yaitu $\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$ adalah tensor energi atau momentum. Dengan demikian, persamaan medan gravitasi semesta telah menunjukkan hubungan antara ruang-waktu dan kesetaraan massa-energi.

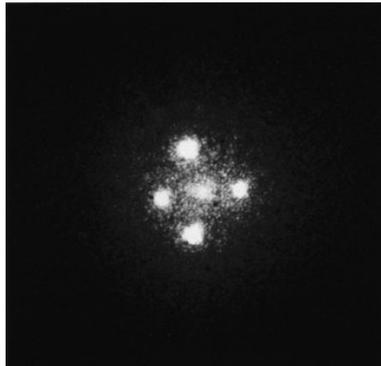
4. Fenomena – fenomena yang dapat diprediksi oleh Teori Relativitas Umum (TRU)

a. Lensa Gravitasi

Ketika berkas cahaya datang dari jarak yang jauh menuju galaksi terdekat. Namun dalam perjalanannya, berkas cahaya ini menemui Quasar atau lubang hitam. Maka berkas sinar akan dibengkokkan oleh medan gravitasi Quasar. Pembengkokan oleh Quasar ini kemudian megakibatkan berkas sinar yang awalnya berupa garis lurus, menjadi berbentuk seperti bola yang mengitari Quasar pada medan gravitasi Quasar. Demikian juga saat gelombang cahaya melalui benda masif, gelombang tersebut akan berbentuk seperti bola pada medan gravitasi benda masif itu. Semakin besar massa benda, maka pelengkungan berkas gelombang akan semakin besar pula.

Dengan menggunakan lensa gravitasi ini, maka kita dapat mendeteksi keberadaan benda-benda langit lainnya, yaitu dengan menembakkan berkas gelombang elektromagnetik. Apabila berkas gelombang elektromagnetik mengalami pembengkokan, maka terdapat benda masif. Semakin besar massa benda, maka pelengkungan gelombang elektromagnetik akan semakin besar pula. Lensa gravitasi ini dimanfaatkan juga untuk membuat citra (image) tentang keberadaan benda- benda langit lainnya (Gambar 2.29). keberadaan benda langit yang masif (bermassa) ditandai dengan daerah yang terang. Sementara daerah yang tidak ditempati benda masif akan berwarna gelap.

Gambar 2. 29 Lensa Gravitasi



b. Pergeseran Merah Gravitasi

Pergeseran Merah Gravitasi atau (Gravitational Redshift) adalah fenomena perubahan frekuensi cahaya saat berada di dekat objek yang massif (bermassa). Bayangkan seberkas sinar diemisikan dari permukaan bumi ke arah vertikal atas. Gravitasi bumi tidak dapat membuat berkas sinar menjadi lebih lambat, tapi dapat membuat energi kinetik menjadi lebih lemah. Pelemahan energi kinetik ini dapat dianalogika dengan melemahnya energi kinetik dari sebuah batu yang dilemparkan diatas. Dari posisi bawah dan dilemparkan ke atas, maka batu akan melambat saat menuju ketinggian maksimum, namun setelah melalui ketinggian maksimum, batu akan bertambah cepat.

Energi gelombang cahaya ini bergantung pada frekuensinya, sesuai dengan Formulasi Plank tentang kuantisasi energi, yaitu

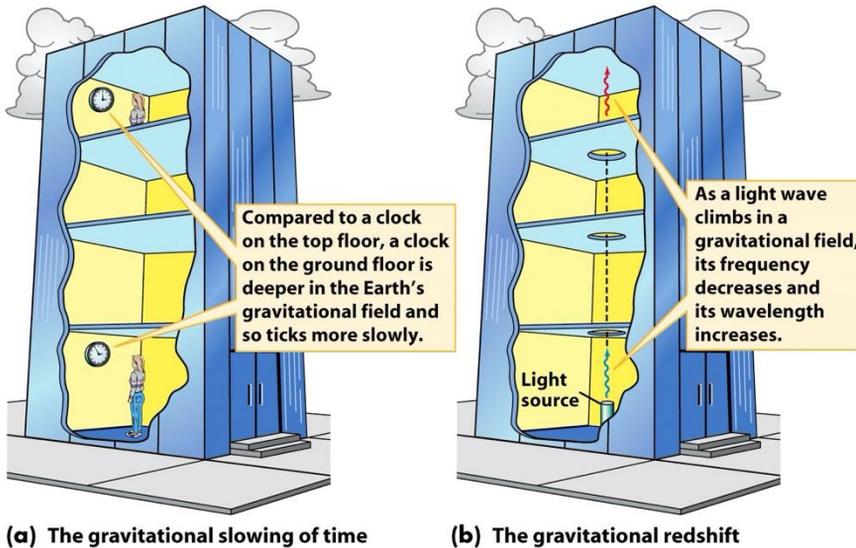
$$E = hf$$

Saat sinar ditembakkan ke atas, maka energi kinetiknya akan berkurang dan frekuensinya menurun. Saat frekuensi energi menurun, panjang gelombangnya akan meningkat (memanjang) hingga pada panjang gelombang tampak. Panjang gelombang tampak ini akan terus begeser ke spektrum gelombang yang panjang gelombangnya paling panjang, yaitu hingga pada gelombang sinar merah. Fenomena inilah yang disebut sebagai pergeseran merah gravitasi.

Sebuah percobaan dilakukan untuk menguji fenomena pergeseran merah Gravitasi. Percobaan ini dilakukan pada sebuah Menara tinggi dan dilakukan untuk mengukur pergeseran biru atau perubahan frekuensi yang terjadi pada gelombang sinar yang dikirim dari bawah menara. Energi yang

diperoleh Ketika berkas sinar menuruni Menara sebanding dengan ketinggian Menara (H) (Gambar), sehingga energi potensialnya adalah $EP = mgH$.

Gambar 2. 30 Pergeseran Merah Gravitasi



Sumber:

http://homepage.physics.uiowa.edu/~pkaaret/2013s_29c62/L14_relativity.pdf

Jika f adalah grekuensi energi sinar pada atas Menara, maka f' adalah frekuensi berkas sinar pada bagian bawah menara. Dengan menggunakan konservasi energi maka

$$hf = hf' + mgH \quad 2.82$$

Massa efektif dari berkas cahaya dapat kita rumuskan

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{hf}{c^2} \quad 2.83$$

Rasio frekuensi pergeseran (Δf) dengan frekuensi f diberikan oleh

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{gH}{c^2} \quad 2.84$$

Atau dalam bentuk umum menjadi

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{GM}{c^2} \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) \quad 2.85$$

Dengan menggunakan sinar Gamma, maka rasio frekuensi kita peroleh sebesar

$$\frac{\Delta f}{f} \approx 10^{-15} \quad 2.86$$

c. Dilasi Waktu Gravitasi

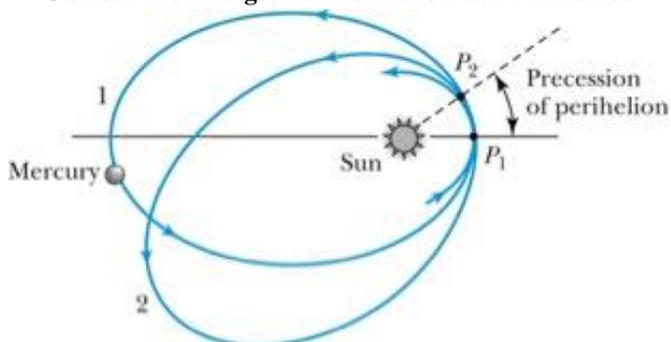
Sebuah eksperimen akurat dilakukan dengan membandingkan frekuensi jam atomic pada roket Scout D pada ketinggian 10.000 km dengan frekuensi yang sama dengan jam atomic di permukaan Bumi. Hasil pengukuran yang diperoleh ternyata sesuai dengan teori relativitas umum Einstein. Frekuensi jam atomic mengalami dilasi 0,02%. Frekuensi jam atomic akan menurun jika mendekati bumi.

Dilasi waktu akibat gravitasi ini menunjukkan bahwa sebuah jam pada medan gravitasi akan berjalan leboh lambat jika dibandingkan pada daerah yang jauh dari medan gravitasi. Fenomena pelambatan gerak jam akibat medan gravitasi ini kemudian disebut sebagai dilasi waktu gravitasi.

d. Pergeseran Perihelion Merkurius

Orbit planet- planet adalah elips dan titik terdekat antara matahari dan planet disebut perihelion. Telah diketahui selamaa beratus-ratus tahun yang lalu bahwa orbit Merkurius mengalami presesi, yaitu perubahan sumbu orbit saat mengitari matahari (Gambar 2.29). Perhitungan presesi pada planet-planet lain juga menunjukkan terjadinya penyimpangan sebesar 43 detik per abad. Penyimpangan ini belum dapat dijelaskan oleh fisika klasik.

Gambar 2. 31 Pergeseran Perihelion dari Merkurius



Sumber: <http://web.pdx.edu/~pmoeck/lectures/modern/TR-15.ppt>.

Dengan menggunakan pelengkungan ruang-waktu yang telah dijelaskan oleh relativitas umum dapat menjelaskan pergeseran 43 detik per busur derajat dari orbit Merkurius.

e. Black Hole

Black Hole dapat terbentuk jika konsentrasi massa dari suatu objek sangat besar, artinya benda itu sangat masif, sehingga massa yang besar ini membuat pelengkungan ruang-waktu yang sangat besar. Massa yang besar ini bisa timbul dari bintang yang collapse (bintang mati). Selama hidupnya, bintang mengalami pembakaran akibat reaksi termonuklir. Reaksi termonuklir ini menghasilkan energi panas yang mendorong materi-materi substansi bintang keluar darinya dan melawan gravitasi yang ditimbulkan bintang.

Ketika bahan bakar bintang sudah habis, maka tidak ada energi panas yang dihasilkan, sehingga materi-materi substansi bintang tidak dapat melawan gravitasi yang ditimbulkan dari bintang itu sendiri. Gravitasi bintang menjadi dominan dan materi-materi substansi penyusun bintang kemudian saling menyusut hingga bintang itu menjadi sebuah bola yang sangat pejal atau masif. Objek yang sangat masif ini memiliki massa yang sangat besar sehingga menimbulkan pelengkungan ruang-waktu yang juga sangat besar.

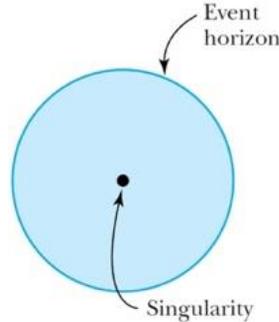
Pelengkungan oleh objek sangat masif ini menciptakan keadaan seperti “lubang” yang menarik benda-benda bermassa atau berenergi lebih rendah darinya, termasuk gelombang cahaya. Saking besarnya massa benda ini, sehingga lubang yang ia timbulkan ini sangat dalam.

Jika bintang yang colaps ini memiliki dimensi lebih besar dari tiga kali massa matahari, maka akan mendistorsi ruang-waktu disekitarnya dan menghasilkan lubang hitam atau black hole. Black hole menimbulkan gravitasi yang sangat besar, bahkan cahaya pun terperangkap di dalamnya. Titik pusat dari black hole ini kemudian disebut sebagai singularitas dan daerah yang dipengaruhi black hole disebut sebagai event horizon (Gambar 2.32).

Lubang yang sangat dalam ini menimbulkan gravitasi yang sangat kuat sehingga membuat cahaya dan materi yang masuk didalamnya tidak dapat keluar atau terperangkap di dalam lubang ini. Jari- jari black hole diberikan oleh Karl Schwarzschild, sehingga disebut sebagai Radius Schwarzschild, yang diberikan oleh persamaan berikut

$$r_s = \frac{2GM}{c^2} \quad 2.87$$

Gambar 2. 32 Ilustrasi Black Hole



Sumber: <http://web.pdx.edu/~pmoeck/lectures/modern/TR-15.ppt>

Radius Schwarzschild untuk Bumi adalah sebesar 1 cm. Untuk objek yang berdimensi 3 x massa matahari, maka radius Schwarzschildnya adalah sebesar 9 km.

Black hole memiliki dua jenis ukuran, yaitu ukuran Stellar dan supermasif. Stelar berdimensi 5 hingga 20 massa matahari, sementara supermasif berdimensi jutaan hingga miliaran kali massa matahari. Black hole dapat dideteksi oleh gravitasi yang ditimbulkannya yang berdampak pada benda masif disekitarnya yang dapat dideteksi menggunakan lensa gravitasi. Sebagai kelanjutan dari medan gravitasi Einstein, kemudian ditemukanlah konstanta kosmologi

$$\Lambda g_{\mu\nu} \quad 2.88$$

Temperatur atau suhu black hole kemudian diformulasikan oleh Hawking. Hawking melakukan kombinasi teori kuantum dengan relativitas umum, persamaan ini kemudian dikenal sebagai efek Hawking, yang dirumuskan dengan

$$T = \frac{hc^3}{8\pi kGM} \quad 2.89$$

Dengan daya radiasi black hole dinyatakan dengan

$$P(T) = 4\pi\sigma r_s^2 \left(\frac{hc^3}{8\pi kGM} \right)^4 \quad 2.90$$

Persamaan yang dirumuskan oleh Hawking ini kemudian digunakan untuk mendeteksi keberadaan Black Hole. Persamaan 2.90 ini juga dikenal sebagai radiasi Hawking.

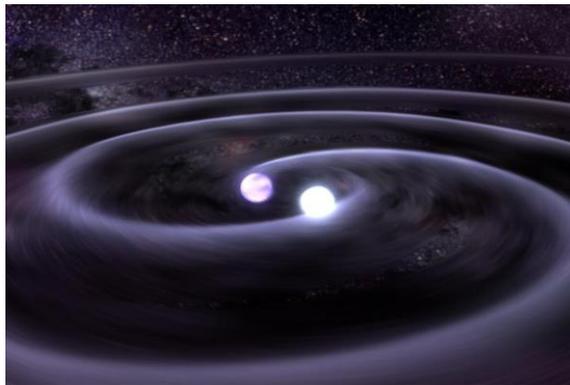
Meskipun keberadaan Black Hole ini belum berhasil diobservasi, namun ada beberapa kandidat Black Hole yang telah ditemukan saat ini, diantaranya:

- a) Cygnus X-1, mengemisikan sinar x dan merupakan bagian dari sistem biner di konstelasi Cygnus. Cygnus X-1 ini bermassa 7 (tujuh) kali massa matahari.
- b) Pusat galaksi M87 yang bermassa 3 miliar kali massa matahari.
- c) NGC 4261 yang memiliki massa miliaran kali massa matahari.

f. Gelombang Gravitasi

Telah dijelaskan bahwa massa mengakibatkan pelengkungan ruang-waktu. Apabila benda bermassa ini bergerak, maka ia dapat menimbulkan perubahan medan gravitasi disekitarnya. Perubahan ini bersifat naik-turun (fluktuatif). Fluktuasi dari pelengkungan ruang-waktu ini ternyata dapat merambat sehingga bersifat sebagai gelombang atau disebut sebagai Gelombang gravitasi.

Gambar 2. 33 Ilustrasi Percobaan Taylor dan Hulse



Sumber: <http://www.space.com/images/i/000/021/030/original/gravity-waves.jpg>

Gelombang gravitasi diradiasikan dari benda yang dipercepat. Sebagai gelombang, dalam perambatannya gelombang ini membawa energi dan momentum. Gelombang gravitasi merambat dengan kelajuan cahaya dan

dapat dikarakterisasi frekuensi dan panjang gelombangnya. Saat gelombang gravitasi melalui ruang-waktu, ia akan mengakibatkan ombak-ombak kecil. Peregangan dan penyusutan dimensi gelombang ini berkisar dari orde 1 hingga 10^{21} . Karena dimensinya yang relatif kecil, maka gelombang gravitasi ini sulit dideteksi. Gelombang gravitasi melalui percobaan Taylor dan Hulse memprediksikan bahwa jika dua benda masif berotasi terhadap sumbu pusat massanya masing-masing, maka benda masif ini akan kehilangan energi dalam bentuk gelombang gravitasi dan kehilangan orbitnya (Gambar 2.33).

Rangkuman

1. 4 (empat) ciri gelombang elektromagnetik menurut Teori relativitas khusus, diantaranya:
 - a) Merupakan gelombang transversal, arah osilasi medan magnet dan medan listrik selalu tegak lurus dengan arah rambatnya.
 - b) Medan magnet dan medan listrik selalu tegak lurus
 - c) Hasil perkalian silang (cross product) Medan listrik dan Medan magnet selalu menyatakan arah rambat gelombang
 - d) Medan listrik dan medan magnet bervariasi secara sinusoidal namun saling sefase dan sefrekuensi satu sama lain.
2. Gelombang cahaya merambat di ruang vakum, tidak memerlukan medium rambat dan merambat dengan kecepatan yang konstan di ruang hampa. Kecepatan cahaya di ruang hampa yang nilainya universal ini kemudian digunakan sebagai standar.
3. teori relativitas umum membantu kita untuk memahami fenomena gravitasi pada alam semesta dan mendorong **kosmologi** menjadi cabang ilmu Fisika yang berkembang pesat hingga saat ini.
4. Prinsip -Prinsip yang berlaku pada Teori Relativitas Umum
 - a. Prinsip ekuivalensi
 - 1) Sebuah medan gravitasi homogen adalah sepenuhnya ekuivalen terhadap sebuah kerangka acuan yang dipercepat seragam.
 - 2) Gelombang cahaya dapat dibelokkan oleh medan gravitasi.
 - b. Deviasi Geodesi
Pelengkungan ruang-waktu akibat benda masif.

5. kesimpulan dari medan gravitasi Einstein dinyatakan dengan:
- 1) Massa-Energi menentukan bagaimana ruang-waktu melengkung
 - 2) Pelengkungan ruang-waktu menentukan bagaimana materi bergerak
6. fenomena jatu bebas pada benda. Benda – benda akan mengalami jatuh bebas bukan karena pada benda mengalami gaya gravitasi, melainkan ketiadaan gayalah yang mengakibatkan benda dapat jatuh bebas.

7. Medan Gravitasi Einstein dinyatakan dalam tensor, dan bukan scalar

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4}G T_{\mu\nu}$$

Yang kemudian disempurnakan lagi dengan menambahkan konstanta kosmologi

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}\Lambda = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

Ruas sebelah kiri, yaitu $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}Rg_{\mu\nu} + g_{\mu\nu}\Lambda$ menunjukkan tensor ruang-waktu, yaitu bagaimana ruang-waktu itu melengkung. Ruas disebelah kanan, yaitu $\frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$ adalah tensor energi atau momentum. Dengan demikian, persamaan medan gravitasi semesta telah menunjukkan hubungan antara ruang-waktu dan kesetaraan massa-energi.

8. Fenomena – fenomena yang dapat diprediksi oleh Teori Relativitas Umum (TRU)
- a. Lensa Gravitasi
 - b. Pergeseran Merah Gravitasi
 - c. Dilasi waktu oleh Gravitasi
 - d. Pergeseran perihelion planet merkurius
 - e. Black Hole
 - f. Gelombang gravitasi

Uji Formatif

Pilihan Ganda

1. Perhatikan pernyataan- pernyataan berikut
 - (1) Teori Relativitas Khusus hanya dapat berlaku pada kerangka acuan inersia yang bergerak dengan kecepatan seragam relatif satu sama lain

- (2) Einstein mempertanyakan bagaimana teori relativitas ini pada kerangka acuan non inersia
- (3) Teori Relativitas Umum (TRU) membantu kita untuk menjawab bagaimana terjadinya gravitasi sehingga kita dapat memahami gravitasi dengan lebih baik.
- (4) Teori Relativitas Umum dijelaskan cukup menggunakan besaran scalar saja, sehingga Einstein seorang diri saja dapat merumuskan persamaan matematis di dalamnya

Pernyataan yang sesuai dengan sejarah lahirnya Teori Relativitas Umum (TRU) adalah

- A. (1) , (2) , (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. semua benar

2. Teori Relativitas Umum Einstein menyatakan bahwa ...

- A. Kelajuan cahaya adalah konstan
- B. Hukum – Hukum Fisika pada kerangka acuan non inersia berbeda dengan pada kerangka acuan inersia
- C. Gravitasi ekivalen dengan percepatan
- D. Hukum- hukum Fisika pada kerangka acuan diam dan bergerak adalah berbeda
- E. Hukum – hukum Fisika adalah invariant pada kerangka acuan inersia

3. Menurut Einstein, gravitasi bisa hadir karena

- A. Adanya benda – benda bermassa yang saling tarik-menarik
- B. Benda-benda bermassa melengkungkan ruang
- C. Berkas sinar bergerak secara acak pada seluruh bagian semesta
- D. Adanya lubang hitam
- E. Massa menimbulkan gaya tarik menarik

4. Fisika klasik yang dinyatakan oleh Newton menggambarkan fenomena fisis dalam tiga dimensi. Namun Einstein dalam teori relativitasnya menyatakan fenomena fisis dapat terjadi dalam empat dimensi. Yang menjadi dimensi keempat tersebut adalah

- A. Dimensi horizontal
- B. Dimensi vertikal
- C. Dimensi ruang
- D. Dimensi waktu
- E. Dimensi waktu

C. Dimensi pelengkungan

5. Pernyataan berikut yang sesuai dengan Lubang Hitam adalah ...
 - A. Sangat masif, sehingga tidak mengizinkan cahaya keluar darinya
 - B. Muncul secara random pada beragam tata surya
 - C. Tidak mengizinkan cahaya untuk memasukinya
 - D. Tidak berdampak pada materi atau benda bermassa lainnya di seluruh semesta
 - E. Berwarna hitam dan memancarkan panas

6. Apabila seberkas sinar melalui Matahari dalam perjalanannya menuju Bumi, maka yang terjadi adalah
 - A. Berkas sinar akan dipantulkan menjauh dari bumi
 - B. Massa dari matahari akan menyimpangkan arah gerak dari berkas sinar
 - C. Matahari akan menyerap berkas sinar
 - D. Matahari yang masif akan membengkokkan ruang-waktu sehingga berkas sinar akan mengalami pembengkokkan
 - E. Berkas sinar akan tertolak oleh matahari

7. Partikel bermuatan dalam medan elektromagnetik akan mengalami gaya
 - A. gaya coulomb
 - B. gaya gravitasi
 - C. gaya gesek
 - D. gaya pulih
 - E. gaya Lorentz

8. Menurut teori relativitas, gelombang electromagnet adalah
 - A. Medan magnet dan medan listrik yang saling sefase, saling tegak lurus, saling menguatkan dan merambat secara transversal
 - B. Medan magnet dan medan listrik yang saling sefase, saling tegak lurus, saling meniadakan dan merambat secara transversal
 - C. Medan magnet dan medan listrik yang saling sefase, saling tegak lurus, saling independent dan merambat secara transversal
 - D. Medan magnet dan medan listrik yang tidak saling mempengaruhi
 - E. Medan listrik adalah penyebab satu-satunya timbul gelombang elektromagnetik

9. Prinsip – prinsip yang menjadi dasar teori relativitas umum adalah
- A. Deviasi geodesi dan prinsip ekuivalensi
 - B. Kesetaraan massa dan energi dan prinsip ekuivalensi
 - C. Deviasi geodesi dan prinsip Bernoulli
 - D. Prinsip ekuivalensi dan universalitas laju cahaya di ruang hampa
 - E. Prinsip Pauli dan prinsip ekuivalensi
10. Fenomena yang dapat diprediksi oleh teori relativitas umum adalah
- A. Lubang hitam, gelombang gravitasi dan pergeseran merah gravitasi
 - B. Radiasi benda hitam, dilasi waktu gravitasi dan lubang waktu
 - C. Bencana ultraviolet, mesin waktu dan gelombang gravitasi
 - D. Gelombang gravitasi, dilasi waktu gravitasi dan rotasi bumi
 - E. Rotasi bumi, pergeseran perihelion dan bencana ultraviolet

Essay

1. Jelaskan bagaimana terbentuknya gelombang elektromagnetik berdasarkan teori relativitas khusus!

Jawab:

2. Buktikan bahwa laju cahaya di ruang hampa bersifat universal menggunakan hukum maxwell dan teori relativitas Einstein.

Jawab:

3. Gambarkan dan Jelaskan interaksi medan listrik dan medan magnet pada gelombang elektromagnetik.

Jawab:

4. Jelaskan bagaimana lahirnya teori relativitas umum.

Jawab:

5. Jelaskan prinsip-prinsip dasar teori relativitas umum

Jawab:

6. Bagaimana perilaku cahaya saat berada di medan gravitasi? Jelaskan

Jawab:

7. Jelaskan tentang formulasi medan gravitasi Einstein mulai dari tensor ricci hingga tensor Einstein

Jawab:

8. Jelaskan fenomena-fenomena apa saja yang dapat diprediksi menggunakan teori relativitas umum!

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

http://homepage.physics.uiowa.edu/~pkaaret/2013s_29c62/L14_relativity.ppt
<http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide13.pdf>
<http://web.pdx.edu/~pmoeck/lectures/modern/TR-15.ppt>
<http://www.space.com/images/i/000/021/030/original/gravity-waves.jpg>
<https://nurma.staff.uns.ac.id/wp-content/blogs.dir/406/files/2009/05/bab-iii-gelombang-bunyi.pdf>
<https://www.flickr.com/photos/nasaf0/31232048890>
<https://www.dnyanasadhanacollege.org/mcq/TYBsc/physics/Semistor%20-%20VI%20Physics%20Paper%20IV%20%20Theory%20of%20Relativity-1.pdf>
https://wps.prenhall.com/chet_ewen_applied_10/180/46087/11798298.cw/-/11798300/index.html
<https://www.youtube.com/watch?v=f5liqUk0ZTw>
<https://www.youtube.com/watch?v=jx3wcdCtL58>

https://www.youtube.com/watch?v=mAtRD9_4Oa0

<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg>

Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition (third)*. Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.

Moore, T. A. (2013). *A general relativity workbook* (pp. 352-365). Mill Valley, California: University Science Books

Thornton, S. T. (University O. V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition (Third)*. Boston: Cengage Learning.

Penutup

Rangkuman

1. Kerangka acuan inersia adalah kerangka acuan yang memberlakukan teori relativitas khusus.
2. Transformasi Galileo berlaku pada hukum-hukum Newton, namun tidak pada hukum-hukum elektromagnet.
3. Kegagalan percobaan Michelson-Morley membuktikan bahwa *ether* itu tidak ada.
4. Postulat postulat Einstein adalah hukum yang berlaku pada teori relativitas khusus.
 - a. Postulat I : Hukum-hukum fisika bersifat sama pada semua kerangka acuan inersia.
 - b. Postulat II : Laju cahaya di ruang hampa adalah konstan, yaitu sebesar $c = 3 \times 10^8 \text{m/s}$
5. Transformasi Lorentz berlaku pada gelombang elektromagnetik.
6. Gejala relativitas yang timbul sebagai konsekuensi transformasi Lorentz adalah
 - a. Kontraksi panjang
 - b. Dilatasi waktu
7. Simultanitas adalah fenomena relativistic dan bukan absolut.
8. pada fenomena paradoks kembar, pengamat di bumi adalah kerangka acuan inersia. Orang yang melakukan perjalanan ke luar angkasa akan pulang ke bumi dengan usia yang lebih muda sesuai tahun yang berlakun Bumi.
9. Teori relativitas khusus dijelaskan menggunakan diagram ruang-waktu Minkowski. Pada diagram ini digunakan kuantitas invariant berupa interval ruang dan waktu.
10. Hubungan antara dua kejadian dibagi menjadi 3 jenis berdasarkan interval ruang-waktu, yaitu *lightlike*, *spacelike*, dan *timelike*,
11. Persamaan kecepatan yang diukur oleh pengamat diam diberikan oleh

$$u = \frac{v + u'}{1 + \frac{u'v}{c^2}}$$

12. Momentum relativistic kemudian diformulasikan juga menggunakan transformasi Lorentz

$$\vec{p} = \gamma m \vec{u}$$

13. Massa adalah invariant, massa tidak mengalami perubahan oleh kerangka acuan manapun.

14. Energi kinetik relativistic diberikan oleh

$$K = mc^2(\gamma - 1)$$
$$K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{u}{c}\right)^2}} - mc^2$$

Dengan suku mc^2 disebut sebagai Energi diam yang disimbolkan dengan E_0 dan γmc^2 disebut sebagai energi total.

15. Kesetaraan massa dan energi diberikan oleh

$$E = mc^2$$

16. Hubungan energi dan momentum diberikan oleh

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2$$

17. Besar partikel tak bermassa diberikan oleh

$$E = pc$$

18. 4 (empat) ciri gelombang elektromagnetik menurut Teori relativitas khusus, diantaranya:

- Merupakan gelombang transversal, arah osilasi medan magnet dan medan listrik selalu tegak lurus dengan arah rambatnya.
- Medan magnet dan medan listrik selalu tegak lurus
- Hasil perkalian silang (cross product) Medan listrik dan Medan magnet selalu menyatakan arah rambat gelombang
- Medan listrik dan medan magnet bervariasi secara sinusoidal namun saling sefase dan sefrekuensi satu sama lain.

19. Gelombang cahaya merambat di ruang vakum, tidak memerlukan medium rambat dan merambat dengan kecepatan yang konstan di ruang hampa. Kecepatan cahaya di ruang hampa yang nilainya universal ini kemudian digunakan sebagai standar.

20. teori relativitas umum membantu kita untuk memahami fenomena gravitasi pada alam semesta dan mendorong **kosmologi** menjadi cabang ilmu Fisika yang berkembang pesat hingga saat ini.

21. Prinsip -Prinsip yang berlaku pada Teori Relativitas Umum

a. Prinsip ekivalensi

1) Sebuah medan gravitasi homogen adalah sepenuhnya ekivalen terhadap sebuah kerangka acuan yang dipercepat seragam.

2) Gelombang cahaya dapat dibengkokkan oleh medan gravitasi.

b. Deviasi Geodesi

Pelengkungan ruang-waktu akibat benda masif.

22. kesimpulan dari medan gravitasi Einstein dinyatakan dengan:

1) Massa-Energi menentukan bagaimana ruang-waktu melengkung

2) Pelengkungan ruang-waktu menentukan bagaimana materi bergerak

23. fenomena jatu bebas pada benda. Benda – benda akan mengalami jatuh bebas bukan karena pada benda mengalami gaya gravitasi, melainkan ketiadaan gayalah yang mengakibatkan benda dapat jatuh bebas.

24. Medan Gravitasi Einstein dinyatakan dalam tensor, dan bukan scalar

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} = \frac{8\pi}{c^4} G T_{\mu\nu}$$

Yang kemudian disempurnakan lagi dengan menambahkan konstanta kosmologi

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

Ruas sebelah kiri, yaitu $R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \Lambda$ menunjukkan tensor ruang-waktu, yaitu bagaimana ruang-waktu itu melengkung. Ruas disebelah kanan, yaitu $\frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$ adalah tensor energi atau momentum. Dengan demikian, persamaan medan gravitasi semesta telah menunjukkan hubungan antara ruang-waktu dan kesetaraan massa-energi.

25. Fenomena – fenomena yang dapat diprediksi oleh Teori Relativitas Umum (TRU)

a. Lensa Gravitasi

b. Pergeseran Merah Gravitasi

- c. Dilasi waktu oleh Gravitasi
- d. Pergeseran perihelion planet merkurius
- e. Black Hole
- f. Gelombang gravitasi

Daftar Istilah

Fenomena / kejadian	: peristiwa atau gejala fisika yang diamati
Pengamat	: subjek yang melakukan pengukuran terhadap fenomena / kejadian fisika
Kerangka acuan	: koordinat yang digunakan oleh pengamat dalam melakukan kegiatan pengukuran fenomena fisika
Kerangka acuan diam	: kerangka acuan yang tetap pada titik koordinat tertentu
kerangka acuan bergerak	: kerangka yang bergerak terhadap titik koordinat tertentu.
kerangka acuan inersia	: kerangka acuan yang berada dalam keadaan diam atau bergerak dengan kecepatan konstan
kerangka acuan inersia	: Kerangka acuan yang berada dalam keadaan dipercepat.
prinsip <i>invariant</i>	: Prinsip yang menyatakan hukum-hukum fisika berlaku seragam
Transformasi	: alih bentuk adalah suatu konsep berfikir matematis yang mengubah bentuk atau mentransformasikan persamaan matematis dari sudut pandang (kerangka acuan) pengamat yang satu ke sudut pandang pengamat yang lain
<i>ether</i>	: medium yang dianggap sebagai medium perambatan gelombang cahaya, keberadaan ether ini kemudian dinyatakan tidak ada semenjak kegagalan percobaan Michelson-morley

- Postulat I Einstein : “Hukum-hukum fisika adalah invarian untuk setiap kerangka acuan inersia”
- Postulat II Einstein : Disebut juga sebagai “universalitas laju cahaya”
 “Laju cahaya di ruang hampa adalah konstan pada semua kerangka acuan inersia, tidak bergantung sumber dan pengamatnya”
- Transformasi Lorentz : bentuk matematis untuk menyatakan besaran-besaran fisis dari pengamat yang berbeda-beda
- Fenomena relativistik : Fenomena atau gejala-gejala yang timbul dan dapat diprediksi oleh Teori relativistik
- kontraksi panjang : Pemendekan (kontraksi) panjang yang terjadi pada benda yang mengalami transformasi gerak, terutama jika bergerak dengan laju mendekati cahaya
- Panjang sejati : Atau *proper length*, panjang yang diukur oleh pengamat yang berada dalam keadaan diam (P).
- panjang relatif : panjang yang diukur oleh pengamat yang bergerak (P')
- pemuluran waktu atau dilatasi waktu : gejala relativistik yang menyebabkan besaran waktu menjadi mulur atau mengembang berdasarkan pengamat yang bergerak.
- Simultanitas : atau keserempakan menurut teori relativitas adalah sebuah fenomena yang menjadi relatif
- Sinkronisasi : kegiatan penyetaraan alat ukur waktu untuk mengamati terjadinya keserempakan.
- Paradoks : pernyataan yang seolah-olah bertentangan (berlawanan) dengan

		pendapat umum atau kebenaran, tetapi kenyataannya mengandung kebenaran;
Ruang-waktu	:	Koordinat 4 dimensi (x, y, z, t), yaitu 3 koordinat panjang dan 1 koordinat waktu, yang digunakan Einstein untuk menunjukkan koordinat sebuah fenomena atau objek dalam teori relativitasnya.
Diagram	ruangwaktu	: menunjukkan ruang dan waktu sebagai dua parameter yang tidak terpisahkan
minkowski		
<i>lightlike</i>		: Dua peristiwa terpisahkan cahaya
<i>spacelike</i>		: Dua peristiwa terpisahkan ruang
<i>timelike</i>		: Dua peristiwa terpisahkan waktu
muon		: sebuah partikel dasar dengan muatan listrik negatif dan sebuah spin 1/2
Waktu paro		: waktu atau umur sebuah partikel sebelum meluruh hingga tinggal separuhnya
Aberasi bintang		: fenomena yang mengamati bahwa bintang-bintang tampak bergerak mengitari bumi dengan bentuk seperti lintasan lingkaran.
Kesetaraan massa dan energi		: massa yang kecil dapat menghasilkan energi yang sangat besar jika bergerak dengan kecepatan mendekati c
gelombang elektromagnetik		: gelombang yang memancar tanpa media rambat yang berupa perpaduan medan magnet dan medan listrik (elektromagnetik).
Muka gelombang		: permukaan gelombang yang terbentuk akibat usikan/ gangguan (osilasi) yang memiliki fase sama
Vektor gelombang		: besaran yang amplitudonya merupakan angka gelombang dan arahnya menunjukkan arah rambat gelombang.

gelombang transversal	: Gelombang yang memiliki arah rambat tegak lurus dengan arah getar (arah osilasi)
arah propagasi	: Arah rambat
Universalitas laju cahaya	: laju cahaya di ruang hampa adalah konstan dan tidak ada kecepatan yang melebihi kecepatan cahaya
GPS	: Global Positioning System, sistem navigasi berbasis satelit yang terdiri dari setidaknya 24 satelit
sefase	: Dua gelombang atau lebih dikatakan memiliki fase yang sama (sefase) apabila puncak-puncak dan lembah-lembah gelombangnya saling berimpitan.
cross product	: Perkalian silang, perkalian antar dua vektor saling tegak lurus.
Medan Gravitasi	: Daerah yang dipengaruhi oleh gravitasi
Prinsip ekuivalensi	: Juga disebut sebagai Postulat III Einstein, bunyinya “Medan gravitasi ekuivalen dengan percepatan”
<i>gedankenexperiment</i>	: Percobaan yang dilakukan dengan pikiran, kebanakan dilakukan dengan fikirian karena berbahaya atau masih terlalu sulit jika dilakukan
<i>Zero gravity</i>	: Atau gravitasi nol, keadaan dimana pengamat tidak mengalami gravitasi atau keadaan dimana pengamat tidak mengalami beratnya sendiri (<i>weightless</i>)
<i>Deviasi geodesi</i>	: Pelengkungan ruang-waktu akibat massa dari benda masif
<i>Tensor</i>	: Besaran yang memiliki arah dan dinyatakan dengan perkalian vektor basis

Scalar	: Besaran yang hanya memiliki nilai namun tak memiliki arah
Lensa gravitasi	: menggunakan objek masif untuk mendeteksi keberadaan gravitasi
Pergeseran merah gravitasi	: Perubahan panjang gelombang menjadi semakin panjang setelah melalui medan gravitasi
Dilasi waktu gravitasi	: Pemuluran waktu pada daerah yang dekat dengan sumber medan gravitasi
Perihelion	: Jarak terdekat sebuah objek dengan pusat orbitnya
Lubang hitam	: konsentrasi massa dari suatu objek sangat besar, artinya benda itu sangat masif, sehingga massa yang besar ini membuat pelengkungan ruang-waktu yang sangat besar, sehingga cahaya pun tidak dapat keluar dari lubang hitam itu.
singularitas	: Inti atau pusat black hole
Event horizon	: Daerah yang masih dipengaruhi gravitasi black hole
Gelombang gravitasi	: Fenomena yang terjadi jika fluktuasi pelengkungan ruang-waktu merambat pada ruang

Referensi

- Beiser, Arthur. (2003). *Concepts of Modern Physics* 6th Edition. Mc Graw Hill.
- Halliday, D., Resnick, R., & Walker, J. (2010). *Fisika Dasar 1 Edisi 7 Jilid 3*. Jakarta: Erlangga.
- Kanginan, Marthen. (2018). *Fisika untuk SMA/MA Kelas XII*. Erlangga: Jakarta.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition (third)*. Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto (2011). *Esensi Fisika Modern*. Andi: Yogyakarta.
- Moore, T. A. (2013). *A general relativity workbook* (pp. 352-365). Mill Valley, California: University Science Books

Surya, Yohanes. (2003). Fisika itu Mudah SMU 3C. Bina Sumber Daya MIPA: Jakarta.

Thornton, S. T. (University O. V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition (Third). Boston: Cengage Learning.

Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). Modern Physics - Fifth Edition. In Modern Physics Siixth Edition. W.H.Freeman and Company: New York.

http://homepage.physics.uiowa.edu/~pkaaret/2013s_29c62/L14_relativity.ppt

<http://web.mit.edu/8.02t/www/802TEAL3D/visualizations/coursenotes/modules/guide13.pdf>

<http://web.pdx.edu/~pmoeck/lectures/modern/TR-15.ppt>.

<http://www.space.com/images/i/000/021/030/original/gravity-waves.jpg>

<https://nurma.staff.uns.ac.id/wp-content/blogs.dir/406/files/2009/05/bab-iii-gelombang-bunyi.pdf>

<https://physics.stackexchange.com/questions/414787/under-which-circumstances-relativistic-kinetic-energy-tends-to-classical-kinetic>

https://wps.prenhall.com/chet_ewen_applied_10/180/46087/11798298.cw/-/11798300/index.html

<https://www.dnyanasadhanacollege.org/mcq/TYBsc/physics/Semistor%20-%20VI%20Physics%20Paper%20IV%20%20Theory%20of%20Relativity-1.pdf>

<https://www.flickr.com/photos/nasafo/31232048890>

<https://www.youtube.com/watch?v=f5liqUk0ZTw>

<https://www.youtube.com/watch?v=jx3wcdCtL58>

https://www.youtube.com/watch?v=mAtRD9_4Oa0

<https://www.youtube.com/watch?v=MTY1Kje0yLg>

MODUL 3

TEORI KUANTUM

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang di Teori Kuantum. Mulai tahun 1800-an para ilmuwan menemukan fenomena-fenomena yang tidak dapat dijelaskan oleh Fisika Klasik, yaitu gejala-gejala fisika yang bersifat mikroskopis dan bergerak dengan kecepatan yang mendekati kecepatan cahaya. Ketidakmampuan ini memerlukan cara pandang yang berbeda dengan sebelumnya dalam menjelaskan gejala fisika tersebut. Pada periode 1900 – 1930 Fisika modern pun mulai lahir semenjak dicetuskannya Teori Relativitas oleh Einstein (1905) dan Teori Kuantum oleh Max Planck (1900).

Pada Modul 2 kita telah membahas Teori Relativitas yang didominasi oleh Pemikiran Einstein. Pada Modul 3 ini kita akan melanjutkan pada Teori Kuantum, mulai dari “Eksperimen – Eksperimen Pencetus Teori Kuantum”, yang terdiri dari dua bagian (Part 1 & Part 2). Di Part 1 kita akan mempelajari tentang 1) Penemuan Sinar X; 2) Percobaan Sinar Katoda; 3) Spektrum Garis; 4) Teori Rayleigh-Jeans; 5) Teori Kuantisasi Planck hingga 6) Eksperimen Radiasi Benda Hitam. Di Part 2 kita akan mempelajari tentang 1) Efek Fotolistrik; 2) Efek Compton; 3) Eksperimen Davisson-Germer; dan 4) Produksi pasangan dan Anhilasi.

Setelah mempelajari tentang eksperimen-eksperimen pencetus teori kuantum, kita akan berkesempatan untuk melakukan praktikum berupa simulasi radiasi benda hitam dan simulasi efek fotolistrik. Setelah praktikum kemudian kita akan mempelajari bagaimana “Dualisme Gelombang-Partikel”, yang terdiri atas 1) Hamburan sinar X; 2) Hipotesis de Broglie; 3) hamburan electron; 4) “Gelombang atau partikel” dan 5) Ketidakpastian Heisenberg. Pada kegiatan Pembelajaran 3 ini kita akan mendefinisikan bagaimana sifat dualitas pada gelombang-materi.

Eksperimen pencetus Teori Kuantum dimulai dari penemuan Wilhem Rontgen tentang sinar X dan Penemuan Elektron oleh JJ Thompson. Dua eksperimen ini kemudian dilanjutkan oleh Robert Milikan yang berhasil menemukan besar muatan electron. Meskipun beberapa besaran Fisika telah berhasil dikuantisasi (baca: diukur), namun penjelasan Max Planck untuk radiasi benda Hitam saat itu sulit diterima kalangan ilmuan saat itu. Di bagian

pertengahan dari Modul 3 ini kita akan melihat penjelasan Einstein tentang efek fotolistrik dan hasil eksperimen yang dilakukan oleh Compton. Setelah melalui eksperimen-eksperimen yang sulit dan memerlukan ketelitian tinggi ini baru kemudian terlihat jelas bahwa Teori kuantum tidak hanya penting namun juga merupakan deskripsi korektif yang betul tentang alam (*nature*).

Teori kuantum ini kemudian akan berlanjut pada perkembangan model atom hingga partikel elementer yang ada di Modul – modul berikutnya. Teori kuantum juga menjadi tonggak perkembangan teknologi nano, fisika nuklir, fisika partikel dan mekanika kuantum. Oleh sebab itu, mari kita pelajari dengan antusias!

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).
- 3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).
- 4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

- 1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)
 - 2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)
- d. Unsur Pengetahuan (PG)
- 1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)
 - 2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)
 - 3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)
 - 4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	<ol style="list-style-type: none"> a) Mahasiswa mampu menjelaskan proses lahirnya Teori Kuantum b) Mahasiswa mampu menjelaskan percobaan – percobaan dan teori – teori yang mendasari teori kuantum c) Mahasiswa mampu mengaplikasikan teori kuantum dalam pemecahan kasus
Sikap	<ol style="list-style-type: none"> a) Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b) Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c) Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan simulasi percobaan-percoaan fisika kuantum

3. Prasyarat Kompetensi

- a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.
- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell

- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang pembelajaran fisika khususnya pada materi Fisika Modern yang diajarkan di kelas XII SMA. Isi dari modul teori kuantum ini berupa eksperimen – eksperimen pencetus teori kuantum, praktikum fisika kuantum dan dualisme gelombang partikel. Teori kuantum juga merupakan kajian fisika modern yang dipelajari dan diaplikasikan saat ini yang akan berguna bagi mahasiswa jika bekerja di bidang Riset Fisika Murni dan Terapan. Modul ini juga bermanfaat bagi mahasiswa untuk mempelajari modul berikutnya.

5. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
a. Eksperimen – eksperimen pencetus teori kuantum (Part 1)	1) Eksperimen Radiasi Benda Hitam 2) Penemuan Sinar X 3) Percobaan Sinar Katoda 4) Spektrum garis 5) Teori Kuantisasi Planck
b. Eksperimen – eksperimen pencetus teori kuantum (Part 2)	1) Eksperimen efek fotolistrik a) Hasil eksperimen b) Interpretasi fisika klasik c) Teori Einstein d) Interpretasi kuantum 2) Efek Compton 3) Eksperimen Davisson-Germer (difraksi elektron) 4) Produksi pasangan dan anihilasi
c. Praktikum Eksperimen Kuantum	1) Simulasi radiasi benda hitam 2) Simulasi efek foto listrik
d. Dualisme gelombang – partikel	1) Hamburan X-ray 2) Hipotesis de Broglie 3) Hamburan electron 4) Gelombang atau Partikel?

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
	5) Ketidakpastian Heisenberg

Kegiatan Pembelajaran 1 EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 1)

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa mampu menjelaskan eksperimen – eksperimen pencetus fisika kuantum	<ul style="list-style-type: none"> a) Mahasiswa dapat menjelaskan apa yang dimaksud dengan benda hitam dan menjelaskan alasan pentingnya mempelajari radiasi benda hitam. b) Mahasiswa dapat menjelaskan secara kualitatif eksperimen-eksperimen yang menjadi pencetus teori kuantum, diantaranya: radiasi benda hitam, Penemuan Sinar X, Percobaan Sinar Katoda dan Spektrum garis pada radiasi gas hidrogen. c) Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana Teori Rayleigh-Jeans gagal menjelaskan distribusi energi radiasi benda hitam d) Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana Plank menjelaskan distribusi energi radiasi benda hitam menggunakan Teori Kuantisasi Planck

Uraian Materi

Teori kuantum adalah teori yang dicetuskan oleh Max Planck. Planck menyebutkan bahwa energi radiasi bersifat diskrit, yaitu ditransmisikan atau merambat dalam bentuk paket – paket yang disebut kuantum (tunggal) atau kuantum (jamak) yang artinya terukur. Kata kuantum menjelaskan apa yang menjadi ukuran-ukuran /nilai-nilai/sifat-sifat dasar dari “bahan” pembentuk “materi”, mulai dari massa atom, proton, neutron, elektron sampai yang dianggap terkecil terkecil saat ini adalah bahan sebagai penyusun.

Teori kuantum menjelaskan tentang sifat dan perilaku gelombang elektromagnetik hingga fenomena fisika yang mikroskopik atau nanoskopik. Teori kuantum kemudian melahirkan Fisika kuantum. Fisika kuantum adalah salah satu cabang dari ilmu fisika, yang merupakan studi tentang perilaku materi dan energi pada molekul, atom, nuklir dan tingkat mikroskopis bahkan

yang paling terkecil. Fisika kuantum digunakan untuk mempelajari materi dasar yaitu mempelajari susunan atom dan struktur pembentuk atom.

A. Eksperimen Radiasi Benda Hitam

Hasil pekerjaan Maxwell dan Hertz telah menunjukkan kesimpulan bahwa cahaya, radiasi panas, dan gelombang radio seluruhnya adalah gelombang elektromagnetik yang berbeda hanya frekuensi dan panjang gelombangnya. Namun berikutnya para ilmuwan menemukan bahwa distribusi spectral radiasi dari rongga panas tidak dapat dijelaskan dengan menggunakan teori gelombang klasik.

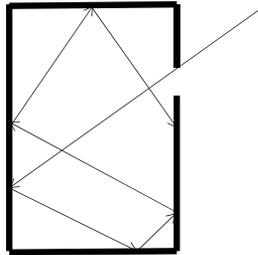
1. Benda Hitam

Setiap benda adalah benda hitam, dengan tingkat kehitaman yang ditentukan dengan emisivitas (e). Awalnya para ilmuwan mendefinisikan benda hitam sebagai sebuah benda yang memiliki kemampuan untuk menyerap energi dan membuat energi tersebut terperangkap didalamnya. Pada definisi awal ini, benda hitam dianalogikan seperti sebuah lubang kecil pada dinding kotak. Meskipun lingkungan di luar kotak sangat terang, maka keadaan didalam kotak tersebut adalah gelap jika dilihat dari lubang itu.

Mengapa gelap? Karena pada keadaan ini seluruh energi radiasi yang berhasil masuk melalui lubang kotak akan mengalami pemantulan berulang kali pada dinding kotak bagian dalam. Energi ini akan mengalami pelemahan setiap kali memantul, karena ada sebagian energi yang juga diserap pada dinding kotak. Karena semakin melemah, energi tersebut akhirnya menjadi sangat kecil bahkan hingga nol, sehingga tidak mampu untuk keluar dari kotak tersebut (Gambar 3.1).

Keadaan benda hitam yang terus menerus menyerap energi ini kemudian menimbulkan pertanyaan. Bagaimana jika benda hitam terus dipanasi? Apakah benda ini akan terus menerus menyerap energi? Apa yang akan terjadi pada benda hitam jika energi ini terus diserap?

Gambar 3. 1 Lubang pada Permukaan Benda Berongga Sebagai Benda Hitam



Berdasarkan hukum Termodinamika, maka kita dapat mengetahui bahwa jika suatu benda dipanaskan, maka kalor dapat meningkatkan suhu suatu benda atau mengubah wujudnya. Jika suhu benda hitam sudah lebih tinggi dari suhu lingkungannya, maka aliran kalor juga akan terjadi dari benda hitam ke lingkungan. Sehingga pada saat benda hitam ini dipanaskan, maka selain ia menyerap kalor dari sumber panas, ia juga akan memindahkan kalor keluar daripadanya dan menuju lingkungan hingga mencapai suhu kesetimbangan.

Dengan demikian, benda hitam bukan hanya benda yang dapat menyerap energi dari lingkungan, namun juga merupakan benda yang dapat melepas energi ke lingkungannya. Sesuai dengan Hukum I Termodinamika, maka benda hitam akan menyerap energi dari lingkungan pada saat benda hitam ini memiliki temperatur yang lebih rendah dari lingkungannya. Sementara jika temperaturnya lebih tinggi dari lingkungannya, maka ia akan melepas energi ke lingkungan. Dengan demikian, emisivitas (e) ini adalah kemampuan suatu benda untuk menyerap atau melepas energi ke lingkungan.

Definisi benda hitam dan emisivitas yang telah diperluas inilah yang digunakan untuk mendefinisikan sifat benda terhadap radiasi energi atau dalam mengadsorpsi energi. Semua benda dikatakan sebagai benda hitam, dengan tingkat kehitaman (emisivitas atau e) yang bervariasi. Semakin besar emisivitas maka semakin mudah suatu benda menyerap atau melepas energi.

Jika penyerapan energi dapat meningkatkan temperatur atau mengubah wujud benda, maka apa yang ditimbulkan dari pelepasan energi? Untuk menjawab ini, serangkaian percobaan pun dilakukan untuk melihat bagaimana benda hitam melepaskan energinya. Untuk dapat melepaskan energi, maka benda hitam ini harus dipanaskan. Dari hasil percobaan, ternyata setiap benda hitam yang dipanaskan, saat temperturnya sudah lebih tinggi dari

lingkungan, ia melepas energinya ke lingkungan secara radiasi (langsung). Bagaimana radiasinya? Simak penjelasan berikutnya ini.

2. Radiasi Benda Hitam oleh Stefan-Boltzmann

Sebuah benda hitam akan terus meradiasikan energinya ke lingkungan sekitar hingga mencapai kesetimbangan termal. Radiasi yang dialami oleh benda hitam ini selanjutnya disebut sebagai **radiasi benda hitam**. Para ilmuwan berusaha untuk menjelaskan bagaimana perilaku radiasi benda hitam, ilmuwan yang memformulasikan radiasi benda hitam ini adalah Stefan dan Boltzmann.

Energi yang dipancarkan (diradiasikan) benda hitam ini dipancarkan dalam bentuk gelombang elektromagnetik yang memiliki panjang gelombang tertentu. Stefan dan Boltzman pertama kali mengamati bahwa energi yang dipancarkan atau diradiasikan sebanding dengan temperature benda hitam. Setiap benda hitam akan terus meradiasikan gelombang elektromagnetik ke lingkungannya hingga tercapai kesetimbangan termodinamika. Josef Stefan (1879) mengajukan rumus empiris mengenai energi yang dipancarkan oleh benda hitam pada suhu T dan Boltzmann mendemonstrasikan teori ini beberapa tahun kemudian. Hubungan antara energi radiasi dengan temperature benda hitam dinyatakan sebagai:

$$E_T = \sigma e T^4 A \quad 3.1$$

Persamaan 3.1 ini dikenal dengan **Hukum Stefan-Boltzmann**

Dengan:

E_T = Energi total yang dipancarkan oleh permukaan benda hitam pada suhu T untuk seluruh spektrum panjang gelombang (J).

e = tetapan emisivitas permukaan benda (bernilai 0 untuk benda putih sampai 1 untuk benda hitam)

σ = Tetapan Stefan-Boltzmann = $5,67 \times 10^{-8} W/(m^2 K^2)$

T = Temperatur atau suhu mutlak (K)

A = Luas permukaan yang meradiasikan gelombang elektromagnetik (m^2)

Jika temperature benda hitam lebih rendah dari lingkungannya, maka jumlah energi yang diserap juga dinyatakan oleh:

$$E_T = \sigma a T^4 A \quad 3.2$$

Dengan a adalah koefisien serapan yang menurut teorema Kirchoff (1883) bernilai $= e$. Pada keadaan $a = 1$, semua sinar yang jatuh pada permukaan benda diserap.

Dari persamaan 3.2 tentang energi radiasi benda hitam, kita dapat menurunkan Intensitas radiasi benda hitam. Intensitas radiasi I_{total} adalah besar daya total per satuan luas. Besar intensitas radiasi benda hitam dinyatakan dengan:

$$I_{total} = \frac{P}{A} = \frac{E_T}{t \cdot A} = \sigma e T^4 \quad 3.3$$

Atau

$$P = \frac{E_T}{t} = \sigma e T^4 A \quad 3.4$$

Dengan P adalah daya radiasi. Intensitas radiasi memiliki satuan watt per meter kuadrat (W/m^2). Daya radiasi adalah banyak energi yang berpindah per satuan waktu dengan satuan dari daya adalah Joule per sekon atau Watt (J/s atau W).

Contoh Soal -Radiasi Benda Hitam

Pada malam yang permukaan bumi melepaskan panas secara radiasi. Andaikan suhu tanah $10^\circ C$ dan tanah meradiasikan panas seperti benda hitam. Berapakah laju hilangnya panas tiap meter persegi.

Penyelesaian:

$$T = 273 + 10 = 283K$$

$$\begin{aligned} \text{Laju hilangnya panas} &= \text{energi yang dipancarkan per detik per } m^2 \\ &= \sigma T^4 \\ &= 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{(m^2 K^2)} \times (283 K)^4 \\ &= 364 \frac{W}{m^2} \end{aligned}$$

Contoh Soal – Intensitas Radiasi Benda Hitam

Para astronom seringkali menentukan ukuran bintang dengan metode berdasarkan hukum Stefan-Boltzmann. Tentukan jejari bintang Capella dari data berikut: Fluks cahaya bintang yang sampai di bumi adalah $1,2 \times$

$10^{-8} \frac{W}{m^2}$. Jarak bintang $4,3 \times 10^{17} m$ dan suhu permukaannya $5200K$. Diandaikan bintang meradiasikan energi seperti benda hitam.

Penyelesaian:

Energi yang dipancarkan oleh permukaan bintang per m^2 tiap detik adalah

$$I_T = \sigma T^4$$

Energi yang dipancarkan oleh seluruh permukaan bintang tiap detik

$$I_T \times \text{luas permukaan bintang}$$

Jadi:

$$I_{bintang} = \sigma T^4 \times 4\pi R^2$$

Energi cahaya bintang yang sampai di permukaan bumi per m^2 tiap detik adalah $1,2 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2}$. Energi total per detik pada jarak itu ($R' = 4,3 \times 10^{17}$) adalah

$$I_{total} = (1,2 \times 10^8) \times 4\pi R'^2 \text{ W}$$

Ini harus sama dengan energi total per detik yang dipancarkan oleh bintang.

Jadi:

$$\begin{aligned} I_{bintang} &= I_{total} \\ \sigma T^4 \times 4\pi R^2 &= (1,2 \times 10^8) \times 4\pi R'^2 \\ R &= R' \left[\frac{1,2 \times 10^8}{\sigma T^4} \right]^{\frac{1}{2}} = 7,3 \times 10^9 \text{ m} \end{aligned}$$

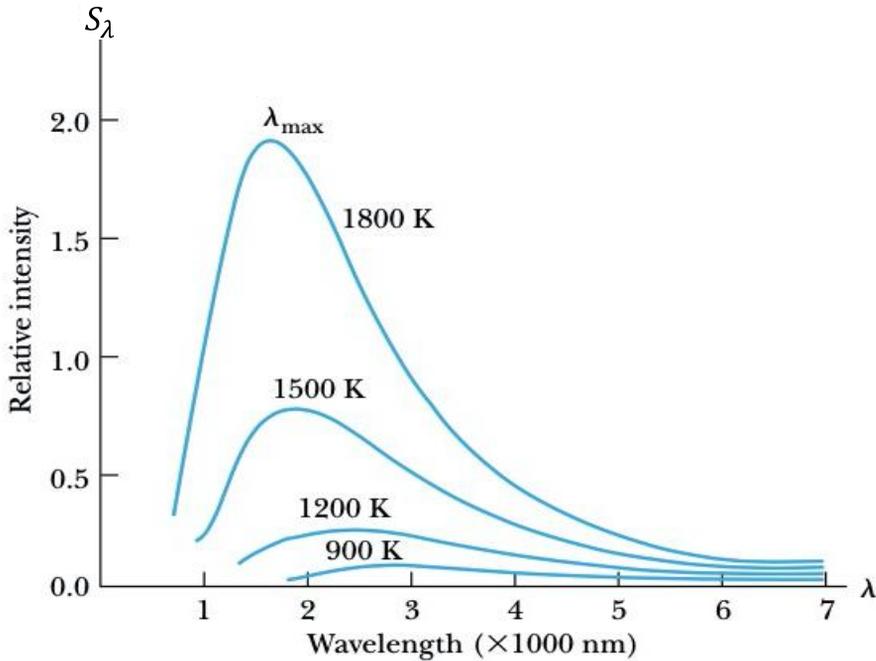
3. Pergeseran Wien

Karena intensitas energi yang diradiasikan oleh benda hitam adalah dalam bentuk gelombang elektromagnetik, maka kita perlu menentukan berapa besar panjang gelombangnya dan bagaimana hubungan intensitas energi radiasi dengan temperatur benda hitam? Wien melakukan percobaan untuk mengukur intensitas radiasi berbagai benda hitam. Dari percobaan ini, ia memperoleh hubungan antara **Intensitas Relatif** (*Relative Intensity*) (s_λ) dengan temperatur (T) (Gambar 3.2).

Intensitas relatif (s_λ) adalah intensitas energi radiasi sebagai fungsi gelombang. Intensitas relatif (s_λ) juga dapat didefinisikan sebagai energi yang dipancarkan oleh benda hitam per satuan waktu per satuan luas permukaan per satuan panjang gelombang. Dari hasil pengamatan ini, Wien mencatat ada dua hal penting tentang intensitas radiasi benda hitam, yaitu:

- Panjang gelombang maksimum akan bergeser ke arah nilai yang semakin kecil, seiring dengan bertambahnya waktu.
- Daya total yang diradiasikan akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur.

Gambar 3. 2 Spektrum Distribusi dari Radiasi yang Diemisikan dari Benda Hitam dengan Temperatur yang Berbeda-Beda



Sumber: Thronton & Rex, 2013

Dari pernyataan pertama (bagian a) diatas, Wien memformulasikan persamaannya:

$$\lambda_{max}T = 2,898 \times 10^{-3} m. K \quad 3.5$$

Persamaan 3.5 ini adalah **Hukum Pergeseran Wien**, dengan λ_{max} adalah panjang gelombang pada intensitas puncak dari temperatur yang diberikan. Panjang gelombang maksimum λ_{max} ini bervariasi sesuai temperatur, sesuai dengan persamaan 3.5. Wilhem Wien memperoleh nobel pada tahun 1911 untuk penemuannya tentang radiasi benda hitam.

Dari pernyataan kedua (bagian b) kita dapat memformulasikan hubungan antara intensitas energi radiasi dengan temperatur dan panjang gelombang, yaitu dengan cara mengintegrasikan intensitas relatif S_{λ} terhadap

seluruh panjang gelombang sehingga diperoleh besar daya per satuan luas pada temperatur T atau I_{total} .

$$I_{total} = \int_0^{\infty} S_{\lambda} d\lambda \quad 3.6$$

Dengan $S_{\lambda}d\lambda$ menunjukkan intensitas relatif atau energi radiasi per satuan waktu per satuan luas dalam selang panjang gelombang antara λ dan $\lambda + d\lambda$.

Hasil pengamatan spektrum cahaya yang dipancarkan pada berbagai suhu benda membuktikan bahwa intensitas relatif S_{λ} tertinggi berbanding terbalik dengan suhu benda. Adanya ketergantungan spektrum pada suhu menunjukkan bahwa proses pancaran energi dari benda hitam merupakan proses radiasi termal. Wien (1893) memformulasikan hasil pengamatan di atas dalam bentuk:

$$S_{\lambda} = \frac{f(\lambda, T)}{\lambda^5} \quad 3.7$$

Persamaan 3.7 inilah yang jika diplot akan menghasilkan diagram sesuai Gambar 3.2, sehingga persamaan ini disebut sebagai **Hukum Radiasi Wien**. Dengan $f(\lambda, T)$ adalah fungsi distribusi energi yang bergantung pada panjang gelombang λ dan temperature T . Fungsi **distribusi intensitas energi** $f(\lambda, T)$ ini dapat diuraikan ke dalam persamaan berikut:

$$f(\lambda, T) = \frac{c_1}{\lambda^5} e^{-\frac{c_2}{\lambda T}} \quad 3.8$$

Dengan c_1 dan c_2 adalah tetapan yang diperoleh dari eksperimen. Dari Eksperimen, Wien memperoleh

$$c_1 = 8\pi hc \quad 3.9$$

Dan

$$c_2 = \frac{ch}{k_B} \quad 3.10$$

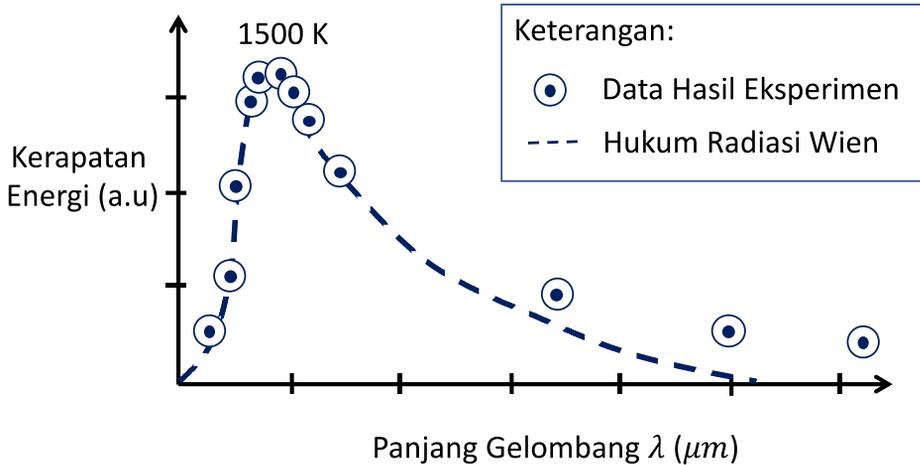
Dengan k_B adalah tetapan Boltzmann, $k_B = 1,38 \times 10^{-23} \text{ J/K}$ dan c adalah laju cahaya di ruang hampa. Sehingga persamaan 3.7 dapat juga dinyatakan dengan

$$S_{\lambda} = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} e^{-\frac{ch}{\lambda k_B T}} \quad 3.11$$

Setahun setelah Wien menerbitkan hukum radiasinya, seorang ahli spektroskopi asal Jerman, Friedrich Paschen menemukan bahwa perkiraan Wien tentang spektrum distribusi intensitas terhadap temperature (persamaan 3.7 dan 3.11) tepat bersesuaian dengan titik – titik data eksperimennya, yang

dilakukan pada kisaran panjang gelombang $1 - 4 \mu\text{m}$ dan suhu benda hitam $400 \text{ K} - 1600 \text{ K}$ (Gambar 3.3).

Gambar 3.3 Ketidaksesuaian Hasil Eksperimen dengan Hukum Wien pada temperatur 1500 K



Sumber: Kanginan, 2018

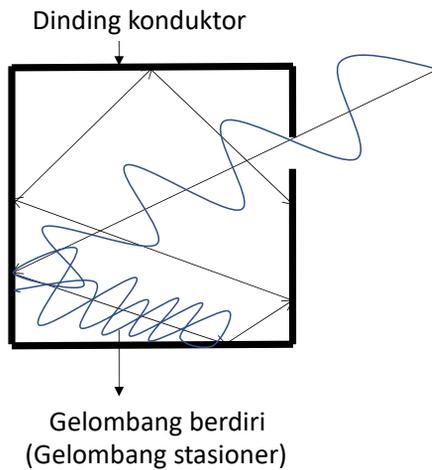
Namun pada tahun 1900, ditemukan ketidaksesuaian data eksperimen dengan Hukum Radiasi Wien. Eksperimen ini dilakukan oleh dua tim, yaitu Lummer dan Pringsheim serta Robert dan Kurlbaum. Lummer dan Pringsheim melanjutkan pengukuran Paschen sampai panjang gelombang $18 \mu\text{m}$. Robert dan Kurlbaum juga melanjutkan sampai $60 \mu\text{m}$. Kedua tim ini menyimpulkan bahwa Hukum Radiasi Wien gagal pada daerah ini (Gambar 3.3).

B. Teori Rayleigh - Jeans

1. Penjelasan Fisika Klasik tentang Radiasi Benda Hitam

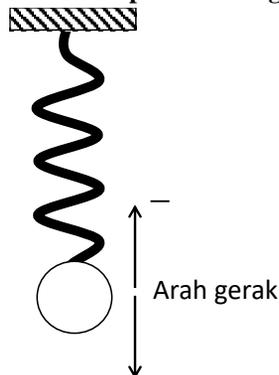
Hasil pengamatan terhadap intensitas radiasi benda hitam (Gambar 3.2) ini kemudian dijelaskan oleh Lord Rayleigh (1842-1919) dan Sir James Hopwood Jeans (1877-1946). Rayleigh dan Jeans menggunakan argumen – argumen dari teori Fisika Klasik, yaitu teori termodinamika dan elektromagnetik, sehingga disebut juga sebagai teori klasik tentang radiasi termal benda Hitam. Untuk menjelaskan distribusi energi pada benda hitam, Rayleigh dan Jeans menggunakan analogi benda hitam sebagai lubang pada permukaan berongga yang berbentuk dalam kubus (Gambar 3.4).

Gambar 3. 4 Lubang pada Permukaan Kubus Berongga



Kotak ini diisi oleh gelombang. Rayleigh dan Jeans mengasumsikan dinding rongga berupa konduktor (logam) yang jika dipanaskan elektron-elektron pada dinding rongga akan tereksitasi secara termal dan berosilasi. Osilasi ini timbul akibat sifat logam yang memantulkan kembali arah gerak benda. Osilasi elektron-elektron ini bisa dibayangkan seperti sebuah bandul yang terhubung dengan pegas yang terikat di dinding (Gambar 3.5).

Gambar 3. 5 Analogi Osilasi Muatan pada Dinding bagian dalam benda Hitam

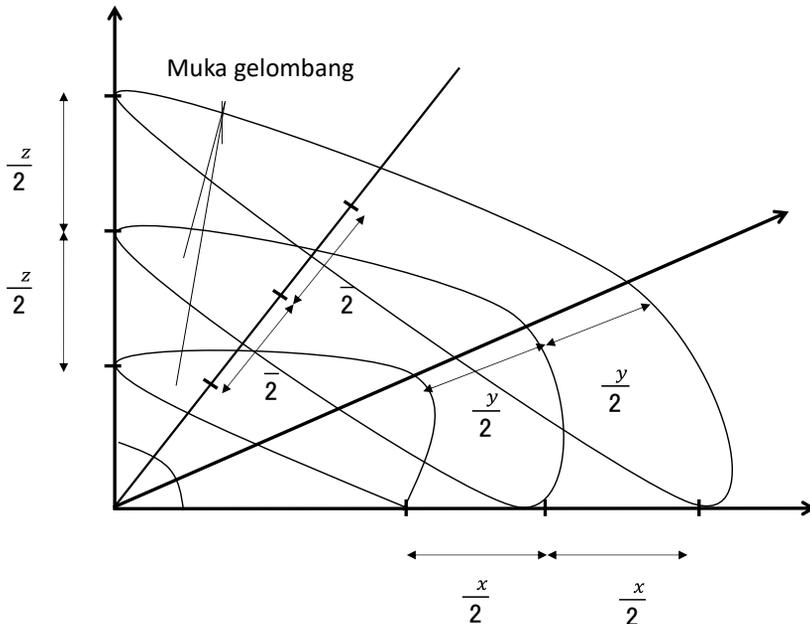


Ketika suhu benda dinaikkan, pada muatan timbul energi kinetik yang menggerakkan elektron secara bolak-balik (berosilasi atau bergetar). Akibat getaran tersebut, kecepatan muatan berubah-ubah, atau dengan kata lain setiap

saat muatan selalu mendapatkan percepatan. Sesuai dengan teori Maxwell, maka muatan yang dipercepat dalam gerak osilasi inilah yang menimbulkan radiasi elektromagnetik.

Radiasi ini akan terkurung di dalam rongga dalam bentuk gelombang-gelombang tegak (gelombang stasioner), karena dinding rongga berupa konduktor maka di dinding rongga memantulkan kembali energi yang mengenainya. Perpaduan gelombang datang dan gelombang pantul ini kemudian menghasilkan simpul-simpul gelombang (Gambar 3.4) yang menunjukkan sifat gelombang berdiri.

Gambar 3. 6 Skema Gelombang Stasioner dalam Kubus



Sumber: Kusminarto, 2011

Gelombang berdiri (gelombang stasioner) ini kemudian digambarkan dalam koordinat kartesius 3 dimensi (Gambar 3.6). Bidang berwarna biru muda adalah muka gelombang yang tegak lurus dengan arah rambat. Jarak antar muka gelombang atau jarak antar simpul adalah λ dengan beda fase π . Jarak antar simpul ke arah yang sejajar dengan sumbu koordinat x, y dan z berturut- turut adalah:

$$\frac{\lambda_x}{2} = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha} \quad 3.12.a$$

$$\frac{\lambda_y}{2} = \frac{\lambda}{2 \cos \beta} \quad 3.12.b$$

$$\frac{\lambda_z}{2} = \frac{\lambda}{2 \cos \gamma} \quad 3.12.c$$

Dengan α , β dan γ berturut – turut adalah sudut yang dibentuk antara normal muka gelombang dengan sumbu x, y dan z.

Persamaan gelombang stasioner yang bergantung pada tiga parameter (persamaan 3.12) dinyatakan dengan:

$$\psi(x, y, z, t) = A \sin\left(2\pi \frac{x}{\lambda_x}\right) \sin\left(2\pi \frac{y}{\lambda_y}\right) \sin\left(2\pi \frac{z}{\lambda_z}\right) \sin(2\pi vt) \quad 3.13$$

Dengan ν (baca: nu) adalah frekuensi dengan satuan Hz. Tiap pilihan (λ_x , λ_y atau λ_z) akan memberikan ragam getar (mode) tertentu. Karena berlaku sebagai pemantul gelombang, maka dinding kubus merupakan simpul gelombang. Oleh sebab itu berlaku bahwa rusuk kubus (a) adalah kelipatan bulat setengah proyeksi panjang gelombang ke arah rusuk tersebut, yaitu:

$$a = \frac{\lambda_x}{2} n_x; n_x = 1, 2, 3, \dots \quad 3.14.a$$

$$a = \frac{\lambda_y}{2} n_y; n_y = 1, 2, 3, \dots \quad 3.14.b$$

$$a = \frac{\lambda_z}{2} n_z; n_z = 1, 2, 3, \dots \quad 3.14.c$$

Kemudian substitusikan λ_x , λ_y atau λ_z pada persamaan 3.12 ke persamaan 3.14, sehingga diperoleh:

$$\frac{2a}{\lambda} \cos \alpha = n_x \quad 3.15.a$$

$$\frac{2a}{\lambda} \cos \beta = n_y \quad 3.15.b$$

$$\frac{2a}{\lambda} \cos \gamma = n_z \quad 3.15.c$$

Jumlah kuadrat dari ketiga persamaan 3.15 adalah

$$\left(\frac{2a}{\lambda}\right)^2 (\cos^2 \alpha + \cos^2 \beta + \cos^2 \gamma) = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

$$\frac{2a}{\lambda} = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad 3.16$$

Jika dalam bentuk frekuensi gelombang menjadi

$$\nu = \frac{c}{\lambda} = \frac{c}{2a} \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} \quad 3.17$$

Selanjutnya kita akan menghitung jumlah ragam getar (mode) yang dinyatakan dalam

$$N(\nu) d\nu$$

$N(\nu) d\nu$ adalah jumlah mode getar yang mungkin dibangkitkan dalam interval frekuensi antara ν dan $\nu + d\nu$. Jumlah ini sama dengan jumlah titik

$$N(r) dr$$

Pada kelopak bola atau permukaan bola yang berjari-jari r dan tebal dr , dengan

$$r = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2} = \frac{2a\nu}{c} \quad 3.18$$

Karena n_x , n_y dan n_z adalah bilangan bulat positif maka jumlah mode (ragam getar) hanya dihitung seprdelapan dari volume kulit bola berongga.

$$N(r) dr = \frac{1}{8} (4\pi r^2) dr = \frac{\pi}{2} r^2 dr \quad 3.19$$

Dengan mengganti

$$r = \frac{2a\nu}{c}$$

Dan

$$dr = \frac{2a}{c} d\nu$$

sehingga

$$N(\nu) d\nu = \frac{\pi}{2} \left(\frac{2a\nu}{c}\right)^2 \left(\frac{2a}{c}\right) d\nu$$

Maka cacah (jumlah) mode atau ragam getar yang dicari adalah

$$N(\nu) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \nu^2 a^3 d\nu \quad 3.20$$

Jika persamaan 3.20 kita nyatakan dalam panjang gelombang, dengan

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

Dan

$$d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$$

Sehingga persamaan 3.20 menjadi

$$N(\nu) d\nu = \frac{8\pi}{c^3} \left(\frac{c}{\lambda}\right)^2 a^3 \left(-\frac{c}{\lambda^2}\right) d\lambda = \frac{8\pi a^3}{\lambda^4} d\lambda \quad 3.21$$

Persamaan 3.21 adalah persamaan yang menunjukkan jumlah atau cacah mode getar atau ragam getar dengan panjang gelombang pada interval λ dan $\lambda + d\lambda$ pada volume a^3 . Dengan demikian, rapat ragam getar gelombang per satuan volume adalah:

$$\frac{N(\nu) d\nu}{a^3} = \frac{8\pi}{\lambda^4} d\lambda \quad 3.22$$

Rapat volume energi dalam selang panjang gelombang $d\lambda$ sama dengan rapat cacah gelombang dalam selang dikalikan dengan energi tiap gelombang,

$$\frac{N(\nu) d\nu}{a^3} = U(\lambda) d\lambda$$

jadi:

$$U(\lambda) d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} k_B T d\lambda \quad 3.23$$

Dengan $U(\lambda) d\lambda$ adalah **rapat energi** atau jumlah gelombang berdiri per satuan volume dikali dengan energi rata-rata tiap gelombang.

Rapat Energi = jumlah gelombang berdiri per satuan volume \times energi rata-rata tiap gelombang

Persamaan di atas dapat dituliskan dalam bentuk rumusan sesuai dengan rumusan Wien:

$$U(\lambda) = \frac{f(\lambda, T)}{\lambda^5} = \frac{8\pi k_B}{\lambda^5} \lambda T \quad 3.24$$

Dengan demikian **fungsi distribusi intensitas energi radiasi Rayleigh - Jeans** $f(\lambda, T)$ dinyatakan dalam:

$$f(\lambda, T) = 8\pi k_B \lambda T \quad 3.25$$

Menurut Rayleigh-Jeans, distribusi ragam getar (mode) gelombang electromagnet pada berbagai energy mengikuti statistik Boltzmann menggunakan fungsi distribusi:

$$p(\varepsilon) = A \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T}\right) \int_0^\infty \varepsilon p(\varepsilon) d\varepsilon \quad 3.26$$

Dengan ε adalah energy gelombang electromagnet berfrekuensi tertentu yang boleh bernilai sebarang (dengan spectrum kontinu) dan k_B adalah tetapan Boltzmann. Energi reratanya dapat dihitung dengan menggunakan faktor bobot statistik yang menghasilkan: (Rayleigh – Jeans)

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon p(\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} p(\varepsilon) d\varepsilon} \quad 3.27$$

Dengan mendefinisikan $\beta = 1/k_B T$ maka didapatkan:

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon A \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} A \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon} = \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon} \quad 3.28$$

Dari hubungan matematis bahwa:

$$\begin{aligned} \frac{d}{d\beta} \ln \int_0^{\infty} \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon &= \frac{\int_0^{\infty} \frac{d}{d\beta} \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon} \\ &= \frac{\int_0^{\infty} \varepsilon \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon}{\int_0^{\infty} \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon} \end{aligned}$$

Maka diperoleh:

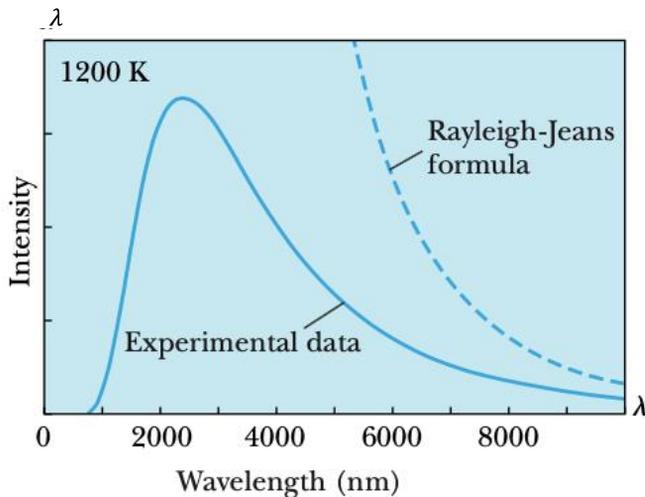
$$\begin{aligned} \langle \varepsilon \rangle &= \frac{d}{d\beta} \ln \int_0^{\infty} \exp(-\beta\varepsilon) d\varepsilon = -\frac{d}{d\beta} \ln \left(\frac{1}{\beta} \right) = -\beta \frac{d\beta^{-1}}{d\beta} \\ &= \beta \beta^{-1} = \frac{1}{\beta} = k_B T \end{aligned} \quad 3.29$$

Jadi, tiap ragam gelombang membawa energy rerata sebesar $\langle \varepsilon \rangle = k_B T$.

2. Bencana Ultraviolet

Persamaan distribusi energi yang diberikan pada persamaan 3.24 ternyata berhasil menerangkan spektrum radiasi benda hitam pada panjang gelombang yang besar. Namun fungsi distribusi ini gagal untuk panjang gelombang yang kecil (mulai dari panjang gelombang ultraviolet ke spektrum dengan panjang gelombang lebih kecil). Jika persamaan distribusi intensitas energi ini diterapkan pada panjang gelombang yang kecil, maka seluruh jangkauan intensitas energi menjadi tak hingga. Padahal seharusnya memberikan nilai intensitas I_{total} yang berhingga.

Gambar 3. 7 Kegagalan Fisika Klasik - Bencana UV



Sumber: Sumber: Thronton & Rex, 2013

Kegagalan fungsi distribusi intensitas energi pada panjang gelombang yang lebih rendah (dimulai dari ultraviolet) ini kemudian disebut sebagai bencana ultraviolet atau UV *Cathastrope*. Jika kita membuat plot intensitas relatif terhadap panjang gelombang menggunakan persamaan 3.23 atau 3.24 maka besar intensitas energi menjadi tak hingga (energinya sangat besar).

Plot yang dihasilkan ini ternyata tidak sesuai dengan hasil eksperimen (Gambar 3.7). Data hasil eksperimen menunjukkan intensitas energi radiasi masih terhingga. Kegagalan ini juga menunjukkan kegagalan teori fisika klasik tentang Termodinamika dan Elektromagnetik. Dengan demikian persamaan distribusi energi Raileigh – Jeans perlu ditinjau ulang.

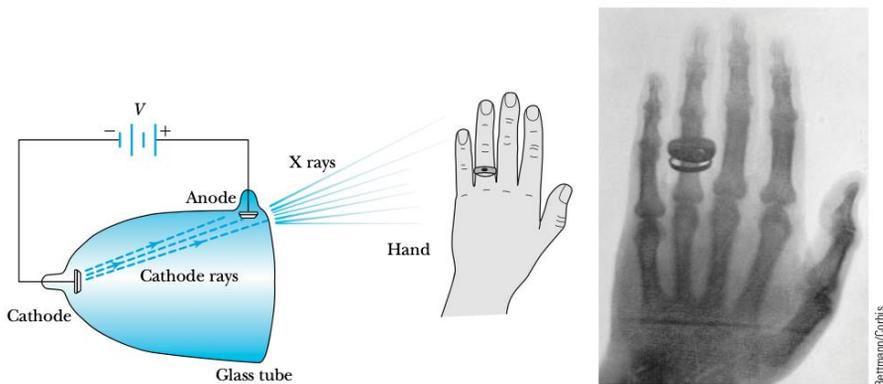
C. Penemuan sinar X

Tahun 1890 para ilmuwan menjadi familiar dengan Sinar Katoda. Sinar Katoda ini dihasilkan dari sebuah keping logam dalam sebuah tabung vakum dengan keduanya diberi beda potensial yang besar. Sinar katoda dapat menembus materi sehingga dapat digunakan untuk mengetahui sifat dari materi tersebut. Pada tahun 1895 Rontgen mempelajari tentang efek sinar katoda saat melalui beragam material dan bagaimana pendaran yang dihasilkan. Rontgen kemudian menyadari bahwa dia telah berhasil menemukan jenis spektrum sinar yang baru, yang bukan merupakan sinar

katoda. Sinar ini tidak dipengaruhi oleh medan magnet, sebagaimana sinar katoda, namun dapat menembus bahan (material) lebih dalam dibandingkan sinar katoda.

Sinar ini kemudian disebut sebagai sinar X, yang diproduksi oleh sinar katoda yang menembak dinding kaca di dalam tabung vakum. Rontgen kemudian mempelajari transmisi dari sinar X pada berbagai material dan berulang kali dapat menghasilkan image atau citra tulang pada tangan, saat sinar X tersebut dilewatkan pada tangan tersebut (Gambar 3.1). Penemuan ini langsung berdampak pada bidang medis dan aplikasinya di bidang lain. Rontgen pun memperoleh nobel atas penemuan sinar X pada tahun 1901.

Gambar 3. 8 Citra tulang pada tangan yang dihasilkan dari penemuan sinar X oleh Rontgen



Sumber: Thronton & Rex, 2013

D. Percobaan Sinar Katoda

1. Penemuan Elektron

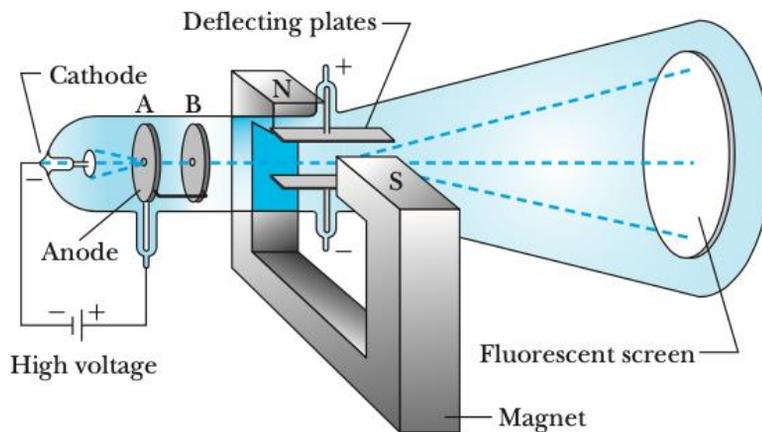
Beberapa tahun sebelum penemuan sinar X, JJ Thomson telah melakukan penelitiannya tentang gas- gas yang bermuatan listrik. Peralatan yang digunakan Thomson sama persis dengan yang digunakan Rontgen dan beberapa ilmuwan lain pada bidang serupa. Thomson yakin bahwa sinar katoda merupakan partikel, sesuai beberapa gagasan ilmuwan dari Jerman (misalnya Heinrich Hertz).

Thomson baru dapat membuktikan bahwa sinar katoda adalah partikel pada tahun 1897. Ia menemukan bahwa sebuah partikel berhasil diemiskan

melalui sebuah katoda listrik yang dipanaskan. Set peralatan Thomson (Gambar 3.9) menunjukkan bahwa sinar dari katoda ditarik menuju potensial positif yang ada di apertura A. Apertura maksudnya adalah sebuah lempeng yang telah diberi sedikit lubang sebagai bukaan agar partikel / sinar dapat melaluinya.

Berkas sinar kemudian diteruskan dalam bentuk berkas sinar lurus menuju apertura B. Dari Apertura B, berkas sinar yang lurus ini ditembakkan ke layar Fluorescent yang ada di belakang tabung, sehingga dapat diilustrasikan seperti berkas sinar yang keluar dari lampu senter. Sebelum menumbuk layer fluorescent, berkas sinar (partikel) ini melalui keping-keping penyimpang (*deflecting plates*).

Gambar 3. 9 Skema Alat Percobaan Sinar Katoda oleh Thomson



Sumber: Thronton & Rex, 2013

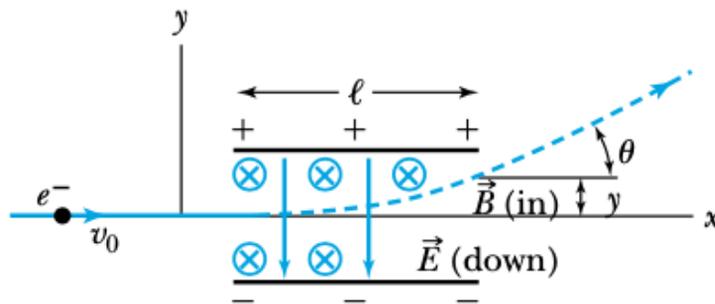
Berkas sinar dapat mengalami penyimpangan karena keping – keping ini diberi beda tegangan, beda tegangan ini kemudian menghasilkan medan listrik yang selanjutnya menimbulkan gaya listrik pada benda bermuatan. Simpangan yang terbentuk dari berkas sinar katoda ini kemudian diamati dan diperoleh kesimpulan bahwa berkas sinar katoda bermuatan negatif.

Sebelum penemuan muatan sinar katoda ini, Hertz telah melakukan percobaan yang sama sebelumnya. Namun ia tidak menemukan penyimpangan sinar katoda setelah melalui keping-keping penyimpang. Kegagalan ini disebabkan karena tabung yang digunakan bukan tabung

vakum, sehingga sinar katoda berinteraksi dengan gas – gas lain disekitarnya. Sinar katoda terionisasi dengan gas gas residual dari percobaan ini.

Thomson juga melakukan percobaan untuk mengamati perilaku sinar katoda pada medan magnetik. Dari percoaan ini Thomson kembali menemukan bahwa sinar katoda bermuatan negatif. Oleh temuannya ini, Thomson memperoleh nobel pada tahun 1906. Thomson berhasil menentukan metode untuk mengukur rasio perbandingan muatan terhadap massa elektron (e/m). Metode ini kemudian menjadi standar dalam mempelajari perilaku partikel saat melalui medan listrik dan medan magnet secara tegak lurus (Gambar 3.10).

Gambar 3. 10 Diagram Gaya Percobaan Thomson dalam Menemukan Rasio e/m



Sumber: Thronton & Rex, 2013

Saat medan magnet dimatikan, elektron dapat melewati daerah antar keping penyimpang karena dipengaruhi medan listrik, sehingga mengalami gaya listrik.

$$F_y = ma_y = qE \quad 3.30$$

Dengan m adalah massa dan q adalah muatan dan a_y adalah resultan percepatan. Waktu yang diperlukan oleh elektron untuk melalui keping-keping penyimpang sepanjang l adalah

$$t \approx \frac{l}{v_0}$$

Sudut hamburan θ kemudian dinyatakan dengan

$$\tan \theta = \frac{v_y}{v_x} = \frac{a_y t}{v_0} = \frac{qE l}{m v_0^2} \quad 3.31$$

Rasio $\frac{q}{m}$ dapat diperoleh jika diketahui kecepatannya. Dengan menyalakan medan magnet dan mengatur besar \vec{B} hingga dapat membuat elektron menyimpang, maka besar kecepatan dapat ditentukan. Syarat simpangan nol adalah jika gaya netto adalah nol, sehingga:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B} = 0 \quad 3.32$$

Kemudian diperoleh

$$\vec{E} = \vec{v} \times \vec{B} \quad 3.33$$

Karena \vec{v} dan \vec{B} saling tegak lurus maka kuat medan listrik dan medan magnet dapat dinyatakan dalam hubungan berikut

$$|\vec{E}| = |v_x| |\vec{B}| \quad 3.34$$

sehingga

$$v_x = \frac{E}{B} = v_o \quad 3.35$$

Dimana kita dapat menggunakan $E = |\vec{E}|$ untuk menyatakan besar medan listrik dan begitu juga untuk besar medan magnet. Jika kita memasukkan nilai v_o ini ke persamaan 3.31 maka kita bisa memperoleh rasio q/m , yaitu

$$\frac{q}{m} = \frac{v_o^2 \tan \theta}{E \ell} = \frac{E \tan \theta}{B^2 \ell} \quad 3.36$$

Contoh Soal – Penentuan rasio q/m

Sebuah percobaan dilakukan sesuai percobaan Thomson. Panjang keping – keping penyimpang adalah 5,0 cm dan menggunakan medan listrik sebesar $1,2 \times 10^4 \frac{V}{m}$. Jika tanpa mengaplikasikan medan magnet maka kita akan memperoleh sudut simpangan sebesar 30° dan jika medan magnet sebesar $8,8 \times 10^{-4} T$ diaplikasikan maka tidak ditemukan simpangan. Berapa besar kecepatan mula mula dan berapa rasion muatan terhadap massanya?

Jawab:

Karena kita telah mengetahui nilai E dan B, maka kita bisa menggunakan persamaan 3.6 untuk mencari kecepatan awalnya. Kemudian untuk mencari q/m , kita bisa menggunakan persamaan 3.7 untuk keadaan tanpa medan magnet.

Kita masukkan nilai E dan B ke dalam persamaan 3.6, sehingga diperoleh:

$$v_o = \frac{E}{B} = \frac{1,2 \times 10^4 \frac{V}{m}}{8,8 \times 10^{-4} T} = 1,4 \times 10^7 m/s$$

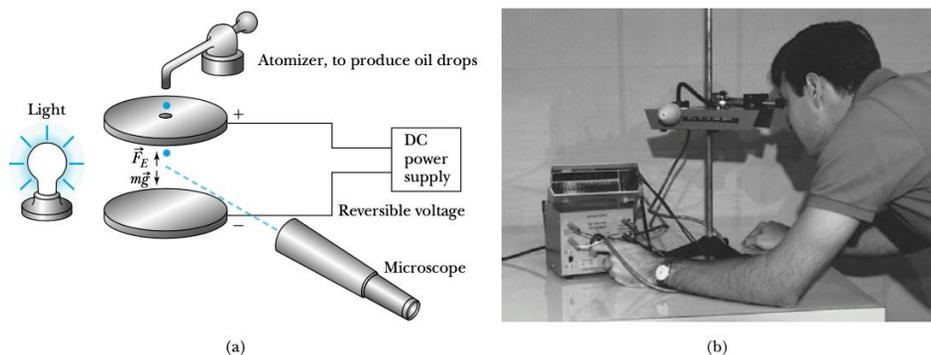
Karena satuan E dan B disini sudah dalam Sistem Internasional (SI), maka satuan kecepatan adalah dalam meter / sekon. Dengan menggunakan persamaan 3.7, maka kita dapat menentukan besar q/m , yaitu

$$\begin{aligned} \frac{q}{m} &= \frac{E \tan \theta}{B^2 \ell} = \frac{\left(1,2 \times 10^4 \frac{V}{m}\right) (\tan 30^\circ)}{(8,8 \times 10^{-4} T)^2 (0,0050 m)} \\ &= 1,8 \times 10^{11} C/kg \end{aligned}$$

2. Penetapan Besar Muatan Electron

Setelah Thomson berhasil menemukan besar e/m dan mengkonfirmasi bahwa sinar katoda bermuatan negatif yang kemudian disebut sebagai elektron, beberapa ilmuwan berusaha untuk mengetahui besar muatan elektron ini. Pada tahun 1911, seorang fisikawan asal Amerika Serikat melaporkan penemuannya tentang berapa besar muatan elektron. Percobaan Milikan dimulai tahun 1907 di Universitas Chicago. Melalui percobaannya ini, Milikan menampilkan bagaimana objek bermuatan (positif dan negatif) berperilaku pada daerah yang dipengaruhi gaya listrik dan gravitasi (Gambar 3.4).

Gambar 3. 11 Skema Percobaan Tetes Minyak Milikan, (a) Diagram alat; (b) Seorang sedang mengamati melalui mikroskop sambal mengatur tegangan antar keping



Sumber: Thronon & Rex, 2013

Milikan menggunakan setetes minyak yang dikeluarkan dari nosel (corong pipa semprot). Setetes minyak ini bisa menjadi bermuatan akibat mengalami gaya gesekan. Saat minyak tersebut keluar, maka ia akan

mengalami gravitasi dan jatuh bebas. Metode yang dilakukan Milikan adalah menghasilkan total gaya sama dengan nol atau menciptakan keadaan setimbang. Sehingga minyak yang jatuh tidak mengalami percepatan, melainkan kecepatan konstan. Untuk menghasilkan kesetimbangan gay aini, Milikan menempatkan dua pelat yang kemudian diberi beda tegangan, agar menghasilkan medan listrik yang kemudian menimbulkan gaya listrik yang setara dengan gravitasi.

Saat tetes minyak bergerak ke bawah, tetes minyak ini juga mengalami gaya gesek, yang ditimbulkan dari viskositas udara. Besar gaya gesek akibat viskositas (kekentalan) udara ini dinyatakan dalam

$$\vec{F}_f = -b\vec{v} \quad 3.37$$

Dengan b adalah konstanta yang berhubungan dengan Hukum Stokes, yang besarnya sebanding dengan radius tetes minyak. Gaya gesek \vec{F} dinyatakan dengan tanda negatif karena arahnya berlawanan dengan arah kecepatan tetes minyak. \vec{v} adalah kecepatan terminal atau kecepatan akhir dari tetes minyak, kecepatan terminal ini diukur saat tetes minyak sudah bergerak dengan kecepatan konstan.

Pada percobaan ini, Milikan juga dapat mengatur besar besar tegangan pada kedua pelat sehingga tetes minyak dalam keadaan berhenti. Pada keadaan diam ini berlaku

$$\sum F = q\vec{E} - mg = 0 \quad 3.38$$

Dengan $q\vec{E}$ adalah gaya listrik dan mg adalah gaya yang ditimbulkan akibat gravitasi. Gaya listrik dan gravitasi saling berlawanan arah. Pada keadaan diam tidak terjadi gaya gesek sehingga $\vec{F}_f = 0$. Dari persamaan 3.34 ini kita dapat memperoleh besar muatan pada tetes minyak adalah

$$q = \frac{mg}{\vec{E}} = \frac{mgd}{V} \quad 3.39$$

Dari persamaan 3.35, kita melihat bahwa kita harus mengetahui besar massa tetes minyak agar diperoleh besar muatan. Massa tetes minyak kita rumuskan sebagai berikut

$$m = \rho \left(\frac{4}{3} \pi r^3 \right) \quad 3.40$$

Dengan mengatur besar beda tegangan V , kita juga dapat mengatur arah gerak tetes minyak, bisa bergerak ke atas, ke bawah, atau bahkan diam.

Pada percobaan ini juga Milikan melaporkan bahwa ia dapat melakukan pengamatan hingga diperoleh besar muatan ini hingga 6 jam dan dalam proses ini, besar muatan pada tetes minyak bisa mengalami perubahan beberapa kali. Milikan mengulangi percobaan ini ribuan kali dengan menggunakan jenis minyak yang berbeda- beda. Dari ribuan percobaan ini kemudian diperoleh ukuran muatan elektron atau kuantisasi muatan elektron adalah sebesar $1,602 \times 10^{-19} C$. kuantisasi muatan ini kemudian dinyatakan dalam tanda positif untuk sebuah muatan positif (e) dan ditulis -e untuk muatan negatif (elektron)

Contoh Kasus – Eksperimen Tetes Minyak Milikan

Pada sebuah Eksperimen Tetes Minyak Milikan dilakukan dua perubahan dalam prosedur percobaannya. Pertama digunakan bola plastik dengan diameter 1 mikrometer (μm atau mikron). Bola ini akan memudahkan kita untuk menentukan massanya. Bola plastik ini disemprotkan melalui atomizer dalam bentuk larutan liquid, namun kemudian larutan ini akan menguap di udara. Bola plastik kemudian diobservasi menggunakan mikroskop.

Satu hal yang terpenting kemudian adalah menyemprotkan daerah diantara pelat dengan radiasi ion, misalnya elektron (partikel beta) dari sebuah sumber radioaktif. Radiasi ionisasi ini akan membuat bola lebih mudah bermuatan. Setelah melalui banyak percobaan maka kita dapat menentukan apakah besar muatan yang diperoleh melalui persamaan 3.10 adalah kelipatan dari beberapa unit muatan dasar.

Jika dalam percobaan ini digunakan bola-bola bermassa $m = 5,7 \times 10^{-16} kg$ dan jarak antar pelat adalah $d = 4,0 mm$. Maka q dapat diperoleh dari persamaan 3.10

$$q = \frac{mgd}{V} = \frac{(5,7 \times 10^{-16} kg)(9,8 m/s^2)(4,0 \times 10^{-3} m)}{V}$$

$$= \frac{2,23 \times 10^{-17} Volt}{V} C$$

Dengan V adalah beda tegangan antara dua pelat yang diukur saat bola dalam keadaan diam. Dua siswa mengamati 30 bola dan menemukan besar tegangan V dalam Tabel 3. Pada percobaan ini beda tegangan dapat diubah dengan mudah dan tegangan positif menunjukkan bahwa bola bermuatan positif. Perhatikan bahwa tanda pada muatan dan tegangan harus diamati juga.

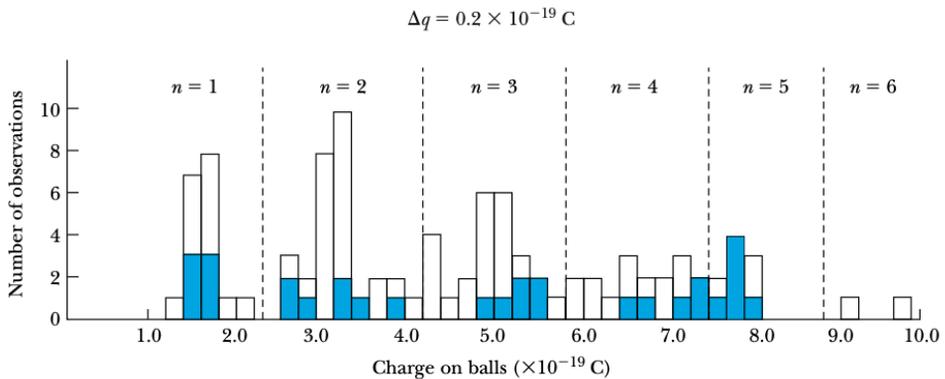
Tabel 3 Hasil Pengamatan Eksperimen Tetes Minyak Milikan

Particle	Voltage (V)	$q (\times 10^{-19} \text{ C})$	Particle	Voltage (V)	q	Particle	Voltage (V)	q
1	-30.0	-7.43	11	-126.3	-1.77	21	-31.5	-7.08
2	+28.8	+7.74	12	-83.9	-2.66	22	-66.8	-3.34
3	-28.4	-7.85	13	-44.6	-5.00	23	+41.5	+5.37
4	+30.6	+7.29	14	-65.5	-3.40	24	-34.8	-6.41
5	-136.2	-1.64	15	-139.1	-1.60	25	-44.3	-5.03
6	-134.3	-1.66	16	-64.5	-3.46	26	-143.6	-1.55
7	+82.2	+2.71	17	-28.7	-7.77	27	+77.2	+2.89
8	+28.7	+7.77	18	-30.7	-7.26	28	-39.9	-5.59
9	-39.9	-5.59	19	+32.8	+6.80	29	-57.9	-3.85
10	+54.3	+4.11	20	-140.8	+1.58	30	+42.3	+5.27

Sumber: Thronton & Rex, 2013

Nilai – nilai dari muatan ini $|q|$ kemudian diplot dalam histogram dengan satuan $\Delta q = 0,2 \times 10^{-19}$ yang berwarna solid (Gambar 3.12).

Gambar 3. 12 Histogram Jumlah Pengamatan Terhadap Muatan Teramati dari Sebuah Bola pada Percobaan Milikan



Sumber: Thronton & Rex, 2013

Ketika 70 pengukuran tambahan dari siswa lainnya dimasukkan, maka terbentuk pola kuantisasi muatan yang lebih jelas dengan sebuah muatan dinyatakan dalam $q = nq_0$, terutama pada tiga grup pertama. Daerah – daerah Histogram dapat dibagi-bagi dalam variasi nilai n dan nilai q_0 untuk tiap pengukuran, untuk selanjutnya ditentukan nilai rata-ratanya. Berdasarkan histogram diatas, diperoleh $q_0 = 1,7 \times 10^{-19} \text{ C}$ untuk 30 pengukuran pertama dan $q_0 = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$ untuk semua 100 pengukuran

E. Spektrum Garis

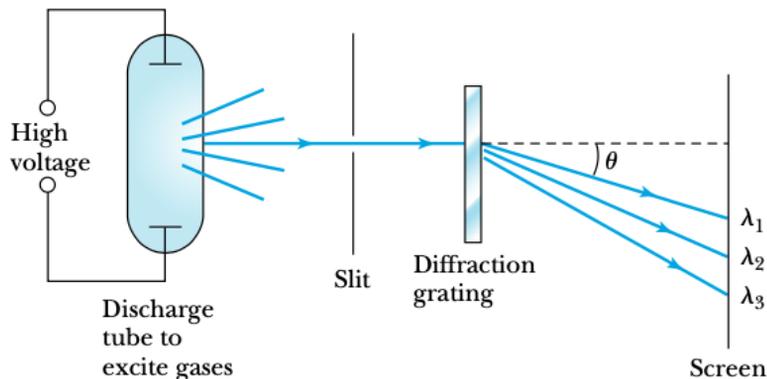
Spektrum garis ini tampak pada nyala api atau saat terjadi lucutan muatan listrik dari bahan dalam bentuk sinar yang memiliki beberapa warna. Percobaan spektrum cahaya tampak juga dapat dilihat menggunakan prisma. Pada akhir era fisika klasik, spektrum garis pada cahaya tampak ini dapat dihasilkan melalui percobaan difraksi kisi oleh Henry Rowland sekitar tahun 1880.

Sebuah spectrometer (Gambar 3.13) digunakan untuk mempelajari spektrum garis yang dihasilkan dari sebuah gas yang diberi beda tegangan. Berkas sinar yang diradiasikan dari gas ini disejajarkan melalui sebuah celah (*slit*), kemudian diteruskan ke kisi difraksi (*diffraction grating*) yang berjumlah ribuan celah per sentimeter. Berkas sinar yang mengalami difraksi kemudian terpisah – pisah dengan sudut θ sesuai panjang gelombangnya. Persamaan yang menyatakan difraksi maksimum diberikan oleh:

$$d \sin \theta = n\lambda \quad 3.41$$

Dengan d adalah jarak antar garis (celah) dan n adalah bilangan bulat yang kemudian disebut sebagai bilangan orde ($n = 1$ menunjukkan intensitas hamburan yang paling tinggi). Pola yang dihasilkan adalah pita terang dan pita gelap yang tampak pada layar, pola ini disebut **Spektrum Garis**.

Gambar 3. 13 Skema Spektrometer Optik



Sumber: Thronton & Rex, 2013

Pada tahun 1860 Bunsen dan Kirchoff menemukan bahwa panjang gelombang pada spektrum garis berhubungan dengan elemen kimia dan komposisi material (bahan). Setiap elemen akan menunjukkan karkteristiknya

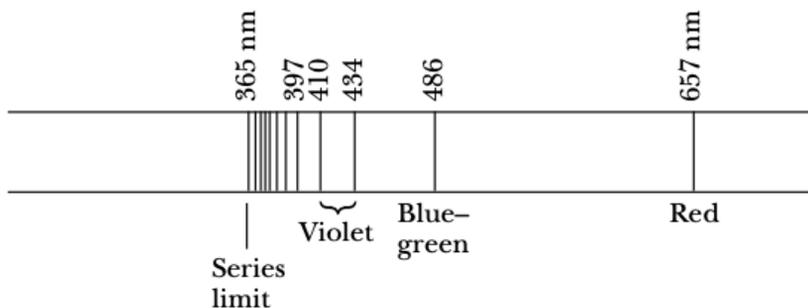
dalam bentuk panjang gelombang yang diradiasikan. Percobaan – percobaan tentang spektroskopi sinar ini kemudian berkembang pesat dengan menggunakan kisi yang lebih halus dan metode yang lebih cermat. Berkas sinar matahari kemudian dianalisis menggunakan spektroskopi optik untuk mengetahui material penyusun matahari. Matahari diketahui terdiri dari helium setelah melalui eksperimen-eksperimen spektroskopi optik ini.

Para ilmuwan beranggapan bahwa semakin kompleks struktur kimia dari suatu bahan, maka akan semakin banyak juga spektrum garisnya. Oleh sebab itu untuk memudahkan studi tentang spektrum garis pada radiasi, digunakanlah atom hidrogen. Pada tahun 1885 Johann Balmer, fisikawan asal Swiss berhasil merumuskan persamaan yang sesuai dengan keempat garis yang tampak pada spektrum garis gas hidrogen dan beberapa garis ultraviolet yang telah diidentifikasi pada spektrum bintang putih. Garis-garis ini dinyatakan dalam deret yang kemudian disebut sebagai **Deret Balmer**. Deret Balmer (Gambar 3.14) menunjukkan spektrum ungu, biru, hijau hingga merah dengan persamaan berikut:

$$\lambda = 364,56 \frac{k^2}{k^2 - 4} \text{ nm} \quad 3.42$$

Dengan ($k = 3, 4, 5, \dots; k > 2$) sesuai dengan spektrum cahaya tampak dari gas hidrogen. Panjang gelombang dinyatakan dalam satuan nm (nanometer).

Gambar 3. 14 Deret Balmer dari Spektrum Atom Hidrogen



Sumber: Thronton & Rex, 2013

Persaman 3.13 bisa juga diubah dalam bentuk frekuensi

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{1}{364,56} \frac{k^2 - 4}{k^2}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4}{364,56} \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right) \\
 &= R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right)
 \end{aligned}
 \tag{3.43}$$

Dengan R_H disebut sebagai konstanta Rydberg untuk atom hidrogen yang nilainya $R_H = 1,096776 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ dan k adalah bilangan bulat yang nilainya lebih besar dari dua ($k > 2$).

Pada tahun 1890 Johannes Rydberg dan Walther Ritz berkontribusi pada penurunan persamaan yang empiric untuk menghitung panjang gelombang dari spektrum garis atom hidrogen. Persamaan ini kemudian disebut sebagai **persamaan Rydberg**

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)
 \tag{3.44}$$

Dengan $n = 2$ untuk deret Balmer dan k selalu lebih besar dari n ($k > n$). Setelah 20 tahun penemuan deret Balmer, deret – deret lain yang mendeskripsikan spektrum atom hidrogen pun ditemukan. Deret- deret ini memiliki nilai n yang berbeda – beda, tapi tetap menggunakan persamaan Rydberg. Penemuan Rydberg mengantarkan pada bentuk spektrum radiasi yang berupa spektrum garis (diskrit) yang kemudian sangat penting untuk perkembangan ilmu Fisika di abad 20.

Tabel 4 Deret pada Spektrum Garis Atom Hidrogen

Discoverer (year)	Wavelength	n	k
Lyman (1916)	Ultraviolet	1	>1
Balmer (1885)	Visible, ultraviolet	2	>2
Paschen (1908)	Infrared	3	>3
Brackett (1922)	Infrared	4	>4
Pfund (1924)	Infrared	5	>5

Sumber: Thronton & Rex, 2013

Contoh Soal – Deret pada Spektrum Garis dari Atom Hidrogen

Deret Balmer ditemukan terlebih dahulu karena spektrum yang dia amati adalah spektrum cahaya tampak. Tunjukkan bahwa panjang gelombang pada spektrum garis pada deret Lyman ($n = 1$) dan Paschen ($n = 3$) bukan pada region cahaya tampak! Tentukan panjang gelombang dari 4 spektrum garis

pertama yang dapat dilihat dari radiasi gas hidrogen. Asumsikan interval panjang gelombang cahaya tampak adalah $\lambda = 400 - 700 \text{ nm}$.

Strategi:

Kita gunakan persamaan 3.15 untuk menentukan panjang gelombang pada $n = 1, 2$ dan 3 . Jika panjang gelombang ada dalam interval $400 \text{ nm} - 700 \text{ nm}$ maka masih merupakan gelombang tampak.

Jawaban:

Untuk Deret Lyman ($n = 1$):

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) = 1,0968 \times 10^7 \left(1 - \frac{1}{k^2} \right) m^{-1}$$

$$k = 2 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(1 - \frac{1}{(2)^2} \right) m^{-1} = 121,6 \text{ nm (ultraviolet)}$$

$$k = 3 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(1 - \frac{1}{(3)^2} \right) m^{-1} = 102,6 \text{ nm (ultraviolet)}$$

Perhatikan bahwa panjang gelombang akan semakin memendek jika nilai k semakin besar. Maka semua panjang gelombang pada deret Lyman tidak dapat dilihat oleh mata.

Untuk Deret Balmer ($n = 2$), kita peroleh

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{k^2} \right) = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{k^2} \right) m^{-1}$$

Sehingga

$$k = 3 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{(3)^2} \right) m^{-1} = 656,5 \text{ nm (merah)}$$

$$k = 4 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{(4)^2} \right) m^{-1} = 486,3 \text{ nm (biru-hijau)}$$

$$k = 5 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{(5)^2} \right) m^{-1} = 434,2 \text{ nm (violet)}$$

$$k = 6 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{(6)^2} \right) m^{-1} = 410,3 \text{ nm (violet)}$$

$$k = 7 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{(7)^2} \right) m^{-1} = 397,1 \text{ nm (ultraviolet)}$$

Maka empat garis yang teramati pada spektrum garis deret balmer adalah merah, biru-hijau, dan violet. Spektrum ultraviolet jarang terlihat karena intensitasnya rendah.

Deret berikutnya yaitu Deret Paschen ($n = 3$),

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{3^2} - \frac{1}{k^2} \right) = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{k^2} \right) m^{-1}$$

Kita peroleh

$$k = 4 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{(4)^2} \right) m^{-1} = 1876 \text{ nm (inframerah)}$$

$$k = 5 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{(5)^2} \right) m^{-1} = 1282 \text{ nm (inframerah)}$$

$$k = 6 \quad \frac{1}{\lambda} = 1,0968 \times 10^7 \left(\frac{1}{9} - \frac{1}{\infty} \right) m^{-1} = 820,6 \text{ nm (inframerah)}$$

Maka seluruh spektrum pada deret Paschen adalah inframerah. Perhatikan bahawa jika kita ingin mencari batas spektrum, maka tinggal masukkan $k = \infty$. Untuk deret Paschen, $k = \infty$ ada pada panjang gelombang 820,6 nm. Pada deret yang lebih tinggi $n \geq 4$ maka kita akan memperoleh panjang gelombang diatas daerah cahaya tampak.

F. Teori kuantisasi Planck

Setelah Rayleigh dan Jeans, distribusi intensitas energi terhadap panjang gelombang (Gambar 3.2) juga coba dijelaskan oleh Max Planck. Perbedaannya, jika Rayleigh dan Jeans hanya dapat menjelaskan pada panjang gelombang yang besar, Max Planck dapat menjelaskan spektrum distribusi energi pada seluruh daerah panjang gelombang.

Planck (1901) menyatakan bahwa ragam getar (mode) gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tertentu tidak dapat memiliki energi sembarang. Besar energi tidak dapat dikatakan berbanding lurus dengan kuadrat amplitude getaran. Sebaliknya, nilai-nilainya harus merupakan kelipatan bulat dari suatu nilai kuantum energi sebesar u_ν , yang besarnya bergantung pada frekuensi ragam getar.

Teori kuantum Planck: Besar energi radiasi merupakan kelipatan bulat dari nilai kuantum energi sebesar u_ν yang besarnya bergantung pada frekuensi ragam getar

Akibat terbatasnya nilai-nilai energi gelombang pada nilai $\epsilon_n = nu_\nu$ dengan spektrum nilai yang diskret, maka perhitungan energi rerata statistik dilakukan dengan penjumlahan diskret meliputi spektrum energi yang diperbolehkan. Hasilnya: (Planck)

$$\langle \varepsilon \rangle = \frac{\sum_{\varepsilon} \varepsilon p(\varepsilon)}{\sum_{\varepsilon} p(\varepsilon)} = \frac{\sum_n \varepsilon_n \exp(-\beta \varepsilon_n)}{\sum_n \exp(-\beta \varepsilon_n)} \quad 3.45$$

$$= \frac{d}{d\beta} \ln \sum_n \exp(-n u_{\nu} \beta) \quad 3.46$$

Dengan

$$\begin{aligned} \sum_{n=0}^{\infty} \exp(-n \beta u_{\nu}) &= 1 + \exp(-x) + \exp(-2x) + \exp(-3x) + \dots \\ &= \{1 - \exp(-x)\}^{-1} \end{aligned} \quad 3.47$$

Dan

$$x = \beta u_{\nu}$$

$$\begin{aligned} \langle \varepsilon \rangle &= -\frac{d}{d\beta} \ln \{1 - \exp(-\beta u_{\nu})\}^{-1} \\ &= -[1 - \exp(-\beta u_{\nu})](-1)[1 - \exp(-\beta u_{\nu})]^{-2}[-(-u_{\nu}) \exp(-\beta u_{\nu})] \\ &= \frac{u_{\nu} \exp(-\beta u_{\nu})}{1 - \exp(-\beta u_{\nu})} \\ \langle \varepsilon \rangle &= \frac{u_{\nu}}{e^{\beta u_{\nu}} - 1} \end{aligned} \quad 3.48$$

Dengan demikian, rapat energi dalam interval panjang gelombang $d\lambda$ adalah

$$\begin{aligned} U(\lambda) d\lambda &= \frac{8\pi u_{\nu}}{\lambda^4 \left\{ \exp\left(\frac{u_{\nu}}{k_b T} - 1\right) \right\}} d\lambda \\ &= \frac{8\pi u_{\nu} \lambda}{\lambda^5 \left\{ \exp\left(\frac{u_{\nu} \lambda}{k_b T \lambda} - 1\right) \right\}} d\lambda \end{aligned} \quad 3.49$$

Sementara rapat volume energi per selang panjang gelombang mempunyai distribusi spektral:

$$U(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{u_{\nu} \lambda}{\left\{ \exp\left(\frac{u_{\nu} \lambda}{k_b T \lambda} - 1\right) \right\}} \quad 3.50$$

Mengingat kesebandingan antara $U(\lambda)$ dengan S_{λ} yang secara termodinamis menurut Wien dapat ditunjukkan mempunyai ketergantungan terhadap T dan λ menurut persamaan 3.7, maka nilai $u_{\nu} \lambda$ terhadap λ maupun T harus tetap. Tetapan ini akan dituliskan sebagai hc dengan h dikenal sebagai

tetapan Planck, yaitu $u_\nu \lambda = hc$. Tetapan Planck akan menyatakan pula besar kuantum tenaga medan radiasi dalam daerah frekuensi ν , yaitu:

$$u_\nu = \frac{hc}{\lambda} = h\nu \quad 3.51$$

Dan distribusi spectral untuk $U(\lambda)$ menjadi

$$U(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{h\nu\lambda}{\left\{ \exp\left(\frac{hc}{k_b T \lambda} - 1\right) \right\}} \quad 3.52$$

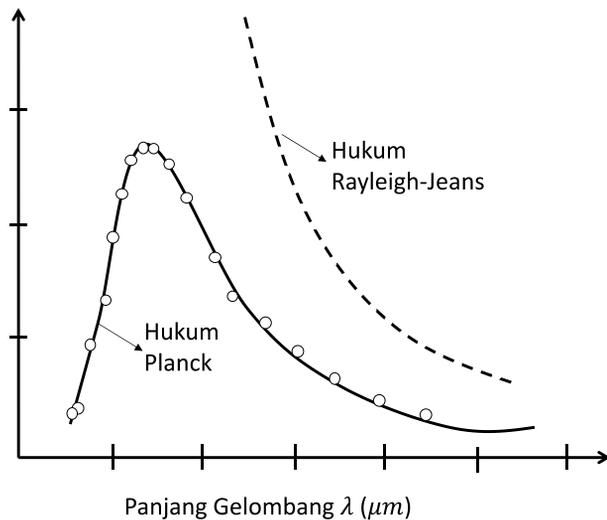
Atau

$$U(\lambda) = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\left\{ \exp\left(\frac{hc}{k_b T \lambda} - 1\right) \right\}} \quad 3.53$$

Dengan demikian

$$f(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\exp\left(\frac{hc}{k_B T \lambda} - 1\right)} \quad 3.54$$

Gambar 3. 15 Grafik $S(\lambda)$ menurut Rayleigh-jeans dan Planck $U(\lambda)$



Penjelasan Teoritis menurut Planck sangat sesuai dengan hasil eksperimen. Untuk nilai panjang gelombang λ yang rendah, faktor eksponensial adalah dominan. Maka mengecilnya nilai λ menyebabkan

naiknya hasil eksponensial dan mengakibatkan turunnya nilai $U(\lambda)$ dan $S(\lambda)$. Pada saat λ menuju nol, nilai eksponensial menuju tak terhingga dan menghasilkan $U(\lambda)$ yang menuju nol. Untuk nilai panjang λ yang besar, factor λ^5 menjadi dominan. Dengan demikian, naiknya nilai λ menghasilkan berkurangnya nilai $U(\lambda)$ sedangkan untuk nilai λ yang cukup besar, $U(\lambda)$ menuju nol. Grafik $U(\lambda)$ sebagai fungsi λ untuk kedua teori di atas ditunjukkan pada Gambar 3.15.

Nilai tetapan h yang kemudian dinamakan tetapan Planck ditentukan dengan cara mencocokkan (*fitting*) spektrum teori terhadap data eksperimental. Hasil perhitungan Planck dalam makalahnya sebesar $h = 6,55 \times 10^{-34} Js$. Hasil pencocokan terbaik yang lebih akurat menghasilkan nilai tetapan sebesar

$$h = 6,62618 \times 10^{-31} Js$$

Nilai λ_{maks} adalah panjang gelombang di mana “intensitas” maksimum diperoleh dari syarat meksimum Persamaan :

$$\frac{dU(\lambda)}{d\lambda} = 0 \tag{3.55}$$

$$\frac{d}{d\lambda} \left[\frac{8\pi hc}{\lambda^5} \frac{1}{\left(\frac{hc}{k_B T \lambda}\right) - 1} \right] = 0 \tag{3.56}$$

Dengan substitusi

$$x = \frac{hc}{k_B T \lambda}$$

Yang diperoleh sebagai hasil

$$e^{-x} + \frac{1}{5} x = 1$$

Dengan penyelesaian

$$x_{maks} \approx 4,9651$$

Kita memperoleh hukum pergeseran Wien:

$$\lambda_{maks} = \frac{hc}{4,9651 k_B T} = 2,9 \times 10^{-3} mK \times \frac{1}{T} \tag{3.57}$$

Dengan mengisikan

$$S(\lambda) = \frac{1}{2} U(\lambda)$$

Dan mengintegalkannya meliputi seluruh λ dari nol sampai tak berhingga, kita memperoleh rumus Stefan – Boltzmann:

$$S_T = \int_0^{\infty} S(\lambda) d\lambda = \sigma T^4 \quad 3.58$$

Dengan tetapan Stefan-Boltzmann:

$$\sigma = \frac{2}{15} \frac{\pi^5 k_B^4}{c^2 h^3} \approx 5,67 \times 10^{-8} \frac{W}{(m^2 K^4)}$$

Contoh Soal 1-Penerapan Teori Kuantum Planck

Fluks energi matahari yang sampai dibumi adalah $1,0 \times 10^3 \frac{W}{m^2}$. Berapa cacah foton gelombang rata-rata 5000\AA ?

Penyelesaian:

Energi tiap foton dengan $\lambda = 5000\text{\AA}$ adalah

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \left(\frac{J}{s}\right) 3 \times 10^8 \left(\frac{m}{s}\right)}{5,0 \times 10^{-7} m} = 4,0 \times 10^{-19} J$$

Contoh Soal 2-Penerapan Teori Kuantum Planck

Sebuah lampu natrium 20 W berwarna kuning dengan panjang gelombang 600 nm. Berapa banyak foton yang dipancarkan lampu tiap sekon?

Penyelesaian :

Soal ini menggabungkan energi listrik dengan energi radiasi.

Daya listrik dinyatakan dengan

$$P = \frac{E}{t}$$

Dan energi radiasi dinyatakan dengan

$$E = n \frac{hc}{\lambda}$$

Maka

$$P \cdot t = n \frac{hc}{\lambda}$$

$$(20) \cdot (1) = n \frac{(6,63 \times 10^{-34}) 3 \times 10^8}{6 \times 10^{-7}}$$

$$n = 5,92 \times 10^{19} \text{ foton}$$

Rangkuman

1. Eksperimen radiasi benda hitam
 - a. Benda Hitam

- 1) Benda hitam adalah benda yang dapat menyerap dan melepas energi dari lingkungan
- 2) Kemampuan menyerap dan melepas energi ini disebut emisivitas
- 3) Setiap benda hitam yang dipanaskan, saat temperturnya sudah lebih tinggi dari lingkungan, ia melepas energinya ke lingkungan secara radiasi (langsung).

b. Radiasi benda hitam

- 1) Hukum Stefan-Boltzmann: energi yang dipancarkan atau diradiasikan sebanding dengan temperatur benda hitam
- 2) Hubungan antara energi radiasi dengan temperature benda hitam

$$E_T = \sigma e T^4 A$$

- 3) Besar intensitas radiasi benda hitam:

$$I_{total} = \frac{P}{A} = \frac{E_T}{t \cdot A} = \sigma e T^4$$

- 4) Daya radiasi benda hitam:

$$P = \frac{E_T}{t} = \sigma e T^4 A$$

c. Hukum Wien

- 1) **Hukum Pergeseran Wien:** Panjang gelombang maksimum akan bergeser kearah nilai yang semakin kecil, seiring dengan bertambahnya waktu.

$$\lambda_{max} T = 2,898 \times 10^{-3} m \cdot K$$

- 2) **Hukum Radiasi Wien:** Daya total yang diradiasikan akan meningkat seiring dengan meningkatnya temperatur.

$$S_\lambda = \frac{8\pi hc}{\lambda^5} e^{-\frac{ch}{\lambda k_B T}}$$

- 3) **Intensitas** relatif (s_λ) adalah intensitas energi radiasi sebagai fungsi gelombang
- 4) Hukum Radiasi Wien hanya dapat menjelaskan radiasi benda hitam pada interval $1 - 4 \mu m$, namun gagal menjelaskan radiasi benda hitam pada panjang gelombang $18 \mu m - 60 \mu m$.

2. Teori Rayleigh – Jeans

a. Penjelasan Fisika Klasik

- 1) Rayleigh dan Jeans menggunakan argumen – argumen dari teori Fisika Klasik, yaitu teori termodinamka dan elektromagnetik,

sehingga disebut juga sebagai teori klasik tentang radiasi termal benda Hitam

- 2) Mengasumsikan gelombang energi dalam lubang benda berongga berbentuk kotak adalah gelombang berdiri
- 3) Gelombang berdiri ini yang dihasilkan dari osilasi electron pada dinding kotak
- 4) $U(\lambda)d\lambda$ adalah rapat energi atau jumlah gelombang berdiri per satuan volume dikali dengan energi rata- rata tiap gelombang.

$$U(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi}{\lambda^4} k_B T d\lambda$$

- 5) Distribusi ragam getar gelombang electromagnet pada berbagai energy mengikuti statistik Boltzmann,

$$p(\varepsilon) = A \exp\left(-\frac{\varepsilon}{k_B T}\right) \int_0^\infty \varepsilon p(\varepsilon) d\varepsilon$$

dengan fungsi distribusi intensitas energi radiasi Rayleigh -Jeans ($f(\lambda, T)$) dinyatakan dengan

$$f(\lambda, T) = 8\pi k_B \lambda T$$

b. Bencana Ultraviolet

- 1) Distribusi energi Rayleigh dan Jeans berhasil menerangkan spektrum radiasi benda hitam pada panjang gelombang yang besar.
- 2) Distribusi energi Rayleigh dan Jeans gagal untuk panjang gelombang yang kecil (mulai dari panjang gelombang ultraviolet ke spektrum dengan panjang gelombang lebih kecil)
- 3) Kegagalan ini kemudian disebut sebagai bencana ultraviolet atau UV Cathastrope
- 4) Kegagalan ini juga menunjukkan kegagalan teori fisika klasik tentang Termodinamika dan Elektromagnetik.

3. Penemuan Sinar X

- a. Ditemukan oleh Rontgen, diproduksi oleh sinar katoda yang menembak dinding kaca di dalam tabung vakum
- b. Sinar ini tidak dipengaruhi oleh medan magnet, sebagaimana sinar katoda, namun dapat menembus bahan (material) lebih dalam dibandingkan sinar katoda.

4. Percobaan Sinar Katoda

- a. Penemuan Elektron oleh JJ Thomson

- 1) sinar katoda merupakan partikel bermuatan negatif.
 - 2) Thomson berhasil menentukan metode untuk mengukur rasio perbandingan muatan terhadap massa elektron (e/m)
 - b. Penetapan besar muatan elektron berhasil dilakukan melalui eksperimen tetes minyak milikan
5. Spektrum Garis
- a. Eksperimen yang menunjukkan bahwa radiasi gas tidak kontinu melainkan dalam spektrum garis (diskrit).
 - b. Spektrum garis atom Hidrogen dinyatakan dalam 5 deret: deret Lyman, Balmer, Paschen, Bracket dan Pfund
 - c. Spektrum garis atom hidrogen sesuai dengan persamaan Rydberg.

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right)$$

6. Teori Kuantisasi Planck
- a. Ragam getar (mode) gelombang elektromagnetik dengan frekuensi tertentu tidak dapat memiliki energi sembarang.
 - 1) Nilai- nilai energi gelombang ini terbatas (spektrum diskret)

$$\varepsilon_n = nu_\nu$$

- b. Besar energi tidak dapat dikatakan berbanding lurus dengan kuadrat amplitude getaran.
- c. nilai-nilainya harus merupakan kelipatan bulat dari suatu nilai kuantum energi sebesar u_ν yang besarnya bergantung pada frekuensi ragam getar.

$$u_\nu = \frac{hc}{\lambda} = h\nu$$

$$h = 6,62618 \times 10^{-31} Js$$

- d. Rapat volume energi per selang panjang gelombang

$$U(\lambda) = \frac{8\pi}{\lambda^5} \frac{u_\nu \lambda}{\left\{ \exp \left(\frac{u_\nu \lambda}{k_b T \lambda} - 1 \right) \right\}}$$

- e. Distribusi intensitas energi diberikan oleh

$$f(\lambda, T) = \frac{8\pi hc}{\exp \left(\frac{hc}{k_b T \lambda} - 1 \right)}$$

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

- Lampu pijar dapat dianggap berbentuk bola. Jari- jari lampu kedua adalah 0,8 kali jari- jari lampu pertama. Suhu lampu pertama dan kedua masing- masing 527°C dan 727°C . Nilai perbandingan antara daya kalor radiasi lampu pertama dan lampu kedua adalah
 - 16/25
 - 25/16
 - 64/125
 - 125/64
 - 625/256
- Suhu permukaan suatu benda 966 K. panjang gelombang radiasi pada intensitas maksimum yang dipancarkan oleh permukaan benda itu adalah...
 - 3×10^2 angstrom
 - 3×10^3 angstrom
 - 3×10^4 angstrom
 - 3×10^5 angstrom
 - 3×10^6 angstrom
- Suhu permukaan matahari adalah 5800K dan puncak panjang gelombang dalam radiasinya adalah 5 nm. Suhu permukaan dari sebuah bintang jauh dengan puncak panjang gelombangnya 4 nm adalah
 - 6105 K
 - 6350 K
 - 6500 K
 - 7000 K
 - 7250 K
- Radiasi kalor benda hitam yang memiliki grafik antara E dan λ diberikan pada gambar ini.
Perhatikan hubungan- hubungan berikut:
 - $E_1 T_1 > E_2 T_2$
 - $T_1 < T_2$
 - $\lambda_1 / \lambda_2 = T_2 / T_1$
 - $\lambda_1 / \lambda_2 = T_1 / T_2$Pernyataan yang benar ditunjukkan oleh nomor
 - (1), (2), (3) dan (4)
 - (1), (2) dan (3)
 - (1) dan (3)
 - (2) dan (4).
 - (4) saja

5. Jika energi foton adalah E , pernyataan yang tepat untuk panjang gelombang λ dari foton dinyatakan dalam energi E , konstanta Planck h dan cepat rambat cahaya di ruang hampa diberikan oleh
- $\lambda = E h c$
 - $\lambda = E / (h c)$
 - $\lambda = h c / E$
 - $\lambda = E h / c$
 - $\lambda = E c / h$
6. Seberkas cahaya tampak dengan panjang gelombang λ , dipancarkan dengan daya W . Jika konstanta Planck h , banyak foton yang dipancarkan tiap detik adalah
- $n = E h c / (W \lambda)$
 - $n = W \lambda / (h c)$
 - $n = h c / (W \lambda)$
 - $n = E h / \lambda$
 - $n = h c / (E \lambda)$
7. Jumlah foton per sekon yang dihasilkan oleh suatu sumber laser yang panjang gelombangnya 6,63 nm dan daya keluaran 6 mW adalah ... foton
- 1×10^{14}
 - 2×10^{14}
 - 1×10^{13}
 - 2×10^{13}
 - 5×10^{13}
8. Menurut Rayleigh-Jeans gelombang di dalam lubang permukaan berogga adalah gelombang berdiri, karena ...
- Merupakan perpaduan dua gelombang yang memiliki amplitudo sama
 - Merupakan perpaduan dua gelombang yang memiliki frekuensi sama
 - Merupakan perpaduan dua gelombang yang memiliki periode berbeda
 - Merupakan perpaduan gelombang datang dan gelombang pantul yang searah
 - Merupakan gelombang berjalan yang dihasilkan dari osilasi electron di dinding rongga
9. Perhatikan pernyataan berikut
- Energi yang diradiasikan benda hitam sebanding dengan pangkat empat dari temperaturnya
 - Terjadi pergeseran panjang gelombang ke arah nilai yang semakin kecil, seiring kenaikan temperatur

(3) Intensitas energi yang dipancarkan dari benda hitam sebanding dengan panjang gelombang

(4) Besar energi radiasi tidak bisa dinyatakan dalam nilai sebarang, melainkan dinyatakan dalam tangga- tingkat energi tertentu

Pernyataan yang merupakan penjelasan radiasi benda hitam menurut fisika klasik adalah

a. (1) (2) dan (3)

d. (4) saja

b. (1) dan (3)

5. semua benar

c. (2) dan (4)

10. Perhatikan pernyataan berikut

(1) Eksperimen Lummer dan Pringsheim

(2) Eksperimen Rubens dan Kurlbaum

(3) Spektrum Garis atom hidrogen

(4) bencana ultraviolet

Fenomena – fenomena diatas menjelaskan bahwa

a. Energi radiasi benda hitam bersifat kontinu

b. Energi radiasi benda hitam ditentukan oleh amplitudonya

c. Hukum Fisika Klasik tentang radiasi sepenuhnya benar

d. Hukum Fisika Klasik gagal menjelaskan tentang radiasi benda hitam

e. Diperlukan berkas sinar X untuk memindai materi

Essay

1. Beberapa bintang diamati bercahaya kemerah-merahan dan beberapa bercahaya biru. Bintang mana yang memiliki suhu permukaan lebih tinggi? Jelaskan!

Jawab:

2. Setiap benda meradiasikan panas. Jika demikian, mengapa kita tidak dapat melihat benda- benda dalam ruang gelap?

Jawab:

3. Suatu benda hitam dapat dijelaskan dengan pendekatan sebuah lubang kecil dalam rongga tertutup apas saja. Jelaskan pernyataan ini!

Jawab:

4. Suatu iklan di TV menyatakan sebuah merk kompor gas sebagai “si api biru”, apa maksudnya?

Jawab:

5. Jika suhu mutlak suatu benda padat yang berpijar ditingkatkan dua kali, bagaimana dengan intensitas radiasi yang dipancarkannya?

Jawab:

6. Apa yang dimaksud dengan bencana ultraviolet?

Jawab:

7. Agar dapat menemukan suatu persamaan radiasi yang menyatukan rumus Wien dan rumus Raileigh – Jeans, anggapa radikal apa yang dibuat oleh Planck?

Jawab:

8. Cahaya ultraviolet menyebabkan penghangusan kulit (kulit menjadi hitam), sementara cahaya tampak tidak. Jelaskan !

Jawab:

9. Manakah yang memiliki energi lebih besar, sebutah foton radiasi ultraviolet atau seribu foton cahaya kuning?

Jawab:

10. Hitung frekuensi dari garis Lyman akibat transisi dari $n = 2$ ke $n = 1$

Jawab:

11. Dari pengukuran yang dibuat di Bumi diketahui bahwa matahari memiliki luas $6,0 \times 10^{18}$ dan meradiasikan energi pada kelajuan $3,6 \times 10^{26}$ W. Anggap permukaan matahari sebagai benda hitam sempurna. Hitung suhu permukaannya!

Jawab:

12. Sebuah tungku pembakar kayu tidak dioperasikan dalam suhu ruang 27°C . Ketika tungku memulai pembakaran hingga suhu permukaannya mencapai 227°C , ruang dipanaskan hingga suhunya tetap 57°C . Tungku memiliki emisivitas 0,9 dan luas permukaan 5 m^2 . Tentukan daya yang diradiasikan tungku ketika:

a. tungku tidak dipanaskan dan suhunya adalah suhu ruang

Jawab:

b. tungku dipanaskan hingga suhunya meningkat menjadi 227°C!

Tips: daya radiasi = $e\sigma A (T_2^4 - T_1^4)$

Jawab:

13. Buktikan bahwa hukum radiasi Wien mematuhi Hukum Plack

Tips : (lihat Thornton & Rex halaman 101)

Jawab:

14. Gunakan Hukum Plank tentang radiasi untuk merumuskan Hukum Stefan – Boltzmann !

Tips : (lihat Thornton & Rex halaman 101)

Jawab:

15. Buktikan bahwa hukum Planck sesuai dengan Hukum Rayleigh- Jeans pada panjang gelombang yang besar

Tips : (lihat Thornton & Rex halaman 102)

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban

benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

- Burns, Marshall L. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: United States of America.
- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental Of physics*. Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Tenth Edition.
- Kanginan, Marthen. (2018). *Fisika untuk SMA/MA Kelas XII*. Erlangga: Jakarta.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition (third)*. Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2013). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.

Kegiatan Pembelajaran 2 EKSPERIMEN-EKSPERIMEN PENCETUS TEORI KUANTUM (PART 2)

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa dapat menyelesaikan masalah yang menggunakan konsep dan persamaan – persamaan yang berhubungan dengan efek fotolistrik, efek Compton, produksi sinar X dan produksi pasangan dan anihilasi.	<ul style="list-style-type: none"> a) Mahasiswa dapat menjelaskan eksperimen efek fotolistrik mulai dari skema percobaan, hasil – hasil eksperimen, interpretasi fisika klasik, penjelasan Einstein tentang efek fotolistrik dan interpretasi kuantum. b) Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana efek Compton mendemonstrasikan sifat gelombang radiasi sesuai dengan teori kuantum, memiliki sifat- sifat partikel dan tetap sesuai dengan hukum kekekalan energi dan momentum c) Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana produksi sinar X adalah fenomena invers dari efek fotolistrik d) Mahasiswa dapat menjelaskan fenomena produksi pasangan dan anihilasi sesuai teori kuantum dan hukum- hukum konservasi e) Mahasiswa dapat menyelesaikan masalah yang menggunakan konsep dan persamaan – persamaan yang berhubungan dengan efek fotolistrik, efek Compton, produksi sinar X dan produksi pasangan dan anihilasi.

Uraian Materi

Pada tahun 1887, Heinrich Hertz berhasil melakukan eksperimen yang mengkonfirmasi Hukum – Hukum Maxwell. Ternyata pada eksperimen yang sama ini, Hertz juga menyadari bahwa ketika sinar ultraviolet dijatuhkan di elektroda logam, sebuah muatan juga dihasilkan dan kemudian muatan itu bergerak keluar dari elektroda logamnya. Efek fotolistrik ini banyak

diterapkan pada alat yang menggunakan berkas sinar untuk bekerja, misalnya panel surya, sensor cahaya dan tabung *photomultiplier*.

A. Eksperimen Efek Fotolistrik

Istilah lama untuk efek fotolistrik adalah efek Hertz (yang saat ini tidak digunakan lagi). Hertz mengamati dan kemudian menunjukkan bahwa elektrode yang diterangi dengan sinar ultraviolet menciptakan bunga api listrik lebih mudah. Efek fotolistrik membutuhkan foton dengan energi dari beberapa elektrotronvolt sampai lebih dari satu *MeV* unsur yang nomor atomnya tinggi. Meskipun Heinrich Hertz yang menemukan efek ini, namun publikasi dari efek ini ia berikan untuk dideskripsikan lebih rinci pada ilmuan lainnya, yaitu Philipp Lenard. Fenomena ini kemudian disebut sebagai **Efek fotolistrik**

Efek fotolistrik adalah salah satu percobaan sederhana yang digunakan untuk menjelaskan bagaimana electron dapat teremisi dari material dan kuantisasi energi radiasi. Pada awal tahun 1900, baru diketahui bahwa electron terikat pada material . Elektron valensi pada logam adalah “**electron bebas**” yang mudah bergerak dari satu atom ke atom lain, tanpa meninggalkan permukaan materialnya. Namun dengan 4 (empat) metode berikut, electron dapat meninggalkan permukaan material.

1. Emisi Termal (*Thermal Emission*): yaitu teremisinya electron dari material saat diberi energi panas tertentu.
2. Emisi Elektron Sekunder (*Secondary Emission*): yaitu teremisinya electron dari material saat electron tersebut memperoleh energi dari electron lain yang ditembakkan dan menembus permukaan material.
3. Emisi Medan (*Field Emission*): yaitu teremisinya electron dari material saat diberi medan listrik eksternal.
4. Efek Fotolistrik: yaitu teremisinya electron dari material saat dikenai radiasi elektromagnetik.

Pada efek fotolistrik, gelombang elektromagnetik yang dijatuhkan pada elektroda logam memberikan energi pada electron. Elektron kemudian dapat meningkatkan energi kinetiknya, sehingga electron mampu keluar (terekstasi / teremisi) dari permukaan. Elektron yang keluar ini kemudian disebut **fotoelektron**. Energi kinetik minimum yang harus ditambahkan agar electron dapat keluar ini kemudian disebut sebagai **energi ambang** atau **fungsi kerja** yang disimbolkan dengan ϕ (baca : *phi*). Besar energi ambang

ini juga sama dengan energi minimum material untuk mengikat electron (Tabel).

Tabel 5 Fungsi Kerja

Element	ϕ (eV)	Element	ϕ (eV)	Element	ϕ (eV)
Ag	4.64	K	2.29	Pd	5.22
Al	4.20	Li	2.93	Pt	5.64
C	5.0	Na	2.36	W	4.63
Cs	1.95	Nd	3.2	Zr	4.05
Cu	4.48	Ni	5.22		
Fe	4.67	Pb	4.25		

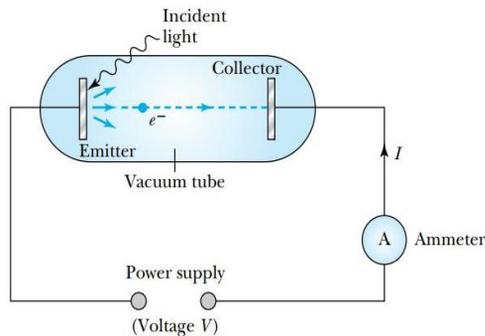
From *Handbook of Chemistry and Physics*, 90th ed. Boca Raton, Fla.: CRC Press (2009–10), pp. 12-114.

Sumber: Thronton, 2013

1. Hasil eksperimen

Efek fotolistrik adalah pengeluaran elektron dari suatu permukaan (biasanya logam) ketika dikenai dan menyerap radiasi elektron magnetik (seperti cahaya tampak dan radiasi ultraungu) yang berada diatas frekuensi ambang tergantung pada jenis permukaan. Eksperimen **efek fotolistrik** dilakukan sekitar tahun 1900 menggunakan peralatan yang digunakan eksperimen Heinrich Hertz (Gambar). Berkas sinar yang dijatuhkan pada emitor atau pemancar gelombang atau katoda disebut juga **fotokatoda**.

Gambar 3. 16 Skema Peralatan Eksperimen Fotolistrik



Sumber: Thronton, 2013

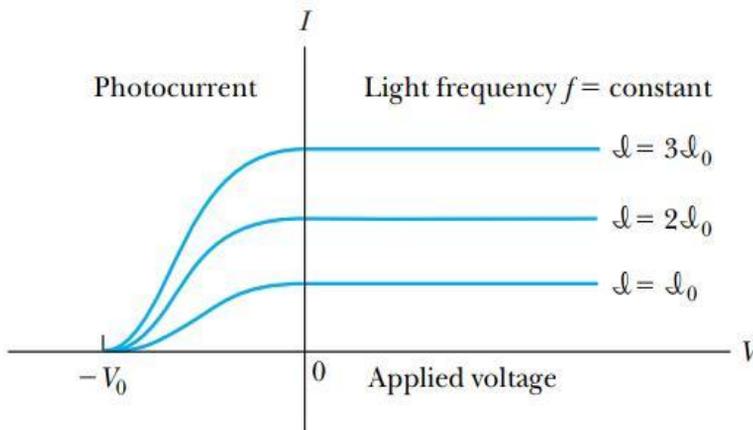
Sebagian elektron yang terpancar kemudian menuju **kolektor** yang merupakan **anoda**. Pada kolektor ini dapat diberikan tegangan negatif atau

positif yang diatur dengan menyesuaikan besar tegangan dari power supply. Jika diberi tegangan negatif, maka electron akan bergerak diperlambat dan sebaliknya. Arus I yang diukur menggunakan amperemeter selanjutnya memperlihatkan bahwa arus listrik ini mengalami peningkatan yang menunjukkan arus fotoelektron

Fakta eksperimental terkait tentang efek fotolistrik (Thorton dan Rex 2012) adalah:

1. Energi kinetik dari fotoelektron tidak tergantung pada intensitas cahaya. Besar potensial henti V_0 yang diberikan untuk menghentikan semua fotoelektron adalah sama besar, tidak peduli berapapun intensitas cahayanya (Gambar 3.17). Arus fotolistrik akan mencapai nilai maksimum saat terjadi peningkatan dari tegangan negatif ke tegangan positif.

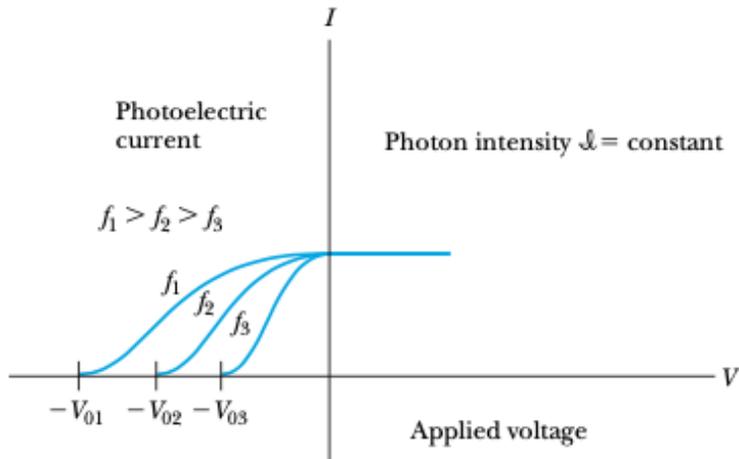
Gambar 3. 17 Hubungan Tegangan dan Arus Fotolistrik dari Percobaan Efek Fotolistrik



Sumber: Thronton, 2013

2. Besar energi kinetik maksimum dari fotoelektron yang teremisi dari material tertentu material, hanya tergantung pada frekuensi cahaya. Dengan kata lain, untuk cahaya dari frekuensi yang berbeda maka akan menghasilkan potensial henti yang berbeda pula. Nilai dari V_0 hanya bergantung pada frekuensi f tetapi tidak pada intensitas.

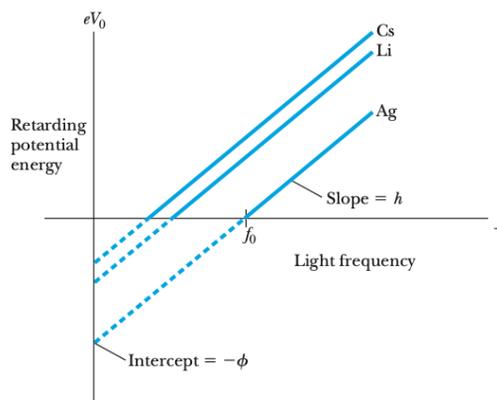
Gambar 3. 18 Arus dan Tegangan penghenti terhadap intensitas radiasi



Sumber: Thronton, 2013

3. Semakin kecil fungsi kerja ϕ bahan, maka semakin rendah frekuensi cahaya untuk menolak atau mengeluarkan fotoelektron. Tidak ada fotoelektron dihasilkan jika bahan disinari cahaya dengan frekuensi dibawah frekuensi ambang. Data ini sesuai dengan percobaan Milikan (Gambar) yang menunjukkan frekuensi ambang yang diukur pada tiga jenis logam.

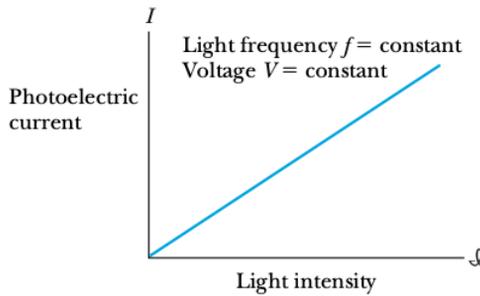
Gambar 3. 19 Energi Potensial Henti eV_0 terhadap frekuensi pada 3 jenis logam



Sumber: Thronton, 2013

4. Ketika fotoelektron dihasilkan, jumlah fotoelektron ini sebanding dengan intensitas berkas sinar (Gambar 3.20). Dengan demikian pada frekuensi yang konstan (λ sama, warna cahayanya sama), **arus fotolistrik** sebanding dengan intensitas berkas sinar.

Gambar 3. 20 Arus Fotolistrik adalah fungsi linear terhadap intensitas berkas sinar



Sumber: Thronton, 2013

5. Tidak ada waktu tunda antara penyinaran katoda dengan terlepasnya fotoelektron (timbulnya arus). Fotoelektron diemisikan secara spontan, hanya diperlukan waktu sekejap dari pemberian radiasi hingga terbentuk fotoelektron. Waktu tunggu hingga muncul fotoelektron ini tidak dipengaruhi oleh intensitas sinar.

Fakta hasil eksperimen efek fotolistrik dari no. 1 sampai 4 ini dikemukakan oleh Philip Lenard, yang merupakan asisten Heinrich Hertz. Lenard yang mempelajari efek fotolistrik ini memperoleh nobel fisika pada tahun 1905.

2. Interpretasi fisika klasik

Fisika klasik setuju dengan pernyataan bahwa gelombang elektromagnetiklah yang membuat electron keluar dari material. Namun, fisika klasik memprediksikan bahwa total energi gelombang elektromagnetik akan mengalami peningkatan jika intensitas berkas sinarnya ditingkatkan. Fisika klasik juga beranggapan bahwa energi kinetik electron akan mengalami peningkatan jika intensitas berkas sinar ditingkatkan.

Tapi menurut hasil eksperimen dan Gambar 3.17 menunjukkan bahwa potensial henti V_0 bernilai tetap untuk menghentikan seluruh fotoelektron untuk berkas sinar f , tidak peduli berapapun intensitasnya. Fisika klasik juga tidak dapat menjelaskan hasil eksperimen fotolistrik pada No. 2, karena energi

kinetik maksimum fotoelektrik hanya bergantung pada frekuensi berkas sinar f dan bukan intensitasnya.

Kehadiran frekuensi ambang, atau frekuensi minimal yang diperlukan untuk menghasilkan efek fotolistrik, ini juga diperlihatkan pada hasil percobaan no. 3. Hasil Percobaan ini sama sekali tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik. Fisika klasik tidak dapat memprediksi hasil eksperimen yang sesuai dengan Gambar 3.19. Untuk hasil percobaan no. 4, fisika klasik hanya memprediksi bahwa jumlah fotoelektron yang dikeluarkan atau dihasilkan akan meningkat seiring dengan intensitas berkas sinar.

Akhirnya, fisika klasik memprediksi bahwa pada intensitas yang sangat rendah, maka electron akan memerlukan waktu yang cukup lama untuk menyerap energi, sehingga kemudian memiliki energi yang cukup untuk keluar dari bahan. Namun berdasarkan hasil pengamatan, fotoelektron langsung keluar secara hampir spontan. Sebagai contoh, pada penyinaran dengan intensitas 100 W/cm^2 dari penyinaran bola lampu dengan jarak 1000 km menghasilkan fotoelektron sekitar satu sekon.

Contoh Kasus – Perhitungan Fisika Klasik tentang waktu emisi fotoelektron

Fotoelektron dapat dikeluarkan dari sodium ($\phi = 2,36 \text{ eV}$) pada intensitas rendah sebesar 10^{-8} W/m^2 . Hitunglah berapa lama sebuah berkas sinar harus menyinari sodium untuk menghasilkan energi kinetik 1,00 eV!

Strategi

Kita asumsikan berkas sinar diserap pada lapisan pertama atom – atom pada permukaan material. Kemudian kita hitung jumlah atom sodium per satuan luas dalam satu lapisan atom. Kita asumsikan bahwa tiap atom pada lapisan atomic tunggal menyerap energi yang sama, dan setiap electron dalam atom juga menyerap energi yang sama. Kemudian kita menghitung berapa lama electron-elektron ini menyerap energi yang diperlukan (sebesar $2,36 \text{ eV} + 1,00 \text{ eV} = 3,36 \text{ eV}$) hingga electron dapat keluar.

Penyelesaian

Pertama – tama tentukan Jumlah atom Na per volume

$$\frac{\text{jumlah atom}}{\text{volume}} = \frac{\text{Bilangan Avogadro}}{\text{berat molekuler Na per gram}} \times \text{densitas}$$

$$\frac{\text{jumlah atom}}{\text{volume}} = \frac{6,02 \times 10^{23} \frac{\text{atom}}{\text{mol}}}{23 \frac{\text{g}}{\text{mol}}} \times 0,97 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$$

Untuk memperkirakan ketebalan satu lapis atom, maka kita asumsikan sebagai struktur kubik

$$\frac{1 \text{ atom}}{d^3} = 2,54 \times 10^{28} \text{ atom/m}^3$$

$$d = 3,40 \times 10^{-10} \text{ m} = \text{ketebalan satu lapis atom – atom sodium}$$

Jika seluruh berkas sinar diserap oleh lapisan pertama, maka jumlah atom yang disinari per m^2 adalah

$$2,54 \times \frac{10^{28} \text{ atom}}{\text{m}^3} \times 3,40 \times 10^{10} \text{ m} = 8,64 \times 10^{18} \frac{\text{atom}}{\text{m}^2}$$

Dengan intensitas $10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$, maka tiap atom akan menerima energi rata – rata sebesar

$$\begin{aligned} 1,00 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \times \frac{1}{8,64 \times 10^{18} \frac{\text{atom}}{\text{m}^2}} &= 1,16 \times 10^{-27} \text{ W} \\ &= 1,16 \times 10^{-27} \text{ W} \times \frac{1}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} \\ &= 7,25 \times 10^{-9} \text{ eV/s} \end{aligned}$$

Jika energi yang diserap sebesar $7,25 \times 10^{-9} \text{ eV/s}$ untuk satu electron, maka waktu yang diperlukan untuk menyerap 3,36 eV adalah

$$t = \frac{3,36 \text{ eV}}{7,25 \times 10^{-9} \text{ eV/s}} = 4,63 \times 10^8 \text{ s} = 14,7 \text{ tahun}$$

Berdasarkan perhitungan fisika klasik, maka waktu yang diperlukan untuk mengeluarkan sebuah fotoelektron adalah 15 tahun! (hasil yang sangat tidak sesuai dengan hasil eksperimen)

3. Teori Einstein

Dalam pembahasan radiasi benda hitam, Planck telah mendalilkan bahwa atom-atom dinding rongga berlaku sebagai osilator yang mempunyai energi terkuantisasi secara diskret. Einstein kemudian terinspirasi dengan hipotesis Planck bahwa medan radiasi elektromagnetik akan diserap dan diemisikan dalam jumlah yang terkuantisasi. Einstein menyempurnakan gagasan Planck dengan menyatakan bahwa “Medan radiasi elektromagnetik itu sendirilah yang terkuantisasi”.

Pada tahun 1905 Einstein menjelaskan bahwa “Energi dari berkas sinar itu menyebar dari sebuah sumber titik tidak didistribusikan menyebar luas secara kontinu pada ruang, namun terdiri dari kuantum energi tertentu (finite) yang terlokalisasi pada titik – titik pada ruang, yang bergerak tanpa terbagi dan hanya diproduksi dan diadsorpsi sebagai satuan terkecil yang utuh” .

Secara singkatnya Einstein mengusulkan bahwa radiasi elektromagnet terdiri atas paket-paket energi. Paket- paket ini disebut sebagai **foton** cahaya, yang energinya terdistribusi dengan nilai tertentu atau **kuanta** (tunggal) dan **kuantum** (jamak). Foton berperilaku seperti partikel atau bak partikel atau *particle-like energy*, yang utuh dan tidak terbagi lagi. Berdasarkan ide Einstein, tiap foton memiliki energi kuantum sebesar:

$$E = h \cdot \nu = \frac{hc}{\lambda} \quad 3.59$$

Dimana frekuensi ν (ν baca: *nu*) adalah frekuensi dari gelombang elektromagnetik (Hertz atau Hz) dan h adalah konstanta planck ($h = 6,621 \times 10^{-34}$ J.s), c adalah laju cahaya di ruang hampa ($c = 3 \times 10^8$ m/s) dan λ adalah panjang gelombang (meter / m).

Melalui pernyataan ini, Einstein juga menjelaskan bahwa cahaya (medan elektromagnetik) adalah gelombang dan gelombang cahaya ini juga memiliki sifat seperti partikel. Einstein mengajukan bahwa tiap foton (kuantum cahaya) memberikan seluruh energinya sebesar $h\nu$ kepada tiap electron dalam bahan. Artinya tiap electron akan menyerap energi dari foton sebesar $h\nu$.

Untuk meninggalkan bahan (material), electron yang terikat dalam bahan harus memiliki energi setara dengan **fungsi kerja** atau **energi ambang** ϕ untuk terlepas dari bahan. Namun jika electron ingin meninggalkan emitor, maka electron harus memiliki energi yang lebih besar dari fungsi kerja. Electron dapat saja kehilangan sebagian energi akibat interaksinya dengan electron lain di permukaan. Berapa pun jumlah energi yang tersisa akan menjadi energi kinetik yang dipakai electron untuk keluar dari emitor. Berdasarkan hukum kekekalan energi, energi yang diperlukan electron untuk keluar dari emitor adalah

$$K = h\nu - \phi \quad 3.60$$

Karena energi yang terlibat dalam orde elektronvolt (eV), kita dapat menggunakan hubungan energi kinetik secara klasik dengan eV sebagai berikut:

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = eV_0 \quad 3.61$$

Dengan K adalah energi kinetik (joule (J)), e adalah muatan elektron ($e = 1,6 \times 10^{-19}$ C), V_0 adalah potensial penghenti, dan v adalah kecepatan elektron.

4. Interpretasi kuantum

Interpretasi teori kuantum tentang efek fotolistrik dibahas sesuai dengan hasil-hasil eksperimen efek fotolistrik. Hasil pertama (poin a) dan kedua (poin b) menyatakan bahwa energi kinetik dari fotoelektron dipengaruhi oleh frekuensi cahaya dan bukan intensitas cahaya. Energi kinetik sudah dirumuskan pada persamaan 3.60. Menurut persamaan 3.60 besar energi kinetik fotoelektron juga ditentukan oleh fungsi kerja dan frekuensi radiasi.

$$\frac{1}{2}mv^2 = hv - \phi = eV_0 \quad 3.62$$

Potensial yang lebih positif nilainya dari potensial henti V_0 tidak akan dapat menolak elektron dan jika potensial henti mendekati nol maka elektron akan dikumpulkan. Untuk potensial henti bernilai positif sangat besar (Gambar 3.17) maka semua elektron akan dikumpulkan dan akan menghasilkan tingkatan arus fotolistrik. Jika intensitas berkas sinar dinaikkan maka akan lebih banyak foton yang dihasilkan per satuan luas, semakin banyak cacah (jumlah) elektron yang dibebaskan sehingga arus fotolistrik akan meningkat (Gambar 3.17).

Jika digunakan berkas sinar dengan warna yang berbeda f_2 maka besar potensial henti V_0 juga akan berbeda, karena besar energi kinetik elektron berbeda.

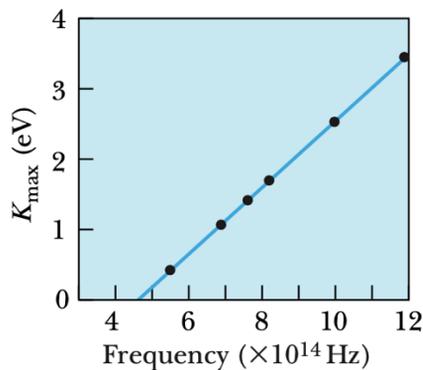
$$eV_{02} = hf_2 - \phi$$

Intensitas menunjukkan banyak foton yang dijatuhkan per satuan waktu per satuan luas. Untuk intensitas yang konstan, pada bahan maka akan menghasilkan arus fotolistrik yang konstan juga, tapi akan tetap terjadi variasi tegangan henti sesuai frekuensi penyinaran. Hal ini disebabkan karena jumlah elektron yang terbebas tetap (Gambar 3.18). Untuk Gambar 3.19, teori kuantum dengan mudah menjelaskan hubungan antara arus fotolistrik dengan

intensitas penyinaran. Semakin besar intensitas berkas sinar, maka jumlah foton per satuan waktu per satuan luas juga semakin besar. Semakin banyak jumlah foton yang mengenai bahan, maka semakin banyak electron yang dibebaskan sehingga semakin besar arus fotolistrik yang dibaca oleh amperemeter.

Persamaa 3.62 di atas ini diajukan oleh Einstein pada tahun 1905. Einstein memprediksikan tegangan henti bergantung pada frekuensi ambang, jika energi kinetiknya nol ($K = 0$). Meskipun telah berhasil menjelaskan hasil efek fotolistrik, ternyata Einstein dan Planck sendiri masih ragu dengan penjelasan ini. Hingga akhirnya Milikan melakukan eksperimen untuk membuktikan kekeliruan penjelasan Einstein tentang efek Fotolistrik. Eksperimen yang dilakukan Milikan ini bahkan berlangsung hingga 10 tahun, hingga pada tahun 1916 Milikan mempublikasikan hasil eksperimennya (Gambar 3.21)

Gambar 3. 21 Data Eksperimen Milikan tentang Efek Fotolistrik



Sumber: Thronton, 2013

Milikan mempublikasikan data eksperimen efek fotolistriknya dalam grafik yang menunjukkan hubungan energi kinetik fotoelektron terhadap frekuensi (Gambar 3.21). Ternyata hasil eksperimen ini sesuai dengan penjelasan Einstein tentang efek fotolistrik. Milikan juga memperoleh nilai h sebesar $4,1 \times 10^{-15} eV.s$ yang sama dengan nilai h dari tetapan planck. Penjelasan Einstein tentang efek fotolistrik ini secara bertahap baru diterima dengan baik di kalangan ilmuwan pada tahun 1916, hingga akhirnya tahun 1922

Einstein menerima Nobel sebagai penghargaan atas penjelasannya tentang efek fotolistrik.

Kita kemudian dapat menyimpulkan apa yang telah kita pelajari tentang kuantisasi radiasi medan gelombang elektromagnetik. Pertama, radiasi elektromagnetik terdiri dari foton- foton, yang berperilaku seperti partikel, dengan **energi tiap foton** dinyatakan dalam:

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda} \quad 3.63$$

Dengan v (baca : nu) adalah frekuensi dan λ (baca: lambda) adalah panjang gelombang cahaya. Energi total dari seberkas sinar adalah sumasi dari seluruh foton dan untuk berkas sinar monokrom adalah integral kelipatan dari hf .

$$E = hv = \frac{hc}{\lambda}$$

Konsep foton ini berlaku juga untuk seluruh spektrum gelombang elektromagnetik, mulai dari gelombang radio, cahaya tampak, sinar X hingga sinar Gamma. Foton ini memiliki frekuensi tertentu, dan apabila diamati oleh kerangka yang bergerak dipercepat atau mengalami gravitasi (ingat kegiatan pembelajaran 2.4), maka dapat mengalami pergeseran, misalnya pada fenomena pergeseran merah. Selama benda hitam meradiasikan atau menyerap segala bentuk gelombang elektromagnetik, maka foton juga diradiasikan atau diserap. Foton tidak bermassa dan hanya memiliki kelajuan, yang besarnya adalah kelajuan cahaya di ruang hampa.

Contoh Kasus – Energi Foton dan Potensial Henti

Seberkas sinar dengan panjang gelombang 400 nm ditembakkan ke lithium ($\phi = 2,93 \text{ eV}$) Hitung (a) energi foton ; (b) potensial henti V_0 .

Strategi

(a) Berkas cahaya biasanya dinyatakan dalam λ dengan satuan nm, sehingga bentuk ini berguna untuk perhitungan sebagai berikut

$$\begin{aligned}
 E &= hv = \frac{hc}{\lambda} \\
 &= \frac{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s})(2,998 \times 10^8 \text{ m/s})}{\lambda(1,602 \times 10^{-19} \text{ J/eV})(10^{-19} \text{ m/nm})} \\
 E &= \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV.nm}}{\lambda} \quad 3.64
 \end{aligned}$$

(b) kita gunakan persamaan 3.62 untuk menentukan potensial henti

Penyelesaian:

(a) untuk $\lambda = 400 \text{ nm}$, maka besar energinya

$$E = \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda} = \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{400 \text{ nm}} = 3,10 \text{ eV}$$

(b) untuk potensial henti,

$$\begin{aligned} h\nu - \phi &= eV_o \\ 3,10 \text{ eV} - 2,93 \text{ eV} &= 0,17 \text{ eV} \end{aligned}$$

Maka

$$V_o = \frac{0,17 \text{ eV}}{e} = 0,17 \text{ volt}$$

Jika diberikan potensial sebesar 0,17, maka fotoelektron akan berhenti bergerak.

Contoh Kasus – Frekuensi dan Panjang Gelombang Foton

- a. Berapa frekuensi berkas sinar yang diperlukan untuk menghasilkan electron dengan energi kinetik 3,00 eV dari penyinaran lithium?
- b. Tentukan panjang gelombang berkas sianr dan tentukan ada pada spektrum apakah berkas sinar ini?

Strategi

Energi kinetik, energi ambang dan energi foton telah diberikan pada persamaan 3.60. Jika energi foton telah diketahui, baru kemudian kita tentukan frekuensinya $E = h\nu$

Penyelesaian

$$h\nu = K + \phi$$

$$h\nu = 3,00 \text{ eV} + 2,93 \text{ eV} = 5,93 \text{ eV}$$

frekuensi foton

$$\nu = \frac{5,93 \text{ eV}}{(6,626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})} (1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}) = 1,43 \times 10^{15} \text{ Hz}$$

(b) panjang gelombang berkas sinar dinyatakan dalam

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

$$\lambda = \frac{3,00 \times 10^8 \text{ m/s}}{1,43 \times 10^{15} \text{ Hz}} = 2,10 \times 10^{-2} \text{ m} = 210 \text{ nm}$$

Panjang gelombang 210 nm ada pada spektrum sinar ultraviolet, berkas sinar ini ada dibawah spektrum cahaya tampak (400 – 700 nm)

Contoh Kasus – intensitas foton

Seberkas sinar di jatuhkan ke sodium ($\phi = 2,36 \text{ eV}$) dengan intensitas 10^{-8} W/m^2 dan panjang gelombang 350 nm. Ternyata menghasilkan fotoelektron dengan energi kinetik 1,00 eV. Berapa jumlah foton per satuan luas per detik yang dihasilkan oleh berkas sinar?

Strategi

Pertama- tama tentukan energi foton, karena kita telah mengetahui intensitasnya, maka kita dapat mengetahui fluks foton N (jumlah foton per satuan luas per detik)

Penyelesaian

Untuk menentukan energi foton, kita bisa juga menggunakan persamaan 3.64

$$E = \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda} = \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{350 \text{ nm}} = 3,5 \text{ eV}$$

Selanjutnya untuk mencari fluks foton, kita gunakan intensitas energi dengan energi foton. Intensitas didefinisikan sebagai foton per satuan detik per satuan luas atau fluks N foton dikali dengan energi per foton

$$I = N \left(\frac{\text{foton}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right) E \left(\frac{\text{Satuan energi}}{\text{foton}} \right) = NE \left(\frac{\text{satuan energi}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}} \right)$$

Maka jumlah fluks N Foton adalah

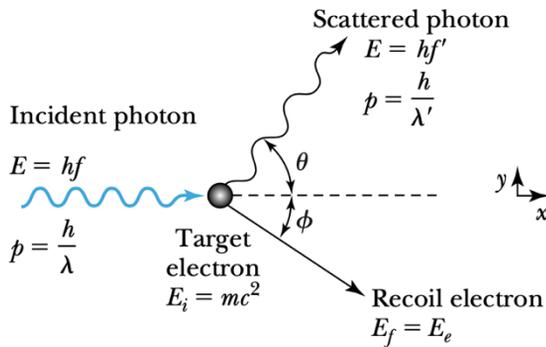
$$N = \frac{I}{E} = \frac{10^{-8} \text{ W/m}^2}{3,5 \text{ eV}} = \frac{10^{-8} \text{ Js}^{-1} \text{ m}^{-2}}{3,5 \text{ eV}} \left(\frac{1}{1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV}} \right) = 1,8 \times 10^{10} \frac{\text{foton}}{\text{m}^2 \cdot \text{s}}$$

Maka walaupun dalam intensitas yang rendah ini, berkas sinar memiliki fluks foton yang besar. Hanya beberapa foton saja sudah dapat menghasilkan fotoelektron, bahkan satu foton saja pun sudah dapat menghasilkan fotoelektron.

B. Efek Compton

Compton melakukan percobaan dengan menjatuhkan sinar-X yang dikeluarkan dari bahan radioaktif pada lempengan tipis ke bahan grafit. Hasil pengamatannya menunjukkan ternyata sinar-X yang terhambur mempunyai panjang gelombang lebih besar dari sinar-X aslinya (Gambar 3.22). Fisika klasik hanya dapat menjelaskan bahwa electron dapat mengalami vibrasi jika diberikan radiasi, dengan frekuensi yang sama dengan foton itu, penjelasan ini dikenal sebagai **hamburan** Thomson.

Gambar 3. 22 Hamburan Compton



Sumber: Thornton, 2013

Namun pada hasil eksperimen, yang terjadi bukan vibrasi melainkan hamburan electron dan perubahan panjang gelombang yang menjadi lebih panjang dari semula (Gambar 3.22). Compton menyimpulkan bahwa efek demikian dapat dipahami hanya jika sesuai dengan konsep partikel foton, yaitu **“Foton bersifat sebagai partikel”**. Karena bersifat sebagai matri atau partikel, maka foton dapat mengalami benturan (tumbukan) antara foton dan electron, atau foton dengan partikel lain. Fenomena tumbukan foton ini kemudian dijelaskan dengan hubungan antara energi dan momentum sebagai berikut:

$$p = \frac{E}{c} = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad 3.65$$

Dalam fenomena ini juga tetap berlaku hukum kekekalan energi dan hukum kekekalan momentum. Hamburan electron dapat diamati pada sumbu x dan sumbu y (Gambar 3.22), proses benturan dari kerangka S dengan sumbu x.

Foton datang dengan momentum awal foton (p) searah sumbu x kemudian menumbuk sebuah elektron yang diam.

Setelah tumbukan, momentum foton berubah menjadi p' yang membentuk sudut θ dengan sumbu x, sedangkan elektron terhambur dengan momentum p'_e ke arah yang membentuk sudut ϕ dengan sumbu x.

Kekekalan momentum pada arah sumbu x:

$$p = p' \cos \theta + p'_e \cos \phi \quad 3.65$$

Kekekalan momentum pada arah sumbu y:

$$0 = p' \sin \theta - p'_e \sin \phi \quad 3.66$$

Kedua persamaan dikuadratkan sesudah diatur letak suku-sukunya, lalu hasilnya dijumlahkan dan diperoleh:

$$p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta = p_e'^2 \quad 3.67$$

Kekekalan energi memberikan

$$E + mc^2 = E' + mc^2 + K'_e \quad 3.68$$

Atau

$$E - E' = pc - p'c = K'_e \quad 3.69$$

atau

$$c(p - p') = K'_e \quad 3.70$$

Dari persamaan energi relativistik diperoleh

$$\begin{aligned} E_e'^2 &= (mc^2)^2 + p_e'^2 c^2 = (mc^2 + K'_e)^2 \\ (mc^2)^2 + p_e'^2 c^2 &= (mc^2)^2 + 2K'_e mc^2 + K_e'^2 \\ p_e'^2 c^2 &= K_e'^2 + 2K'_e mc^2 \end{aligned} \quad 3.71$$

Padahal

$$K'_e = c(p - p') \quad 3.72$$

jadi

$$p_e'^2 = (p - p')^2 + 2c(p - p')m \quad 3.73$$

Nilai $p_e'^2$ ini kemudian disubstitusikan kedalam persamaan

$$\begin{aligned} p^2 + p'^2 - 2pp' \cos \theta &= (p - p')^2 + 2c(p - p')m \\ p^2 + p'^2 - 2pp' + 2c(p - p')m &= p^2 + p'^2 - 2pp' + 2c(p - p')m \\ mc(p - p') &= pp'(1 - \cos \theta) \end{aligned} \quad 3.74$$

Apabila persamaan tersebut dibagi dengan $mcpp'$ maka kita peroleh:

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{mc} (1 - \cos \theta) \quad 3.75$$

Karena

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

dan

$$p' = \frac{h}{\lambda'}$$

maka

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta) \quad 3.76$$

Persamaan 3.76 disebut persamaan **hamburan Compton**,

$$\lambda - \lambda' = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

dan

$$\lambda_c = \frac{h}{mc} = \frac{0,02426 \times 10^{-10}}{m} \quad 3.77$$

λ_c pada persamaan 3.77 dinamakan panjang gelombang Compton, m adalah massa electron yang terhambur, c adalah laju cahaya di ruang hampa dan h adalah tetapan Planck.

Jika kita mengarahkan cahaya tertentu (misalnya merah) ke suatu benda, maka cahaya terhamburnya tetap berwarna merah, artinya efek compton tidak laku. Perubahan pada gelombang paling besar terjadi pada sudut hambur $\theta = 180^\circ$ yang besarnya sama dengan dua kali panjang gelombang Compton atau $0,04852 \text{ \AA}$. Perubahan ini tidak teramati jika dibandingkan dengan panjang gelombang cahaya yang tampak yang berkisar dari 4000 \AA sampai 8000 \AA .

Melalui eksperimennya, Compton berhasil menjelaskan foton dalam konsep kuantum dan sekaligus berperilaku sebagai partikel. Compton juga melibatkan hukum kekekalan momentum dan hukum kekekalan energi dalam menurunkan persamaan hamburannya, sehingga banyak ilmuwan mendukung gagasannya. Dari penemuannya ini, Compton memperoleh Nobel Fisika pada tahun 1927.

Contoh Kasus – Efek Compton

Pada sebuah eksperimen yang sama dengan skema Efek Compton, Sinar X dengan panjang Gelombang $0,050 \text{ nm}$ terhambur dari bahan Emas.

- Dapatkah sinar X membebaskan electron, jika electron terikat dengan atomya pada energi 62 keV ?
- Berapa besar panjang gelombang maksimum foton yang diobservasi setelah tumbukan?

(c) Berapa besar energi kinetik dari electron yang terpelanting dan berapa sudut hamburannya?

Strategi

Pertama-tama kita harus mengetahui terlebih dahulu, apakah energi foton dari sinar X dapat menggerakkan electron yang ada di bagian dalam (inner electron) dari keadaan diam. Kita gunakan persamaan 3.76 dengan massa atom dan electron untuk menentukan panjang gelombang yang terhambur. Kemudian kita gunakan hukum kekekalan energi untuk menentukan energi kinetik dari electron terhambur.

Penyelesaian

Dengan menggunakan persamaan 3.6 kita peroleh energi foton dari sinar X

$$E = \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{\lambda} = \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{0,050 \text{ nm}} = 24.800 \text{ eV} = 24,8 \text{ keV}$$

Karena energi foton lebih kecil dari energi ikat elektron, maka electron dibagian dalam tidak dapat keluar dari bahan. Jika energi foton lebih besar dari energi ikat, maka electron bagian dalam akan ikut tereksitasi dan dalam persamaan 3.76 kita akan menggunakan massa atom emas.

Akibat penyinaran sinar X ini, elektron yang dapat keluar dari bahan hanyalah electron yang ada di permukaan yang diradiasi (electron bebas). Dalam keadaan ini, persamaan 3.76 akan menggunakan massa electron. Panjang gelombang maksimum diberikan $\lambda' = \lambda + \Delta\lambda$, panjang gelombang maksimum terjadi saat $\theta = 180^\circ$

$$\lambda' = \lambda + \frac{h}{m_e c} (1 - \cos 180^\circ) = \lambda + \frac{2h}{m_e c}$$

$$\lambda' = 0,050 \text{ nm} + 2 (0,00243 \text{ nm}) = 0,055 \text{ nm}$$

Energi hamburan foton kemudian menjadi minimum (jika panjang gelombang bertambah, maka energinya menurun) dan memiliki nilai sebesar

$$E'_{x \text{ ray}} = \frac{1,240 \times 10^3 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{0,055 \text{ nm}} = 2,25 \times 10^4 \text{ eV} = 22,5 \text{ keV}$$

Perubahan energi foton dari sebelum tumbukan ke setelah tumbukan ini setara dengan energi kinetik electron (untuk melawan energi ikat). Elektron ini harus terhambur dengan sudut $\phi = 0^\circ$ karena foton akhirnya terhambur pada arah sebaliknya ($\theta = 180^\circ$) agar memenuhi konservasi momentum. Besar energi kinetik electron pada keadaan maksimum ini adalah

$$\begin{aligned}
 E_{x\ ray} &= E'_{x\ ray} + K_{elektron} \\
 K_{elektron} &= E_{x\ ray} - E'_{x\ ray} \\
 &= 24,8\ keV - 22,5\ keV = 2,3\ keV
 \end{aligned}$$

Karena $\Delta\lambda$ tak bergantung pada λ dan λ' , maka kita dapat menentukan panjang gelombang dan energi dari foton dengan memperoleh energi kinetik electron dengan hamburan sudut tertentu.

C. Produksi Sinar X

Jika pada efek fotolistrik foton mengeksitasi electron, maka pertanyaannya apakah electron bisa mengeksitasi foton? Jawabannya adalah bisa. Selama proses yang dilakukan juga dalam alur yang terbalik (alur kebalikannya). Elektron permukaan suatu bidang yang menyerap energi foton dapat terbebas dari material asalnya. Maka jika dibalik, jika electron melepas energinya maka akan dihasilkan foton.

Untuk fenomena ini kita harus paham bahwa foton akan diradiasikan atau diserap secara utuh. Foton tidak dapat diserap hanya sebagian atau dilepas hanya sebagian saja. Jika sebuah proses terjadi dengan menyerap 1 foton, maka dengan melepas energi dari proses ini juga akan dihasilkan foton. Berbeda dengan foton, electron dapat melepas atau menyerap energi sebagian dari energi kinetiknya.

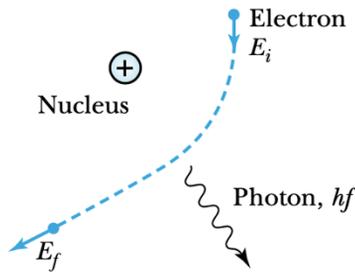
Ketika electron berinteraksi dengan medan listrik kuat dari inti atom, maka ia akan mengalami percepatan menuju inti atom dan meradiasikan gelombang elektromagnetik. Jika pada efek fotolistrik electron keluar dari bahan, maka jika electron bergerak masuk ke dalam bahan, ia akan meradiasikan foton. Elektron yang dipercepat masuk ke dalam bahan akan mengalami penurunan energi kinetik secara bertahap dan meradiasikan foton. Fenomena foton yang dihasilkan dari electron yang masuk ke dalam bahan ini kemudian disebut sebagai **Bremsstrahlung**.

Istilah bremsstrahlung ini berasal dari Bahasa Jerman yang artinya “radiasi akibat pengereman”. Skema proses bremsstrahlung diberikan pada Gambar 3.23. Foton yang diradiasikan electron timbul dari perubahan energi kinetik electron, yang diberikan pada persamaan berikut:

$$E_f - E_i = hf \quad 3.78$$

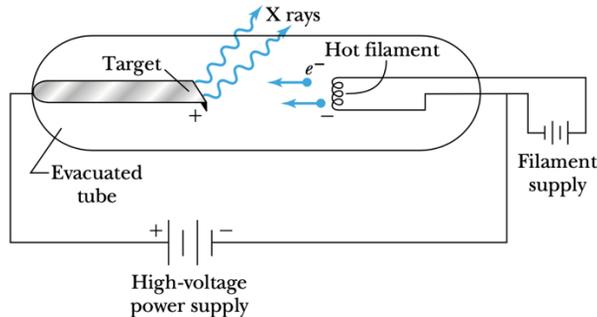
Efek bremsstrahlung inilah yang kemudian diterapkan untuk menghasilkan sinar X, dengan skema alat (gambar 3.24):

Gambar 3. 23 Fenomena Bremsstrahlung



Sumber: Thronton, 2013

Gambar 3. 24 Skema Alat Produksi Sinar X



Dari Gambar 3.24 elektron dimanipulasi agar dapat masuk kedalam pelat Target. Elektron dari kumparan filamen yang dipanaskan kemudian mengalami medan listrik menuju keping target dengan gerak dipercepat karena keping ini diberi muatan positif. Saat electron masuk ke dalam bahan, maka ia akan mengalami penurunan energi kinetik. Penurunan energi kinetik inilah yang kemudian dikonversi menjadi radiasi foton. Efek Bremsstrahlung ini dikenal juga sebagai kebalikan efek fotolistrik.

Panjang gelombang yang dihasilkan pada proses kebalikan efek fotolistrik ini ternyata juga sebanding dengan potensial yang diberikan antaran anoda (-) dengan katoda (+). Energi foton maksimum saat electron memberikan seluruh energi kinetiknya untuk diubah menjadi foton, untuk keadaan ini berlaku

$$eV_o = hf_{max} = \frac{hc}{\lambda_{min}} \quad 3.79$$

Ingat: frekuensi dan panjang gelombang saling berbanding terbalik. Jika frekuensi maksimum, maka panjang gelombang minimum.

Atau dapat juga dicari panjang gelombang minimum ini:

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV_o} = \frac{1,240 \times 10^{-6} V.m}{V_o} \quad 3.80$$

Persamaan 3.80 ini kemudian diuji secara eksperimental dan dikenal sebagai **aturan Duane-Hunt**. Fenomena ini kembali mengkonfirmasi kevalidan konsep foton Einstein. Untuk menghasilkan berkas sinar dengan intensitas tinggi, maka diperlukan anoda yang dapat melepas electron dengan banyak, misalnya tungsten.

Contoh kasus- Produksi sinar x

Jika kita menggunakan bahan tungsten ($\phi = 4,63 \text{ eV}$) pada anoda dan electron berakselerasi pada tegangan 35 kV, kenapa kita mengabaikan energi kinetik mula mula pada persamaan 3.78 dan besar fungsi kerja dari anoda? Berapa panjang gelombang minimum sinar x yang dihasilkan?

Strategi

Kita dapat mengabaikan energi kinetik mula-mula dan fungsi kerja karena nilai keduanya berada pada orde beberapa electron volt (eV), sementara energi kinetik electron saat dipercepat mencapai 35.000eV. *Error* yang diakibatkan karena mengabaikan energi kinetik mula-mula dan fungsi kerja cukup kecil. Kita akan menggunakan persamaan sesuai atura Duane-Hunt untuk memperoleh panjang gelombang minimum

Penyelesaian:

Dengan menggunakan aturan Duane-Hunt, panjang gelombang minimumnya adalah

$$\lambda_{min} = \frac{1,240 \times 10^{-6} V.m}{35,0 \times 10^3 V} = 3,54 \times 10^{11} m$$

D. Produksi Pasangan dan Anihilasi

Dari uraian diatas kita telah mempelajari tentang efek fotolistrik, efek compton dan bremsstrahlung. Dari ketiga eksperimen ini kita mempelajari tentang pertukaran energi antara foton dan electron. Tapi bisa tidak kita mempertanyakan, semua kemungkinan yang muncul? Apakah energi kinetik foton dapat dikonversi menjadi sebuah partikel bermassa dan sebaliknya? Menurut hukum kekekalan energi, konversi ini dapat terjadi.

1. Produksi Pasangan

Pertama, konversi energi foton menjadi energi massa, misalnya energi foton bisa diubah menjadi elektron (massa electron $m_e = 0,511 \text{ MeV}/c^2$), maka sebuah muatan positif juga haruslah muncul. Kenapa harus ikut muncul ? agar sesuai dengan hukum kekekalan muatan. Pada tahun 1932, D Anderson (peraih nobel fisika tahun 1936) berhasil mengobservasi electron bermuatan positif (e^+) pada radiasi sinar kosmik. Partikel ini kemudian disebut sebagai **positron**. Positron ini telah berhasil diprediksi oleh P.A.M. Dirac (Peraih Nobel pada tahun 1933). Positron memiliki massa yang sama besar dengan electron, tapi muatannya berlawanan dengan electron. Positron juga berhasil diobservasi pada sinar gamma saat menembus bidang.

Eksperimen – eksperimen ini menunjukkkn bahwa energi foton dapat dikonversi seluruhnya menjadi partikel electron dan positron. Proses ini disebut sebagai **produksi pasangan**, yang reaksinya diberikan oleh



Proses produksi pasangan hanya muncul saaan foton menembus bahan (material) (Gambar 3.25), karena jika foton dalam keadaan terisolasi dalam bahan, momentum dan energinya menjadi tidak kekal. Momentum yang berkurang ini digunakan untuk berinteraksi dengan objek masif lain, misalnya nucleus.

Contoh kasus – Produksi Pasangan

Tunjukkan bahwa foton tidak dapat memproduksi pasangan electron-positron pada ruang hampa (Gambar).

Strategi

Kita harus menggunakan hukum kekekalan momentum dan energi untuk membuktikan apakah produksi pasangan dapat terjadi pada keadaan vakum.

Penyelesaian

Jika energi dan momentum total dari electron dan positron masing – masing dinyatakan dengan E_-, p_- dan E_+, p_+ , maka

Menurut hukum kekekalan Energi

$$hf = E_+ + E_- \quad 3.82.a$$

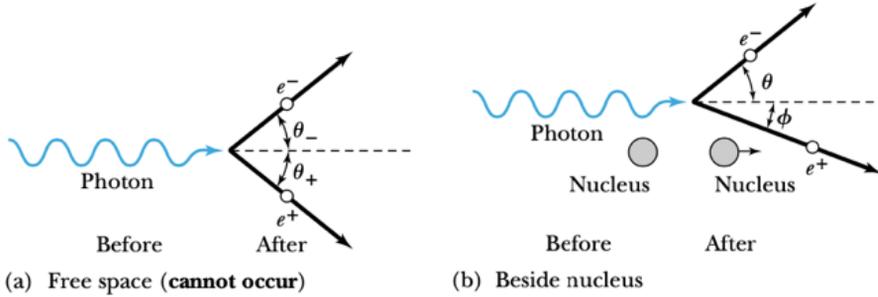
Menurut hukum kekekalan momentum di sumbu x

$$hv = p_- \cos \theta_- + p_+ \cos \theta_+ \quad 3.82.b$$

Menurut hukum kekekalan momentum di sumbu y

$$0 = p_- \sin \theta_- + p_+ \sin \theta_+ \quad 3.82.c$$

Gambar 3. 25 Skema Produksi Pasangan (a) Vakum (b) di dalam Bahan



Sumber: Thornton, 2013

Persamaan 3.82.b dapat juga ditulis dalam bentuk

$$hv = p_- c \cos \theta_- + p_+ c \cos \theta_+ \quad 3.83$$

Kemudian kita masukkan $E_{\pm}^2 = p_{\pm}^2 c^2 + m^2 c^4$ pada persamaan 3.82.a, sehingga

$$hv = \sqrt{p_+^2 c^2 + m^2 c^4} + \sqrt{p_-^2 c^2 + m^2 c^4} \quad 3.84$$

Nilai maksimum dari hv diperoleh dari persamaan 3.83

$$hv_{maks} = p_- c + p_+ c$$

Maka dari persamaan 3.84 kita peroleh

$$hv > p_- c + p_+ c$$

persamaan 3.83 dan 3.84 tidak konsisten dan tidak valid, persamaan 3.82 menggambarkan reaksi yang tidak mungkin terjadi. Reaksi yang dituliskan pada Gambar 3.25.(a) adalah reaksi yang tidak mungkin terjadi, karena pada keadaan ini energi dan momentum tidak memenuhi hukum kekekalan.

Sekarang kita akan mempelajari bagaimana jika konversi foton menjadi pasangan electron dan positron ini terjadi didalam sebuah atom dengan medan listrik dari nukleus cukup besar (Gambar 3.25. (b)). Nukleus bisa terpental dan membawa sejumlah energi yang dapat diabaikan besarnya, tapi momentumnya masih perlu untuk diperhitungkan. Menurut hukum kekekalan energi, berlaku

$$hv = E_+ + E_- + K_{nukleus} \quad 3.85$$

Sesuai proses produksi pasangan dalam bahan di Gambar 3.25. (b), energi foton ini paling sedikit $2m_e c^2$ agar bisa menghasilkan massa electron dan positron

$$h\nu > 2m_e c^2 = 1,022 \text{ MeV} \quad 3.86$$

Kemungkinan terjadinya produksi pasangan meningkat terhadap tingginya energi foton dan nomor atom yang besar dari atom nucleus karena berhubungan dengan tingginya medan listrik yang terjadi selama proses ini.

Pertanyaan berikutnya, yang perlu diperhatikan adalah positron. Kenapa positron tidak umum ditemukan secara alamiah? Kemudian kita juga perlu menjawab pertanyaan kedua: Apakah massa bisa dikonversi menjadi energi?

Jawabannya: Positron ditemukan bisa secara alamiah. Positron dideteksi ada di radiasi sinar kosmis dan diproduksi sebagai hasil radioaktivitas pada beberapa radioaktivitas inti atom. Namun keberadaan positron ini bisa sirna karena berinteraksi dengan electron. Ketika positron ini berdekatan dengan electron walaupun pada waktu yang sangat singkat, maka mereka akan saling meniadakan (**annihilasi**).

Ketika positron masuk dan menembus bahan, maka ia akan dengan cepat kehilangan energi kinetik akibat bertumbukan dengan atom-atom dan akan dengan mudah sirna akibat bertemu electron. Ketika positron melambat, maka ia akan “tenggelam” ke dalam sebuah electron oleh gaya listrik, selanjutnya electron dan positron akan membentuk konfigurasi mirip atom yang kemudian disebut sebagai **positronium**, dengan gerak mengorbit pada pusat massa. Baru kemudian electron dan positron saling meniadakan satu sama lain, sekitar 1^{0-10} sekon, yang kemudian menghasilkan radiasi elektromagnetik (foton). Proses saling meniadakan ini kemudian disebut **pasangan annihilasi**, dengan persamaan reaksi

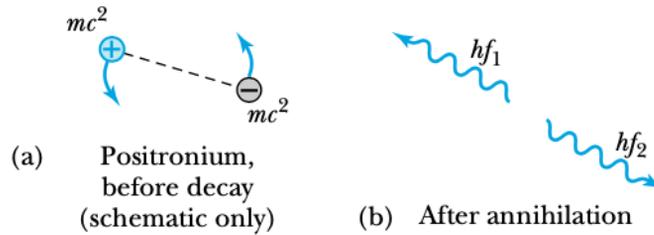


2. Pasangan Annihilasi

Sekarang mari kita memperhatikan tentang “atom” positronium yang ada di ruang hampa dalam keadaan diam. Reaksi ini harus mengemisikan setidaknya dua foton (Gambar), sesuai dengan hukum kekekalan momentum dan energi. Jika positronium sirna di dekat sebuah nucleus, maka ada kemungkinan akan dihasilkan hanya satu foton yang dihasilkan, karena

momentum yang hilang ini dapat digunakan untuk mengatasi gaya tolakan dari nucleus.

Gambar 3. 26 Pasangan anihilasi (a) Positroniuml (b) produksi 2 foton setelah anihilasi



Sumber: Thornton, 2013

Proses annihilasi yang menghasilkan dua foton dapat kita tentukan energi yang dihasilkannya sebagai berikut

Sesuai hukum kekekalan energi

$$2m_e c^2 = hv_1 + hv_2 \quad 3.88.a$$

Sesuai hukum kekekalan momentum

$$0 = \frac{hv_1}{c} + \frac{hv_2}{c} \quad 3.88.b$$

Dengan persamaan 3.88.b, maka frekuensi adalah identik

$$v_1 = v_2 = v$$

Maka persamaan 3.88.a menjadi

$$2m_e c^2 = 2hv$$

atau

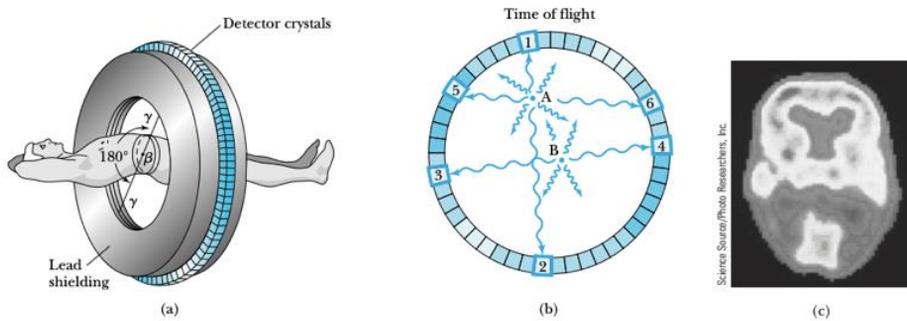
$$hv = m_e c^2 = 0,511 \text{ MeV} \quad 3.89$$

Dengan kata lain dua foton yang dihasilkan dari annihilasi positronium akan berpindah kearah saling berlawanan dan masing-masing membawa energi sebesar 0,511 MeV. Hasil inilah yang tepat diamati melalui eksperimen.

Produksi dua foton dengan arah berlawanan dan masing-masing membawa energi 0,511 MeV ini kemudian digunakan untuk teknik diagnose menggunakan **Positron Emission Tomography (PET)** di dunia medis. Pemindaian dengan teknik PET ini menjadi salah satu teknik diagnose yang standar. Unsur – unsur radioaktif yang digunakan untuk PET diantaranya O^{15} , C^{11} , N^{13} atau F^{18} disuntikkan ke dalam tubuh dan kemudian menghasilkan annihilasi dua foton yang kemudian diemisikan dari lokasi di

bagian tubuh mana bahan- bahan kimia tadi terkonsentrasi. Lokasi tempat sumber foton ini diidentifikasi dengan mengukur arah dari dua foton sinar gamma dari energi 0,5 MeV (Gambar). Pengukuran aliran darah dalam otak adalah salah satu hasil pemindaian dari teknik ini, dari pengukuran aliran darah ini kita bisa mendeteksi gejala stroke, tumor otak dan cedera otak.

Gambar 3. 27 Teknik Pemindaian PET



Sumber : Thronton, 2013

Gambar (a) menunjukkan proses pemindaian menggunakan PET pada bagian tubuh tertentu. Gambar (b) menunjukkan positron bergerak sejauh beberapa milimeter sebelum mengalami annihilasi yang kemudian menghasilkan dua foton dengan arah rambat berlawanan. Keberadaan foton inilah yang tampak pada citra yang dihasilkan. (c) Citra atau image hasil pemindaian menggunakan PET pada organ otak yang normal. Teknik PET biasanya dilakukan dengan MRI, teknik PET melengkapi MRI karena teknik PET bisa memindai hingga tingkat sel. PET -MRI digunakan untuk memindai tubuh khususnya pada organ lunak, bahkan hingga aliran darah, penggunaan oksigen dan penggunaan gula oleh tubuh.

Rangkuman

A. Efek fotolistrik

1. Efek fotolistrik adalah fenomena keluarnya electron dari permukaan bahan ketika disinari dengan frekuensi tertentu.
2. Hasil-hasil eksperimen efek fotolistrik menunjukkan:
 - a. Energi kinetik dari fotoelektron tidak tergantung pada intensitas cahaya. Untuk suatu permukaan bahan, nilai potensial penghenti

V_o tergantung pada frekuensi cahaya ν dan bukan pada intensitas cahaya I .

- b. untuk cahaya dari frekuensi yang berbeda maka akan menghasilkan potensial henti yang berbeda pula
 - c. Semakin kecil fungsi kerja ϕ bahan, maka semakin rendah frekuensi cahaya untuk menolak atau mengeluarkan fotoelektron. Tidak ada fotoelektron dihasilkan jika bahan disinari cahaya dengan frekuensi dibawah frekuensi ambang.
 - d. Pada frekuensi cahaya yang tetap (λ pun tetap, warna cahaya sama), arus i yang timbul sebanding lurus dengan intensitas cahaya I .
 - e. Tidak ada waktu tunda antara penyinaran elektode dan terlepasnya fotoelektron (timbulnya arus)
3. Hasil eksperimen efek fotolistrik ini tidak dapat dijelaskan oleh fisika klasik, tapi di tahun 1905 Einstein mengajukan penjelasan ini dengan konsep medan radiasi elektromagnetik itu sendirilah yang terkuantisasi.
4. Kuantisasi medan radiasi elektromagnetik ini kemudian disebut sebagai foton dan foton berperilaku sebagai partikel.
5. Setiap satu foton hanya dapat memiliki dan melepas energi sebesar

$$E = h\nu$$

Dengan h = tetapan Planck ($6,6261 \times 10^{-34}$ Js) dan ν (baca:nu) adalah frekuensi (hz)

6. Efek fotolistrik menjelaskan dengan mudah bagaimana setiap satu foton hanya berinteraksi dengan satu electron. Berdasarkan hukum kekekalan energi, berlaku

$$h\nu = \phi + \frac{1}{2}mv_{maks}^2$$

7. Potensial henti hanya dipengaruhi oleh frekuensi foton

$$eV_o = h\nu - h\nu_o = \frac{1}{2}mv_{maks}^2$$

Dengan

$$\phi = h\nu_o$$

Eksperimen Milikan pada tahun 1916 membuktikan bahwa konsep Einstein tentang foton adalah benar.

B. Efek Compton

1. Efek Compton mendemonstrasikan bahwa sebuah foton bisa terhambur setelah bertumbukan dengan sebuah electron, hamburan ini menghasilkan foton dengan panjang gelombang yang lebih besar dari semula dan juga electron yang terpental.
2. Perubahan panjang gelombang foton diberikan oleh

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta)$$

Dengan λ adalah panjang gelombang awal dan λ' adalah panjang gelombang akhir. h adalah konstanta planck dan c adalah kecepatan cahaya di ruang hampa. m yang digunakan bisa merupakan massa atom atau massa electron. θ adalah sudut hamburan foton terhadap arah momentum awal.

3. Panjang gelombang Compton dari sebuah electron diberikan oleh

$$\lambda_c = \frac{h}{m_e c} = 2,426 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

4. Melalui eksperimen ini, Compton berhasil mendemonstrasikan gelombang foton bersifat sebagai partikel

C. Produksi sinar X

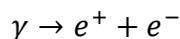
1. Radiasi bremsstrahlung (sinar X) diemisikan ketika partikel bermuatan (misalnya electron) keluar dari bahan dan bergerak dipercepat oleh medan nuklir.
2. Sinar x ini memiliki panjang minimum sebesar

$$\lambda_{min} = \frac{hc}{eV_0}$$

Dengan electron dipercepat oleh potensial V_0 yang diterapkan di bahan targek (anoda).

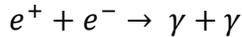
D. Produksi pasangan-annihilasi

1. Energi foton dapat dikonversi menjadi massa dalam bentuk produksi pasangan, dengan reaksi:



Dengan e^+ adalah positron

2. Sebaliknya, partikel dapat dikonversi menjadi foton melalui annihilasi pasangan yang diberikan oleh persamaan:



Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

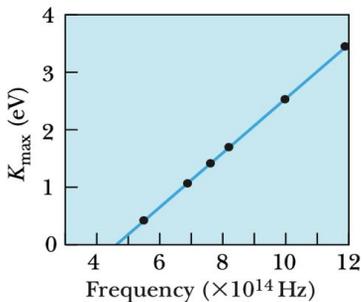
1. Perhatikan pernyataan-pernyataan berikut

- (1) Electron dapat keluar dari logam saat permukaan logam disinari gelombang elektromagnetik.
- (2) Lepas atau tidaknya electron dari logam ditentukan oleh frekuensi ambang
- (3) Fungsi kerja untuk setiap logam berbeda.
- (4) Laju electron terpancar bergantung pada intensitas cahaya yang mengenai permukaan logam

Pernyataan yang benar tentang efek fotolistrik adalah

- | | |
|--------------------|--------------------|
| A. (1) (2) dan (3) | D. (2) (3) dan (4) |
| B. (1) dan (2) | E. benar semua |
| C. (1) dan (3) | |

2. Diberikan kurva berikut

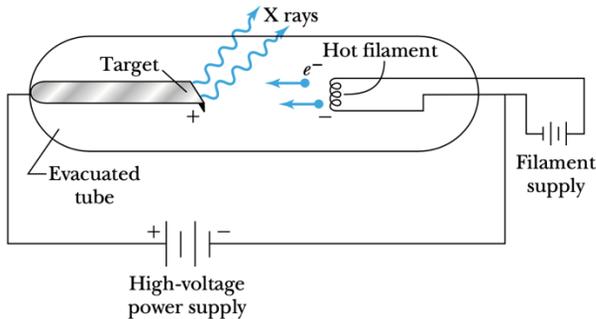


Pernyataan yang sesuai dengan kurva diatas adalah

- A. Kemiringan kurva adalah tetapan Planck
- B. Kemiringan kurva bergantung pada intensitas cahaya
- C. Kemiringan kurva bergantung pada bahan yang mengeluarkan electron
- D. Titik A adalah energi ambang (f_0), yang tidak bergantung pada bahan yang mengeluarkan electron
- E. Titik A adalah energi ambang (f_0), yang bergantung pada intensitas cahaya

3. Fenomena berikut yang tepat menggambarkan bahwa cahaya memiliki sifat – sifat partikel adalah ...
- Interferensi cahaya pada lapisan tipis
 - Radiasi elektromagnetik
 - Efek fotolistrik
 - Difraksi electron
 - Difraksi sinar x
4. Jika frekuensi gelombang yang menyinari sebuah permukaan logam pada efek foto listrik adalah ν dan frekuensi ambang diberikan oleh ν_0 , maka pernyataan yang benar adalah
- Tidak ada arus fotolistrik kecuali $\nu < \nu_0$
 - ν_0 tidak bergantung pada jenis logam
 - Di atas frekuensi ambang, aliran electron-elektron per sekon meningkat ketika intensitas cahaya datang
 - Potensial henti sebanding dengan ν_0^2
 - Potensial henti bergantung pada intensitas cahaya
5. Permukaan suatu lempeng logam disinari cahaya monokromatik. Percobaan ini diulang dengan panjang cahaya yang berbeda. Ternyata tidak ada electron keluar jika lempeng disinari dengan panjang gelombang di atas 500 nm. Dengan menggunakan panjang gelombang tertentu, ternyata diperlukan tegangan 3,1 volt untuk menghentikan arus fotolistrik yang terpancar dari lempeng. Besar panjang gelombang ini adalah
- | | |
|-----------|-----------|
| A. 223 nm | D. 384 nm |
| B. 273 nm | E. 442 nm |
| C. 332 nm | |
6. Sebuah fotoelektron keluar dari permukaan logam ($\phi = 3,338 \text{ eV}$) ketika disinari oleh foton $10,09 \text{ eV}$. Energi kinetik maksimum fotoelektron adalah
- | | |
|------------|------------|
| A. 2,15 eV | D. 6,71 eV |
| B. 2,28 eV | E. 8,86 eV |
| C. 4,56 eV | |

7. Elektron-elektron dari suatu filamen dipercepat dengan beda potensial V sehingga menumbuk batang tembaga.



Spektrum kontinu dari sinar X yang dihasilkan memiliki frekuensi maksimum $0,6 \times 10^{19}$ Hz. Beda potensial V adalah

- A. 20 kV
 B. 23 kV
 C. 25 kV
 D. 28 kV
 E. 30 kV
8. Sinar X dengan energi 50 keV mengalami hamburan Compton dari sebuah sasaran. Jika sinar yang dihamburkan dideteksi pada 60° relatif terhadap sinar datang, energi hamburan sinar X adalah
- A. 47,2 keV
 B. 48,6 keV
 C. 49,3 keV
 D. 50,0 keV
 E. 51,4 keV
9. Sebuah foton 0,7 nm menumbuk electron diam. Setelah itu, foton terhambur dengan sudut 120° terhadap arah semula. Panjang gelombang foton setelah bertumbukan adalah
- A. 0,7000 nm
 B. 0,7036 nm
 C. 0,7136 nm
 D. 0,7460 nm
 E. 0,7600 nm
10. Panjang gelombang foton yang dihamburkan oleh electron bebas akan lebih besar dibandingkan saat datang adalah hasil dari....
- A. efek fotolistrik
 B. efek Compton
 C. produksi sinar X
 D. produksi pasangan
 E. radiasi benda hitam

Essay

1. Mengapa fisikawan klasik cenderung menyatakan bahwa cahaya termasuk radiasi gelombang elektromagnetik dan bukan menyatakan cahaya sebagai partikel?

Jawab:

2. Sebutkan peristiwa- peristiwa yang menguatkan fisikawan fisika klasik untuk menyatakan cahaya termasuk gelombang!

Jawab:

3. Apa saja hasil dari efek fotolistrik? Apakah fisika klasik bisa menjelaskannya? Kenapa? Jelaskan jawabanmu!

Jawab:

4. Bagaimana penjelasan Einstein tentang hasil eksperimen efek fotolistrik? Menurutmu kenapa melalui penjelasan itu ia memperoleh Nobel Fisika?

Jawab:

5. Kenapa efek Compton sulit diamati jika menggunakan spektrum cahaya tampak? Jelaskan!

Jawab:

6. Sebuah gelombang radio FM ada pada frekuensi 98,1 MHz diberikan pada sinyal 50.000 W. Berapa banyak foton perdetik yang diemisikannya?

Jawab:

7. Berapa besar frekuensi ambang dari sebuah efek fotolistrik pada lithium ($\phi = 2,93 \text{ eV}$)? Berapa besar potensial henti jika panjang gelombang sinar adalah 380 nm?

Jawab:

8. Berapa besar panjang gelombang maksimum yang digunakan untuk menyinari bahan perak ($\phi = 4,64 \text{ eV}$)? Berapa besar energi kinetik maksimum fotoelektron yang dihasilkan jika perak ini disinari panjang gelombang yang separuh dari semula ?

Jawab:

9. Pada sebuah eksperimen efek fotolistrik, diperoleh potensial henti suatu bahan adalah 1,00 V untuk menghentikan seluruh fotoelektron ketika disinari gelombang dengan panjang gelombang 260 nm. Dengan bahan yang sama, ternyata potensial hentinya 2,30 V ketika panjang gelombang yang menyinarinya 207 nm. Dari data ini , tentukan berapa konstanta Planck dan berapa fungsi kerja bahan ?

Jawab:

10. Berapa panjang gelombang sinar X minimum yang dihasilkan oleh sebuah alat dokter gigi yang bekerja pada 30 kV?

Jawab:

11. Pada sebuah alat yang menerapkan efek Compton, terjadi resolusi $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 0,40\%$. Berapa panjang gelombang foton yang datang untuk menghasilkan resolusi ini jika diberikan sudut hamburannya

- a) 30°
- b) 90°
- c) 170°

Jawab:

12. Turunkanlah persamaan untuk sebuah electron yang terpelanting dengan energi kinetik dan sudut ϕ pada hamburan Compton . Buktikan bahwa

$$K_{elektron} = \frac{\Delta\lambda/\lambda}{1 + (\Delta\lambda/\lambda)} h\nu$$

Dan

$$\cot \phi = \left(1 + \frac{h\nu}{mc^2}\right) \tan \frac{\theta}{2}$$

Jawab:

13. Saat diberikan sinar gamma sebesar 650 keV, terjadi efek Compton pada sebuah electron. Tentukan besar
- a. Energi dari foton yang terhambur pada percobaan ini, jika foton terhambur pada sudut 110° .

Jawab:

- b. Berapa besar energi kinetik electron terhambur?

Jawab:

- c. Berapa sudut hamburan dari electron?

Jawab:

14. Jika sebuah foton terhambur dari sebuah electron yang tetap diam. Setelah terhambur ini foton membawa energi 40 keV. Berapa energi maksimum yang diperoleh electron?

Jawab:

15. Berapa besar energi yang diperlukan untuk menghasilkan pasangan electron-positron ketika sebuah foton bertumbukan dengan

(a) sebuah electron bebas dalam keadaan diam

Jawab:

(b) sebuah proton bebas dalam keadaan diam

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.

Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2013). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.

Kanginan, Marthen. (2018). *Fisika untuk SMA/MA Kelas XII*. Erlangga: Jakarta.

Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi

Wiyatmo. (2003). *Fisika Modern*. Yogyakarta: Penerbit Pustaka Pelajar.

Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental Of physics*. Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Tenth Edition.

Kegiatan Pembelajaran 3 SIMULASI FOTOLISTRIK

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa dapat melakukan eksperimen efek fotolistrik secara virtual menggunakan PhET,	<ol style="list-style-type: none"> 1. Mempelajari gejala efek fotolistrik melalui simulasi PhET 2. Menentukan nilai frekuensi ambang (ν_0) dan potensial henti (V_0) 3. Mengamati, mengumpulkan, mengolah, menyajikan dan menganalisis data yang diperolehnya dalam bentuk laporan praktikum

Uraian Materi

A. Tujuan Praktikum

1. Mempelajari gejala efek fotolistrik melalui simulasi PhET
2. Menentukan nilai frekuensi ambang (ν_0) dan potensial henti (V_0)

B. Tinjauan Pustaka

Efek fotolistrik adalah peristiwa terlepasnya electron dari permukaan logam karena logam tersebut disinari cahaya. Untuk menguji teori kuantum yang dikemukakan oleh Max Planck, kemudian Albert Einstein mengadakan suatu penelitian yang bertujuan untuk menyelidiki bahwa cahaya merupakan pancaran paket-paket energy yang kemudian disebut foton yang memiliki energy sebesar

$$E = h\nu$$

Tegangan henti adalah tegangan pada fotolistrik yang diatur agar diperkecil sedikit demi sedikit sampai nilainya negatif ($-V_0$), hingga tidak ada arus listrik yang mengalir. Hubungan potensial henti dan energy kinetic adalah:

$$eV_0 = K = h\nu - h\nu_0$$

Dengan

$$h\nu_0 = \phi$$

ϕ adalah energi ambang.

C. Alat dan Bahan

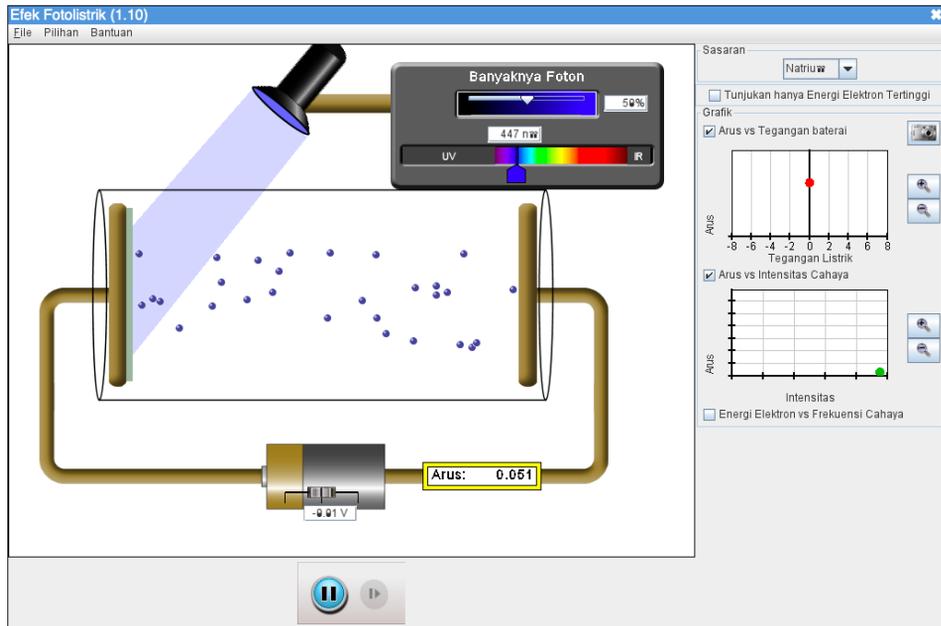
1. Laptop / PC / gadget
2. Web Browser
3. PhET simulation photoelectric effect

D. Prosedur Eksperimen

Persiapan

- a. Masukkan alamat <http://phet.colorado.edu> di Browser
- b. Pilih “Physics” pada toolbar “Simulation”
- c. Pilih pada simulasi “Photoelectric Effect” kemudian klik “play” (Gambar)

Gambar 3. 28 Simulasi Fotolistrik melalui PhET



Percobaan 1- Menentukan Frekuensi Ambang Dari Bahan

- a. Pilih bahan yang akan di gunakan, atur intensitas tetap yaitu 10%.
- b. Tembakkan sinar dengan panjang gelombang tertentu. Amati electron yang keluar.
- c. Catat panjang gelombang keberapa bahan mulai melepaskan electron
- d. Ulangi dengan bahan yang berbeda
- e. Catatlah data yang diperoleh sesuai Tabel 1

Percobaan 2-Menentukan Potensial Henti

- Pilih satu bahan saja dari percobaan pertama (bebas)
- Pilih sinar ungu dan catat panjang gelombangnya di tabel 2
- Perhatikan arus awal yang terbaca dan catat di tabel 2
- Variasikan besar intensitas sinarnya sesuai Tabel
- Atur tegangan mulai dari $-0,01$ V, kurangi terus hingga arus fotolistrik adalah nol.
- Catatlal data tegangan henti yang diperoleh pada Tabel 2

Percobaan 3- Menentukan Hubungan Potensial Henti dengan Panjang Gelombang

- Dengan menggunakan bahan yang sama dengan percobaan 2
- Atur intensitas sinar pada 50%
- Atur panjang gelombang foton sehingga semua spektrum warna terwakili, mulai dari arus belum terbaca hingga arus sudah terbaca
- Atur tegangan hingga menghasilkan tegangan henti, dimulai dari $-0,01$ V
- Ulangi dengan frekuensi cahaya yang lain, mulai dari sinar merah hingga ultraviolet.
- Catatlal data tegangan henti yang diperoleh pada Tabel 3

E. Tabel Hasil Pengamatan

Tabel 6 Menentukan Frekuensi Ambang Dari Bahan

No	Bahan	Intensitas (%)	Panjang Gelombang (nm)	Frekuensi Ambang (Hz)	Energi Ambang (eV)
1.	Natrium	10			
2.	Seng	10			
3.	Tembaga	10			
4.	Platinum	10			
5.	Kalsium	10			

Tabel 7 Menentukan Hubungan Potensial Henti dan Intensitas

No	Bahan	Intensitas (%)	Panjang Gelombang (nm)	Arus (A)	Potensial Henti (Volt)
----	-------	----------------	------------------------	----------	------------------------

1.	Natrium	12	403	0,016	-0,17
2.		22	403		
3.		32	403		
4.		42	403		
5.		52	403		

Tabel 8 Menentukan Hubungan Potensial Henti dengan Panjang Gelombang

No	Bahan	Intensitas (%)	Panjang Gelombang (nm)	Arus (A)	Potensial Henti (Volt)	Energi kinetik Elektron (eV)
1.		50	700	0	0	0
2.		50	590	0	0	0
3.		50	430	0,030	-0,23	-0,23
4.		50	444			
5.		50				
6.		50				
7.		50	384			

Rangkuman

Eksperimen simulasi fotolistrik bertujuan untuk mempelajari gejala efek fotolistrik secara simulasi menggunakan aplikasi PheT dan menentukan frekuensi ambang dan potensial henti.

Evaluasi Formatif

1. Sebutkan tujuan eksperimen simulasi fotolistrik!

Jawab:

2. Sebutkan alat dan bahan eksperimen simulasi fotolistrik

Jawab:

3. Apakah setiap bahan akan langsung menghasilkan arus saat disinari?
Kenapa? Jelaskan !

Jawab:

4. Berapakah nilai konstanta Planck yang Anda peroleh dari pengolahan data?

Jawab:

5. Berdasarkan hasil data di Tabel 3, buatlah grafik hubungan antara energi kinetik electron terhadap frekuensi dan jelaskan makna fisisnya!

Jawab:

6. Hasil eksperimen efek fotolistrik telah dibahas pada Kegiatan Pembelajaran 3.2. Bandingkanlah dengan hasil praktikum simulasi fotolistrik yang kamu lakukan hari ini. Uraikanlah penjelasan ke- 5 hasil eksperimen tersebut dengan menggunakan hasil pengamatanmu! Buatlah dan cantumkan grafik pada setiap hasil eksperimen (jika ada).

Jawab:

7. Hitunglah kesalahan relatif dari pengolahan data Anda!

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 8 soal, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Burns, Marshall L. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: United States of America.

Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.

Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2013). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.

Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Moder* Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi

Wiyatmo. (2003). *Fisika Modern*. Yogyakarta: Penerbit Pustaka Pelajar.

Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental Of physics*. Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.

Kegiatan Pembelajaran 4 DUALISME GELOMBANG-PARTIKEL

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana dualism gelombang – partikel	<ol style="list-style-type: none">1. Mahasiswa dapat menjelaskan kontribusi hamburan sinar x dan difraksi electron dalam menguatkan dualisme gelombang partikel2. Mahasiswa dapat menganalisa hipotesa panjang gelombang de broglie dan mengaplikasikannya dalam penyelesaian permasalahan.3. Mahasiswa dapat menjelaskan fenomena-fenomena dan teori yang mendukung dualism gelombang-partikel \4. Mahasiswa dapat menjelaskan makna fisis dari prinsip komplementer Bohr dan Prinsip ketidakpastian Heisenberg serta mengaplikasikannya pada pemecahan masalah secara matematis

Uraian Materi

A. Hamburan Sinar X

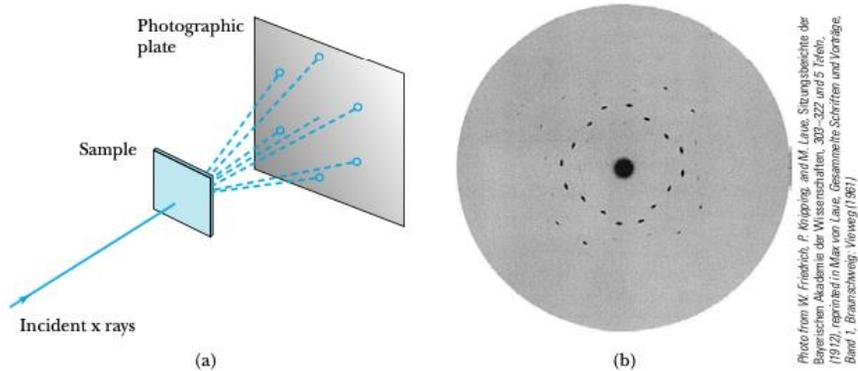
Setelah ditemukannya sinar X pada tahun 1895 oleh Rontgen, para ilmuwan mempelajari perilaku radiasi yang masuk ke dalam materi. Tahun 1912 sinar X dimasukkan menjadi salah satu spektrum gelombang elektromagnetik. Charles barklas (peraih Nobel tahun 1917) menemukan bahwa setiap elemen material mengemisikan sinar x dengan panjang gelombang tertentu dan sinar x bisa dipolarisasikan. Max von Loue (peraih Nobel fisika tahun 1914) dan Arnold Sommerfeld kemudian menggunakan sinar X untuk mempelajari struktur atom.

Wilhem Wien dan Sommerfeld menemukan bahwa panjang gelombang sinar X ada pada 10^{-10} m dan 10^{-11} m. Loue yang mengetahui jarak antar kristal ada pada 10^{-10} , kemudian mengusulkan bahwa sinar X dapat didifraksikan melalui atom-atom kristal, yang berperan sebagai kisi tiga dimensi. Kisi – kisi ini akan menghasilkan interferensi gelombang yang

kemudian bisa diamati polenya. Hasil interferensi sinar X pasti bisa diamati karena sinar X adalah gelombang elektromagnetik.

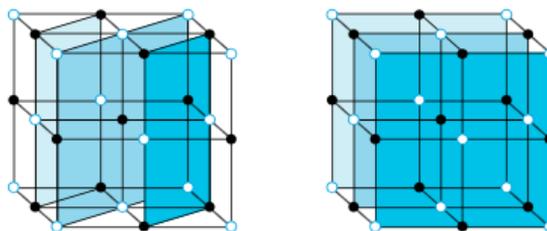
Gagasan Laue ini kemudian diuji dengan beberapa ilmuwan lainnya. Dalam percobaan ini mereka merotasikan kristal, mengubah posisi dan intensitas difraksi maksimum (Gambar 3.29) hingga akhirnya Laue memperoleh sifat- sifat sinar X dan dapat menampilkan kisi struktur kristal. Temuan Laue dan teman- temannya ini membuka bidang baru dalam fisika, yaitu Fisika Zat Padat dan perkembangan teknologi komponen elektronika.

Gambar 3. 29 Diagram Alat Transmisi Laue



Sumber: Thronton, 2013

Gambar 3. 30 Struktur Kubik pada Kristal Garam

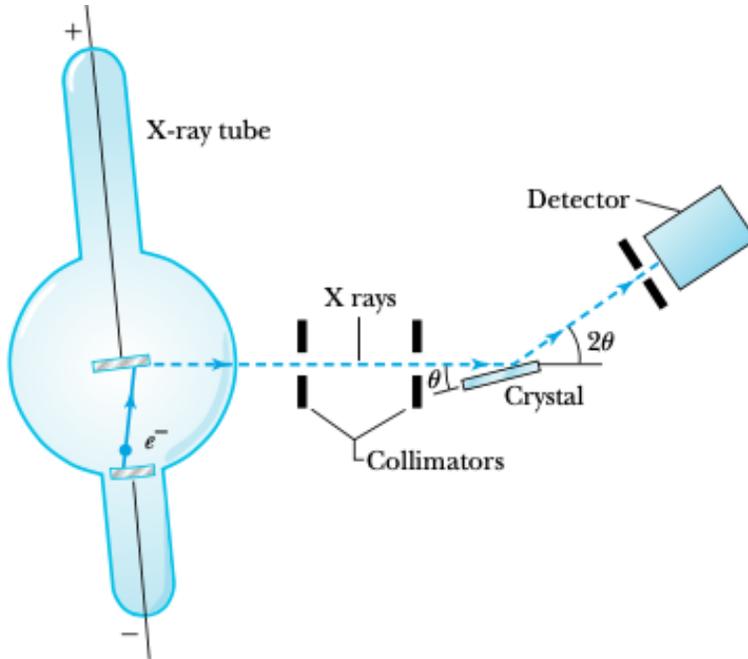


Sumber: Thronton, 2013

Bragg kemudian menyempurnakan gagasan Laue ini dengan mengamati bahwa tiap gambar yang dihasilkan berupa titik – titik terang yang memiliki pusat. Titik – titik terang ini oleh Bragg dijelaskan sebagai pantulan sinar x terhadap bidang atom- atom dengan susunan yang khas dalam kristal. Konfigurasi titik -titik ini dibentuk oleh konfigurasi atom- atom dalam kristal.

Apabila berkas sinar X terhambur dari kristal garam (NaCl) (Gambar 3.30) dengan skema alat percobaan menurut spektrometer Bragg (Gambar) maka kita dapat mengetahui struktur kristal garam ini menggunakan konsep Bragg. Bidang – bidang yang diberi warna biru pada Gambar 3.31 ini kemudian disebut sebagai **bidang Bragg**.

Gambar 3. 31 Skema Percobaan Difraksi Bragg



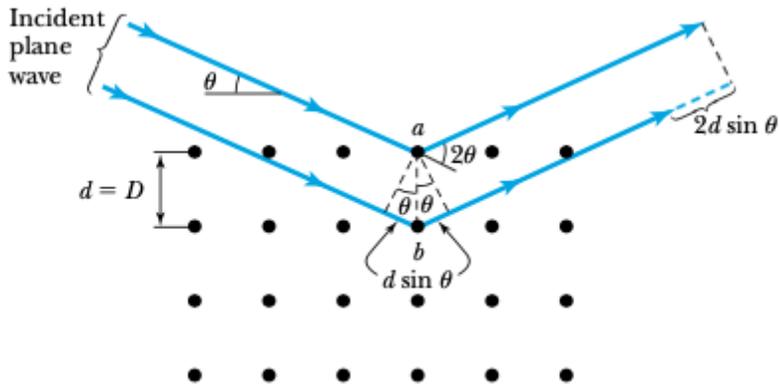
Sumber: Thronton, 2013

Bidang – bidang Bragg pada struktur kristal ini memiliki densitas atom masing- masing. Terbentuknya bidang – bidang Bragg bisa dijelaskan melalui skema berikut (Gambar 3.32). Dua berkas sinar x identik saling sejajar dengan panjang gelombang λ masuk ke dalam bahan. Berkas ini kemudian mengalami pemantulan sempurna, sehingga sudut datang sama dengan sudut pantul. Jarak antar pola terang sebesar $2d \sin \theta$ yang sama dengan kelipatan bilangan bulat

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad 3.90$$

Dengan d adalah jarak antar kisi. Kelipatan bilangan bulat n kemudian disebut sebagai orde refleksi. Persamaan 3.90 kemudian disebut persamaan **Hukum Bragg**.

Gambar 3. 32 Skema Hamburan Bragg



Sumber: Thronton, 2013

Hukum Bragg ini kemudian digunakan untuk menentukan panjang gelombang sinar X dan menentukan jarak antar kristal atau kemudian disebut sebagai panjang kisi kristal. Atas temuannya ini Bragg memperoleh Nobe pada tahun 1915.

Contoh Kasus-Hamburan Sinar X

Hamburan sinar X dari kristal NaCl diobservasi pada sudut 20° terhadap arah datang. Asumsikan $n = 1$, berapa panjang gelombang sinar datang ?

Strategi

Kita akan menggunakan persamaan 3.90 untuk menentukan λ , tapi kita harus menentukan d (jarak antar kisi) dan sudut θ . Perhatikan bahwa sudut antara sinar datang dengan gelombang pantul untuk interferensi konstruktif haruslah 2θ (perhatikan gambar 3.32), sehingga $2\theta = 20^\circ$, $\theta = 10^\circ$. Kita dapat menggunakan densitas NaCl untuk menentukan d , karena volume dari satu atom adalah d^3

Penyelesaian :

Dengan

$$\frac{\text{Jumlah Molekul}}{\text{Volume}} = \frac{N_A \rho}{M}$$

N_A adalah bilangan Avogadro, ρ adalah rapat jenis dan M adalah berat molecular per gram. Untuk NaCl, $\rho = 2,16 \text{ g/cm}^3$ dan $M = 5,85 \text{ g/mol}$.

$$\frac{N_{AP}}{M} = \frac{\left(6,02 \times 10^{23} \frac{\text{molekul}}{\text{mol}}\right) \left(2,16 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}\right)}{58,5 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}$$

$$\frac{N_{AP}}{M} = 2,22 \times 10^{22} \frac{\text{molekul}}{\text{cm}^3} = 4,45 \times 10^{28} \frac{\text{atom}}{\text{m}^3}$$

Karena NaCl memiliki struktur kubik, maka kita gunakan d sebagai jarak antara Na dan Cl, sehingga kita memiliki volume tiap atom sebesar d^3

$$\frac{1}{d^3} = 4,45 \times 10^{28} \frac{\text{atom}}{\text{m}^3}$$

$$d = 0,282 \text{ nm}$$

Teknik perhitungan ini hanya berlaku untuk kristal dengan struktur kubus. Kemudian kita gunakan persamaan 3.90 untuk memperoleh panjang gelombang

$$\lambda = \frac{2d \sin \theta}{n} = \frac{2(0,282 \text{ nm}) \sin 10^\circ}{1} = 0,098 \text{ nm}$$

Panjang gelombang yang diperoleh ini masih dalam kisaran panjang gelombang sinar x. NaCl adalah kristal yang sangat berguna untuk menentukan panjang gelombang sinar x dan untuk melakukan kalibrasi alat.

B. Hipotesis de Broglie

Setelah tahun 1920, para ilmuwan telah sepakat bahwa radiasi sinar X memiliki sifat sebagai gelombang. Sinar X berperan dalam mempelajari struktur atom, molekul dan kristal. Sinar X merupakan gelombang karena dapat mengalami difraksi dan interferensi. Namun perilaku sinar X sebagai foton yang energinya terlokalisasi dalam bentuk paket – paket dengan nilai tertentu (terkuantisasi) dan bersifat sebagai partikel juga harus diperhitungkan.

Untuk mengakomodir sifat – sifat gelombang radiasi ini, De Broglie pada 1924 menghipotesiskan jika gelombang elektromagnetik harus memiliki sifat sebagai gelombang dan sebagai partikel. Hipotesis ini lahir tanpa bukti eksperimen yang menunjang. De Broglie menggunakan teori relativitas. Broglie menganalogikan foton dengan panjang gelombang λ mempunyai momentum sebesar:

$$\lambda = \frac{h}{p} \tag{3.91.a}$$

Persamaan 3.91.a adalah persamaan **gelombang de Broglie** (baca: de Broy-ii). Dengan p adalah momentum, λ adalah panjang gelombang dan h adalah tetapan Planck.

Panjang gelombang de Broglie ini tidak hanya berlaku bagi foton saja, namun bagi seluruh partikel. Hipotesis ini kemudian disebut sebagai **Gelombang-partikel de Broglie**. Setelah beberapa bukti eksperimen mendukung hipotesisnya ini, de Broglie mendapat nobel fisika pada tahun 1929. Untuk partikel, persamaan 3.91.a dapat berlaku pada keadaan relativistic dan non relativistic.

1. Kasus partikel pada keadaan relativistik

Partikel dalam keadaan relativistik memiliki energi total E yang berkaitan dengan energi kinetik K dan energi diam $E_0 = mc^2$. Hubungan ketiga energi ini diberikan oleh:

$$E = \gamma mc^2 = K + E_0 = K + mc^2$$

Sehingga momentum relativistiknya diberikan oleh

$$p = \frac{\sqrt{E^2 - E_0^2}}{c} = \frac{\sqrt{(K + mc^2)^2 - (mc^2)^2}}{c} = \frac{\sqrt{K^2 + 2Kmc^2}}{c}$$

Dan panjang gelombang partikel pada keadaan relativistic diberikan oleh:

$$\lambda = \frac{hc}{\sqrt{K^2 + 2Kmc^2}} \quad 3.91.b$$

2. Kasus partikel pada keadaan non relativistik

Untuk kasus partikel non relativistic berlaku hubungan

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Atau

$$p = \sqrt{2mK}$$

Sehingga rumusan panjang gelombang partikel pada kasus non relativistic adalah

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mK}} = \frac{hc}{\sqrt{2(mc^2)K}} \quad 3.91.c$$

3. Foton

Untuk kasus foton, momentum yang digunakan oleh de Broglie adalah momentum relativistic yang diajukan oleh Einstein. Momentum relativistic ini kemudian bisa kita hubungkan dengan energi relativistic sebagai berikut

$$E = pc$$

besar energi foton menurut kuantisasi Planck adalah $E = pc$. Sehingga

$$h\nu = pc \quad 3.92$$

Contoh Kasus- Panjang Gelombang de Broglie

Hitunglah panjang gelombang dari sebuah

a) Bola tenis 57 gram dengan kecepatan 25 ms/

b) electron dengan energi kinetik 50 eV

Strategi

Perhitungan keduanya langsung saja menggunakan persamaan 3.91.

Penyelesaian:

a) untuk bola tenis berlaku

$$p = \frac{h}{\lambda}$$

$$mv = \frac{h}{\lambda}$$

$$(57 \times 10^{-3} \text{ kg}) \left(25 \frac{\text{m}}{\text{s}}\right) = \frac{6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{\lambda}$$

$$\lambda = 4,7 \times 10^{-34} \text{ m}$$

b) untuk electron, lebih mudah menggunakan eV

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

Namun karena energi kinetik relativistic dari electron cukup kecil, maka kita gunakan energi kinetik non relativistic

$$K = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$$

$$p = \sqrt{2mK}$$

Sehingga

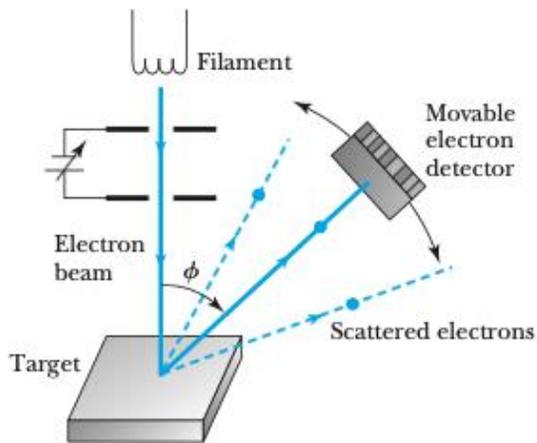
$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mK}} = \frac{hc}{\sqrt{2(mc^2)K}} = \frac{1240 \text{ eV.nm}}{\left(\sqrt{2(0,511 \times 10^6 \text{ eV})(50 \text{ eV})}\right)} = 0,17 \text{ nm}$$

Perhitungan dalam fisika modern lebih sering menggunakan eV, karena perhitungan energi pada skala atomic dinyatakan dalam keV dan MeV. Nilai hc dalam eV ada di bagian cover buku Thornton & Rex.

C. Eksperimen Davisson-Germer (Difraksi Elektron)

Melalui eksperimen, C.J Davisson dan L.H Germer berhasil mengamati difraksi electron – electron dari permukaan suatu kristal padat (Gambar 3.33). Mereka melihat bahwa berkas electron dihamburkan oleh atom- atom permukaan nikel tepat seperti kebenaran hipotesis de Broglie.

Gambar 3. 33 Skema Alat Eksperimen Davisson-Germer



Sumber: Thornton, 2013

Eksperimen Davisson - Germer menggunakan seberkas elektron berenergi 54 eV dikenakan pada permukaan kristal Ni dengan membentuk sudut 65° terhadap suatu bidang Bragg. Jarak antar kristal Ni adalah $d = 0,91 \text{ \AA}$. Mereka kemudian membandingkan panjang gelombang electron dengan menganggap electron sebagai gelombang dan partikel.

Pada eksperimen disebut nilai-nilai $d = 0,91 \text{ \AA}$, $\theta = 65^\circ$, dan $n = 1$ sehingga diperoleh nilai $\lambda = 1,65 \text{ \AA}$. Jika menganggap electron sebagai gelombang, gunakan hukum Bragg. Jika menganggap electron sebagai partikel maka gunakan panjang gelombang de Broglie

Dengan menganggap elektron sebagai gelombang dan menggunakan rumusan difraksi Bragg bahwa difraksi maksimum terjadi bila memenuhi

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

Dengan n = orde difraksi, d = jarak bidang Bragg/difraksi dan θ = sudut difraksi

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

$$1\lambda = 2(0,91\text{\AA}) \sin 65^\circ$$

$$\lambda = 1,65 \text{\AA}$$

Jika elektron ditinjau sebagai partikel maka energi kinetiknya adalah $K = 54 \text{ eV}$ dengan momentum

$$p = mv = \sqrt{2mK}$$

maka

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{2 \times (9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) \times (54 \text{ eV} \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J/eV})} \\ &= 4,0 \times 10^{-24} \text{ kg m/s} \end{aligned}$$

Dengan demikian elektron memiliki panjang gelombang de Broglie sebesar

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}}{4,0 \times 10^{-24} \text{ kg m/s}} = 1,66^\circ \text{ A}$$

suatu hasil yang sangat cocok dengan tinjauan gelombang.

D. Gelombang atau Partikel?

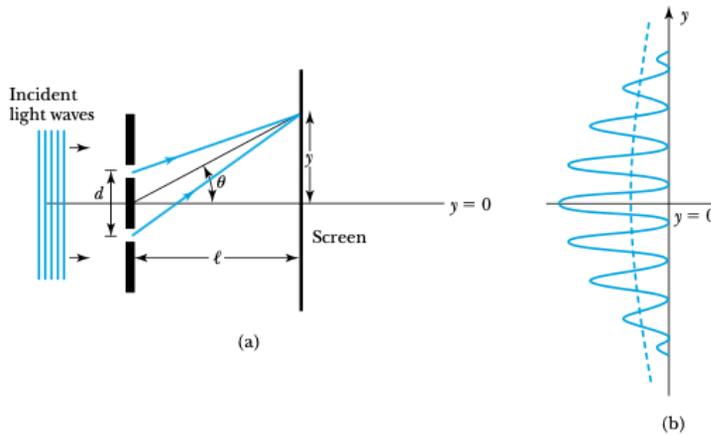
Pada uraian sebelumnya dari Modul Teori Kuantum ini kita telah mempelajari bahwa radiasi elektromagnetik bersifat sebagai gelombang (pada difraksi dan interferensi) tapi pada waktu yang lain bersifat sebagai partikel (fotolistrik dan efek Compton). Pada eksperimen Davisson-Gerner juga dapat dibuktikan bahwa electron berperilaku sebagai gelombang (dapat dicari panjang gelombang hamburannya). Melalui Hipotesa Broglie, kita secara matematis bisa menyatakan partikel yang memiliki momentum kedalam paket-paket gelombang.

Fenomena dimana radiasi elektromagnetik ini dapat dinyatakan sebagai gelombang dan juga partikel dan sebaliknya: ternyata materi (misalnya electron) juga berperilaku sebagai gelombang dan juga dapat sebagai partikel ini kemudian disebut sebagai **dualisme gelombang-partikel**. Untuk mempelajari dualisme gelombang-partikel, berkas sinar dan electron dilewatkan pada celah ganda (Gambar 3.44). Untuk celah ganda, dua terang terdekat dinyatakan dengan

$$d \sin \theta = n\lambda \quad 3.93$$

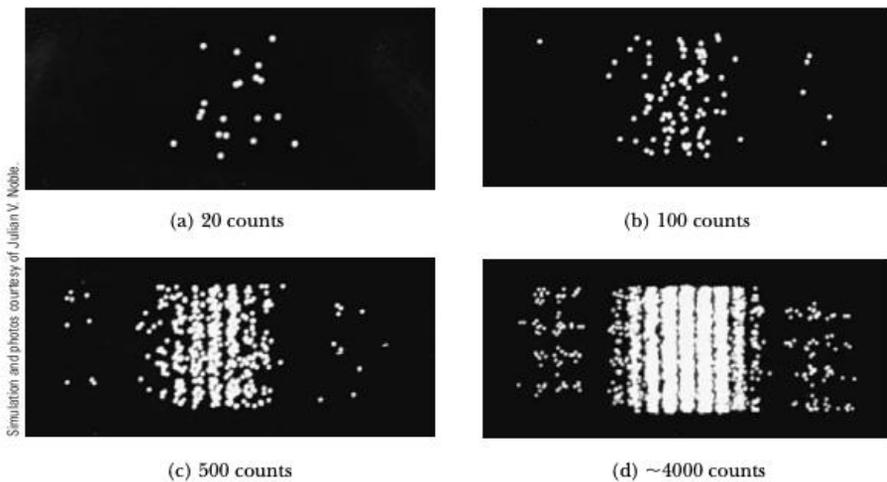
Hasilnya ternyata baik pola berkas sinar (Gambar 3.45) maupun electron yang dilakukan oleh Jonsson (1961) (Gambar 3.36) menunjukkan pola terang gelap yang sama. Pola terang menunjukkan interferensi maksimum dan pola gelap menunjukkan interferensi minimum. Pola terang – gelap pada interferensi berkas sinar dan elektron ini menunjukkan bahwa keduanya bersifat sebagai gelombang.

Gambar 3. 34 Skema eksperimen Celah Ganda



Sumber: Thornton, 2013

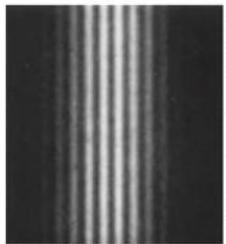
Gambar 3. 35 Pola Interferensi Foton pada Celah Ganda



Simulation and photos courtesy of Julian V. Noble.

Sumber: Thornton, 2013

Gambar 3. 36 Pola Interferensi Elektron pada Celah Ganda



Sumber: Thornton, 2013

Contoh kasus – Dualisme Gelombang Partikel

Pada eksperimen Jonsson, electron dengan energi 50 keV dilewatkan pada dua celah yang terpisah 2000 nm satu sama lain. Tiap celah memiliki lebar yang sama yaitu 500 nm. Antara celah dan layer terdapat jarak 350 mm. Berapa jarak antara dua maksima terdekat?

Strategi:

persamaan yang menghubungkan orde maksima (terang) dengan sudut θ dari berkas sinar datang adalah persamaan 3.93

$$d \sin \theta = n\lambda$$

Untuk terang pertama, berlaku $n = 1$, sehingga

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{d} = \frac{\lambda}{2000 \text{ nm}}$$

Kita perlu menentukan λ agar diperoleh sudut θ .

Penyelesaian:

Panjang gelombang electron dapat ditentukan menggunakan persamaan

$$\lambda = \frac{1,226 \text{ nm} \cdot V^{1/2}}{\sqrt{50 \times 10^3 \text{ V}}} = 5,48 \times 10^3 \text{ nm}$$

Karena 50 keV terlalu besar untuk ukuran energi nonrelativistic, maka kemudian panjang gelombang ditentukan menggunakan energi relativistic

$$\begin{aligned}(pc)^2 &= E^2 - E_0^2 = (K + E_0)^2 - E_0^2 \\ &= (50 \times 10^3 \text{ eV} + 0,511 \times 10^6)^2 + (0,511 \times 10^6)^2 \\ &= (0,231 \times 10^6 \text{ eV})^2\end{aligned}$$

Kemudian kita dapat menentukan panjang gelombang

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{pc} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{0,231 \times 10^6 \text{ eV}} = 5,36 \times 10^{-3} \text{ nm}$$

Dengan cara ini kita memperoleh hasil yang lebih akurat 2% dari hasil nonrelativistic. Maka kemudian kita bisa menentukan sudutnya

$$\sin \theta = \frac{\lambda}{2000} = \frac{5,36 \times 10^{-3} \text{ nm}}{2000 \text{ nm}} = 2,68 \times 10^{-6}$$

Jarak terang pertama pada layar dinyatakan dengan

$$y = \ell \tan \theta$$

Tapi karena θ sangat kecil maka $\sin \theta \approx \tan \theta$

$$y = \ell \sin \theta = 350 \text{ mm} (2,68 \times 10^{-6}) = 938 \text{ nm}$$

Jarak ini sangat kecil, tidak dapat dilihat dengan pengamatan langsung sehingga Jonsson mengamatinya menggunakan rangkaian lensa electron. Dengan daya 10 kali daya mikroskop optic.

Kemudian apakah pengukuran besaran fisika yang menunjukkan sifat sebagai partikel dan sebagai gelombang bisa diukur secara bersamaan? Jawabannya ternyata tidak. Jonsson kemudian menjelaskan ini dengan menggunakan gedanken eksperimen. Ia menggunakan electron sebagai materi (partikel). Sebagai partikel, celah mana dari 2 celah ini yang dipilih oleh electron? Sebagai partikel, pemilihan celah akan menentukan momentum yang dimiliki oleh electron. Kesulitan dalam menentukan celah mana yang dilalui electron sebagai partikel ini menunjukkan saat percobaan interferensi celah ganda berlangsung (eksperimen yang memperlihatkan sifat sebagai gelombang), maka sifatnya sebagai partikel akan sulit untuk dilihat.

Untuk menyempurnakan eksperimen Jonsson, Bohr memberikan prinsip komplementernya yang dikenal dengan **prinsip komplementer Bohr** dengan mengemukakan bahwa:

“Tidak mungkin untuk mendeskripsikan observabel fisis sebagai partikel dan gelombang secara bersamaan”.

Observabel fisis adalah kuantitas atau besaran, misalnya posisi, kecepatan, momentum dan energi yang dapat diukur dalam percobaan. Dalam setiap eksperimen, yang kita peroleh hanya besaran- besaran yang menunjukkan sifat sebagai partikel atau sebagai gelombang. Misalnya pada interferensi gelombang, yang bisa diamati adalah besaran – besaran yang menunjukkan

perilaku gelombang, meskipun kita menggunakan electron. Tapi dalam percobaan interferensi celah ganda ini, electron diamati berperilaku sebagai gelombang.

Dengan menggunakan prinsip komplementer oleh Bohr, kita lebih memahami lagi permasalahan dalam dualisme gelombang partikel. Dengan menggunakan prinsip komplementer ini, kita tidak dapat menjelaskan suatu fenomena sebagai partikel sekaligus gelombang secara simultan.

E. Gelombang Materi

Dari eksperimen hamburan electron kita telah mempelajari bahwa materi memiliki sifat sebagai gelombang. Dari percobaan fotolistrik dan efek Compton kita memperoleh bahwa gelombang bersifat sebagai partikel. Gelombang menjadi titik dasar dalam teori kuantum. Kemudian pertanyaannya bagaimana mendeskripsikan gelombang yang bersifat sebagai partikel ini? Bagaimana menjelaskan gelombang yang kemudian bersifat seperti paket – paket energi? Untuk menjelaskannya, kita akan mempelajari dasar- dasar dari gelombang hingga interpretasi **gelombang materi**.

Gelombang adalah energi yang merambat. Energi ini berasal dari sumber getar (osilator). Dalam perambatannya, fungsi energi dalam gelombang ini dinyatakan dalam posisi (x) dan waktu (t). Persamaan umum gelombang sebagai fungsi waktu $\psi(t)$ dan fungsi posisi $\psi(x)$ juga dapat dinyatakan dalam:

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi(t)}{\partial t^2} \quad 3.94.a$$

ψ (baca: psi adalah simpangan. $\psi(x, t)$ menunjukkan simpangan gelombang sebagai fungsi posisi dan waktu. Dengan v adalah kecepatan fase, $v = u_{phase}$. Di SMA kamu sudah memperoleh persamaan umum gelombang sebagai berikut

$$\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad 3.94.b$$

Dengan A adalah simpangan maksimum atau amplitudo, x adalah perpindahan materi (atau energi) dan t adalah waktu.

Persamaan Umum Gelombang

$$\boxed{\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi(t)}{\partial t^2}}$$

Dan

$$\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t)$$

k adalah bilangan gelombang yang menyatakan kebalikan dari panjang gelombang.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Dan ω (baca: omega) adalah frekuensi angular, yang berhubungan dengan frekuensi linear (ν)

$$\omega = 2\pi\nu \text{ atau } \omega = \frac{2\pi}{T}$$

Dengan T adalah periode atau waktu yang diperlukan untuk menghasilkan satu gelombang. Persamaan 3.94 ini kemudian bisa kita tulis menjadi

$$\psi(x, t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad 3.95$$

Persamaan 3.95 adalah fungsi gelombang yang bergerak ke arah x positif. Sedangkan jika bergerak ke arah x negatif, persamaannya menjadi:

$$\psi(x, t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} + \frac{t}{T} \right) \right] \quad 3.96$$

Kecepatan fase u_{fase} adalah kecepatan sebuah titik dengan fase tertentu dinyatakan dengan

$$u_{fase} = \frac{\lambda}{T} = \frac{\omega}{k} \quad 3.97$$

Jika gelombang tidak memenuhi $\psi(x, t)$ pada saat $x = 0$ dan $t = 0$, maka kita dapat memodifikasi persamaan 3.95 dengan menambahkan **konstanta fase**

$$\psi(x, t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} + \phi \right) \right] \quad 3.98$$

Sebagai contoh jika $\phi = \frac{1}{2}\pi$, maka persamaan 3.98 menjadi

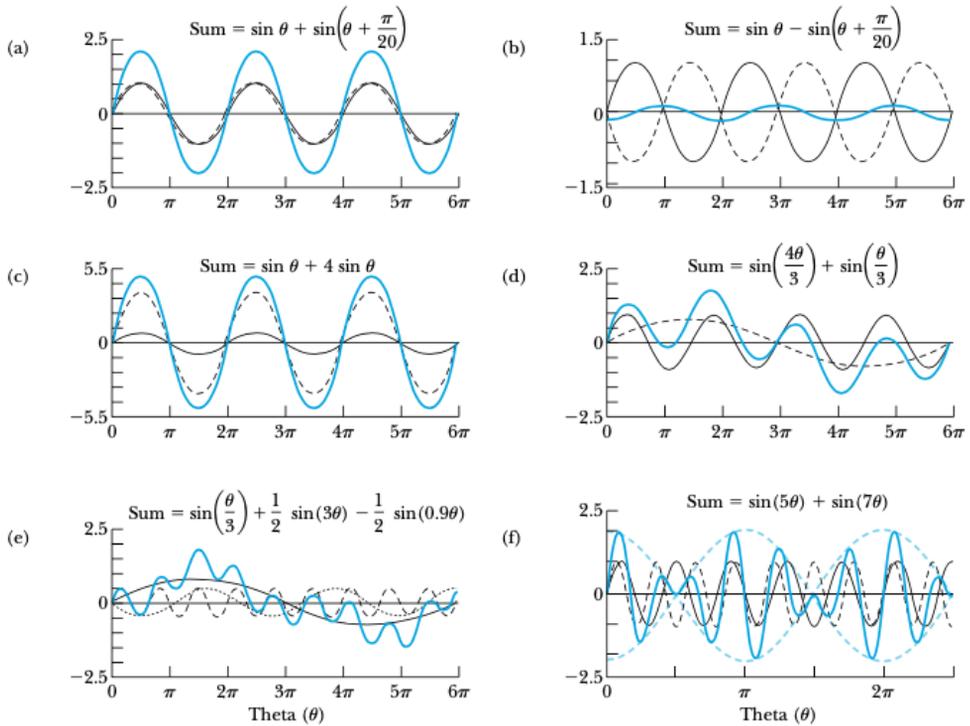
$$\psi(x, t) = A \cos \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} \right) \right] \quad 3.99$$

Persamaan 3.95 hingga 3.99 adalah bentuk gelombang tunggal. Jika terdapat lebih dari satu gelombang pada suatu area maka gelombang-gelombang ini akan saling berpadu atau berinterferensi yang kemudian disebut **superposisi gelombang**. Jika gelombang yang berpadu ini terdiri dari banyak sekali gelombang, maka akan terbentuk **paket gelombang** (Gambar 3.37)

Persamaan umum gelombang juga bisa dinyatakan dalam:

$$\psi(x, t) = A \sin \left[2\pi \left(\frac{x}{\lambda} - \frac{t}{T} + \phi \right) \right]$$

Gambar 3. 37 Superposisi Gelombang



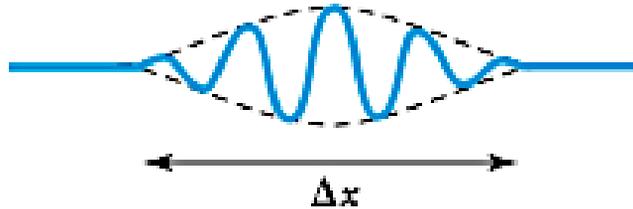
Sumber: Thornton, 2013

Paket gelombang yang paling jelas pada gambar 33.7 (f), karena merupakan perpaduan gelombang – gelombang yang berbeda amplitudo namun memiliki frekuensi hampir sama. Garis biru pada Gambar 3.37 menunjukkan amplitudo superposisi. Garis biru putus – putus menunjukkan “bungkus” atau selubung dari paket gelombang. Selubung paket gelombang ini sebenarnya menunjukkan perpindahan maksimum yang dihasilkan dari kombinasi gelombang-gelombang ini.

Satu paket gelombang dicirikan dengan amplitude superposisi yang tidak nol pada daerah yang kecil Δx (Gambar 3.38). Hasil perpaduan

gelombang tampak terlokalisasi atau berkumpul pada daerah Δx , artinya seluruh energi dan/materi hanya ditemukan pada daerah Δx .

Gambar 3. 38 Ilustrasi satu paket gelombang pada daerah Δx



Sumber: Thornton, 2013

1. Superposisi Dua Gelombang

Jika disederhakan, superposisi dari dua gelombang dinyatakan dengan

$$\begin{aligned} \psi(x, t) &= \psi_1(x, t) + \psi_2(x, t) \\ &= A \cos(k_1 x - \omega_1 t) + A \cos(k_2 x - \omega_2 t) \quad 3.100 \\ &= 2A \cos \left[\frac{1}{2} (k_1 - k_2) x - \frac{1}{2} (\omega_1 - \omega_2) t \right] \end{aligned}$$

$$\psi(x, t) = 2A \cos \left(\frac{\Delta k}{2} x - \frac{\Delta \omega}{2} t \right) \cos(k_{av} x - \omega_{av} t) \quad 3.101$$

Dengan

$$\Delta k = k_1 - k_2 \text{ dan } \Delta \omega = \omega_1 - \omega_2$$

serta

$$k_{av} = \frac{k_1 + k_2}{2} \text{ dan } \omega_{av} = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2}$$

Jika kemudian kita tinjau satu paket gelombang pada daerah Δx (Gambar 3.38), maka kita dapat melihat bahwa dari ujung ke ujung berbeda fase sebesar π . Kenapa sebesar π ? Karena ujung ke ujung satu paket gelombang adalah simpul, jarak dua simpul terdekat adalah setengah panjang gelombang. Karena satu paket gelombang menunjukkan setengah panjang gelombang atau $\frac{1}{2} \lambda$, maka pada fase gelombang berlaku:

$$\frac{\Delta k}{2} x_2 - \frac{\Delta k}{2} x_1 = \pi \quad 3.102.a$$

$$\Delta k (x_2 - x_1) = 2\pi \quad 3.102.b$$

Atau

$$\Delta k \cdot \Delta x = 2\pi \quad 3.103$$

Hal yang sama juga berlaku pada frekuensi angular:

$$\Delta\omega \cdot \Delta t = 2\pi \quad 3.104$$

2. Superposisi Banyak Gelombang

Untuk dapat merumuskan superposisi gelombang pada pulsa atau paket gelombang, maka kita gunakan **transformasi Fourier** atau **deret Fourier**. Deret Fourier adalah metode matematika yang digunakan untuk menjumlahkan gelombang dengan jumlah yang banyak, seperti yang terdapat pada paket gelombang.

Penjumlahan paket gelombang ini melibatkan banyak kombinasi bilangan gelombang, frekuensi sudut, dan amplitude yang berbeda. Bentuk umum dari deret Fourier adalah perluasan dari persamaan 3.101, yang dinyatakan dengan:

$$\psi(x, t) = \sum_i A_i \cos(k_i x - \omega_i t) \quad 3.105$$

Untuk spektrum kontinu, persamaan 3.106 menjadi

$$\psi(x, t) = \int A(k) \cos(kx - \omega t) \quad 3.106$$

Persamaan 3.106 disebut sebagai **integral fourier**. Dengan A_i adalah amplitude dan A_k adalah amplitudo sebagai fungsi dari bilangan gelombang k . A_k merupakan fungsi distribusi amplitudo gelombang untuk setiap bilangan gelombang k atau juga disebut **fungsi distribusi spektral**.

Di sisi lain, fungsi cosinus yang mengikutinya ($\cos(kx - \omega t)$) merupakan fungsi basis bagi tiap gelombang individual. Persamaan 3.106 kemudian bisa kita perluas lagi, agar dapat mengakomodir bentuk cosinus dan sinus serta mengakomodir bilangan riil dan imajiner dalam bentuk bilangan kompleks sebagai berikut:

$$\psi(x, t) = \int A(k) e^{i(kx - \omega t)} dk \quad 3.107$$

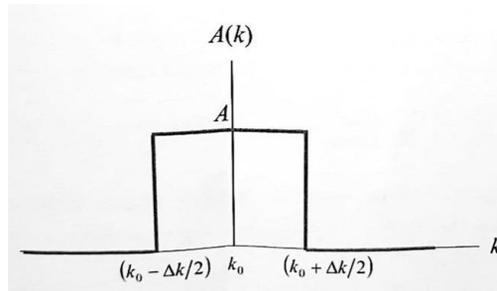
Terdapat dua jenis fungsi distribusi spectral, yaitu fungsi konstan dan fungsi Gaussian.

a. Fungsi Distribusi Konstan

Fungsi distribusi konstan dalam rentang tertentu (Gambar 3.39) dan dinyatakan dengan

$$A(k) = A \text{ untuk } \left(k_0 - \frac{\Delta k}{2}\right) \leq k \leq \left(k_0 + \frac{\Delta k}{2}\right) \quad 3.108$$

Gambar 3. 39 Ilustrasi fungsi distribusi spektral konstan dalam rentang $(k_0 - \frac{\Delta k}{2}) \leq k \leq (k_0 + \frac{\Delta k}{2})$



Sumber: Sutjahja, 2018

Pada saat $t = 0$, paket gelombang dinyatakan dengan

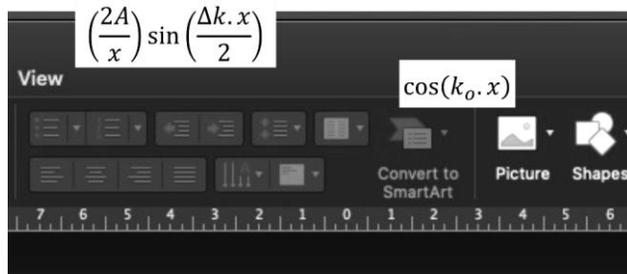
$$\psi(x, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k) \cos kx \, dk \quad 3.109$$

Pers 3.10 kemudian bisa kita detailkan dengan amplitudo mensubstitusi yang konstan (per. 3.108) dan memiliki batas dari $k_0 - \frac{\Delta k}{2}$ hingga $k_0 + \frac{\Delta k}{2}$, sehingga

$$\psi(x, 0) = A \int_{k_0 - \frac{\Delta k}{2}}^{k_0 + \frac{\Delta k}{2}} \cos kx \, dk = \frac{2A}{x} \left(\sin \frac{\Delta k}{2} x \right) (\cos k_0 x) \quad 3.110$$

Persamaan gelombang 3.110 bisa digambarkan pada Gambar 3.40 berikut

Gambar 3. 40 Ilustrasi paket gelombang pada $t = 0$ untuk fungsi distribusi spektral tetap



Sumber: Sutjahja, 2018

b. Fungsi Distribusi Gaussian

Fungsi distribusi normal atau fungsi distribusi spektral Gaussian dinyatakan dengan persamaan:

$$A(k) = e^{\frac{-\sigma^2(k-k_0)^2}{2}} \quad 3.111$$

Dengan σ (baca: sigma) adalah suatu konstanta. Fungsi distribusi spektral Gaussian merupakan fungsi eksponensial negatif dengan argument kuadratik, bentuk kurva Gaussian digambarkan seperti lonceng dan tingginya sama dengan 1 (Gambar 3.41).

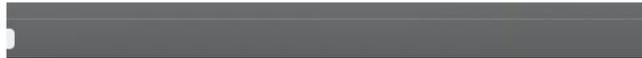
Fungsi gelombang dalam fungsi distribusi spectra Gaussian ini menggunakan bentuk persamaan 3.107, sehingga paket gelombang pada $t = 0$ adalah:

$$\psi(x, 0) = \int_{-\infty}^{\infty} A(k)e^{ikx} dk = \int_{-\infty}^{\infty} \left(e^{\frac{-\sigma^2(k-k_0)^2}{2}} \right) (e^{ikx}) dk \quad 3.112$$

Integral 3.112 dapat disederhanakan dengan mendefinisikan

$$k' = k - k_0$$

Gambar 3. 41 Fungsi Distribusi Spektral Gaussian



* See John D. McGervey, *Introduction to Modern Physics*, Ch

$A(k)$



Sumber: Thornton, 2013

Sehingga menjadi

$$\begin{aligned} \psi(x, 0) &= e^{ik_0x} \int_{-\infty}^{\infty} \left(e^{\frac{-\sigma^2(k')^2}{2} + ik'x} \right) dk' \\ &= e^{(ik_0x) + \left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} \int_{-\infty}^{\infty} \left(e^{\left(\frac{-\sigma^2}{2}\right)\left(k' - \frac{ix}{\sigma^2}\right)^2} \right) dk' \end{aligned} \quad 3.112$$

Jika kita definisikan parameter baru

$$q = k' - \frac{ix}{\sigma^2}$$

Maka persamaan 3.112 menjadi

$$\begin{aligned} \psi(x, 0) &= e^{(ik_0x)\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} \int_{-\infty}^{\infty} \left(e^{\left(\frac{-\sigma^2}{2}\right)q^2} \right) dq \\ &= \sqrt{\frac{2\pi}{\sigma^2}} \left(e^{(ik_0x)\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} \right) \end{aligned} \quad 3.113.a$$

Atau

$$\psi(x, 0) = \sqrt{\frac{2\pi}{\sigma^2}} \cdot e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)} \cdot e^{(ik_0x)} \quad 3.113.b$$

Persamaan 3.113. b menunjukkan bahwa “selubung” paket gelombang dinyatakan oleh fungsi (Gambar 3.42)

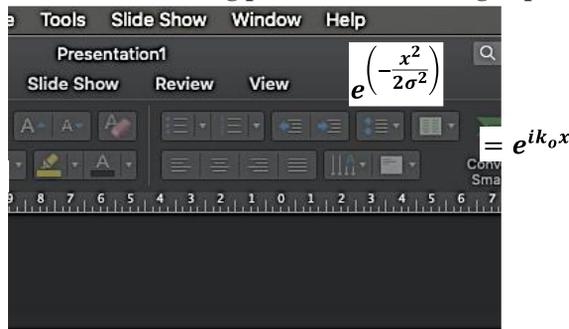
$$e^{\left(\frac{-x^2}{2\sigma^2}\right)}$$

Dan osilasi harmonic dari gelombang resultan yang merupakan fungsi masing-masing gelombang individual dinyatakan dengan

$$e^{(ik_0x)} = \cos k_0x$$

Ilustrasi paket gelombang sesuai fungsi distribusi gaussian diberikan pada Gambar 3.42.

Gambar 3. 42 Ilustrasi Paket Gelombang pada t = 0 untuk fungsi spektral Gaussian



$$\psi(x)$$

Sumber: Thornton, 2013

Pada fungsi distribusi spektral Gaussian, fungsi $A(k)$ pada persamaan 3.111 dan fungsi gelombang $\psi(x, 0)$ (persamaan 3.113) dapat diperoleh ukuran lebarnya. Ukuran lebar dari fungsi distribusi normal adalah setengah lebar dari kuadrat mutlak dari nilai maksimumnya ketika amplitudonya adalah sekitar $e^{-\frac{1}{2}} \approx 0,6$. Secara matematis kita tuliskan pernyataan diatas sebagai:

$$[A(k_o \pm \Delta k)]^2 = e^{-\frac{1}{2}} \approx 0,6 \quad 3.114$$

Dengan fungsi distribusi $A(k)$ diberikan oleh pers 3.111 yaitu

$$A(k) = e^{\frac{-\sigma^2(k-k_o)^2}{2}}$$

Subtitusikan $k = (k_o \pm \Delta k)$ dari pers 3.114

$$A(k_o \pm \Delta k) = e^{\frac{-\sigma^2((k_o \pm \Delta k) - k_o)^2}{2}} = \exp\left(\frac{-\sigma^2 \Delta k^2}{2}\right)$$

Dan hasil kuadratnya

$$\begin{aligned} [A(k_o \pm \Delta k)]^2 &= \exp\left(\frac{-\sigma^2 \Delta k^2}{2}\right)^2 \\ &= \exp(-\sigma^2 \Delta k^2)^{\frac{1}{2} \cdot 2} \\ e^{-\frac{1}{2}} &= \exp(-\sigma^2 \Delta k^2) \end{aligned} \quad 3.115$$

Maka

$$\sigma^2 \Delta k^2 = \frac{1}{2}$$

Sehingga kemudian menghasilkan

$$\Delta k = \frac{1}{\sigma\sqrt{2}} \quad 3.116$$

Di sisi lain dengan meninjau persamaan gelombangnya (pers 3.113)

$$\begin{aligned} |\psi(\pm \Delta x, 0)|^2 &= \left(\sqrt{\frac{2\pi}{\sigma^2}} \cdot e^{\left(\frac{-\Delta x^2}{2\sigma^2}\right)} \right)^2 = \left(\frac{2\pi}{\sigma^2}\right) \exp\left(\frac{-\Delta x^2}{2\sigma^2}\right)^2 \\ e^{-\frac{1}{2}} &= \left(\frac{2\pi}{\sigma^2}\right) \exp\left(\frac{-\Delta x^2}{\sigma^2}\right)^{\frac{1}{2} \cdot 2} = \left(\frac{2\pi}{\sigma^2}\right) \exp\left(\frac{-\Delta x^2}{\sigma^2}\right) \end{aligned}$$

Maka diperoleh

$$\frac{-\Delta x^2}{\sigma^2} = -\frac{1}{2}$$

$$\Delta x = \frac{1}{\sqrt{2}} \sigma \quad 3.117$$

Dari persamaan 3.116 tentang perubahan bilangan gelombang dan persamaan 3.117 tentang perubahan posisi gelombang, maka keduanya memenuhi hubungan

$$\boxed{\Delta k \Delta x = \frac{1}{2}} \quad 3.118$$

Dengan metode serupa, kita juga memperoleh hubungan perubahan frekuensi sudut $\Delta \omega$ dan interval waktu Δt adalah

$$\boxed{\Delta \omega \Delta t = \frac{1}{2}} \quad 3.119$$

Catatan:

Fungsi gelombang dengan distribusi spektral Gaussian menghasilkan nilai terkecil dari $\Delta k \Delta x$ dan $\Delta \omega \Delta t$, inilah sebabnya Heisenberg menggunakannya sebagai landasan dari prinsip ketidakpastian Heisenberg.

3. Gerak dari sebuah paket gelombang

Superposisi dari banyak gelombang akan menghasilkan **pulsa** atau paket gelombang. Paket gelombang merambat dengan kecepatan grup (u_{grup}) yang dinyatakan dengan

$$u_{grup} = \frac{\Delta \omega}{\Delta k} \quad 3.120$$

Atau dalam bentuk yang lebih umum, kecepatan grup paket gelombang menjadi

$$u_{grup} = \frac{d\omega}{dk} \quad 3.121$$

Karena paket gelombang terdiri dari banyak gelombang, ingat untuk melakukan derivasi pada titik tengah paket gelombang ($k = k_0$).

Untuk panjang gelombang de Broglie kita telah mendefinisikan energi dan momentum gelombang sebagai berikut

Energi gelombang

$$E = h\nu = \hbar(2\pi\nu) = \hbar\omega \quad 3.122$$

Dan Momentum gelombang:

$$p = \frac{h}{\lambda} = \hbar \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right) = \hbar k \quad 3.123$$

Dengan mengalikan pembagi dan pembilang pada persamaan 3.121 dengan konstanta Planck tereduksi (\hbar) baca: h bar, dengan

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} = 6,58 \times 10^{-16} eV.s \quad 3.124$$

Maka kita peroleh kecepatan grup

$$u_{grup} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d\hbar\omega}{d\hbar k} = \frac{dE}{dp} \quad 3.125$$

Kemudian gunakan relasi energi relativistic:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Maka derivasinya diperoleh

$$2E dE = 2pc^2 dp$$

Atau

$$u_{grup} = \frac{dE}{dp} = \frac{pc^2}{E} \quad 3.126$$

Persamaan 3.126 adalah persamaan kecepatan paket gelombang. Kemudian bagaimana kecepatan partikel dalam gelombang?

Kecepatan fase dari sebuah gelombang diberikan oleh

$$u_{fase} = \lambda v = \frac{\omega}{k} \quad 3.127$$

Maka, hubungan kecepatan grup dengan kecepatan fase adalah

$$u_{grup} = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d}{dk} (u_{fase} \cdot k) = u_{fase} + k \frac{du_{fase}}{dk} \quad 3.128$$

Dari persamaan ini terlihat bahwa kecepatan grup bisa lebih besar dari kecepatan fase.

F. Ketidakpastian Heisenberg

Dari superposisi gelombang, kita dapat mengetahui bahwa gelombang terlokalisasi pada daerah kecil Δx pada paket gelombang. Prinsip ketidakpastian menggambarkan hubungan antara variabel konjugasi seperti posisi dan momentum atau energi dan waktu. Fungsi distribusi Gaussian berupa $\Delta k \Delta x = \frac{1}{2}$ dan $\Delta \omega \Delta t = \frac{1}{2}$ kemudian dimanfaatkan oleh Heisenberg untuk menjelaskan lebih detail tentang perilaku dualisme gelombang -partikel pada paket gelombang.

1. Ketidakpastian Momentum-Posisi

Dari persamaan $\Delta k \Delta x = \frac{1}{2}$, Heisenberg menggunakan perubahan panjang gelombang untuk menjelaskan bagaimana gelombang melebar saar radiasi.

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}$$

Bilangan gelombang (k) ini berhubungan dengan momentum (p) paket gelombang.

$$k = \frac{2\pi}{h/p} = p \frac{2\pi}{h} = \frac{p}{\hbar} \quad 3.129$$

Dan

$$\Delta k = \frac{\Delta p}{\hbar} \quad 3.129$$

Maka

$$\begin{aligned} \Delta k \Delta x &= \frac{1}{2} \\ \frac{\Delta p}{\hbar} \Delta x &= \frac{1}{2} \\ \Delta p \Delta x &= \frac{\hbar}{2} \end{aligned} \quad 3.130$$

Dengan tinjauan yang lebih akurat tentang gelombang de Broglie sebagai paket gelombang, kita memperoleh hubungan:

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{\hbar}{2} \quad 3.131$$

Persamaan 3.131 adalah **persamaan ketidakpastian momentum-posisi Heisenberg** yang dipresentasikan pada tahun 1927, dari gagasan ini ia memperoleh Nobel Fisika pada tahun 1932. Tanda lebih dari sama dengan menunjukkan bahwa $\frac{\hbar}{2}$ adalah nilai minimum dari ketidakpastian Heisenberg. Dari persamaan ini Heisenberg memperkuat kembali prinsip komplementer Bohr.

Heisenberg menjelaskan bahwa antara perubahan momentum berbanding terbalik dengan perubahan posisi. Artinya jika kita ingin memperoleh posisi yang akurat, maka nilai Δx harus sangat kecil (mendekati nol) yang hanya dicapai jika interval perubahan momentum Δp sangat besar.

$$\Delta \lambda = \infty \text{ dan } \Delta f = \infty$$

Ketika kita ingin memperoleh posisi partikel secara akurat, maka pengukuran momentum menjadi tidak akurat, dan sebaliknya. Saat kita mengukur posisi partikel (foton) dengan presisi, maka kita juga akan memperoleh hasil pengukuran momentum yang tidak presisi, dan sebaliknya. Oleh itu, Heisenberg menyimpulkan bahwa tidak mungkin dapat mengukur posisi partikel dan momentum paket gelombang secara bersama.

Jika sebuah partikel telah diketahui posisinya disepanjang ℓ pada sumbu x. Kemudian kita dapat mengetahui posisi partikel ada pada jarak

$$\Delta x \leq \frac{\ell}{2}$$

Prinsip ketidakpastian memberikan:

$$\begin{aligned} \Delta p &\geq \frac{\hbar}{2\Delta x} \\ \Delta p &\geq \frac{\hbar}{\ell} \end{aligned} \tag{3.132}$$

Karena $p = mu$ dan $\Delta p = m\Delta u$ dengan u adalah kecepatan, maka

$$\Delta u = \frac{\Delta p}{m} \geq \frac{\hbar}{m\ell} \tag{3.133}$$

Hasil di persamaan 3.133 menunjukkan dampak yang besar. Jika sebuah partikel memiliki energi yang rendah, maka gunakan energi kinetik non relativistic. Energi kinetik dapat diperoleh jika momentum telah diketahui

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Dari persamaan 3,132 menunjukkan bahwa untuk memperoleh momentum yang akurat, maka p harus minimum, setidaknya sedikit lebih besar dari perubahan momentumnya.

$$p_{min} \geq \Delta p$$

Maka besar energi kinetiknya

$$K = \frac{p_{min}^2}{2m} \geq \Delta p \geq \frac{\hbar^2}{2m\ell^2} \tag{3.134}$$

Persamaan 3.134 juga bisa dipahami bahwa jika kita telah mengetahui dengan tepat posisi suatu partikel, maka energi kinetiknya yang diamati adalah nol. Ketika suatu gelombang elektromagnetik dipandang sebagai partikel, posisi foton dapat ditentukan setiap saat dengan ketelitian sangat tinggi. Artinya ketidakpastian dalam posisi waktu dalam nol atau

$$\Delta x = 0 \text{ dan } \Delta t = 0$$

2. Ketidakpastian Energi-Waktu

Bentuk lain dari ketidakpastian Heisenberg adalah ketidakpastian Energi-waktu yang diturunkan dari

$$\Delta\omega\Delta t = \frac{1}{2}$$

Dengan menghubungkan frekuensi sudut dengan energi, maka diperoleh

$$E = h\nu = h\frac{\omega}{2\pi} = \hbar\omega \quad 3.135$$

Atau

$$\Delta E = \hbar\Delta\omega$$

Sehingga

$$\begin{aligned} \Delta\omega\Delta t &= \frac{1}{2} \\ \frac{\Delta E}{\hbar}\Delta t &= \frac{1}{2} \\ \Delta E\Delta t &= \frac{\hbar}{2} \end{aligned} \quad 3.136$$

Yang kemudian didetailkan menjadi

$$\Delta E\Delta t \geq \frac{\hbar}{2} \quad 3.137$$

$\frac{\hbar}{2}$ adalah nilai minimum dari ketidakpastian Heisenberg. Persamaan 3.137 adalah **ketidakpastian energi-waktu** Heisenberg.

Contoh kasus – Ketidakpastian Momentum-Posisi

Hitung nilai energi kinetik minimum dari sebuah electron yang terlokalisasi dalam jari - jari nukleus $6 \times 10^{-15}\text{m}$.

Strategi :

Karena yang diketahui interval posisi, maka gunakan ketidakpastian Momentum-posisi

Penyelesaian

$$\begin{aligned} \Delta p &\geq \frac{\hbar}{2\Delta x} \geq \frac{6,58 \times 10^{-16} \text{eV} \cdot \text{s}}{2(6 \times 10^{-15} \text{m})} \\ &\geq \left(5,48 \times 10^{-2} \text{eV} \cdot \frac{\text{s}}{\text{m}}\right) \frac{\left(3 \times \frac{10^8 \text{m}}{\text{s}}\right)}{c} \end{aligned}$$

$$\geq 1,64 \times 10^7 \text{ eV}/c$$

Karena kita asumsikan bahwa momentum minimum sama dengan ketidakpastian momentum, maka

$$p \approx \Delta p \geq 1,64 \times 10^7 \text{ eV}/c$$

Catatan: karena $E \gg E_0$ maka diperlukan perhitungan relativistic.

Untuk menentukan energi kinetik, gunakan hubungan energi relativistic

$$\begin{aligned} E^2 &= (pc)^2 + E_0^2 \\ &= [(1,64 \times 10^7 \text{ eV}/c)c]^2 + (0,511 \text{ MeV})^2 \\ E &= 16,4 \text{ MeV} \end{aligned}$$

$$K = E - E_0 = 16,4 \text{ MeV} - 0,511 \text{ MeV} = 15,9 \text{ MeV}$$

Contoh kasus – Ketidakpastian Energi -Waktu

Sebuah atom terhambur dalam waktu yang singkat ($\sim 10^{-8} \text{ s}$) sebelum mengemisikan sebuah foton dan kembali lagi ke keadaan dasar. “Waktu hidup” dari keadaan tereksitasi dapat dinyatakan sebagai ketidakpastian waktu Δt berhubungan dengan energi keadaan. Energi keadaan menunjukkan “lebar energi” menunjukkan ketidakpastian ΔE . Hitung:

- karakteristik “lebar energi” pada keadaan tersebut
- rasio ketidakpastian dari frekuensi $\frac{\Delta f}{f}$ jika panjang gelombang foton 300 nm.

Strategi

- kita gunakan prinsip ketidakpastian energi-waktu untuk menentukan lebar energi ΔE karena kita telah mengetahui Δt .
- kita dapat menentukan Δf dari ketidakpastian energi dengan menggunakan $E = h\nu$; $\Delta E = h\Delta\nu$. Kita dapat menentukan frekuensi dari $f = c/\lambda$

Penyelesaian

- Ketidakpastian energi-waktu

$$\begin{aligned} \Delta E \Delta t &\geq \frac{\hbar}{2} \\ \Delta E &\geq \frac{6,58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}}{2(10^{-8})} = 3,3 \times 10^{-8} \text{ eV} \end{aligned}$$

Energi eksitasi atom ini cukup rendah. Untuk eksitasi dari nucleus, waktu hidupnya bisa lebih rendah dari 10^{-20} s dengan lebar energi hingga 100 keV .

(b) Frekuensi diperoleh:

$$f = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \times 10^8 \frac{m}{s}}{300 \times 10^{-9} m} = 10^{15} \text{ Hz}$$

Ketidakpastian Δf diberikan oleh

$$\Delta f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{3,3 \times 10^{-8} eV}{4,136 \times 10^{-15} eV \cdot s} = 8 \times 10^6 \text{ Hz}$$

Rasio ketidakpastian dari frekuensi $\frac{\Delta f}{f}$ adalah

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{8 \times 10^6 \text{ Hz}}{10^{15} \text{ Hz}} = 8 \times 10^{-9}$$

Rangkuman

1. Max Von Laue menggagas bahwa sinar x terhambur dari materi, yang kemudian bisa digunakan untuk menyelidiki perilaku sinar x dan struktur kristal.
2. Bragg menggunakan difraksi sinar X untuk menentukan jarak antar kisi, menggunakan hukum Bragg:

$$2d \sin \theta = n\lambda$$

3. De Broglie merumuskan konsep bahwa partikel juga berperilaku sebagai gelombang. Persamaan panjang gelombang De Broglie dinyatakan dengan

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

4. Davisson-Germer serta Thomson melakukan eksperimen yang membuktikan bahwa hamburan electron berenergi rendah yang telah melewati kristal dapat mengalami difraksi (bersifat sebagai gelombang).
5. Partikel – partikel dapat berperilaku sebagai gelombang dengan memperlakukannya sebagai paket gelombang. Paket gelombang adalah superposisi dari banyak gelombang, yang merupakan kombinasi dari banyak amplitudo dan frekuensi berbeda. Kecepatan grup menggambarkan kelajuan partikel-partikel dalam paket gelombang.
6. Niels Bohr menggagas prinsip komplementer yang menyatakan bahwa tidak mungkin mendeskripsikan kuantitas fisika partikel dan gelombang

secara simultan. Dalam dualisme gelombang, kita harus memilih perilaku mana yang diukur.

7. Partikel menunjukkan sifat sebagai gelombang dengan panjang gelombang sebagai fungsi posisi dan waktu $\psi(x, t)$.
8. Weiner Heisenberg menyatakan prinsip ketidakpastian Heisenberg yang konsisten dengan prinsip komplementer Niels Bohr. Ada 2 jenis ketidakpastian Heisenberg:

- a. Ketidakpastian momentum – posisi

$$\Delta p \Delta x = \frac{\hbar}{2}$$

- b. Ketidakpastian energi-waktu

$$\Delta E \Delta t = \frac{\hbar}{2}$$

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Anggap electron-elektron dipercepat melalui beda tegangan 10.000 V dalam sebuah tabung gambar TV. Panjang gelombang maksimum yang dapat dihasilkan ketika electron-elektron menumbuk fosforus adalah
(1 Å = 10⁻¹⁰m)
A. 0,62 Å
B. 1,24 Å
C. 5,0 Å
D. 12,4 Å
E. 100,9 Å
2. Pernyataan yang benar tentang electron adalah
A. tidak dapat mengionisasi udara
B. dapat menyebabkan pola interferensi
C. bergerak hanya pada kelajuan cahaya
D. tidak memiliki massa ketika diam
E. tidak memiliki massa ketika bergerak
3. Sebuah electron bermassa 9,1 x 10⁻³¹ kg bergerak dengan kelajuan 10⁷ m/s. Panjang gelombang de Broglie dari electron tersebut adalah
A. 7,3 x 10⁻¹¹ m
B. 7,6 x 10⁻¹¹ m
C. 8,4 x 10⁻¹¹ m
D. 7,3 x 10⁻¹² m
E. 7,6 x 10⁻¹¹ m

4. Sebuah partikel alfa dipercepat pada kelajuan u dalam akselerator partikel oleh beda potensial 800 V. Supaya kelajuan partikel alfa menjadi tiga kali lipat, maka diperlukan beda potensial
- A. 7200 V
B. 4800 V
C. 4100 V
D. 2400 V
E. 1700 V
5. Sebuah electron bergerak dari keadaan diam melawati beda potensial 400 V. panjang gelombang de Broglie dari electron tersebut adalah
- A. 0,0614 nm
B. 0,614 nm
C. 6,14 nm
D. 614 nm
E. 6140 nm
6. Massa partikel A empat kali massa partikel B dan kecepatan A sepertiga kali kecepatan B. Perbandingan panjang gelombang partikel A dan panjang gelombang partikel B adalah
- A. 1:4
B. 1:12
C. 3:4
D. 4:1
E. 4:3
7. Perhatikan pernyataan berikut
- (1) Elektron dapat menembus inti atom
 - (2) Tenaga atom seluruhnya diberikan ke partikel
 - (3) Foton musnah setelah menumbuk materi
 - (4) Sinar X dapat berinteraksi dengan electron
- Pernyataan yang sesuai dengan efek Compton adalah ...
- A. semua benar
B. (1) (2) dan (3)
C. (1) dan (3)
D. (2) dan (4)
E. (4)
8. Sebuah kelereng dengan massa a bergerak dengan kecepatan b . Jika konstanta planck adalah h , panjang gelombang de Broglie dari kelereng tersebut adalah ...
- A. $a b / h$
B. $h / (a b)$
C. $a h / b$
D. $a / b h$
E. $b / a h$

9. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Prinsip ketidakpastian Heisenberg berlaku pada electron tapi tidak pada proton
- (2) Prinsip ketidakpastian Heisenberg berlaku pada semua partikel bermuatan, misalnya electron
- (3) Sebuah partikel dengan umur yang berhingga akan memiliki massa yang ditentukan secara tepat

Pernyataan yang benar adalah

- A. (1) dan (3)
- B. (2) dan (3)
- C. (3) saja
- D. (2) saja
- E. Semua benar

10. Partikel – partikel berikut memiliki energi kinetik sama besar. Urutkan mulai dari panjang gelombang yang rendah ke tinggi. Gunakan panjang gelombang de Broglie!

- A. foton, electron, proton
- B. Foton, proton, electron
- C. Elektron, proton, foton
- D. Proton, foton, electron
- E. Proton, electron, dan foton

Essay

- 1. Sinar X terhambur dari sebuah kristal zat padat. Terang orde 1 dari puncak difraksinya ada pada $\theta = 12,5^\circ$. Pada sudut berapakah terang orde kedua dan ketiga?

Jawab

2. Sinar X dengan panjang gelombang 0,207 nm terhambur dari NaCl. Berapa sudut yang dibentuk antara terang orde pertama dengan terang orde kedua? Asumsikan berkas-berkas sinar X jatuh parallel satu sama lain pada permukaan bahan.

Jawab

3. Sebuah electron awalnya dalam keadaan diam kemudian bergerak dipercepat pada beda potensial 3,00 kV. Berapa besar panjang gelombang, momentum, energi kinetik dan total energi electron?

Jawab

4. Davisson – Germer menghasilkan eksperimen dengan menembakkan nikel dengan electron – electron. Pada sudut berapakah akan diperoleh maksimum difraksi pada energi electron 48 eV dan 64 eV?

Jawab

5. Sebuah paket gelombang mendeskripsikan sebuah partikel bergerak dengan nomentum p . Jika hubungan energi secara relativistic diberikan oleh

$$E^2 = p^2 c^2 + E_0^2$$

Tunjukkan bahwa kecepatan grup adalah βc dan kecepatan fase diberikan oleh c/β dimana $\beta = \frac{v}{c}$.

Jawab

6. Sebuah proton terikat dalam nucleus uranium yang berjari-jari $7,2 \times 10^{-15} m$. Tentukan energi kinetik minimum proton berdasarkan prinsip ketidakpastian jika proton terikat dalam sebuah kotak dengan panjang sisi setara diameter nuklir.

Jawab

7. Sebuah mikroskop electron di sesain untuk mengamati objek hingga 0,14 nm. Berapa energi electron yang diperlukan pada alat ini!

Jawab

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 80% , berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Burns, Marshall L. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*.
America: United States of America.
Halidday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh.
Amerika: Penerbit: Erlangga.

- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling Edisi 2 Cetakan 1*. Bandung: ITBPress
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.
- Wiyatmo. (2003). *Fisika Modern*. Yogyakarta: Penerbit Pustaka Pelajar.

Penutup

Rangkuman

Teori kuantum menjelaskan tentang dualisme gelombang dan materi.

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.

Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.

Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). Modern Physics - Fifth Edition. In *Modern Physics Sixth Edition*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

MODUL 4

MEKANIKA GELOMBANG

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang di mekanika gelombang. Disini kita akan mempelajari tentang bagaimana persamaan chrodinger menjelaskan fenomena gelombang.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).
- 3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).
- 4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

- 1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)
- 2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

- 1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)
- 2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)
- 3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)
- 4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RAHANG	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu mengaplikasikan persamaan Schrodinger dan interpretasinya dalam bilangan kuantum
Sikap	a) Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b) Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c) Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu membuat presentasi untuk menjelaskan persamaan schrodinger dan interpretasinya

3. Prasyarat Kompetensi

- d) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.
- e) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- f) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang pembelajaran fisika khususnya

pada materi Fisika Modern yang diajarkan di kelas XII SMA. juga bermanfaat bagi mahasiswa untuk mempelajari modul berikutnya.

5. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Persamaan Schrodinger dan Interpretasinya	A. Fungsi Gelombang sebagai probabilitas B. Partikel dalam kotak C. Persamaan Gelombang Schrodinger D. keadaan Stasioner
Interpretasi Fungsi Gelombang	A. Harga Ekspektasi dan Operator B. Partikel Bebas C. Keberhasilan dan Kelemahan Persamaan Schrodinger D. Potensial Tangga atau Potensial Undak

Kegiatan Pembelajaran 1 PERSAMAAN SCHRODINGER DAN INTERPRETASINYA

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
<p>Mahasiswa dapat menjelaskan, menginterpretasi dan menerapkan persamaan Schrodinger dalam pemecahan kasus.</p>	<p>(1) Mahasiswa bisa menjelaskan perbedaan persamaan gelombang dengan fungsi gelombang, serta menjelaskan syarat-syarat dari fungsi gelombang.</p> <p>(2) Mahasiswa bisa menjelaskan fungsi gelombang sebagai probabilitas dan menjelaskan normalisasi pada fungsi gelombang.</p> <p>(3) Mahasiswa bisa menjelaskan penurunan dari kuantisasi energi pada partikel dalam kotak.</p> <p>(4) Mahasiswa dapat menurunkan persamaan Schrodinger bergantung waktu untuk 1 dimensi dan 3 dimensi.</p> <p>(5) Mahasiswa dapat menurunkan persamaan Schrodinger tidak bergantung waktu untuk 1 dimensi</p> <p>(6) Mahasiswa dapat melakukan konversi dari mekanika klasik ke dalam mekanika kuantum dalam pemecahan kasus yang berkaitan dengan gelombang - partikel</p>

Uraian Materi

A. Fungsi Gelombang Sebagai Probabilitas

Jika kita telah mengetahui bahwa gelombang berperilaku sebagai partikel dan materi berperilaku sebagai gelombang, maka jika diberikan deskripsi dari sebuah gelombang dapatkah kita memprediksikan dimana letak materi (partikelnya)? Untuk menjawabnya, kita perlu mengingat kembali bahwa gelombang terlokalisasi dalam sebuah **gelombang paket**. Untuk itu dalam fisika kuantum kita akan menggunakan **fungsi gelombang** $\psi(x, t)$.

1. Persamaan Gelombang dan Fungsi Gelombang

Mekanika kuantum menjelaskan dualisme gelombang dan partikel menggunakan fungsi gelombang. Apa bedanya persamaan gelombang dengan fungsi gelombang? Pada kegiatan pembelajaran sebelumnya kita telah mendeskripsikan **persamaan gelombang** dengan

$$\psi(x, t) = A \sin(kx - \omega t) \quad 4.1$$

ψ (baca : Psi), dengan A adalah amplitudo, $k = \frac{2\pi}{\lambda}$ adalah bilangan gelombang dan $\omega = 2\pi\nu$ adalah frekuensi sudut. Persamaan 4.1 belum dapat ditentukan apakah merupakan fungsi gelombang yang benar. Tetapan-tetapan A, k dan ω belum menampilkan satu besaran fisis khusus.

Untuk memodifikasi persamaan gelombang (pers 4.1) menjadi fungsi gelombang, maka konstanta gelombang k dan frekuensi angular ω kemudian dinyatakan dengan momentum. Dari $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, panjang gelombang de Broglie dan \hbar adalah $h/2\pi$ maka bilangan gelombang k dapat dinyatakan dalam momentum partikel p sebagai

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi p}{h} = \frac{p}{\hbar} \quad 4.2$$

Frekuensi angular berhubungan dengan energi kinetik partikel yang dinyatakan dengan

$$E = h\nu = \hbar\omega \quad 4.3$$

Hubungan energi kinetik dengan momentum pada suatu partikel diberikan oleh

$$E = \frac{p^2}{2m} = \hbar\omega \quad 4.4$$

atau

$$\omega = \frac{p^2}{2m\hbar} \quad 4.5$$

Maka dengan mensubstitusikan bilangan gelombang k (pers 4.2) dengan frekuensi angular ω (pers 4.5) kedalam persamaan 4.1 kita peroleh

$$\psi(x, t) = A \sin\left(\frac{p}{\hbar}x - \frac{p^2}{2m\hbar}t\right) \quad 4.6$$

Pers. 4.6 ini adalah salah satu **fungsi gelombang**. Dikatakan sebagai fungsi gelombang karena fungsi didalam sinus sudah dinyatakan dalam satu besaran. Fungsi gelombang selain dalam momentum, juga bisa kita nyatakan dalam energi, posisi, gaya, massa, dan besaran lain yang sesuai.

Fungsi gelombang di Pers. 4.6 juga adalah penyelesaian **persamaan diferensial parsial dari gelombang**, yang salah satu bentuk nya adalah

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad 4.7$$

Sesuai persamaan 4.7, kita mencari nilai α dengan menurunkan persamaan diferensial orde duanya masing – masing sebagai fungsi waktu dan fungsi posisi.

a) diferensial orde dua terhadap waktu , diperoleh

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = A \left(\frac{p^2}{2m\hbar} \right) \cos \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \quad 4.8.a$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = -A \left(\frac{p^2}{2m\hbar} \right)^2 \sin \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \quad 4.8.b$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} = \left(\frac{p^2}{2m\hbar} \right)^2 \psi \quad 4.8.c$$

b) diferensial orde dua terhadap posisi , diperoleh

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = A \left(\frac{p}{\hbar} \right) \cos \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \quad 4.9.a$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -A \left(\frac{p}{\hbar} \right)^2 \sin \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \quad 4.9.b$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \left(\frac{p}{\hbar} \right)^2 \psi \quad 4.9.c$$

Persamaan 4.8.c dan 4.9.c kemudian sisubtitusikan ke persamaan 4.7, sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2} &= \alpha \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \\ \left(\frac{p^2}{2m\hbar} \right)^2 \psi &= \alpha \left(\frac{p}{\hbar} \right)^2 \psi \\ \alpha &= \frac{p^2}{4m^2} \end{aligned} \quad 4.10$$

Kita telah memperoleh α dari persamaan diferensial orde dua dari gelombang, tapi variabel momentum p adalah variabel yang berubah seiring waktu, sehingga perlu dikonversi kedalam bentuk yang memiliki nilai tetap, yaitu massa. Sehingga kita akan mencoba bentuk persamaan orde diferensial dua yang baru :

$$\boxed{\frac{\partial \psi}{\partial t} = \gamma \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}} \quad 4.11$$

Karena nilai $\frac{\partial \psi}{\partial t}$ sudah diperoleh di persamaan 4.8.a dan $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}$ sudah diperoleh di persamaan 4.9.b, maka

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial t} &= \gamma \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \\ A \left(\frac{p^2}{2m\hbar} \right) \left[\cos \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] &= \gamma \left(-A \left(\frac{p}{\hbar} \right)^2 \right) \left[\sin \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] \\ \left(\frac{1}{2m\hbar} \right) \left[\cos \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] &= \gamma \left(-1 \left(\frac{1}{\hbar} \right)^2 \right) \left[\sin \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] \end{aligned} \quad 4.12$$

Agar kedua persamaan di ruas kiri dan kanan dapat kita selesaikan lebih mudah, maka fungsi gelombang 4.6 kita nyatakan dalam bilangan kompleks

$$\psi(x, t) = A \sin \left[i \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] \quad 4.13$$

Kemudian pers 4.12 juga dapat kita nyatakan dengan

$$i \left(\frac{1}{2m\hbar} \right) \left[i \left[\cos \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] \right] = \gamma \left(\frac{1}{\hbar} \right)^2 \left[i \left[\sin \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] \right]$$

Sehingga ruas yang dinyatakan dalam fungsi cos dan fungsi sin adalah setara.

$$i \left(\frac{1}{2m\hbar} \right) \left[i \left[\cos \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] \right] = \gamma \left(\frac{1}{\hbar} \right)^2 \left[i \left[\sin \left(\frac{p}{\hbar} x - \frac{p^2}{2m\hbar} t \right) \right] \right]$$

Dan diperoleh

$$\begin{aligned} i \left(\frac{1}{2m\hbar} \right) &= \gamma \left(\frac{1}{\hbar} \right)^2 \\ \gamma &= i \frac{\hbar}{2m} \end{aligned}$$

Sehingga **fungsi gelombang satu dimensi** bisa kita nyatakan dengan

$$\boxed{\frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(i \frac{\hbar}{2m} \right) \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2}} \quad 4.14$$

Atau dalam **fungsi gelombang 3 dimensi** menjadi

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(i \frac{\hbar}{2m} \right) \nabla^2 \psi \quad 4.15.a$$

Dengan ∇ (baca del) dan ∇^2 adalah persamaan laplace yang memenuhi

$$\nabla^2 \psi = \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2}$$

Persamaan 4.15 adalah **fungsi gelombang kompleks** , yang juga dapat ditulis ulang dalam bentuk

$$\boxed{i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{-(\hbar \nabla)^2}{2m} \psi} \quad 4.15.b$$

2. Gelombang Sebagai Probabilitas

Jika pada persamaan gelombang elektromagnetik kita nyatakan persamaan gelombang sebagai fungsi medan listrik E dan / atau medan magnet B, maka dalam menyatakan fungsi gelombang materi secara kuantum dinyatakan dalam **probabilitas**. Umumnya fungsi gelombang dinyatakan sebagai sebuah fungsi kompleks yang bergantung pada ruang dan waktu $\psi(x, y, z, t)$.

a. Densitas Probabilitas

Densitas probabilitas adalah besaran yang menunjukkan besar probabilitas (kemungkinan) untuk menemukan sebuah partikel pada ruang dengan volume tertentu pada waktu tertentu. Densitas probabilitas dinyatakan sebagai kuadrat mutlak dari fungsi gelombang.

$$\text{Densitas probabilitas} = |\psi|^2 \quad 4.16$$

b. Probabilitas

Probabilitas menemukan sebuah partikel dinyatakan sebagai perkalian fungsi gelombang ψ dengan fungsi gelombang konjugat ψ^* nya. Ingat bahwa fungsi gelombang dinyatakan dengan bilangan kompleks.

$$P(x) dx = \psi^* \psi dx = |\psi(x, t)|^2 dx \quad 4.17$$

Dengan dx adalah dimensi panjang di ruang yang kita amati. $P(x) dx$ menunjukkan probabilitas kita dapat mengamati sebuah electron pada interval $x + dx$ pada waktu tertentu.

Probabilitas partikel ditemukan antara x_1 dan x_2 diberikan oleh

$$P = \int_{x_1}^{x_2} \psi^* \psi dx$$

Untuk sebuah ruang, kemungkinan menemukan partikel dalam satu volume dinyatakan dengan

$$P(x, y, z) dx dy dz = \int_v |\psi(x, y, zt)|^2 dx dy dz \quad 4.18$$

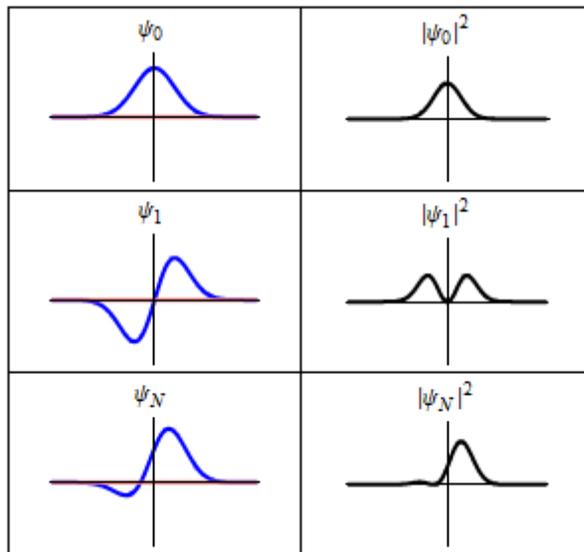
c. Normalisasi

Karena electron harus memiliki probabilitas yang terkonsentrasi di satu daerah ketika diobservasi pada layar, maka kemudian kita lakukan **normalisasi** pada fungsi gelombang. Normalisasi dilakukan dengan melakukan integral pada seluruh ruang di x mulai dari $-\infty$ hingga ∞ . Persamaan normalisasi diberikan oleh :

$$\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx = \int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1 \quad 4.19.a$$

Persamaan 4.18 yaitu normalisasi fungsi gelombang dilakukan pada seluruh ruang dan bukan elemen ruang.

Gambar 4. 1 Fungsi Gelombang



Sumber: https://id.wikipedia.org/wiki/Fungsi_gelombang

Fungsi gelombang harus dinormalisasai agar probabilitas partikel pada posisi tertentu di sumbu x adalah nol.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \psi dx = 1 \quad 4.19.b$$

Max Born (Peraih Nobel Tahun 1954) adalah seorang yang pertama kali menjelaskan interpretasi tentang interpretasi probabilitas fungsi gelombang di tahun 1926. Fungsi gelombang dan fungsi distribusi probabilitas diberikan oleh Gambar 4.1. Kiri : bagian riil (biru) dan bagian imajiner (kanan) dari fungsi gelombang. Kanan : distribusi probabilitas dalam menemukan partikel dengan fungsi gelombang pada posisi tertentu. Kedua baris diatas adalah contoh keadaan stasioner. Baris bawah adalah contoh keadaan non stasioner.

Contoh Kasus Normalisasi dan Probabilitas Gelombang

Jika sebuah paket gelombang memenuhi fungsi gelombang

$$\psi = Ae^{-\alpha|x|}$$

Dengan α adalah konstanta yang ditetapkan setelah normalisasi. Normalisasikan fungsi ini dan tentukan probabilitas partikel untuk berada antara 0 dan $1/\alpha$ dan antara $1/\alpha$ dan $2/\alpha$!

Penyelesaian :

Fungsi gelombang ini disketsakan pada Gambar. Kita gunakan persamaan 4.19 b untuk menormalisasi gelombang ψ . Kemudian kita akan mencari probabilitasnya menggunakan limit oada integrasi persamaan 4.17

Solusi:

Untuk mencari persaman gelombang ternormalisasi kita gunakan persamaan 4.19 b.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^* \psi dx = 1$$

$$\int_{-\infty}^{\infty} A^2 e^{-2\alpha|x|} dx = 1$$

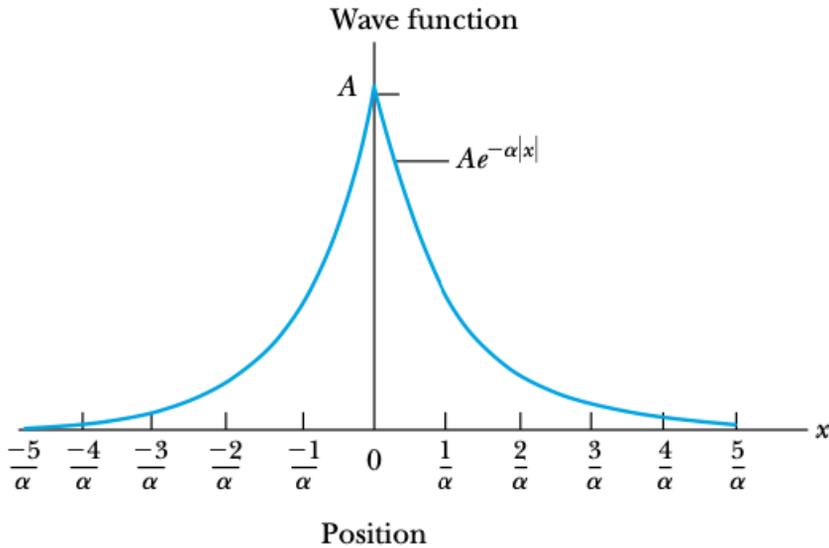
Karena fungsi ini simetris terhadap $x = 0$ maka kita dapat melakukan integrasi dari 0 ke ∞ , kalikan dua dan gunakan nilai mutlak pada nilai x ($|x|$)

$$\begin{aligned}
 2 \int_0^{\infty} A^2 e^{-2\alpha|x|} dx &= 1 = \frac{2A^2}{-2\alpha} e^{-2\alpha x} \Big|_0^{\infty} \\
 &= 1 = \frac{-A^2}{\alpha} (0 - 1) \\
 &= 1 = \frac{A^2}{\alpha}
 \end{aligned}$$

Maka $A = \sqrt{\alpha}$ dan persamaan gelombang ternormalisasi menjadi

$$\psi = \sqrt{\alpha} e^{-\alpha|x|}$$

Gambar 4. 2 Fungsi Gelombang $Ae^{-\alpha|x|}$ Diplot sebagai fungsi terhadap x



Sumber: Thornton, 2013

Untuk mencari probabilitas, kita gunakan persamaan 4.17

a) probabilitas menemukan partikel antara 0 dan $1/\alpha$, kita tidak menggunakan tanda mutlak dari x, karena kita gunakan x positif .

$$P = \int_0^{1/\alpha} \alpha e^{-2\alpha x} dx$$

Hasil integrasinya adalah

$$P = \frac{\alpha}{-2\alpha} e^{-2\alpha x} \Big|_0^{1/\alpha} = -\frac{1}{2} (e^{-2} - 1) \approx 0,432$$

b) probabilitas menemukan partikel antara $1/\alpha$ dan $2/\alpha$ adalah

$$P = \int_{1/\alpha}^{2/\alpha} \alpha e^{-2\alpha x} dx$$

Hasilnya

$$P = \frac{\alpha}{-2\alpha} e^{-2\alpha x} \Big|_{1/\alpha}^{2/\alpha} = -\frac{1}{2} (e^{-4} - e^{-2}) \approx 0,059$$

Probabilitas menemukan partikel lebih besar antara 0 dan $1/\alpha$ dibandingkan $1/\alpha$ dan $2/\alpha$ (sesuai Gambar 4.2).

3. Sifat Fungsi Gelombang yang Valid

Selain persamaan Gelombang Schrodinger, ada beberapa sifat khusus yang harus dipenuhi sebagai fungsi gelombang. Syarat- syarat ini kemudian disebut sebagai **Syarat batas**. Syarat- syarat ini adalah

- (1) Untuk menghindari probabilitas tak hingga, maka ψ haruslah berhingga dimanapun posisinya.
- (2) Untuk menghindari nilai berlipat dari probabilitas, maka ψ harus bernilai tunggal.
- (3) Untuk potensial berhingga, maka ψ dan $\frac{\partial\psi}{\partial x}$ harus kontinu. Agar bentuk derivasi orde dua dari persamaan gelombang harus bernilai tunggal. (ada pengecualian pada potensial tak hingga)
- (4) Untuk menormalisasi fungsi gelombang, maka ψ harus mendekati nol ketika x mendekati tak hingga ($\pm\infty$).

Penyelesaian ψ yang tidak memenuhi syarat diatas tidak memenuhi kriteria sebagai fungsi gelombang.

B. Partikel Dalam Kotak

Sekarang perhitungkan apabila sebuah partikel bermassa m berada di dalam kotak dengan panjang sisi ℓ . Dari prinsip ketidakpastian, kita sudah menghitung besar energi kinetiknya (persamaan 3.134), yaitu

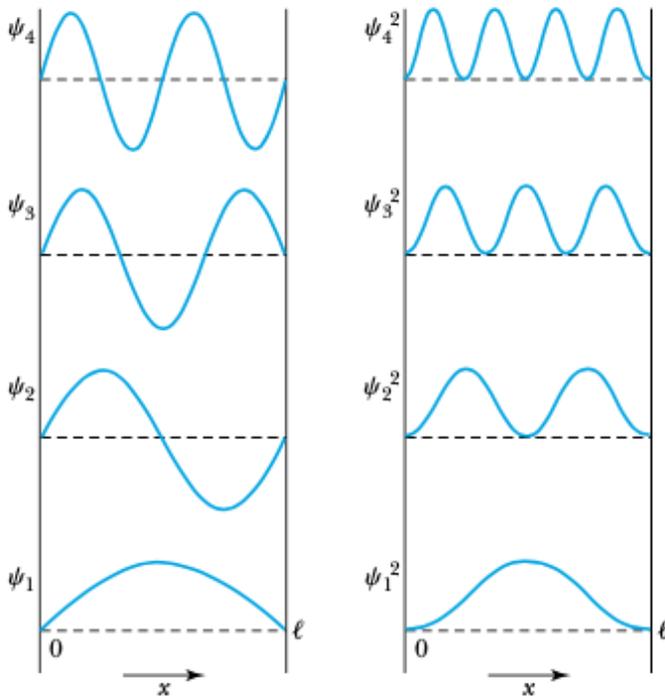
$$K \geq \frac{\hbar^2}{2m\ell^2}$$

Kini mari kita tentukan energi yang mungkin dari partikel ini, dengan menggunakan perilaku gelombang dari partikel dalam kotak ini.

Pertama-tama, yang daerah yang paling mungkin dalam menemukan partikel adalah pada energi terendah dengan waktu tertentu, katakanlah $t = 0$ sehingga $\psi(x, t) = \psi(x) = ?$. Untuk menentukan probabilitas lokasi, kita memperlakukan partikel sebagai gelombang sinusoidal. Partikel dianggap tidak dapat keluar dari kotak, sehingga tidak ada gelombang diluar kotak atau dengan kata lain, probabilitas menemukan partikel diluar kotak adalah nol. Fungsi gelombang harus kontinu dan distribusi probabilitas hanya memiliki satu nilai pada setiap titik dalam kotak.

Jika kita meninjau dalam satu dimensi saja maka kelipatan setengah panjang gelombanglah $\left(\frac{\lambda}{2}\right)$ yang sesuai di memenuhi di dalam kotak (Gambar 4.2).

Gambar 4. 3 Gelombang yang mungkin di dalam kotak 1 dimensi



Sumber: Thornton 2013

Kelipatan setengah dari panjang gelombang ini artinya

$$n \frac{\lambda}{2} = \ell \qquad \lambda_n = \frac{2\ell}{n} \qquad n = 1,2,3, \dots \qquad 4.20$$

Karena panjang gelombang telah kita kuantisasi, maka bentuk gelombang akan memenuhi $\sin\left(n\frac{\pi x}{\ell}\right)$. Pada keadaan non relativistic dan kita asumsikan tidak ada energi potensial, maka energi E dari partikel dinyatakan dengan

$$E = K = \frac{p^2}{2m} = \frac{1}{2m} \left(\frac{h}{\lambda}\right)^2$$

Sehingga

$$E = \frac{h^2}{2m} \left(\frac{n}{2\ell}\right)^2 = n^2 \frac{h^2}{8m(\ell^2)} \quad n = 1,2,3, \dots \quad 4.21a$$

Atau

$$E = n^2 \frac{(2\pi\hbar)^2}{8m\ell} = n^2 \frac{(\pi\hbar)^2}{2m(\ell^2)} \quad n = 1,2,3, \dots \quad 4.21.b$$

Hasil dari persamaan 4.21. b berbeda dengan hasil di persamaan 3.134, yaitu sebesar factor $(1/\pi^2)$. Tingkat energi yang akurat diperoleh dari persman 4.21, karena menggunakan fungsi gelombang, sedangkan pada persamaan 3.134 menggunakan pendekatan bahwa besar momentum dianggap mendekati nilai lebar momentum. Dengan demikian persamaan 4.21 adalah persamaan tangga- tingkat energi partikel dalam kotak yang lebih akurat.

Probabilitas energi dapat ditentukan dalam bentuk tingkat – tingkat energi (E_n). Energi terendah bukan E_0 karena $E_0 = 0$, karena $n = 0$ menunjukkan $\psi_0 = 0$. Jika $\psi_0 = 0$, maka probabilitasnya

$$P_0(x) dx = \int_v |\psi(x)|^2 dx = 0$$

Dengan demikian, energi terendah adalah $E_1 = \frac{(\pi\hbar)^2}{2m\ell}$, dengan probabilitas

$$P_1(x) dx = \int_v |\psi_1(x)|^2 dx$$

Setiap tingkat energi dinyatakan dengan fungsi gelombang dan probabilitas masing masing (Gambar 4.2), dengan E_1 adalah tingkat energi terendah. Kemungkinan menemukan partikel yang paling besar ada pada tingkat energi terendah dan pada tengah kotak (bagian puncak setengah gelombang).

$$P(n) dx \propto \int_v |\psi_n(x)|^2 dx$$

Atau

$$P(n) \propto \int_v |\psi_n(x)|^2 \quad 4.22$$

Partikel dalam kotak ini adalah aplikasi atau penerapan pertama dari “Teori kuantum” atau “mekanika kuantum”. Kuantisasi energi partikel dalam kotak ini timbul dari bagaimana cacah setengah gelombang memenuhi kotak dan kemudian dihubungkan dengan probabilitasnya. Kuantisasi energi partikel dalam kotak ini kemudian digunakan oleh Bohr untuk menjelaskan model atomnya dan berguna saat kita mempelajari fisika elementer.

Contoh Soal- Partikel dalam Kotak

Tentukan kuantisasi energi dari sebuah electron dalam 1 dimensi yang panjangnya 0,1 n.

Strategi

Kita gunakan kuantisasi energi pada sebuah partikel sesuai persamaan 4.21.b

Penyelesaian

$$E = n^2 \frac{(h)^2}{8m\ell} = n^2 \frac{(1239,8 \text{ eV} \cdot \text{nm})^2}{8(0,511 \times 10^6 \text{ eV})(0,1 \text{ nm})^2}$$

$$E_n = n^2(38 \text{ eV})$$

Maka tiga tingkat energi pertama diberikan oleh $E_1 = 38 \text{ eV}$, $E_2 = 152 \text{ eV}$ dan $E_3 = 342 \text{ eV}$.

C Persamaan Gelombang Schrodinger

Erwin Schrodinger, seorang fisikawan asal Jerman menghadiri sebuah seminar di Universitas Zurich pada tahun 1925. Pada saat Peter Debye menggagas bahwa teori gelombang de Broglie seharusnya bisa dinyatakan dalam persamaan gelombang. Schrodinger kemudian menurunkan persamaan ini dari konsep geometri dan dan konsep – konsep gelombang optic yang ia ketahui, yang kemudian disebut sebagai **Persamaan Gelombang Schrodinger**.

1. Persamaan Schrodinger

Schrodinger menurunkan persamaan gelombangnya dari fungsi difrensial gelombang pada persamaan 4.15.

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \frac{-(\hbar \nabla)^2}{2m} \psi$$

Dengan $i = \sqrt{-1}$, i adalah bilangan imajiner. \hbar adalah $\hbar = h/2\pi$, \hbar adalah konstanta Planck tereduksi dan m adalah massa partikel. Persamaan ini ini analog (memiliki bentuk yang serupa) dengan persamaan energi non relativistic, yaitu

$$E = \frac{p^2}{2m} \tag{4.16}$$

Fungsi gelombang dan persamaan gelombang merupakan fungsi kompleks, artinya fungsi gelombang ini tidak dapat diukur secara langsung, tapi melalui fungsi ini ada suatu besaran yang diukur. Besaran apa saja? Bisa besaran posisi, momentum, kecepatan, energi, dan lainnya yang berkaitan dengan mekanika.

Schrodinger menggunakan bentuk persamaan 4.15 sebagai dasar untuk mendalilkan bahwa transisi dari deskripsi mekanika klasik ke deskripsi mekanika kuantum dapat dilakukan dengan metode sebagai berikut:

- (1) Tuliskan persamaan gerak klasik dalam bentuk energi total E , momentum p , dan energi potensial V .
- (2) Ganti persamaan tersebut dalam bentuk persamaan operator dan mengganti E dengan operator $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$ dan p dengan operator $\hbar \nabla$
- (3) Kenakan operator tersebut pada fungsi gelombang ψ dan selesaikan persamaan gelombang yang diperoleh.
- (4) Persamaan gerak klasik partikel dalam suatu potensial adalah

$$E = K + U$$

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r) \tag{4.17}$$

Langkah (1) dan (4) memberikan:

$$E = \frac{p^2}{2m} + V(r)$$

Kemudian langkah (2) memberikan

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(r) \tag{4.18}$$

Langkah (3) menghasilkan

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(r)\psi \quad 4.19.a$$

Persamaan 4.19 adalah bentuk **persamaan Schrodinger bergantung waktu**. Atau jika dirincikan menjadi

$$i\hbar \frac{\partial \psi(x, y, z, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + V(r)\psi(x, y, z, t) \quad 4.19.b$$

Persamaan ini digunakan untuk mendeskripsikan atom hidrogen dengan merincikan energi potensial diberikan oleh hukum Coulomb:

$$V(r) = \frac{ke^2}{r} \quad 4.20$$

persamaan 4.20 disubstitusikan ke persamaan hingga memperoleh 4.19

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + \frac{ke^2}{r} \psi \quad 4.21$$

ini adalah persamaan Schrodinger atom hidrogen dan hasilnya sangat cocok dengan hasil eksperimen.

Contoh Kasus – Persamaan Schrodinger pada Paket Gelombang

Persamaan gelombang haruslah linear agar menghasilkan paket gelombang. Buktikan bahwa persamaan gelombang Schrodinger (pers 4.19) adalah linear dan memenuhi fungsi gelombang

$$\psi(x, t) = a \psi_1(x, t) + b \psi_2(x, t)$$

Dengan a dan b adalah konstanta, ψ_1 dan ψ_2 mendeskripsikan dua persamaan yang saling memenuhi persamaan Schrodinger (Pers 4.19)

Strategi:

Turunkan persamaan diatas kemudian masukkan pada persamaan Schrodinger (Pers 4.19), jika persamaannya sesuai, maka persamaan gelombangnya linear.

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} = a \frac{\partial \psi_1}{\partial t} + b \frac{\partial \psi_2}{\partial t} \quad 4.22$$

$$\frac{\partial \psi}{\partial x} = a \frac{\partial \psi_1}{\partial x} + b \frac{\partial \psi_2}{\partial x}$$

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = a \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} \quad 4.23$$

Masukkan pers. 4.22 dan 4.23 ke persamaan 4.19

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(r)\psi \quad 4.19.a$$

$$i\hbar \left(a \frac{\partial \psi_1}{\partial t} + b \frac{\partial \psi_2}{\partial t} \right) = -\frac{\hbar^2}{2m} \left(a \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} + b \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} \right) + V(r)(a\psi_1 - b\psi_2) \quad 4.24$$

Persamaan 4.24 kemudian dapat disusun ulang dalam bentuk

$$a \left(i\hbar \frac{\partial \psi_1}{\partial t} + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi_1}{\partial x^2} - V(r)\psi_1 \right) = b \left(i\hbar \frac{\partial \psi_2}{\partial t} + \frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi_2}{\partial x^2} + V(r)\psi_2 \right) \quad 4.25$$

Karena ψ_1 dan ψ_2 mendeskripsikan dua persamaan yang saling memenuhi persamaan Schrodinger, maka hasil persamaan di dalam kurung adalah nol dan ψ menjadi solusi dalam persamaan ini.

2. Persamaan Schrodinger Tak Bergantung Waktu

Fungsi gelombang $\psi(x, t)$ dapat dituliskan sebagai hasil kali fungsi gelombang terhadap posisi $\varphi(x)$ dan fungsi gelombang terhadap waktu $\phi(t)$.

$$\psi(x, t) = \varphi(x)\phi(t) \quad 4.26$$

persamaan ini disubstitusikan ke persamaan 4.19

$$i\hbar \left(\varphi(x) \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} \right) = -\frac{\hbar^2}{2m} (\phi(t)) \left(\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} \right) + (V(x)\varphi(x)\phi(t)) \quad 4.27$$

Kita bagi kedua ruas dengan $\varphi(x)\phi(t)$ sehingga diperoleh

$$i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\varphi(x)} \left(\frac{\partial^2 \varphi(x)}{\partial x^2} \right) + V(x) \quad 4.28$$

Persamaan 4.28 dapat kita bagi dua, ruas kiri hanya bergantung waktu dan ruas kanan hanya bergantung posisi atau koordinat ruang. Karena keduanya sama maka haruslah sama dengan suatu ketetapan misalnya B .

Kita integralkan persamaan ruas kiri saja untuk menentukan nilai B

$$i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} = B \quad 4.29.a$$

$$i\hbar \int \frac{1}{\phi(t)} \partial \phi(t) = \int B \partial t \quad 4.29.b$$

Hasil integral persamaan 4.29.b kita peroleh

$$i\hbar \ln(\phi(t)) = Bt + C$$

Dengan C adalah konstanta Integrasi yang bisa kita pilih adalah nol, sehingga

$$\ln(\phi(t)) = \frac{Bt}{i\hbar} \quad 4.30$$

Dari persamaan 4.30 kita dapat menyatakan $\phi(t)$ menjadi

$$\phi(t) = e^{\frac{Bt}{i\hbar}} = e^{\frac{-iBt}{\hbar}} \quad 4.31$$

Jika persamaan 4.31 ini kita bandingkan dengan fungsi gelombang partikel bebas yang bergantung waktu, yaitu

$$e^{-i\omega t}$$

Maka ternyata persamaa ini analog dan kita bisa menentukan nilai B , yaitu

$$B = \hbar\omega = E \quad 4.32$$

Setelah diperoleh nilai B kita dapat menulis ulang persamaan 4.29 a menjadi

$$i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} = E \quad 4.29.a$$

Dan persamaan 4.28 kita tulis ulang menjadi

$$\begin{aligned} i\hbar \frac{1}{\phi(t)} \frac{\partial \phi(t)}{\partial t} &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\phi(x)} \left(\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2} \right) + V(x) \\ E &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{1}{\phi(x)} \left(\frac{\partial^2 \phi(x)}{\partial x^2} \right) + V(x) \\ E \psi(x) &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi \\ E \psi(x) &= -\frac{(\hbar\nabla)^2}{2m} \psi(x) + V(x) \psi(x) \end{aligned} \quad 4.33$$

Persamaan 4.33 adalah **Persamaan Schrodinger Tidak Bergantung Waktu**, artinya persamaan Schrodinger yang sama pada waktu kapanpun.

D. Keadaan Stasioner

Fungsi 4.31 juga dapat kita tuliskan dalam bentuk

$$\phi(t) = e^{i\omega t} \quad 4.34$$

Fungsi gelombang juga bisa dinyatakan

$$\psi(x, t) = \phi(x) e^{i\omega t} \quad 4.35$$

Menyatakan kerapatan probabilitas, kita nyatakan dengan

$$\begin{aligned} \psi^* \psi &= \phi(x) (e^{i\omega t})(e^{-i\omega t}) \\ \psi^* \psi &= \phi(x) \end{aligned} \quad 4.36$$

Persamaan 4.36 menunjukkan bahwa distribusi probabilitas adalah konstan terhadap waktu. Distribusi probabilitas yang konstan ini dalam fisika dasar tampak pada gelombang berdiri, sedangkan pada mekanika kuantum keadaan ini disebut sebagai **keadaan stasioner**.

Contoh Kasus- Keadaan Stasioner

Sebuah logam memiliki electron bebas dan potensialnya nol. Bagaimana bentuk matematis dari fungsi gelombang electron bebas pada keadaan ini?

Strategi :

Gunakan persamaan 4.33 yaitu persamaan gelombang Schrodinger tak bergantung waktu Kemudian masukkan $V(x) = 0$ karena potensialnya nol. Baru kemudian kita selesaikan diferensialnya.

Penyelesaian:

$$E \psi(x) = -\frac{(\hbar\nabla)^2}{2m} \psi(x)$$

Kemudian kita modifikasi menjadi bentuk persamaan diferensial

$$\begin{aligned} &= -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} \\ \frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} &= -\left(\frac{2m}{\hbar^2}\right) E \psi(x) = -k^2 \psi(x) \end{aligned}$$

Persamaan

$$\frac{\partial^2 \psi(x)}{\partial x^2} = -k^2 \psi(x)$$

Adalah salah satu bentuk persamaan gelombang pada sudut osilasi kecil untuk pendulum atau gerak harmonic sederhana. Jika energi E positif maka k^2 riil dan persamaan gelombang adalah persamaan sinusoidal

$$\psi(x) = A \sin(kx) + B \cos(kx)$$

Jika energi bernilai negatif, maka k^2 imajiner, dan persamaan gelombang yang sesuai adalah persamaan dalam eksponensial

$$\psi(x) = C e^{(ikx)}$$

Rangkuman

1. Deskripsi sebuah materi sebagai gelombang dengan menggunakan fungsi gelombang, yang secara umum dinyatakan dalam nilai kompleks dan merupakan dinyatakan dalam fungsi ruang dan fungsi waktu.
2. Probabilitas menemukan atau mengobservasi sebuah partikel pada x dan $x + dx$ dan pada waktu t adalah

$$P(x) dx = \psi^* \psi dx$$

3. Tingkat energi akan muncul secara alamiah ketika ada sebuah partikel dalam kotak memiliki sifat sebagai gelombang.
4. Werner Heisenberg dan Erwin Schrodinger mengembangkan teori kuantum modern tahun 1920.

5. Persamaan gelombang Schrodinger bergantung waktu untuk fungsi gelombang $\psi(x, t)$ dinyatakan dengan

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x)\psi$$

6. Persamaan gelombang Schrodinger tak bergantung waktu (hanya bergantung posisi) dalam satu dimensi dari $\psi(x)$, dimana $\psi(x, t) = \psi(x)e^{-\frac{iEt}{\hbar}}$ adalah

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi = E\psi(x)$$

7. Fungsi gelombang ψ dan $\frac{\partial \psi}{\partial x}$ akan menunjukkan perilaku kuantisasi.
 8. Syarat fungsi gelombang adalah: Fungsi gelombang $\psi(x, t)$ harus berhingga, memiliki nilai tunggal dan kontinu; $\frac{\partial \psi}{\partial x}$ harus kontinu
 9. Fungsi gelombang harus ternormalisasi untuk menentukan probabilitasnya.

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Persamaan gelombang Schrodinger bergantung waktu diberikan oleh

A. $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x)\psi$

B. $E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$

C. $\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$

D. $\int |\psi(x, t)|^2 dx = \psi^* \psi dx$

E. $|\psi|^2$

2. Persamaan gelombang Schrodinger tak bergantung waktu diberikan oleh

A. $i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x)\psi$

B.
$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$$

C.
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$$

D.
$$\int |\psi(x, t)|^2 dx = \psi^* \psi dx$$

E. $|\psi|^2$

3. Persamaan probabilitas menemukan partikel dari suatu fungsi gelombang diberikan oleh

A.
$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x)\psi$$

B.
$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$$

C.
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$$

D.
$$\int |\psi(x, t)|^2 dx = \psi^* \psi dx$$

E. $|\psi|^2$

4. Persamaan yang menunjukkan fungsi normalisasi adalah ...

A.
$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V(x)\psi$$

B.
$$E\psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(x)\psi$$

C.
$$\int_{-\infty}^{\infty} |\psi(x, t)|^2 dx = 1$$

D.
$$\int |\psi(x, t)|^2 dx = \psi^* \psi dx$$

E. $|\psi|^2$

5. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Fungsi gelombang $\psi(x, t)$ harus berhingga
- (2) Fungsi gelombang $\psi(x, t)$ memiliki nilai tunggal
- (3) Fungsi gelombang $\psi(x, t)$ kontinu;
- (4) $\frac{\partial \psi}{\partial x}$ harus kontinu

Yang merupakan syarat batas fungsi gelombang adalah

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. semua benar

6. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Diturunkan dari prinsip- prinsip mekanika kuantum
- (2) Merupakan persamaan diferensial
- (3) $\frac{d\psi}{dx} = 0$
- (4) Mendeskripsikan panjang gelombang de Broglie dalam bentuk persamaan gelombang

Yang sesuai dengan persamaan gelombang Schrodinger adalah

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. semua benar

7. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Merupakan operator Laplacian
- (2) Merupakan operator Curl
- (3) didefinisikan dengan $\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$
- (4) didefinisikan dengan $\frac{\partial}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial z}$

Pernyataan yang sesuai dengan operator ∇^2 adalah

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. semua benar

8. Total probabilitas menemukan partikel dalam ruang adalah sebesar ...

- A. 1
- B. tidak terhingga
- C. merupakan kuadrat amplitudo
- D. 0 (nol)
- E. nilai kompleks

9. Jika sebuah partikel diamati berperilaku sebagai gelombang dengan fungsi gelombang

$$\psi(x) = A \exp\left(-\frac{x^2}{a^2}\right)$$

Dimana A adalah konstanta positif. Besar momentum partikel dinyatakan dengan

- A. 0
 B. $\hbar k$
 C. $-\hbar k$
 D. \hbar / k
 E. k/\hbar

10. Diberikan sebuah fungsi gelombang pada waktu tertentu

$$\psi(x) = \frac{A}{\sqrt{x^2 + a^2}} e^{ikx}$$

a , k adalah konstanta bernilai positif. Nilai A jika $\psi(x)$ ternormalisasi adalah

- A. $\frac{a}{\pi}$
 B. $\sqrt{\frac{a}{\pi}}$
 C. $\sqrt{\frac{2a}{\pi}}$
 D. $\sqrt{\frac{\pi}{2a}}$
 E. $2 \pi a$

Essay

1. Buktikan bahwa fungsi gelombang $\psi(x, t) = e^{(ikx - \omega t)}$ memenuhi persamaan Schrodinger Bergantung Waktu (Pers 4.19.a).

Jawab:

2. Normalisasi Fungsi gelombang $\psi(x, t) = A \cdot r \cdot e^{-r/\alpha}$ pada daerah 0 hingga ∞ dengan A dan α adalah konstanta. Gunakan Appendix 3 dari buku Thornton untuk melihat tabel integral.

Jawab:

3. Kenapa kita dapat menggunakan energi kinetik nonrelativistic untuk mendeskripsikan struktur atom Hidrogen?

Jawab:

4. Jika fungsi gelombang dari sebuah partikel dalam 1 dimensi dengan lebar L adalah $\psi(x) = A \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right)$. Kita tahu bahwa partikel berada dalam titik tertentu dalam kotak itu. Tentukanlah berapa besar A!

Jawab:

5. Tuliskan persamaan fungsi gelombang ternormalisasi untuk tiga tingkat energi pertama dari sebuah partikel bermassa m dalam kotak 1 dimensi dengan lebar L . Asumsikan ketiga keadaan (tingkat energi) ini memiliki probabilitas yang sama besar!

Jawab:

Umpan balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 80% , berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.

- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling Edisi 2 Cetakan 1*. Bandung: ITBPress
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.
- https://careerendeavour.in/wp-content/uploads/2016/04/IIT-jam-modern-physics_.pdf

Kegiatan pembelajaran 2 INTERPRETASI FUNGSI GELOMBANG

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa dapat melakukan interpretasi pada Gelombang Schrodinger	<ul style="list-style-type: none"> a. Mahasiswa dapat menjelaskan hubungan harga ekspektasi, operasi fisis dan fungsi gelombang b. Mahasiswa dapat menurunkan operator fisis posisi, momentum dan energi dan menggunakannya untuk menentukan harga ekspektasi masing – masing c. Mahasiswa mengetahui hubungan operator, nilai eigen dan fungsi eigen d. Mahasiswa dapat mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk mendesripsikkan fungsi gelombang partikel bebas e. Mahasiswa dapat mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk mendesripsikkan fungsi gelombang pada partikel yang berada di potensial undak.

Uraian Materi

A. Harga Espektasi dan Operator

1. Harga ekspektasi

Fungsi gelombang dalam mekanika kuantum memegang peranan penting, sehingga fungsi gelombang harus dapat mendeskripsikan secara lengkap keadaan dari sistem. Keadaan sistem yang perlu diketahui dan dapat diukur ini disebut sebagai **observable fisis**, contohnya posisi, momentum linier dan energi. Tentu dalam pengamatan dilakukan pengukuran jamak (berulang) sehingga nilai observable fisis ini dinyatakan dalam **harga ekspektasi** atau harga rata- rata. Contohnya kita ingin mengamati nilai ekspektasi dari besaran fisis x , ditulis $\langle x \rangle$. Sesuai dengan prinsip pengukuran riil, maka harga ekspektasi selalu riil.

Untuk menentukan nilai ekspektasi (atau nilai rata-rata) ini, dimulai dengan sejumlah pengukuran diskrit kemudian diperluas untuk hasil pengukuran tak hingga. Misalkan sebuah partikel dibatasi bergerak 1D pada sumbu x . Jika dilakukan banyak pengukuran pada partikel, maka diperoleh probabilitas posisi partikel adalah x_1 dari sejumlah N_1 pengukuran, posisi partikel adalah x_2 dari sejumlah N_2 pengukuran, dan posisi partikel adalah x_i dari sejumlah N_i pengukuran. Nilai rata – rata dari posisi partikel yang dinotasikan dalam \bar{x} atau $\langle x \rangle$ adalah :

$$\bar{x} = \frac{N_1 x_1 + N_2 x_2 + \dots + N_i x_i}{N_1 + N_2 + \dots + N_i} = \frac{\sum_i N_i x_i}{\sum_i N_i} \quad 4.37$$

Selanjutnya perpindahan variabel dari diskrit menjadi kontinu dilakukan dengan menggunakan **fungsi probabilitas** $P(x)$ untuk mendapatkan partikel pada posisi (x) tertentu.

$$\bar{x} = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x P(x) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} P(x) dx} \quad 4.38$$

Dalam mekanika kuantum, digunakan **fungsi distribusi probabilitas** yang dinyatakan dengan

$$P(x) dx = \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx$$

Untuk menentukan nilai rata-rata atau ekspektasi dari suatu besaran fisis. Dengan demikian, nilai ekspektasi untuk posisi partikel diberikan oleh

$$\langle x \rangle = \frac{\int_{-\infty}^{\infty} x \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx}{\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx} \quad 4.39$$

Untuk fungsi gelombang partikel yang telah ternormalisasi (memenuhi persamaan 4.19.b) maka

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx = 1$$

Dan diperoleh nilai ekspektasi dari posisi partikel dalam bentuk yang lebih sederhana

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx \quad 4.40$$

Dengan demikian, nilai ekspektasi dari sembarang fungsi $g(x)$ untuk fungsi gelombang ternormalisasi $\psi(x, t)$ adalah

$$\langle g(x) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx \quad 4.41$$

2. Operator Fisis

Sebuah operator adalah operasi matematika yang mentransformasi suatu fungsi ke dalam fungsi lain, misalnya sebuah operator \hat{q} mentransformasi fungsi $f(x)$ menjadi $g(x)$. Notasi operator, fungsi $f(x)$ dan $g(x)$ kita tulis dalam notasi

$$\hat{q}f(x) = g(x)$$

Umumnya, operator yang digunakan adalah operator momentum, posisi dan energi.

a. Operator Posisi

Misalnya untuk kasus 1 dimensi, operator posisi \hat{x} adalah sama dengan posisi itu sendiri, jadi bisa dituliskan

$$x = \hat{x} \quad 4.42$$

Dan dengan demikian, nilai ekspektasi dari posisi partikel kita nyatakan

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \hat{x} [\psi(x, t)] dx = \int_{-\infty}^{\infty} x |\psi(x, t)|^2 dx \quad 4.43$$

b. Operator Momentum

operator momentum dapat diperoleh dari representasi persamaan gelombang umum:

$$\psi(x, t) = Ae^{i(kx - \omega t)} = A[\cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t)] \quad 4.44$$

Yang merupakan solusi dari persamaan diferensial gelombang 1 dimensi

$$\frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial x^2} = \frac{1}{u^2} \frac{\partial^2 \psi(x, t)}{\partial t^2} \quad 4.45$$

Dengan u adalah kecepatan fase. Persamaan 4.44 menunjukkan persamaan gelombang sinusoidal 1 D yang merambat pada sumbu x . Jika fungsi gelombang tersebut digunakan untuk representasi partikel, maka bilangan gelombang dinyatakan dalam momentum. Dengan melakukan operasi diferensial pertama dari persamaan ini terhadap variabel posisi x , maka dihasilkan, agar lebih mudah persamaa 4.44 kita nyatakan dalam fungsi eksponen terlebih dulu

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} (Ae^{i(kx-\omega t)}) \\
&= ik (Ae^{i(kx-\omega t)}) \\
&= ik \psi \\
\frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} &= i \frac{p}{\hbar} \psi
\end{aligned}
\tag{4.46}$$

Dengan kata lain momentum dapat dituliskan sebagai

$$p \psi(x, t) = -i\hbar \frac{\partial \psi(x, t)}{\partial x} \tag{4.47}$$

Yang menghasilkan definisi untuk operator momentum partikel, yaitu

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \tag{4.48}$$

Dengan demikian nilai ekspektasi momentum partikel adalah

$$\langle p \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \hat{p} [\psi(x, t)] \tag{4.49}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] -i\hbar \frac{\partial}{\partial x} [\psi(x, t)] dx$$

$$= -i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial x} [\psi(x, t)] dx \tag{4.50}$$

c. Operator Energi

selanjutnya, fungsi gelombang partikel bebas yang sama, operasi diferensialnya terhadap waktu menghasilkan

$$\begin{aligned}
\frac{\partial \psi}{\partial t} &= \frac{\partial}{\partial t} [Ae^{i(kx-\omega t)}] = -i\omega [Ae^{i(kx-\omega t)}] \\
\frac{\partial \psi}{\partial t} &= -i\omega \psi = -i \frac{E}{\hbar} \psi
\end{aligned}
\tag{4.51}$$

Maka energi partikel dapat dinyatakan dengan

$$E \psi(x, t) = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} \tag{4.52}$$

Dan **operator energi partikel** yang dikenal pula sebagai **operator Hamiltonian** didefinisikan sebagai

$$\hat{E} = \hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \tag{4.53}$$

Maka nilai ekspektasi energi dinyatakan dengan

$$\begin{aligned}
\langle E \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \hat{E} [\psi(x, t)] & 4.54 \\
&= \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] i\hbar \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)] \\
&= i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)] & 4.55
\end{aligned}$$

Contoh Kasus – Operator Momentum

Gunakan operator momentum dan operator energi untuk menghasilkan persamaan Schrodinger !

Strategi

Tentukan energi sebagai hasil penjumlahan energi kinetik (K) dengan energi potensial (U). Perlakuan yang kita gunakan adalah pada keadaan non relativistic. Karena kita akan menuliskan fungsi operator maka kita tulis energi kinetik dalam bentuk momentum .

Penyelesaian

$$E = K + U = \frac{p^2}{2m} + U$$

Gunakan operator pada kedua sisi persamaan diatas untuk memperoleh fungsi gelombang. Pada sisi kiri kita akan memperoleh

$$\hat{E}\psi = i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t}$$

Aplikasi operator pada sisi kanan akan menjadi

$$\begin{aligned}
\left[\frac{1}{2m} (\hat{p})^2 + U \right] \psi &= \frac{1}{2m} \left(-i\hbar \frac{\partial}{\partial x} \right)^2 \psi + U\psi \\
&= -\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + U\psi
\end{aligned}$$

Perhatikan bahwa $(\hat{p})^2$ menunjukkan dua pemakaian operator. Kemudian gabungkan ruas kiri dan kanan sehingga diperoleh:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + U\psi$$

Persamaan diatas adalah bentuk persamaan bergantung waktu dari Persamaan Gelombang Schrodinger.

3. Nilai Eigen

Persamaan Schrodinger Tak Gayut Waktu ditulis dalam bentuk:

$$E \psi(x) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(x) + V(x)\psi(x)$$

Yang kemudian kita tulis menjadi

$$E \psi = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi + V \psi \tag{4.56}$$

Dengan

$$\hat{H} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V \right) \tag{4.57}$$

Operator \hat{H} pada persamaan 4.57 disebut Operator Hamilton atau Hamiltonasi dari sistem yang digambarkan oleh persamaan schrodinger. Operator ini menggambarkan enrgi potensial dan kinetik.

Sehingga persamaan 4.56 dapat kita tulis ulang dalam **persamaan eigen** menjadi

$$\hat{H}\psi = E\psi \tag{4.58}$$

Persamaan eigen adalah persamaan yang terdiri dari operator yang apabila dikenakan pada sebuah fungsi eigen akan menghasilkan nilai tertentu dan fungsi yang sama dengan sebelumnya. Dengan E : Nilai Eigen, ψ : Fungsi Eigen dan \hat{H} : Operator Hamiltonian.

Nilai eigen E adalah nilai-nilai energi partikel yang mungkin muncul setelah fungsi eigen diberikan operator. Nilai eigen ini bisa bernilai lebih dari 1 yang berasal dari operator energi yang berkaitan dengan observable fisis energi partikel. Fungsi eigen adalah fungsi yang tidak mengalami perubahan setelah diberikan operator. Fungsi eigen yang tidak mengalami perubahan ini dalam mekanika kuantum ditulis dalam notasi ket $|\psi\rangle$, sehingga persamaan 4.58 dapat kita tulis ulang

$$\hat{H} |\psi\rangle = E |\psi\rangle \tag{4.59}$$

Notasi ket ini akan digunakan pada fisika modern lanjutan atau pada mekanika kuantum .

B. Partikel Bebas

Partikel bebas adalah partikel yang tidak merasakan potensial apapun atau $V = 0$. Persamaan gelombang Schrodinger untuk partikel bebas diberikan oleh:

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + V(r)\psi$$

Dengan $V(r) = 0$ maka

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = -\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad 4.60$$

Untuk memudahkan perhitungan, gunakan persamaan schrodinger bebas waktu

$$E\psi = -\frac{\hbar}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} \quad 4.61$$

Atau

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{2m}{\hbar} E\psi = -k^2\psi$$

Dengan

$$k = \sqrt{\frac{2m}{\hbar} E} \quad 4.62$$

Solusi dari persamaan tersebut adalah

$$\psi = A_1 \sin kx + B_1 \cos kx \quad 4.63$$

Dengan A_1 dan B_1 adalah konstanta yang menyatakan amplitudo fungsi gelombang partikel dan menentukan amplitudo rapat probabilitas partikel. Kedua konstanta tersebut pada prinsipnya dapat ditentukan dari kondisi normalisasi fungsi gelombang.

Sebagai catatan penting, fungsi gelombang bebas ini menyatakan perambatan gelombang dari $-\infty$ sampai $+\infty$. Akan tetapi pemilihan fungsi gelombang berbentuk sinusoidal tersebut tidak dapat menghasilkan fungsi gelombang sinusoidal tersebut tidak dapat menghasilkan fungsi gelombang yang ternormalisasi seperti yang dipersyaratkan pada persamaan 4.19. a dengan demikian rapat probabilitas partikel bebas tidak dapat ditentukan secara eksak.

Alternatif lain untuk representasi fungsi gelombang partikel bebas adalah sebagai fungsi eksponensial imajiner

$$\psi = A_2 e^{ikx} + B_2 e^{-ikx} \quad 4.64$$

Atau sebagai posisi dan waktu secara lengkap

$$\psi = A_2 e^{i(kx-\omega t)} + B_2 e^{i(kx+\omega t)} \quad 4.65$$

Persamaan 4.65 menunjukkan gelombang pertama bergerak ke kanan dengan amplitudo A_2 dan gelombang ke dua bergerak ke kiri dengan amplitudo B_2 . Jika kita membatasi gerak partikel, hanya ke kanan, maka amplitudo B_2 adalah nol. Dengan demikian rapat probabilitas yang diasosiasikan dengan partikel ini adalah

$$P(x) = |\psi^*(x)\psi(x)|^2 = |A_2|^2 (e^{i(kx-\omega t)})(e^{-i(kx-\omega t)}) = |A_2|^2 \quad 4.65$$

Yang menunjukkan nilai rapat probabilitas konstan, atau kemungkinan partikel berada dimanapun sepanjang sumbu x dalam ruang. Dengan kata lain fungsi gelombang partikel bebas menyatakan partikel yang bersifat tak terlokalisasi dengan gelombang partikel berada pada jangkauan dari $x = -\infty$ sampai $x = +\infty$ dan nilai bilangan gelombang bergantung pada massa dan energi partikel (persamaan 4.62)

Selanjutnya nilai energi partikel dapat diperoleh langsung dari persamaan 4.62

$$E = \frac{\hbar^2 k^2}{2m} \quad 4.66$$

Sebagai catatan: energi ini sesuai dengan rumusan energi kinetik

$$K = \frac{p^2}{2m}$$

Untuk

$$p = \hbar k$$

Energi partikel bebas bernilai positif sebarang, kontinu dan tanpa batasan serta hanya ditentukan oleh bilangan gelombang dan massa partikel m .

C. Keberhasilan dan Kelemahan Persamaan Schrodinger

Persamaan Schrodinger berhasil menjelaskan :

- (1) Tingkatan energi pada atom dan spektrum atom hidrogen
- (2) Gagasan Schrodinger dapat dilukiskan secara visual
- (3) Partikel digambarkan sebagai grup gelombang atau paket gelombang yang berdimensi sangat kecil dan menjalar ke segala arah, sesuai dengan de Broglie

Kelemahan dari gagasan Schrodinger:

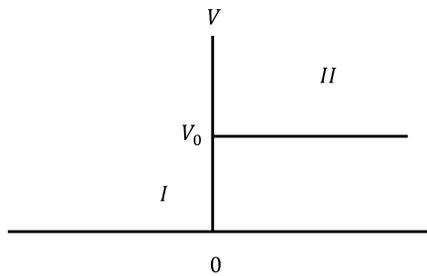
- (1) Gelombang akan menyebar dalam waktu
- (2) Frekuensi layangan tidak akan menghasilkan garis spektrum

- (3) Tidak sesuai dengan kerangka klasik
- (4) Tidak dapat menjelaskan efek fotolistrik Einstein dan radiasi benda hitam

D. Potensial Tangga atau Potensial Undak

Potensial undak (step potential) (Gambar 4.4) adalah suatu keadaan yang menunjukkan bahwa pada daerah I ($x < 0$) potensialnya adalah nol; sementara pada daerah II ($x \geq 0$) potensialnya memiliki nilai potensial yang konstan ($V = \text{konstan}$).

Gambar 4. 4 Potensial Undak



1. untuk $E < V_0$

Pada keadaan energi total (E) partikel lebih kecil dari energi potensial V maka partikel pada daerah I tidak mungkin berada di daerah II. Karena energi yang dimilikinya tidak cukup untuk menyeberang. Karena $E < V$ dan $K = E - V$, maka energi kinetiknya bernilai negatif. Energi kinetik negatif artinya partikel – partikel tetap bergerak bebas di permukaan bahan logam, tapi tidak dapat terlepas dari logam metal itu.

Pada keadaan ini ada dua tinjauan

a. Jika pada daerah I berlaku $V = 0$ maka

$$\begin{aligned}
 -\frac{\hbar}{2m} \nabla^2 \psi + V(r) \psi &= E \psi \\
 \nabla^2 \psi &= \frac{2m}{\hbar} E \psi = -k_1^2 \psi \\
 \nabla^2 \psi - \frac{2m}{\hbar} E \psi &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.67}$$

Maka

$$k_1 = \sqrt{\frac{2m}{\hbar} E}
 \tag{4.68}$$

Solusi dari persamaan 4.67 adalah

$$\psi_1 = Ae^{ikx} + Be^{-ikx} \quad 4.69$$

b. Di daerah II ($V = V_0$) berlaku

$$-\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2\psi + V(r)\psi = E\psi$$

$$\nabla^2\psi = -k_2^2\psi = \frac{2m}{\hbar^2}(E - V(r))\psi$$

Maka

$$k_2 = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2}(E - V)} \quad 4.70$$

Persamaan schrodinger diberikan oleh

$$\nabla^2\psi + \frac{2m}{\hbar^2}(E - V(r))\psi = 0 \quad 4.71$$

Solusi dari persamaan 4.71 adalah

$$\psi_2 = Ce^{ik_2x} + De^{-ik_2x} \quad 4.72$$

Suku 1 digunakan (Ce^{ik_2x}) karena pada daerah Energi 2 partikel harus bernilai riil, maka

$$\psi_2 = Ce^{ik_2x} \quad 4.72$$

c. bidang batas

pada bidang batas berlaku kontinuitas, sehingga

$$\psi_1 = \psi_2 \text{ dan } \left. \frac{\partial\psi_1}{\partial x} \right|_{x=0} = \left. \frac{\partial\psi_2}{\partial x} \right|_{x=0}$$

Sehingga

$$A + B = C \quad 4.73$$

$$ik_1(A - B) = k_2C \quad 4.74$$

Selesaikan persamaan diatas maka diperoleh

$$B = \left[\frac{k_1 - ik_2}{k_1 + ik_2} \right] A \quad 4.75$$

$$C = \left[\frac{2k_1}{k_1 + ik_2} \right] A \quad 4.76$$

Karena ψ_2 adalah fungsi gelombang di daerah tanggul yang ternyata tidak nol, artinya masih ada partikel yang berhasil menerobos tanggul potensial. Fenomena ini bisa dijelaskan dengan **efek tunneling** yang akan dibahas pada modul berikutnya. Efek tunneling tidak mungkin dibahas dengan

meninjaunya secara klasik. Namun dari persamaan 4.75 dan 4.76 ini kita bisa memperoleh koefisien transmisinya dengan hubungan

$$T = \frac{\text{fluks partikel yang menerobos tanggul}}{\text{fluks partikel yang datang ke tanggul}}$$

$$T = \frac{CC^*}{AA^*} = \left[\frac{2k_1}{k_1 + ik_2} \right]^2$$

2. Untuk $E > V_0$

Dengan tinjauan yang sama, di daerah I dengan $x < 0$ kita peroleh fungsi gelombang partikel nya ψ_1 (persamaan 4.69) dengan k_1 (persamaan 4.68) Sementara untuk fungsi gelombang di daerah II dengan $x > 0$ berlaku ψ_2 sama dengan 4.72 dan nilai k_2 sama dengan 4.70. Hubungan koefisien A, B, dan C diberikan oleh

$$B = \left[\frac{k_1 - k_2}{k_1 + k_2} \right] A \quad 4.75$$

$$C = \left[\frac{2k_1}{k_1 + k_2} \right] A \quad 4.76$$

Di daerah II partikel hanya bergerak ke kanan, karena tidak ada dinding yang memantulkannya. Koefisien transmisinya kemudian dinyatakan dengan

$$T = \frac{CC^*}{AA^*} = \left[\frac{2k_1}{k_1 + k_2} \right]^2$$

Rangkuman

1. Nilai rata – rata dari observable fisis dinyatakan dalam perhitungan nilai ekspektasi menggunakan fungsi gelombang. Nilai ekspektasi dari sebuah fungsi diberikan oleh

$$\langle g(x) \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} x \psi^*(x, t) \psi(x, t) dx$$

2. Untuk memperoleh nilai ekspektasi dari momentum dan energi digunakan operator yang sesuai.
 - a. Operator momentum dinyatakan dengan

$$\hat{p} = -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

- b. Nilai ekspektasi momentum

$$\langle p \rangle = -i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)][\psi(x, t)] dx$$

c. Operator energi dinyatakan dengan

$$\hat{E} = \hat{H} = i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

d. Nilai ekspektasi energi

$$\langle E \rangle = i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)]$$

3. Persamaan eigen adalah persamaan yang terdiri dari operator yang apabila dikenakan pada sebuah fungsi eigen akan menghasilkan nilai tertentu dan fungsi yang sama dengan sebelumnya.

$$\hat{H}\psi = E\psi$$

4. Persamaan Schrodinger berhasil menjelaskan tingkatan energi atom hidrogen, dapat dilukiskan secara visual, partikel digambarkan sebagai grup gelombang atau paket gelombang yang berdimensi sangat kecil dan menjalar ke segala arah, sesuai dengan de Broglie
5. Kelemahan dari gagasan Schrodinger: Gelombang akan menyebar dalam waktu, Frekuensi layangan tidak akan menghasilkan garis spektrum, Tidak sesuai dengan kerangka klasik, tidak dapat menjelaskan efek fotolistrik Einstein dan radiasi benda hitam

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Persamaan operator momentum diberikan oleh

A. $-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$

B. $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$

C. $-i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)][\psi(x, t)] dx$

$$D. \quad i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)]$$

$$E. \quad -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$$

2. Persamaan operator energi diberikan oleh

$$A. \quad -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

$$B. \quad i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

$$C. \quad -i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)][\psi(x, t)] dx$$

$$D. \quad i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)]$$

$$E. \quad -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$$

3. Persamaan operator Hamiltonian diberikan oleh

$$A. \quad -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

$$B. \quad i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$$

$$C. \quad -i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)][\psi(x, t)] dx$$

$$D. \quad i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)]$$

$$E. \quad -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$$

4. Persamaan nilai ekspektasi energi diberikan oleh

$$A. \quad -i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$$

- B. $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$
- C. $-i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)][\psi(x, t)] dx$
- D. $i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)]$
- E. $-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$

5. Persamaan nilai ekspektasi momentum diberikan oleh

- A. $-i\hbar \frac{\partial}{\partial x}$
- B. $i\hbar \frac{\partial}{\partial t}$
- C. $-i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)][\psi(x, t)] dx$
- D. $i\hbar \int_{-\infty}^{\infty} [\psi^*(x, t)] \frac{\partial}{\partial t} [\psi(x, t)]$
- E. $-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V$

6. Yang merupakan kelemahan persamaan Schrodinger adalah ...

- A. Menyebar terhadap waktu
- B. sesuai dengan panjang gelombang de Broglie
- C. partikel digambarkan sebagai paket gelombang
- D. dapat dilukiskan secara visual
- E. menjelaskan tingkatan energi atom hidrogen

7. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Tidak mengalami potensial apapun $V = 0$
- (2) Fungsi gelombangnya $\psi = A_2 e^{ikx} + B_2 e^{-ikx}$, dengan $k = \sqrt{\frac{2m}{\hbar} E}$
- (3) Rapat probabilitas seragam, electron dapat ditemukan diseluruh permukaan logam.
- (4) Energi partikel hanya ditentukan panjang gelombang dan massa

Persamaan yang sesuai dengan partikel bebas adalah ...

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

8. Diberikan persamaan berikut

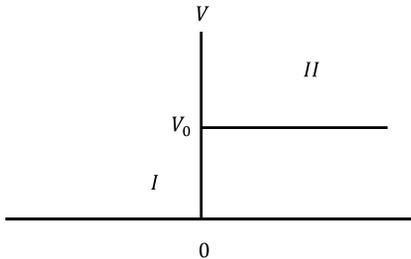
$$\hat{H}|\psi\rangle = E|\psi\rangle$$

Yang merupakan nilai eigen adalah ...

- A. \hat{H}
- B. $|\psi\rangle$
- C. E
- D. ψ
- E. $|\ \rangle$

9. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Fungsi gelombang pada daerah I adalah $\psi_1 = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$
- (2) Fungsi gelombang pada daerah II adalah $\psi_2 = Ce^{-ikx}$
- (3) Pada daerah batas berlaku $\psi_1 = \psi_2$
- (4) Pada keadaan $E < V_0$ (r) ternyata partikel masih bisa berpindah dari daerah (I) ke daerah (II)



Pernyataan yang benar sesuai gambar diatas adalah

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

10. Hubungan antara harga ekspektasi dengan operator fisis dinyatakan dengan

....

- A. Operator fisis dihasilkan dari harga ekspektasi
- B. Harga ekspektasi adalah rata – rata operator fisis
- C. Operator fisis digunakan untuk menentukan harga ekspektasi
- D. Saling berbanding lurus

E. Tidak saling berhubungan

Essay

1. Jelaskan hubungan antara operator fisis dengan nilai ekspektasi!

Jawab

2. Untuk sebuah sistem non relativistic, jika diberikan energi potensial

$$V(r) = ax + u_0$$

maka tuliskanlah bentuk persamaan Schrodinger tak bergantung waktu untuk sistem ini!

Jawab

3. Jika \hat{H} adalah operator Hamiltonian , maka tentukan bentuk operator Hamiltonian untuk

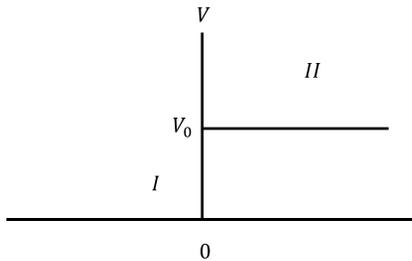
a. sistem non relativistic 1 dimensi dengan $V(r) = ax + u_0$

jawab

b. sistem non relativistic 2 dimensi dengan $V (r) = \frac{a}{x} + \frac{a}{y} + u_0$

jawab

4. Diberikan keadaan seperti berikut



Pada daerah (I) potensial nya nol , sedangkan pada daerah II potensialnya V_0 .
Jelaskan fungsi gelombang electron yang berada pada sistem ini jika

a. energi di daerah I lebih kecil dari energi potensial daerah II

Jawab :

b. energi di daerah II lebih besar dari energi potensial daerah II

Jawab:

5. Buktikan bahwa partikel bebas memiliki distribusi probabilitas yang merata! Jelaskan juga apa yang dimaksud dengan probabilitas merata ini ?

Jawab :

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan

menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 80% , berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.
- https://careerendeavour.in/wp-content/uploads/2016/04/IIT-jam-modern-physics_.pdf

Penutup

Rangkuman

Mekanika gelombang menggunakan persamaan schrodinger untuk menjelaskan tentang dualisme gelombang dan materi.

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Eisntein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & SOns, Inc.
- Thornton, S. T. (University O. V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A.; Llewellyn, R. a. (2012). Modern Physics - Fifth Edition. In *Modern Physics Siixth Edition*.
<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

MODUL 5

SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang di mekanika gelombang. Disini kita akan mempelajari tentang bagaimana solusi persamaan chrodinger menjelaskan posisi elektron pada atom.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).
- 3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).
- 4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

- 1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)

2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)

2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)

3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)

4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu mengaplikasikan persamaan Schrodinger dan interpretasinya dalam bilangan kuantum
Sikap	a) Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b) Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c) Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu membuat presentasi untuk menjelaskan persamaan schrodinger dan interpretasinya

3. Prasyarat Kompetensi

a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.

b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell

c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang riset fisika murni,

5.. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Solusi persamaan Schrodinger (Part 1)	A. Sumur Potensial tak Hingga B. Sumur Potensial berhingga C. Sumur Potensial Tak Hingga 3 dimensi
Solusi persamaan Schrodinger (Part21)	A.Osilator Harmonik Sederhana B. Efek Tunneling

Kegiatan Pembelajaran 1 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 1)

Kemampuan Akhir	Sub Kemampuan Akhir
Mahasiswa bisa menjelaskan keadaan gelombang pada partikel menggunakan fungsi gelombang	<ul style="list-style-type: none"> a. Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk mendeskripsikan keadaan partikel pada sumur potensial tak hingga b. Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk mendeskripsikan keadaan partikel pada sumur potensial berhingga c. Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk mendeskripsikan keadaan partikel pada sumur potensial tak hingga 3 dimensi

Uraian Materi

Kita telah menurunkan persamaan Schrodinger baik yang bergantung waktu dan yang tidak bergantung waktu. Kita juga telah membahas bahwa persamaan gelombang Schrodinger dipakai untuk menentukan observabel fisis, misalnya posisi, momentum dan energi. Kini kita akan menentukan fungsi gelombang pada keadaan sumur potensial dalam beberapa keadaan: tak hingga (1 dimensi), berhingga, dan tak hingga (3 dimensi). Kita akan mempelajari gejala fisis apa yang kita peroleh.

Dalam kegiatan pembelajaran ini kita akan menemukan energi mungkin dialami partikel ternyata terkuantisasi. Kita mulai dengan mempelajari partikel yang terjebak di dalam sumur yang berdinding tebal, sehingga partikel tidak bisa menerobosnya. Penyelesaian yang kita gunakan

mirip dengan partikel dalam kotak, tapi dengan tinjauan penyelesaian mekanika kuantum.

A. Sumur Potensial Tak Hingga

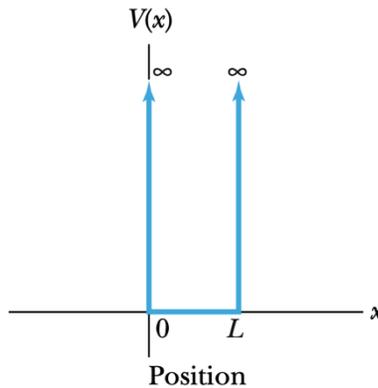
Sebuah sumur potensial (Gambar 5.1) memenuhi

$$V(x) = \begin{cases} \infty & x \leq 0, x \geq L \\ 0 & 0 < x < L \end{cases} \quad 5.1$$

Partikel hanya dapat bergerak antara $x = 0$ dan $x = L$ karena terjebak pada dinding yang diberi potensial sangat besar (∞). Fungsi gelombang ψ hanya ditemukan antara $x = 0$ dan $x = L$. $\psi = 0$ pada daerah $x \leq 0$ dan $x \geq L$. Sumur potensial tak hingga ini dapat menjelaskan tentang kuantisasi energi yang ditentukan dari persamaan gelombang Schrodinger tak bergantung waktu.

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{2mE}{\hbar^2} \psi = -k^2 \psi$$

Gambar 5. 1 Sumur Potensial Tak Hingga



Sumber: Thornton, 2013

Perhatikan $V = 0$ antara $x = 0$ dan $x = L$, dari persamaan Schrodinger diatas diperoleh

$$k = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

Solusi dari persamaan Schrodinger diatas diberikan:

$$\psi(x) = A \sin kx + B \cos kx \quad 5.2$$

Konstanta A dan B bisa diperoleh melalui normalisasi fungsi gelombang. Fungsi gelombang harus kontinu, yang artinya $\psi(x) = 0$ pada $x = 0$ dan $x =$

L. Solusi yang diajukan untuk persamaan 5.1 adalah $B = 0$ agar $\psi(x = 0) = 0$. Jika $\psi(x = L)$, maka kemudian $A \sin kl = 0$ dan menjadi $A = 0$, sehingga diperoleh penyelesaian:

$$kl = n\pi \quad 5.3$$

Dengan n adalah bilangan bulat. Nilai $n = 0$ menunjukkan $\psi = 0$. Fungsi gelombang kemudian bisa kita nyatakan dengan

$$\psi_n(x) = A \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad 5.4$$

Syarat bahwa $\frac{d\psi}{dx}$ harus kontinu tidak dapat dipenuhi pada kasus ini karena nilai kenaikan yang tak hingga pada $x = 0$ dan $x = L$. Kita normalisasi fungsi gelombang ini sepanjang $-\infty < x < \infty$.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_n^*(x) \psi_n(x) dx = 1$$

Substitusikan fungsi gelombang sehingga diperoleh

$$A^2 \int_0^L \sin^2\left(\frac{n\pi x}{L}\right) dx = 1$$

Hasil integral ini (lihat tabel bantuan integral di Appendix 3 Buku Thornton) dan memberikan $L/2$, sehingga $A^2(L/2) = 1$ dan $A = \sqrt{2/L}$

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad 5.5$$

Persamaan 5.5 ini identik dengan persamaan gelombang pada tali yang kedua ujungnya terikat. Ujung terikat ini menunjukkan keberadaan gelombang berdiri di dalam kotak. Kita masukkan persamaan 5.3 dan kita hubungkan bilangan gelombang dengan energi sehingga diperoleh

$$k_n = \frac{n\pi}{L} = \sqrt{\frac{2mE_n}{\hbar^2}}$$

Perhatikan bahwa n pada k_n dan E_n menunjukkan mereka bergantung pada bilangan bulat ke n dan merupakan kelipatan. Persamaan untuk E_n diperoleh:

$$E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad 5.6$$

Energi yang mungkin dari partikel dinyatakan dalam E_n berhasil dikuantisasi dan bilangan bulat n kemudian disebut sebagai bilangan

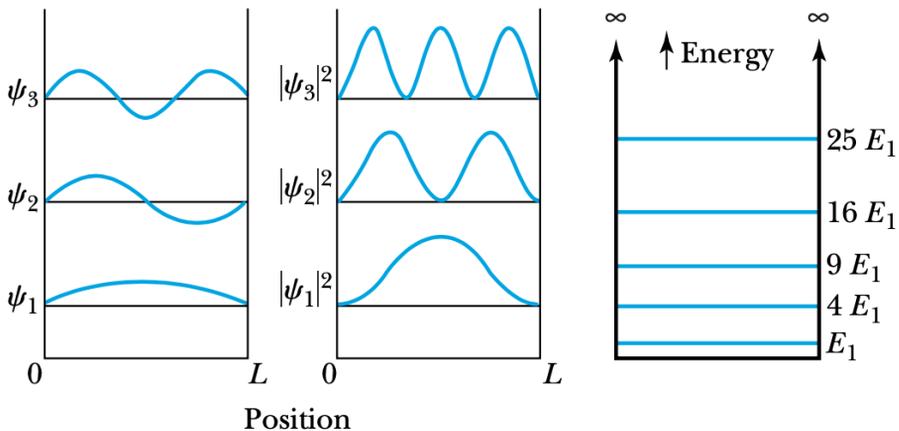
kuantum. Perhatikan bahwa tingkat energi terkuantisasi dalam persamaan 5.6 identik dengan energi yang kita peroleh di partikel dalam kotak (persamaan 4.21) di Modul 4. Kuantisasi energi ini muncul secara alami saat kita menerapkan syarat batas (gelombang berdiri) pada semua penyelesaian fungsi gelombang. Setiap fungsi gelombang $\psi_n(x, t)$ terasosiasi dengan energi khas masing – masing tingkatan n (E_n) (Gambar 5.2). Setiap fungsi gelombang ψ_n , menunjukkan densitas probabilitas $|\psi_n|^2$ dan energi E_n masing – masing.

Energi terendah diberikan oleh $n = 1$ yang kemudian disebut *ground state* yang besarnya

$$E_1 = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$$

Perhatikan bahwa energi terendah tidak boleh nol karena akan menghasilkan kemungkinan 0, $n = 0$ dan $\psi_n = 0$.

Gambar 5. 2 Fungsi Gelombang, Densitas Probabilitas, dan Pita Energi pada Sumur Potensial Tak Terhingga



Sumber: Thornton, 2013

Secara klasik, partikel memiliki probabilitas yang sama untuk berada di titik manapun dalam ruang. Densitas probabilitas partikel dalam sumur potensial tak hingga ini adalah $P(x) = 1/L$ untuk $0 < x < L$, dengan total probabilitas adalah 1. probabilitas secara kuantum dinyatakan dengan $(2/L) \sin^2(k_n x)$. untuk nilai n yang besar artinya ada banyak osilasi di dalam kotak. Nilai rata – rata dari $\sin^2\theta$ pada satu putaran penuh adalah $1/2$. Nilai rata – rata $\sin^2\theta$

pada banyak osilasi juga $1 / 2$. Sehingga probabilitas secara kuantum mendekati $1 / L$, sesuai dengan hasilnya secara klasik.

Contoh Kasus Sumur Potensial Tak Hingga

Tunjukkan bahwa fungsi gelombang $\psi_n(x, t)$ untuk sebuah partikel dalam kotak menunjukkan gelombang berdiri di dalamnya.

Strategi:

Fungsi gelombang $\psi_n(x)$ telah kita temukan pada persamaan 5.6. Kita bisa memperoleh $\psi_n(x, t)$ dengan mengalikan $\psi_n(x)$ dengan $e^{i\omega_n t}$

Penyelesaian:

Hasil dari perkalian $\psi_n(x)$ dengan $e^{i\omega_n t}$ menghasilkan

$$\psi_n(x, t) = \sqrt{\frac{2}{L}} [\sin(k_n x)] (e^{i\omega_n t})$$

Kita tuliskan $\sin(k_n x)$ sebagai

$$\sin(k_n x) = \frac{(e^{ik_n x}) - (e^{-ik_n x})}{2i}$$

Maka fungsi gelombangnya menjadi

$$\psi_n(x, t) = \sqrt{\frac{2}{L}} \frac{(e^{i(k_n x - \omega_n t)}) - (e^{i(k_n x + \omega_n t)})}{2i}$$

Ini adalah persamaan gelombang berdiri untuk gelombang pada tali, dimana terjadi superposisi antara gelombang datang dengan gelombang pantul yang kemudian menghasilkan frekuensi angular ω_n .

Contoh kasus – Menentukan Harga Ekspektasi dari Sumus Potensial Tak Hingga

Tentukan nilai ekspektasi untuk x , x^2 , p dan p^2 dari sebuah partikel di dalam sumur potensial tak hingga untuk eksitasi pertama.

Strategi:

Eksitasi pertama dinyatakan dengan $n = 2$, karena $n = 1$ menyatakan *ground state* yang adalah energi terendah. Persamaan 5.6 memberikan kita fungsi gelombang untuk menentukan nilai ekspektasi.

Penyelesaian

Fungsi gelombang pada kasus ini dinyatakan dengan

$$\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right)$$

Nilai ekspektasi $\langle x \rangle_{n=2}$ adalah

$$\langle x \rangle_{n=2} = \frac{2}{L} \int_0^L x \left(\sin^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right) dx = \frac{L}{2}$$

Kita evaluasi integral ini menggunakan Tabel integral di Appendix 3 Buku Thornton. Posisi rerata dari partikel ada di bagian tengah kotak ($x = L/2$), meskipun pada titik itu probabilitasnya nol pada keadaan eksitasi pertama (Gambar 5.2).

Nilai ekspektasi dari posisi kuadrat diberikan oleh $\langle x^2 \rangle_{n=2}$

$$\langle x^2 \rangle_{n=2} = \frac{2}{L} \int_0^L x^2 \sin^2\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx = 0,32L^2$$

Nilai $\sqrt{\langle x^2 \rangle_{n=2}}$ adalah $0,57L$, lebih besar dari $\langle x \rangle_{n=2} = 0,5L$

Nilai ekspektasi $\langle p \rangle_{n=2}$ ditentukan menggunakan persamaan 4.50

$$\langle p \rangle_{n=2} = (-i\hbar) \frac{2}{L} \int_0^L \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \left[\frac{d}{dx} \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \right] dx$$

Yang menjadi

$$\langle p \rangle_{n=2} = -\frac{4i\hbar}{L^2} \int_0^L \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx = 0$$

Karena partikel bergerak ke kiri sama seringnya dengan bergerak ke kanan maka momentum rerata adalah nol.

Nilai ekspektasi $\langle p^2 \rangle_{n=2}$ diberikan oleh

$$\begin{aligned} \langle p^2 \rangle_{n=2} &= \frac{2}{L} \int_0^L \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \left(-i\hbar \frac{d}{dx}\right) \left(-i\hbar \frac{d}{dx}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx \\ &= (-i\hbar)^2 \frac{2}{L} \int_0^L \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \left(\frac{2\pi}{L} \frac{d}{dx}\right) \cos\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
&= -(-\hbar^2) \frac{8\pi^2}{L^3} \int_0^L \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{2\pi x}{L}\right) dx \\
&= \frac{4\pi^2 \hbar^2}{L^2}
\end{aligned}$$

Nilai ini dapat dibandingkan dengan E_2 (pers. 4.82)

$$E_2 = \frac{4\pi^2 \hbar^2}{2mL^3} = \frac{\langle p^2 \rangle_{n=2}}{2m}$$

Nilai ini benar, karena pada keadaan nonrelativistic $E = \frac{p^2}{2m} + V$ dengan $V = 0$.

Contoh kasus- Menentukan Energi Transisi electron dari Sumur Potensial Tak Hingga

Diameter dari sebuah nucleus (inti atom) adalah 10^{-14} m. Gunakan sumur potensial tak hingga untuk menghitung energi transisi dari eksitasi pertama ke *ground state* untuk sebuah proton.

Strategi

Untuk menghitung transisi energi antara *ground state* ke keadaan eksitasi pertama gunakan persamaan 5.6 untuk menentukan E_1 dan E_2

Solusi

Energi pada *ground state* :

$$\begin{aligned}
E_1 &= \frac{\pi^2 \hbar^2 c^2}{2mc^2 L^2} = \frac{1}{mc^2} \frac{\pi^2 (197,3 \text{ eV} \cdot \text{nm})^2}{2(10^{-5} \text{ nm})^2} \\
&= \frac{1}{mc^2} (1,92 \times 10^{15} \text{ eV}^2)
\end{aligned}$$

Massa proton adalah $938,3 \text{ MeV} / c^2$, sehingga

$$E_1 = \frac{1,92 \times 10^{15} \text{ eV}^2}{938,3 \times 10^6 \text{ eV}} = 2,0 \text{ MeV}$$

Eksitasi pertama dihitung menggunakan persamaan

$$E_2 = 4E_1$$

Sehingga energi transisi dari eksitasi pertama ke *ground state* adalah

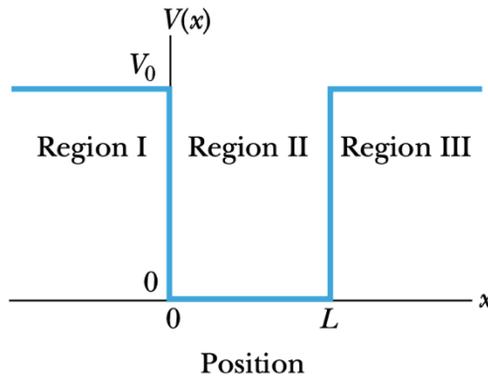
$$\Delta E = E_2 - E_1 = 4E_1 - E_1 = 3E_1 = 3(2,0 \text{ MeV}) = 6 \text{ MeV}$$

B. Sumur Potensial Berhingga

Sumur potensial berhingga mirip dengan sumur potensial tak berhingga, namun dindingnya diberi potensial berhingga V_0 (Gambar 5.3). Di dalam sumur terdapat sebuah partikel. Potensial di dalam sumur adalah nol. Karena diberi potensial berhingga, maka partikel di region III masih bisa berpindah (keluar) dari sumur potensial ke region I dan II.

$$V(x) = \begin{cases} V_0 & x \leq 0 & \text{Region I} \\ 0 & 0 < x < L & \text{Region II} \\ V_0 & x \geq L & \text{Region III} \end{cases} \quad 5.7$$

Gambar 5. 3 Sumur Potensial Berhingga



Sumber: Thornton, 2013

Untuk region I dan III berlaku persamaan Schrodinger

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = E - V_0 \quad \text{Region I dan III} \quad 5.8$$

Dengan $\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = k_1^2 \psi$

Sehingga

$$k_1 = \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar^2}}$$

Solusi persamaan ini kita buat dalam fungsi eksponensial sebagai berikut

$$\psi_I(x) = Ae^{\alpha x} \quad \text{Region I, } x < 0 \quad 5.9$$

$$\psi_{III}(x) = Be^{-\alpha x} \quad \text{Region III, } x > L \quad 5.9$$

Di dalam sumur potensial, dimana potensialnya nol maka persamaan gelombangnya menjadi

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -k_2^2 \psi$$

dimana

$$k_2 = \sqrt{\frac{2mE}{\hbar^2}}$$

Maka

$$\psi_{II} = Ce^{ikx} + De^{-ikx} \quad \text{Region II, } 0 < x < L \quad 5.10$$

Kemudian kita terapkan syarat batas. Fungsi gelombang haruslah berhingga pada semua region. Agar memiliki nilai tunggal maka berlaku

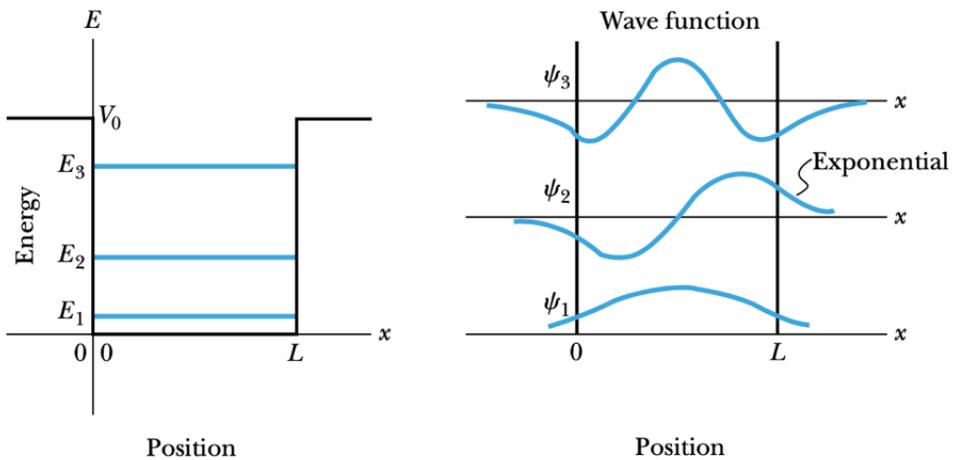
$$\psi_I = \psi_{II} \text{ pada } x = 0$$

Dan

$$\psi_{II} = \psi_{III} \text{ pada } x = L$$

Baik ψ dan $d\psi/dx$ harus kontinu pada $x = 0$ dan $x = L$. Hasil dari fungsi gelombang ini menampilkan Gambar 5.4.

Gambar 5. 4 Pita Energi dan Fungsi Gelombang untuk Bilangan Kuantum Terendah Pada Sumur Potensial Berhingga



Sumber: Thornton, 2013

Syarat batas menghasilkan kuantisasi energi E_n yang memiliki panjang gelombangnya masing-masing ψ_n

Apa perbedaan yang diperoleh dari sumur potensial tak hingga dengan sumur potensial berhingga? Dari Gambar 4.6 dengan 4.8 kita lihat panjang gelombang pada sumur potensial berhingga lebih besar dibanding

potensial tak hingga. Keadaan ini menunjukkan momentum yang lebih kecil (sesuai panjang gelombang de Broglie) dan tingkat energi yang lebih rendah juga. Jumlah tingkat energi atau pita energi juga terbatas, berbeda dengan sumur potensial tak hingga yang memiliki pita energi tak terbatas. Ketika $E > V_0$ maka partikel akan lepas dari sumur potensial.

Kejadian keluarnya partikel dari sumur potensial sebenarnya sangat dihindari secara klasik, namun oada mekanika kuantum hal ini adalah fenomena yang alami. Terjadinya penurunan eksponensial dari fungsi gelombang ψ_I dan ψ_{III} akan meningkatkan probabilitas partikel menerobos dengan jarak lebih besar dari $\delta x \approx \frac{1}{\alpha}$

$$\delta x \approx \frac{1}{\alpha} = \frac{\hbar}{\sqrt{2m(V_0 - E)}} \quad 5.11$$

δx kemudian disebut sebagai kedalaman penetrasi yang akan kita bahas di efek tunneling pada kegiatan pembelajaran berikutnya. Kedalaman penetrasi ini sebanding dengan konstanta Planck \hbar . Efek tunneling ini juga sesuai dengan ketidakpastian Heinsenberg, agar partikel bisa berada di daerah batas atau penghalang ini, maka ketidakpastian energi ΔE harus sangat besar. Sesuai dengan $\Delta E \Delta t = \hbar/2$, maka efek tunneling harus terjadi pada interval waktu sangat kecil.

C. Sumur Potensial Tak Hingga 3 Dimensi

Sumur potensial tak hingga 3 dimensi diperlukan untuk membantu kita memahami fisika atom yang akan dipelajari pada Modul – Modul Pembelajaran berikutnya. kita akan memodifikasi persamaan Schrodinger ke dalam 3 dimensi. Dimulai dengan hukum kekekalan energi secara non relativistic diberikan oleh

$$E = K + U = \frac{p^2}{2m} + U$$

Kedua ruasi dikalikan ψ , diperoleh:

$$\frac{p^2}{2m} \psi + U\psi = E\psi \quad 5.12$$

Kemudian kita gunakan operator momentum (pers 4.48) dan dinyatakan dalam 3 dimensi

$$\hat{p}_x \psi = -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial x}$$

$$\hat{p}_y \psi = -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial y}$$

$$\hat{p}_z \psi = -i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial z}$$

Kemudian kita terapkan

$$\hat{p} = \hat{p}_x + \hat{p}_y + \hat{p}_z$$

Dan kita terapkan \hat{p}^2 ke dalam persamaan 4.89 menjadi:

$$-\frac{\hbar}{2m} \left(\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \psi}{\partial z^2} \right) + U\psi = E\psi \quad 5.13$$

Persamaan ini adalah **Persamaan Schrodinger Tak Bergantung Waktu 3 Dimensi**.

Persamaan di dalam kurung diatas dapat dinyatakan dalam operator Laplace yang dinyatakan dengan

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

Sehingga persamaan 4.90 bisa kita tulis ulang menjadi

$$-\frac{\hbar}{2m} \nabla^2 \psi + U\psi = E\psi \quad 5.14$$

Contoh kasus – Sumur Potensial Tak Hingga 3 Dimensi

Sebuah partikel bebas berada dalam kotak dengan panjang sisi L_1 , L_2 dan L_3 masing – masing pada sumbu x , y dan z (Gambar 5.5). Sebuah partikel berada di dalam kotak. Tentukan persamaan gelombang dan tingkat – tingkat energinya. Kemudian tentukan energi *ground state* dan energi pada eksitasi pertama untuk kubus dengan panjang sisi L.

Strategi

Pada kasus partikel di dalam kotak potensial tak hingga ini, partikel berada di bagian dalam yang potensial nya nol, sehingga persamaan Schrodinger yang berlaku adalah

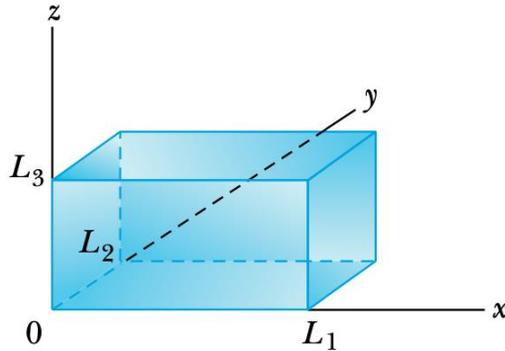
$$-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi = E\psi \quad 5.15$$

Kita gunakan fungsi gelombang dalam bentuk:

$$\psi(x, y, z) = A \sin(k_1 x) \sin(k_2 y) \sin(k_3 z) \quad 5.16$$

Dengan A adalah konstanta normalisasi. Kuantitas k_i ($i = 1, 2, 3$) ditentukan dengan menerapkan syarat batas. Untuk menghitung energi, kita substitusikan fungsi gelombang ke dalam persamaan Schrodinger lalu selesaikan untuk E.

Gambar 5. 5 Kotak 3 Dimensi Berisi Partikel



Sumber: Thornton, 2013

Penyelesaian

Syarat batas $\psi = 0$ pada $x = L$ menghasilkan $k_1 L_1 = n_1 \pi$, maka nilai k_i

$$k_1 = \frac{n_1 \pi}{L_1} \qquad k_2 = \frac{n_2 \pi}{L_2} \qquad k_3 = \frac{n_3 \pi}{L_3} \qquad 5.17$$

Dengan n_1, n_2, n_3 adalah bilangan bulat yang merupakan bilangan kuantum pada masing – masing koordinat. Kita gunakan ketiga bilangan kuantum ini untuk mendeskripsikan keadaan fisis.

Untuk memperoleh energi dari persamaan 5.13 kita perlu menggunakan derivasi fungsi gelombang terhadap x, sebagai berikut:

$$\begin{aligned} \frac{\partial \psi}{\partial x} &= \frac{\partial}{\partial x} [A \sin(k_1 x) \sin(k_2 y) \sin(k_3 z)] \\ &= k_1 A \cos(k_1 x) \sin(k_2 y) \sin(k_3 z) \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} &= \frac{\partial}{\partial x} [k_1 A \cos(k_1 x) \sin(k_2 y) \sin(k_3 z)] \\ &= -(k_1)^2 A \sin(k_1 x) \sin(k_2 y) \sin(k_3 z) \\ &= k_1^2 \psi \end{aligned}$$

Derivasi untuk y dan z juga akan sama dan persamaan 5.13 menjadi

$$-\frac{\hbar^2}{2m} (k_1^2 + k_2^2 + k_3^2) \psi = E \psi \qquad 5.18$$

Yang memberikan

$$E = \frac{\hbar^2}{2m}(k_1^2 + k_2^2 + k_3^2)$$

Substitusikan nilai k_i dari Pers 5.17 sehingga diperoleh

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_1^2}{L_1^2} + \frac{n_2^2}{L_2^2} + \frac{n_3^2}{L_3^2} \right) \quad 5.19$$

Maka energi yang diperbolehkan bergantung pada nilai n_1 , n_2 dan n_3 .

Untuk kotak kubus yang memiliki panjang sisi identik $L_1 = L_2 = L_3 = L$, maka nilai – nilai energi menjadi:

$$E = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (n_1^2 + n_2^2 + n_3^2) \quad 5.20$$

Untuk *ground state* maka $n_1 = n_2 = n_3 = 1$ sehingga

$$E_{gs} = \frac{3\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} \quad 5.21$$

Dan fungsi gelombang pada *ground state* menjadi

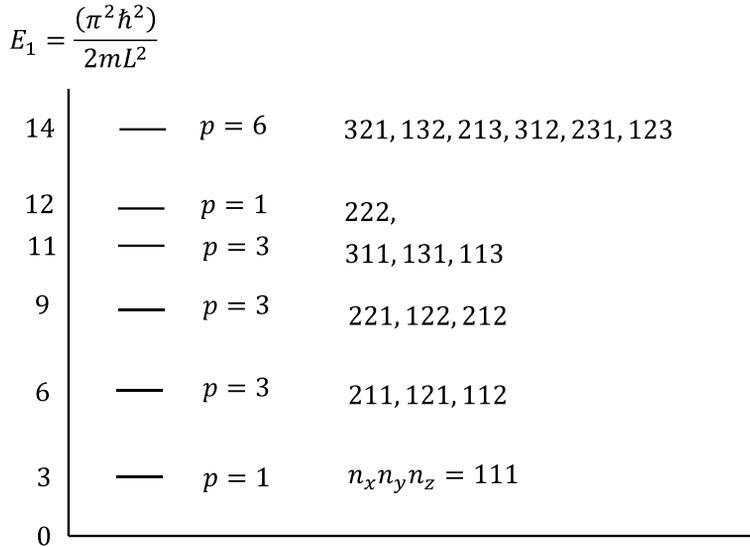
$$\psi_{gs} = A \sin\left(\frac{\pi x}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi y}{L}\right) \sin\left(\frac{\pi z}{L}\right) \quad 5.22$$

Berapa energi pada eksitasi pertama? Lebih besar dari energi pada *ground state*! Bilangan kuantum yang semakin besar akan menghasilkan tingkat energi yang semakin besar. Pada eksitasi pertama ini, kombinasi bilangan kuantum (n_1, n_2, n_3) yang mungkin adalah (211, 121, 112) ketiga kombinasi ini menghasilkan nilai energi yang sama. Kita masukkan misalnya $n_1 = 2, n_2 = 1$ dan $n_3 = 1$ kemudian diperoleh:

$$E_{1st} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2} (2^2 + 1^2 + 1^2) = \frac{3\pi^2 \hbar^2}{mL^2}$$

Fungsi gelombang berbeda tapi menghasilkan tingkat energi yang sama ini kemudian disebut sebagai keadaan **degenerasi**, dengan p adalah derajat degenerasi. Derajat degenerasi adalah jumlah kombinasi yang mungkin pada degenerasi. Tingkat energi pada sebuah partikel di dalam kotak potensial tak hingga dengan derajat degenerasinya diilustrasikan pada Gambar 5.6.

Gambar 5. 6 Tingkat - tingkat Energi, Derajat Terdegenerasi, dan Bilangan Kuantum untuk Partikel dalam Potensial Kubus



Sumber: Kusminarto 2011.

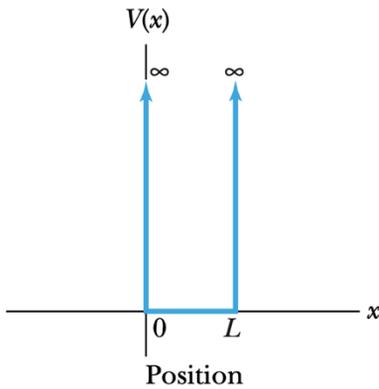
Rangkuman

1. Sumur potensial adalah penerapan sederhana dari Persamaan Gelombang Schrodinger dan digunakan untuk melakukan kuantisasi energi dan bilangan kuantum.
2. Sumur potensial berhingga menghasilkan tingkat energi yang lebih rendah dari sumur potensial tak berhingga.
3. Kotak potensial tak hingga digunakan untuk memahami keadaan terdegenerasi, yaitu keadaan fisis yang berbeda (fungsi gelombang berbeda) namun memiliki energi yang sama.

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

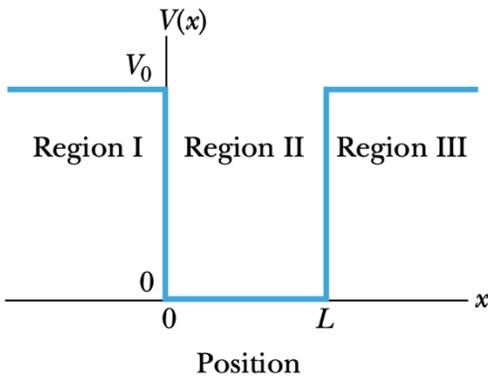
1. Perhatikan gambar berikut



Fungsi gelombang partikel yang berada di daerah $0 < x < L$ adalah

- A. $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$
- B. $E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$
- C. $\psi_{n_x, n_y, n_z} = A \sin\left(n_x \frac{\pi x}{L_x}\right) \sin\left(n_y \frac{\pi y}{L_y}\right) \sin\left(n_z \frac{\pi z}{L_z}\right)$
- D. $E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$
- E. $\psi = Ce^{ikx} + De^{-ikx}$

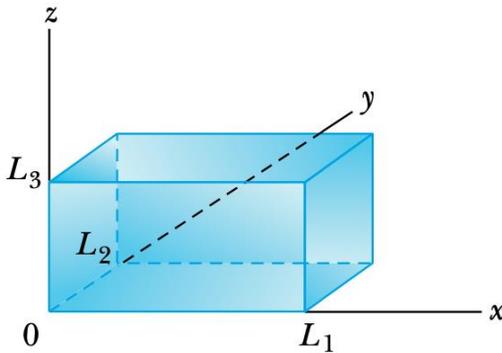
2. Perhatikan gambar berikut



Fungsi gelombang partikel yang berada di daerah $0 < x < L$ adalah

- A. $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$
- B. $E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$
- C. $\psi_{n_x, n_y, n_z} = A \sin\left(n_x \frac{\pi x}{L_x}\right) \sin\left(n_y \frac{\pi y}{L_y}\right) \sin\left(n_z \frac{\pi z}{L_z}\right)$
- D. $E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$
- E. $\psi = C e^{ikx} + D e^{-ikx}$

3. Perhatikan gambar berikut



Fungsi gelombang partikel yang berada di daerah $0 < x < L$ adalah

- A. $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$
- B. $E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$
- C. $\psi_{n_x, n_y, n_z} = A \sin\left(n_x \frac{\pi x}{L_x}\right) \sin\left(n_y \frac{\pi y}{L_y}\right) \sin\left(n_z \frac{\pi z}{L_z}\right)$
- D. $E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$
- E. $\psi = C e^{ikx} + D e^{-ikx}$

4. Batasan nilai energi partikel dalam sumur potensial tak hingga pada daerah $0 < x < L$ dinyatakan dalam

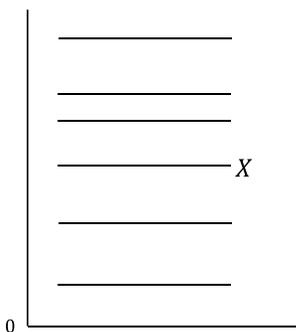
- A. $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$
- B. $E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$
- C. $\psi_{n_x, n_y, n_z} = A \sin\left(n_x \frac{\pi x}{L_x}\right) \sin\left(n_y \frac{\pi y}{L_y}\right) \sin\left(n_z \frac{\pi z}{L_z}\right)$
- D. $E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$
- E. $\psi = C e^{ikx} + D e^{-ikx}$

5. Batasan nilai energi partikel dalam kotak potensial berhingga pada daerah $0 < x < L$ dinyatakan dalam

- A. $\psi_n(x) = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi x}{L}\right)$
- B. $E_n = n^2 \frac{\pi^2 \hbar^2}{2mL^2}$
- C. $\psi_{n_x, n_y, n_z} = A \sin\left(n_x \frac{\pi x}{L_x}\right) \sin\left(n_y \frac{\pi y}{L_y}\right) \sin\left(n_z \frac{\pi z}{L_z}\right)$
- D. $E_{n_x, n_y, n_z} = \frac{\pi^2 \hbar^2}{2m} \left(\frac{n_x^2}{L_x^2} + \frac{n_y^2}{L_y^2} + \frac{n_z^2}{L_z^2} \right)$
- E. $\psi = C e^{ikx} + D e^{-ikx}$

6. Perhatikan gambar berikut

$$E_1 = \frac{(\pi^2 \hbar^2)}{2mL^2}$$



Daerah yang ditandai dengan X adalah

- A. Eksitasi pertama dengan $E = 6 E_1$ dan $p = 3$
- B. Eksitasi kedua dengan $E = 6 E_1$ dan $p = 3$
- C. Eksitasi ketiga dengan $E = 6 E_1$ dan $p = 3$
- D. Eksitasi kedua dengan $E = 9 E_1$ dan $p = 3$
- D. Eksitasi ketiga dengan $E = 9 E_1$ dan $p = 3$

7. Solusi penyelesaian dari persamaan Schrodinger dilambangkan dengan

- A. psi
- B. mu
- C. rho
- D. delta
- E. k

8. Besar probabilitas memperoleh partikel di daerah $0 < x \leq L$ dalam kotak potensial tak hingga yang berdimensi L adalah

- A. $\frac{1}{4}$
- B. $\frac{1}{2}$
- C. $\frac{1}{3\pi}$
- D. $\frac{1}{2} + \frac{1}{3\pi}$
- E. $\frac{1}{4} + \frac{1}{6\pi}$

9. Pada partikel yang berada di dalam sumur potensial tak hingga, probabilitas menemukan partikel akan menjadi nol pada keadaan ...

- A. Semua bilangan kuantum
- B. Bilangan kuantum ganjil
- C. Bilangan kuantum genap
- D. Ground state
- E. Bilangan kuantum kelipatan 3

10. Sebuah electron terjebak di dalam sumur potensial tak hingga dengan lebar 1 cm. Pada bilangan kuantum berapa sebuah electron mencapai energi 1 eV?

- A. $\sim 10^5$
- B. $\sim 10^6$
- C. $\sim 10^7$
- D. $\sim 10^8$
- E. $\sim 10^9$

Essay

1. Bandingkan pada sumur potensial tak hingga dengan sumur potensial berhingga.
 - a. Jelaskan perbedaan dan kemiripan diantara keduanya!

Jawab

b. Bagaimana dengan panjang gelombang pada sumur potensial berhingga? Apakah lebih besar atau lebih kecil dari sumur potensial tak hingga?

Jawab:

2. Untuk kotak potensial tak hingga, *ground state* dinyatakan dengan $n_1 = n_2 = n_3 = 1$. Kenapa tidak diperbolehkan $n_1 = 1$ dengan $n_2 = n_3 = 0$?

Jawab:

3. Sebuah partikel di dalam kotak potensial mengalami eksitasi pertama sebesar 3 eV. Berapa panjang sisi kotak?

Jawab:

4. Sebuah partikel pada sumur potensial tak hingga memiliki energi ground state $4,3 \text{ eV}$

- a. Hitung dan gambarkan tiga tingkat energi berikutnya!
 - b. Gambarkan juga fungsi gelombangnya disamping tingkat energi
- jawab:

5. Jika sebuah partikel terjebak di dalam kotak potensial dengan panjang sisi L , $2L$ dan $4L$.

- a. Tentukan energi pada ground state masing – masing kotak
- jawab:

b. Tentukan juga tiga tingkat energi berikutnya setelah ground state
jawab:

c. Apakah ada keadaan yang terdegenerasi dari ketiga kotak ini?
jawab:

6. Diameter dari sebuah nucleus (inti atom) adalah 10^{-14} m. Gunakan sumur potensial tak hingga untuk menghitung energi transisi dari eksitasi pertama ke *ground state* untuk sebuah elektron.

jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 80% , berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.
- https://edurev.in/course/quiz/attempt/-1_Application-Of-Schrodinger-Equation-MCQ-/264f0044-0cdc-4985-bb59-a01cc3d37ace
- http://file.upi.edu/Direktori/FPMIPA/JUR._PEND._FISIKA/195806081987031-YUYU_RACHMAT_TAYUBI/MATERI_KUANTUM/SOLUSI%21/Kunci_Jawaban_TU_..._Pend._Fisika_Kuantum.pdf
- <http://www.iitg.ac.in/asil/QM-02.pdf>
- <https://muhammadilham99.files.wordpress.com/2014/12/83999658-catatan-fistum-1.pdf>
- [https://web.iitd.ac.in/~pramitc/Lecture%20review%207_Particle%20in%20a%20box%20\(3D&2D\).pdf](https://web.iitd.ac.in/~pramitc/Lecture%20review%207_Particle%20in%20a%20box%20(3D&2D).pdf)
- https://www.youtube.com/watch?v=wfr11_JydbY

Kegiatan Pembelajaran 2 SOLUSI PERSAMAAN SCHRODINGER (PART 2)

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan keadaan gelombang pada partikel menggunakan fungsi gelombang	a. Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk mendeskripsikan keadaan partikel pada Osilator harmonik sederhana b. Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk mendeskripsikan keadaan partikel pada Efek tunneling

Uraian Materi

A. Osilator Harmonik Sederhana

Secara alami, ada banyak keadaan setimbang yang memiliki bentuk potensial seperti potensial dari sebuah osilator harmonik, misalnya potensial dari sebuah molekul diatomik yang ditandai oleh kurva biru (Gambar 5.1). Potensial yang dihasilkan dari atom – atom dari zat padat juga mendekati potensial dari osilator harmonik sederhana. Potensial dari sebuah sistem kisi kristal, kisi kristal adalah susunan atom- atom pada kristal, yang juga mendekati osilator harmonik sederhana. Kisi kristal akan mengalami osilasi (getaran), dimana simpangan Δx terhadap titik setimbangnya x_0 dari tiap kisi akan bergantung pada besarnya yang diberikan pada atom-atom kristal.

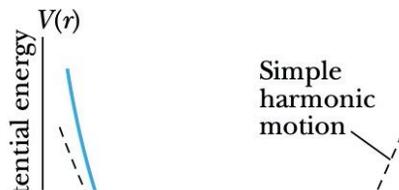
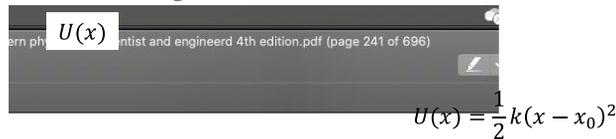
Osilasi harmonik sederhana atau Gerak Harmonik Sederhana (GHS) adalah gerak periodik (berulang) dengan interval waktu tetap. Di Fisika Dasar kita mempelajari GHS dengan menggunakan sebuah benda bermassa m yang diikatkan pada sebuah pegas (Gambar). Benda kemudian ditarik dengan gaya F , sehingga menghasilkan simpangan sebesar $x - x_0$. Hubungan antara gaya dan simpangan kemudian dinyatakan dengan

$$F = k(x - x_0)$$

Dan besar energi potensial yang tersimpan dalam pegas diberikan oleh

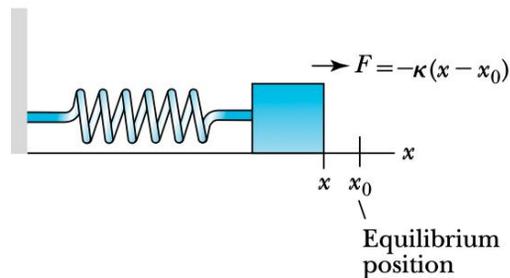
$$U(r) = \int F \cdot dr = k \int r \, dr = \frac{1}{2} r^2 \Big|_{x_0}^x = \frac{1}{2} (x - x_0)^2 \quad 5.23$$

Gambar 5. 7 Kurva Energi Potensial dari Molekul Diatomik yang berbentuk seperti Energi Potensial Osilator Harmonik



Sumber: Thornton, 2013

Gambar 5. 8 Gerak Harmonik Sederhana (GHS)



Sumber: Thornton, 2013

Fungsi energi potensial dari persamaan 5.23 ini kemudian dapat kita nyatakan ke dalam deret pangkat, yaitu dengan menggunakan Deret Taylor. Ekspansi dari persamaan 5.23 ke dalam deret Taylor dituliskan sebagai berikut:

$$U(r) = U_0 + U_1(x - x_0) + \frac{1}{2} U_2(x - x_0)^2 + \dots \quad 5.24$$

Dimana U_0 , U_1 dan U_2 adalah sebuah konstanta. Kita cukup menggunakan tiga suku pertama dari deret ini, karena kita anggap simpangan yang dialami benda cukup kecil $(x - x_0) \approx 0$.

Pada titik $x = x_0$ benda mengalami kesetimbangan, pada titik ini energi potensial sistem GHS adalah minimum, sehingga

$$\frac{dU}{dx} = 0$$

Pada keadaan ini akan menghasilkan $U_0 = 0$ dan $U_1 = 0$, maka energi potensial terendah pada keadaan ini dinyatakan dengan

$$U(x) = \frac{1}{2}U_2(x - x_0)^2 = \frac{1}{2}k(x - x_0)^2 \quad 5.25$$

1. Persamaan Keadaan untuk Sumur Potensial Osilator Harmonik Sederhana

Dari bentuk energi potensial ini (Persamaan 5.23) maka kita akan mempelajari deskripsi kuantum pada partikel yang melakukan gerak harmonik sederhana (GHS) atau berada dalam potensial osilator harmonik. Kita masukkan potensial osilator harmonik ke dalam persamaan Schrodinger tak bergantung waktu

$$\begin{aligned} E\psi &= \frac{-\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial x^2} \psi + U\psi \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} &= \frac{2m}{\hbar^2} (-E + U)\psi = \frac{2m}{\hbar^2} \left(-E + \frac{1}{2}k(x - x_0)^2 \right) \psi \\ \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} &= \left(-\frac{2mE}{\hbar^2} + \frac{mk}{\hbar^2} (x - x_0)^2 \right) \psi \end{aligned}$$

Jika kemudian kita anggap posisi semula ada di titik origin $x_0 = 0$, maka

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \left(-\frac{2mE}{\hbar^2} + \frac{mk}{\hbar^2} x^2 \right) \psi \quad 5.26$$

Jika kita definisikan

$$\alpha^2 = \frac{mk}{\hbar^2} \quad 5.27$$

Dan

$$\beta = \frac{2mE}{\hbar^2} \quad 5.28$$

Maka persamaan 5.26 dapat kita tulis ulang menjadi

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = (\alpha^2 x^2 - \beta) \psi \quad 5.29$$

Sebelum kita mencari solusi dari persamaan 5.29, maka kita jelaskan terlebih dahulu permasalahannya secara kualitatif. Karena benda terikat (terjebak) pada sebuah sumur potensial harmonik, maka probabilitas paling besar untuk

menemukan partikel ada pada nilai maksimumnya (saat di titik setimbang). Dengan kata lain partikel akan cenderung berada di tengah sumur. Sementara jika partikel berada pada titik tak hingga $x = \pm\infty$, maka probabilitasnya menjadi nol $\psi(x) = 0 \rightarrow x = \pm\infty$.

Solusi untuk fungsi gelombang (Pers. 5.29) adalah

$$\psi_n = H_n(x) e^{-\frac{\alpha x^2}{2}} \quad 5.30$$

Dimana H_n adalah polynomial Hermitian dengan orde n dan n adalah bilangan bulat ≥ 0 .

$$\psi_n = H_n(x) e^{-\frac{\alpha x^2}{2}}$$

Fungsi $H_n(x)$ adalah fungsi polynomial Hermitian, banyak ditabulasikan di buku – buku mekanika kuantum. Beberapa suku awal dari ψ_n dan $|\psi_n|^2$ diberikan pada Gambar 5.9.

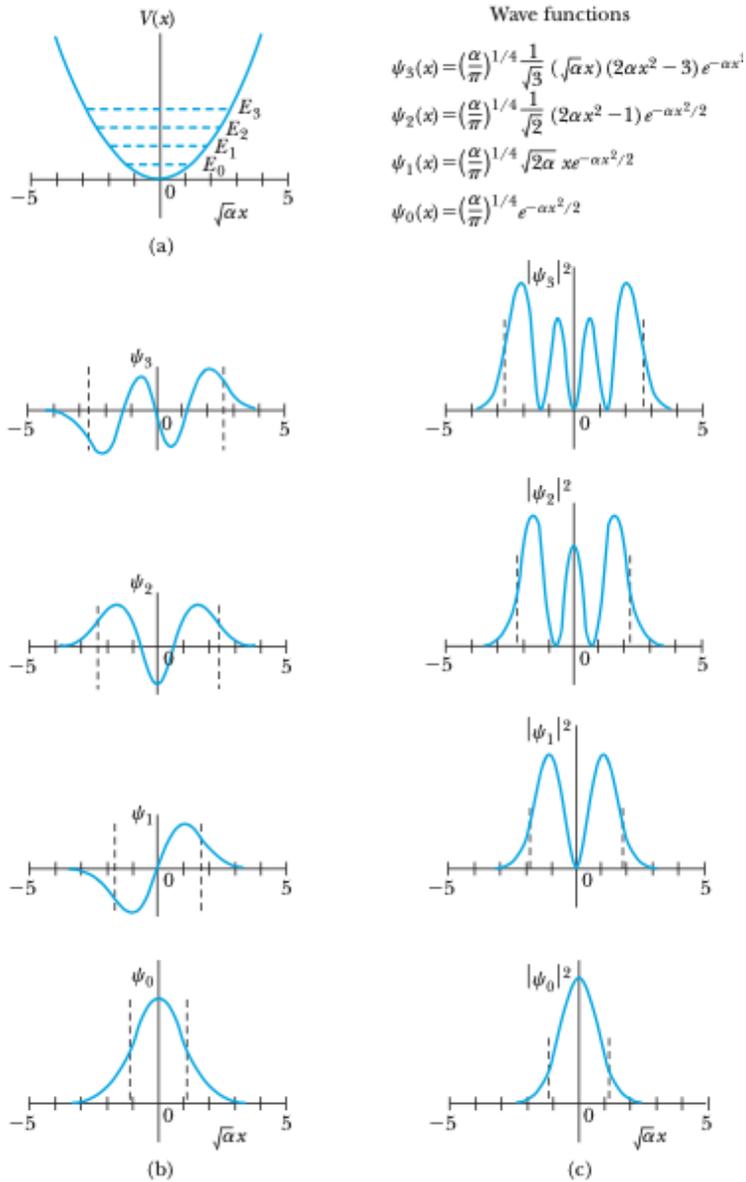
Jika kita bandingkan dengan partikel dalam kotak, dimana fungsi osilasi gelombang berupa kurva sinusoidal, maka pada kasus ini perilaku osilasi disebabkan oleh polynomial yang mendominasi pada x kecil. Deret dari eksponensial diberikan oleh fungsi Gaussian yang mendominasi pada x besar.

2. Zero Point Energy pada Sumur Potensial Osilator Harmonik Sederhana

Berapakah energi terendah dari sebuah partikel yang berada pada sumur potensial osilator harmonik sederhana? Apakah $E = 0$ memungkinkan? Jika $E = 0$ maka $x = 0$ dan $U = 0$, agar $E \geq U$. Namun apabila E dan U adalah nol, maka energi kinetik K dan momentum p juga adalah nol. Momentum dan posisi yang sama – sama nol ini tidak memenuhi prinsip ketidakpastian Heisenberg. Sehingga energi terendah dari potensial osilator harmonik sederhana ini bukanlah nol.

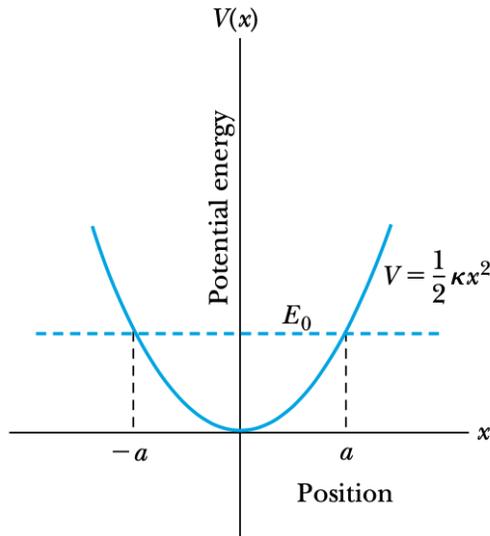
Faktanya ternyata semua tingkat energi pada potensial harmonik sederhana ini bernilai positif karena $E > 0 \geq U$. Energi terendah dinyatakan dengan E_0 (Gambar 5.9) dan fungsi gelombang (atau fungsi keadaan) pada *ground state* dinyatakan dalam ψ_0 , fit dengan daerah yang diberikan oleh energi potensial (Gambar 5.10).

Gambar 5. 9 Distribusi fungsi keadaan pada sumur potensial osilator Harmonik Sederhana (a) Empat Energi pertama dan Fungsi Gelombangnya; (b) Plot Fungsi Gelombang ; (c) Densitas Probabilitas



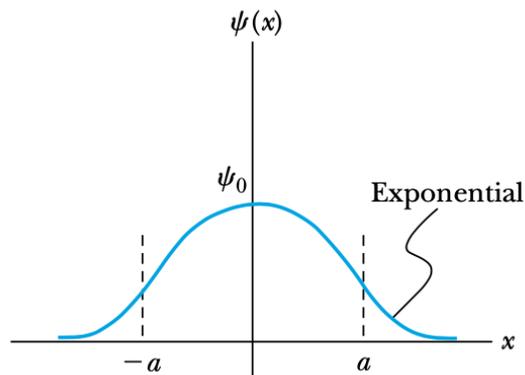
Sumber: Thornton, 2013

Gambar 5. 10 Ground State pada Sumur Potensial Osilator Harmonik Sederhana



Sumber: Thornton, 2013

Gambar 5. 11 Fungsi Keadaan Ground State pada Sumur Potensial Osilator Harmonik Sederhana



Sumber: Thornton, 2013

Kita ambil jika

$$E_0 = U_0 = \frac{1}{2} \kappa a^2$$

Dengan $\pm a$ menunjukkan batas panjang yang dapat ditempuh partikel (secara klasik). Namun pada pembahasan sebelumnya, partikel ini terjebak di dalam sumur potensial (tidak dapat keluar dari sumur potensial). Probabilitas

menemukan partikel pada daerah diluar sumur adalah kecil. Karena itu fungsi gelombang di dinding sumur ($x = \pm a$) tidak nol melainkan memiliki nilai berhingga yang menurun ke nol pada sisi diluar dinding sumur. Maka fungsi gelombang paling rendah ψ_0 yang paling memungkinkan kemudian diperlihatkan pada Gambar (5.10).

Energi minimum dari partikel yang berada dalam potensial osilator harmonik sederhana biasanya disebut juga sebagai energi titik nol atau *zero point energy*. *Zero point energy* dapat dicari menggunakan ketidakpastian Heisenberg. Di Fisika Dasar kita telah memperoleh bahwa pada sebuah partikel yang melakukan gerak harmonik sederhana dari $-x$ hingga $+x$, energi kinetik rata – rata setara dengan energi potensial rata – rata. Energi kinetik rata – rata dan Energi potensial rata – rata ini juga setara dengan setengah dari energi total. Hubungan energi- energi ini kita tuliskan

$$K_{av} = \frac{1}{2}E = \frac{1}{2}k(x^2)_{av} = \frac{1}{2m}(p^2)_{av} \quad 5.31$$

Nilai rata- rata dari x adalah nol, tapi nilai rata – rata dari $(x^2)_{av}$ adalah simpangan kuadrat rata – rata $(\Delta x)^2$. Demikian juga dengan $(p^2)_{av} = (\Delta p)^2$. Persamaan diatas dapat kita tuliskan ulang:

$$E = k(\Delta x)^2 = \frac{1}{m}(\Delta p)^2 \quad 5.32$$

Maka

$$\begin{aligned} (\Delta x)^2 &= \frac{1}{mk}(\Delta p)^2 \\ \Delta x &= \Delta p \sqrt{\frac{1}{mk}} \end{aligned} \quad 5.33$$

Dari ketidakpastian Heisenberg kita peroleh

$$\Delta p \Delta x = \frac{\hbar}{2}$$

Maka nilai minimum dari Δx adalah

$$\Delta x = \frac{\hbar}{2\Delta p} \quad 5.34$$

Maka energi terendahnya adalah

$$E_0 = k(\Delta x)^2 = k \left(\frac{\hbar}{2\Delta p} \right) \left(\Delta p \sqrt{\frac{1}{mk}} \right) \quad 5.35$$

$$E_0 = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{k^2}{mk}} = \frac{\hbar}{2} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{\hbar\omega}{2} \quad 5.36$$

Maka kita dapat mengestimasi energi terendah dari partikel dalam sumur potensial osilator harmonik sederhana adalah

$$E_0 = \frac{\hbar\omega}{2}$$

3. Tingkat Energi pada Sumur Potensial Osilator Harmonik Sederhana

Fungsi gelombang (Pers. 5.30) pada sumur potensial osilator harmonik dinyatakan dengan,

$$\psi_n = H_n(x) e^{-\frac{\alpha x^2}{2}}$$

Dengan fungsi Hermitian dinyatakan:

$$H_n(x) = a_n y^{n+s} \quad 5.37$$

Persamaan 5.37 kemudian dimasukkan ke persamaan diferensial 5.29

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = (\alpha^2 x^2 - \beta) \psi$$

Akan diperoleh hubungan rekursif untuk koefisien – koefisien dari y^{n+s} sebagai

$$a_{n+2} = \frac{2n - \frac{\beta}{\omega} + 1}{(n+1)(n+2)} a_n \quad 5.37$$

Dengan $s = 0$. Hubungan rekursif yang dinyatakan pada persamaan 5.37 kemudian digunakan untuk memperoleh nilai – nilai koefisien a_n , untuk n genap dan n ganjil secara terpisah.

- Dimulai dari a_0 maka akan diperoleh semua suku genap dari a_n , yaitu (a_0, a_2, a_4, \dots)
- Dimulai dari a_1 maka akan diperoleh semua suku ganjil dari a_n , yaitu (a_1, a_3, a_5, \dots)

Dengan kata lain diperlukan 2 konstanta yaitu a_0 dan a_1 untuk menemukan ungkapan eksplisit dari deret $H_n(x)$. Namun demikian deret ini tidak bersifat konvergen, sehingga perlu dipotong supaya bersifat konvergen. Dengan kata lain deret ini dirubah menjadi sebuah polinomial, sehingga berlaku

$$\frac{2n - \frac{\beta}{\omega} + 1}{(n+1)(n+2)} = 0$$

Kondisi ini kemudian menghasilkan

$$\frac{\beta}{\omega} = 2n + 1$$

Kombinasikan kondisi diatas dengan persamaan 5.28

$$\begin{aligned} \frac{\beta}{\omega} &= \frac{2mE}{\hbar^2} \\ \beta &= \frac{2mE}{\hbar^2} \omega \\ 2n + 1 &= \frac{2mE}{\hbar^2} \omega \end{aligned} \quad 5.38$$

Tingkat tingkat energi dari potensial osilator harmonik dinyatakan dengan

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \sqrt{\frac{k}{m}} \quad 5.39$$

Dimana $n = 0,1,2 \dots$

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega$$

Contoh Kasus- Normalisasi Fungsi Gelombang Partikel pada Potensial Osilator Harmonik Sederhana (OHS)

Normalisasi fungsi gelombang ψ_0 keadaan dasar (*ground state*) untuk gerak harmonik sederhana. Tentukan juga nilai ekspektasi dari $\langle x \rangle$ dan $\langle x^2 \rangle$.

Strategi

Gunakan persamaan 4.19.a untuk melakukan normalisasi. Asumsikan bahwa kita telah mengetahui fungsi gelombang ψ_0 adalah persamaan 5.30 . $H_0(x)$ tidak memiliki ketergantungan dengan x, sehingga kita dapat menganggapnya sebagai sebuah konstanta A. kita kemudian bisa menentukan nilai ekspektasi sebagaimana di Modul 4 Kegiatan Pembelajaran 2.

Solusi

Jika kita gunakan

$$H_0(x) = A$$

Maka fungsi *ground state* menjadi

$$\psi_0(x) = Ae^{-ax^2/2}$$

Kemudian kita normalisasi agar memperoleh A.

$$\int_{-\infty}^{\infty} \psi_0^*(x)\psi_0(x) dx = 1$$

$$A^2 \int_{-\infty}^{\infty} e^{-ax^2} dx = 1$$

$$2A^2 \int_0^{\infty} e^{-ax^2} dx = 1$$

Kita menyelesaikan integral diatas menggunakan tabel integral (lihat Appendix 6 buku Thornton), yang kemudian menghasilkan

$$2A^2 \left(\frac{1}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \right) = 1$$

$$A^2 = \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}}$$

$$A = \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^{1/4}$$

Maka fungsi *ground state* memberikan:

$$\psi_0(x) = \left(\frac{\alpha}{\pi} \right)^{1/4} e^{-ax^2/2} \tag{5.40}$$

Ini adalah dungsi gelombang yang tepat menjelaskan Gambar 5.9 dan merupakan bentuk Gaussian.

Nilai ekspektasi dari x diberikan oleh

$$\langle x \rangle = \int_{-\infty}^{\infty} \psi_0^*(x)x \psi_0(x) dx$$

$$\langle x \rangle = \sqrt{\frac{\pi}{\alpha}} \int_{-\infty}^{\infty} x e^{-ax^2} dx$$

Nilai $\langle x \rangle$ harus sama dengan nol, karena kita mengintegrasikan sebuah fungsi genap di sepanjang simetri dengan limi dari $-\infty$ ke ∞ (lihat Appendix 6 Buku Thornton). Prediksi klasik dan mekanika kuantum menunjukkan nilai rata-rata dari x adalah nol karena adanya keadaan simetri dari energi potensial $\frac{kx^2}{2}$.

Nilai ekspektasi $\langle x^2 \rangle$ harus positif, karena nilai x^2 tidak pernah negatif.

$$\begin{aligned}
\langle x^2 \rangle &= \int_{-\infty}^{\infty} \psi_0^*(x) x^2 \psi_0(x) dx \\
&= \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} x^2 e^{-\alpha x^2} dx \\
&= 2 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \int_0^{\infty} x^2 e^{-\alpha x^2} dx
\end{aligned}$$

Penyelesaian integral diatas dapat menggunakan tabel bantuan pada Appendix 5 Buku Thornton dan menghasilkan

$$\langle x^2 \rangle = 2 \sqrt{\frac{\alpha}{\pi}} \left(\frac{\sqrt{\pi}}{4\alpha^{3/2}} \right) = \frac{1}{2\alpha}$$

Masukkan konstanta α dari persamaan 5.27 sehingga diperoleh

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\hbar}{2\sqrt{mk}}$$

Karena $\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$ maka kita peroleh

$$\langle x^2 \rangle = \frac{\hbar}{2m\omega} \tag{5.41}$$

dan karena

$$(x^2)_{av} = (\Delta x)^2 = \frac{E_0}{k}$$

Dengan

$$E_0 = \frac{\hbar\omega}{2}$$

Energi minimum mengikuti prinsip ketidakpastian. Kini kita dapat membuktikan bahwa persamaan ini konsisten karena

$$\langle x^2 \rangle = (x^2)_{av} = \frac{E_0}{k} = \frac{\hbar\omega}{2k} = \frac{\hbar\omega}{2m\omega^2} = \frac{\hbar}{2m\omega}$$

(hasil yang sama dengan persamaan 5.41)

4. OHS pada Tinjauan Klasik dan Kuantum

Tingkat-tingkat energi pada potensial osilator harmonik telah dirumuskan pada persamaan 5.39 dan telah digambarkan pada Gambar 5.9 a. dari persamaan 5.39 kita peroleh bahwa secara kuantum, osilator harmonik

sederhana akan menghasilkan selisih dua energi terdekat yang seragam pada tiap tingkatan energi

$$\Delta E = E_{n+1} - E_n = \hbar\omega$$

Gerak partikel pada sistem osilator harmonik sederhana (OHS) dapat dibandingkan secara langsung untuk sistem klasik dan kuantum. Untuk OHS klasik dengan sebuah benda yang terikat di ujung pegas, nilai kecepatan maksimum akan dicapai saat benda melewati posisi kesetimbangan ($x = 0$). Di sisi lain, kecepatan benda minimum saat berada di simpangan maksimum, yaitu saat terjadi pembalikan arah gerak benda. Dengan demikian, secara klasik probabilitas terbesar untuk mendapatkan benda adalah saat berada di kedua posisi ujung tersebut dan probabilitas terkecil di posisi setimbangnya.

Di sisi lain, pada tinjauan kuantum, probabilitas mendapatkan benda adalah saat kuadrat fungsi gelombangnya adalah maksimum ψ_n^2 (Gambar 5.9.c). Nilai terbesar yang ditunjukkan ψ_n^2 saat energi terendah $n = 0$ ada pada posisi setimbang, yang mana hal ini bertentangan dengan tinjauan klasik. Namun berdasarkan prinsip korespondensi, yang menyatakan bahwa:

“Teori kuantum harus sesuai dengan teori klasik pada limit ketika teori klasik diketahui sesuai dengan hasil eksperimen.”

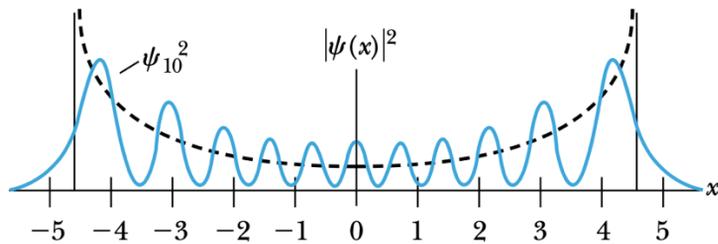
Atau sama dengan

“Teori kuantum harus sesuai dengan teori klasik pada limit bilangan kuantum yang besar.”

Dari prinsip korespondensi ini, diharapkan bahwa hasil yang diperoleh dari teori kuantum mendekati dengan hasil yang diperoleh secara klasik untuk nilai bilangan kuantum n yang sangat besar.

Rapat probabilitas pada n yang besar kemudian kita tampilkan pada Gambar 5.12. Pada $n = 10$ ternyata rapat probabilitasnya sudah mendekati tinjauan klasik. Sehingga pada osilator harmonik sederhana dengan nilai n yang semakin besar akan menunjukkan nilai – nilai puncak dari rapat probabilitas kuantum yang makin besar di bagian tepi atau ujung dari sistem osilator harmonik sehingga menyerupai prediksi teori klasik.

Gambar 5. 12 Grafik Rapat Probabilitas Kuantum untuk $n = 10$ dibandingkan dengan Probabilitas Klasik (Garis Putus)



Sumber: Thornton, 2013

Tabel 9 Perbandingan Osilator Harmonik pada tinjauan Klasik dan Kuantum

Aspek	Osilator Harmonik	
	Klasik	Kuantum
a. Energi Partikel	Kontinu	Diskrit
b. Energi minimum (<i>Ground State</i>)	0	$\frac{1}{2} \hbar \omega$
c. Energi <i>Gap</i>	Nilai energi gap sembarang	Nilai energi <i>gap</i> atau selisih antara 2 nilai energi berdekatan selalu sama atau homogen, yaitu besarnya $\Delta E = \hbar \omega$
d. Probabilitas tertinggi untuk mendapatkan partikel	Ada di dekat dinding potensial osilator harmonik	Ada di lokasi yang terdekat dengan dinding potensial untuk nilai n yang besar

Sumber: Sutjahja, 2018

Sebagai simpulan, sifat- sifat penting yang berkaitan dengan fungsi gelombang dan energi partikel pada potensial OHS, persamaan dan perbedaannya antara kasus klasik dan kuantum diberikan pada Tabel 9.

B. Efek Tunneling

Kita telah mempelajari bahwa posisi partikel bisa diperoleh dari probabilitas. Probabilitas posisi partikel diperoleh dari hasil kuadrat fungsi

gelombangnya. Probabilitas paling besar adalah pada daerah amplitudo fungsi gelombang. Kita juga telah mempelajari tentang perilaku partikel saat berada di dalam sumur potensial. Sumur potensial adalah keadaan dimana partikel dikelilingi oleh potensial penghalang, sehingga secara klasik partikel ini tidak dapat keluar dari sumur potensial.

Permasalahan partikel dalam potensial penghalang (*potential barrier*) yang merupakan fenomena fisis nyata. Perilaku partikel pada potensial barrier secara klasik bisa kita analogikan (bayangkan) seperti sebuah bola berada diantara dua bukit dan bola itu mencoba untuk berguling melampaui bukit (Gambar 5.13). Jika energi mekanik bola cukup besar, maka bola ini bisa melampau bukit – bukit yang menghalanginya, sehingga bola bisa keluar dari tempatnya semula. Namun secara klasik, bola ini tidak akan bisa keluar dari tempat asalnya jika memiliki energi yang lebih kecil.

Gambar 5. 13 Analogi klasik Partikel pada Potensial Penghalang



Tinjauan klasik ini ternyata berbeda dengan hasil eksperimen yang diamati pada tahun 1927 oleh Friedrich Hund. Saat menghitung *ground state* dari sumur potensial ganda, Ia mengamati bahwa dengan probabilitas yang kecil, partikel masih bisa menerobos (*tunneling*) potensial penghalang ini. Leonid Mandelstam dan Mikhail Leontovoch masing – masing juga berhasil menemukan fenomena ini pada tahun yang sama. Max Born kemudian menyadari bahwa fenomena menerobosnya partikel pada potensial penghalang ini tidak terbatas hanya pada fisika nuklir tapi juga bisa pada sistem yang lain, misalnya pancaran medan pada semikonduktor dan mekanisme kerja enzim. Dengan demikian efek tunneling ini adalah sebuah fenomena fisis yang umum (general) yang hanya bisa dijelaskan secara quantum. Bagaimana partikel bisa menerobos dinding partikel ini? Mari pelajari dengan antusias!

Titik Henti

Sebelum lanjut ke pembahasan berikutnya, tonton terlebih dahulu video pada link atau scan kode QR berikut. Supaya kamu bisa mendapatkan visualisasi yang lebih baik tentang *quantum tunneling*.

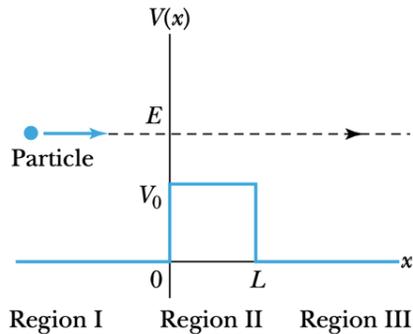
<https://www.youtube.com/watch?v=RF7dDt3tVmI>



1. Potensial Penghalang dengan $E > V_0$

Apabila sebuah partikel dengan energi E mendekati sebuah dinding penghalang dengan energi potensial V_0 pada $0 < x < L$. Potensial di daerah panapun adalah nol. Pertama – tama, kita anggap sebuah partikel memiliki energi yang lebih besar dari energi potensial penghalangnya. Energi potensial penghalang ini kemudian kita sebut sebagai potensial penghalang (V_0). Jika $E > V_0$ (Gambar 5.14), maka kita dapat menyimpulkan bahwa partikel bisa keluar dari daerah asalnya di Region I kemudian ke Region II dan III.

Gambar 5. 14 Partikel dengan $E > V_0$ terhadap Potensial Penghalang



Sumber: Thornton, 2013

Setelah partikel keluar dari region I ke region II, kecepatan partikel akan menurun, dengan energi kinetiknya dinyatakan sebagai

$$K_{II} = \frac{1}{2}mv^2 = E - V_0$$

Kemudian setelah berada di region III, partikel akan kembali ke kecepatan awalnya di region I. Karena potensial di region 3 adalah nol, maka energi kinetiknya dinyatakan dengan

$$K_I = K_{III} = \frac{1}{2} m v_0^2 = E$$

Karena partikel berperilaku sebagai gelombang, maka bilangan gelombang pada ketiga daerah ini masing – masing dinyatakan sebagai

a. Pada daerah penghalang (Region II):

$$k_{II} = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)} \quad 5.42$$

Dan

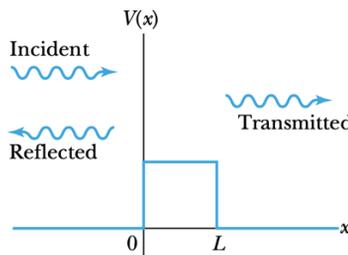
b. pada daerah I dan II:

$$k_I = k_{III} = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} E} \quad 5.43$$

Kita kemudian bisa menjelaskan perilaku gelombang partikel ini seperti saat berkas cahaya mengenai medium, misalnya medium kaca. Berkas cahaya yang ditembakkan ke medium ini kemudian akan ada yang diteruskan hingga menembus bidang (ditransmisikan) dan ada juga yang dipantulkan kembali (direfleksikan). Dengan demikian, maka fungsi gelombang pada dinding penghalang akan memiliki tiga jenis, yaitu gelombang datang (incident), fungsi gelombang transmisi dan fungsi gelombang refleksi (Gambar 5.15).

Ketiga fungsi gelombang ini diselesaikan sesuai dengan persamaan Schrodinger dengan menggunakan batas yang sesuai. Menurut fisika klasik, saat $E > V_0$ maka seluruh partikel akan ditransmisikan menuju region II hingga region III tanpa ada yang mengalami refleksi dan saat $E < V_0$ maka seluruh partikel akan direfleksikan tanpa ada yang ditransmisikan.

Gambar 5. 15 Gelombang Datang, Pantul dan Transmisi pada Potensial Penghalang



Sumber: Thornton, 2013

Sementara mekanika kuantum memprediksikan partikel akan ditransmisikan secara total jika energi partikel jauh lebih besar dari potensial penghalang ($E \gg V_0$) dan akan hampir seluruhnya direfleksikan jika energi partikel jauh lebih kecil dari potensial penghalang ($E \ll V_0$). Pada daerah dimana E setara dengan V_0 maka akan berlaku fenomena non klasik tak biasa.

Besar potensial dan gelombang Schrodinger pada tiap region dinyatakan sebagai :

$$\text{Region I } (x < 0) \quad V = 0 \quad \frac{\partial^2 \psi_I}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi_I = 0 \quad 5.44$$

$$\text{Region II } (0 < x < L) \quad V = V_0 \quad \frac{\partial^2 \psi_{II}}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0) \psi_{II} = 0 \quad 5.45$$

$$\text{Region III } (x > L) \quad V = 0 \quad \frac{\partial^2 \psi_{III}}{\partial x^2} + \frac{2m}{\hbar^2} E \psi_{III} = 0 \quad 5.46$$

Dengan ketiga fungsi gelombang pada setiap region memenuhi

$$\text{Region I } (x < 0) \quad \psi_I = Ae^{ik_1x} + Be^{-ik_1x} \quad 5.47.a$$

$$\text{Region II } (0 < x < L) \quad \psi_{II} = Ce^{ik_{II}x} + De^{-ik_{II}x} \quad 5.47.b$$

$$\text{Region III } (x > L) \quad \psi_{III} = Fe^{ik_{III}x} + Ge^{-ik_{III}x} \quad 5.47.c$$

Kemudian kita asumsikan pada region 1 terdapat dua fungsi gelombang, yaitu fungsi gelombang datang (incident) (arah rambat + x) dan fungsi gelombang refleksi (arah rambat -x). Yang masing – masing kita nyatakan dengan

$$\text{Gelombang datang} \quad \psi_I = Ae^{ik_1x} \quad 5.48.a$$

$$\text{Gelombang refleksi} \quad \psi_I = AB e^{-ik_1x} \quad 5.48.b$$

Pada region III hanya ada gelombang transmisi yang merambat pada arah +X, sehingga

$$\text{Gelombang transmisi} \quad \psi_{III} = F e^{ik_{III}x} \quad 5.48.c$$

Probabilitas partikel mengalami refleksi atau transmisi dinyatakan dengan rasion dari $\psi^* \psi$, yang dinyatakan dengan

$$R = \frac{|\psi_I(\text{refleksi})|^2}{|\psi_I(\text{incident})|^2} = \frac{B^* B}{A^* A} \quad 5.49$$

$$T = \frac{|\psi_{III}(\text{transmisi})|^2}{|\psi_I(\text{incident})|^2} = \frac{F^* F}{A^* A} \quad 5.50$$

Dengan R dan T masing – masing adalah probabilitas Refleksi dan Transmisi. Karena partikel hanya bisa mengalami keadaan ditransmisikan atau di refleksikan maka

$$R + T = 1 \quad 5.51$$

Nilai R dan T dapat diperoleh dengan mengaplikasikan nilai batas dengan $x \rightarrow \pm\infty$, $x = 0$ dan $x = L$. Syarat batas ini akan menentukan besar A, B, C, D dan

F. Penyelesaian ini tidak kita tuliskan disini, namun besar probabilitas Transmisi kemudian diperoleh:

$$T = \left| 1 + \frac{V_0^2 \sin^2(k_{II}L)}{4E(E - V_0)} \right|^{-1} \quad 5.52$$

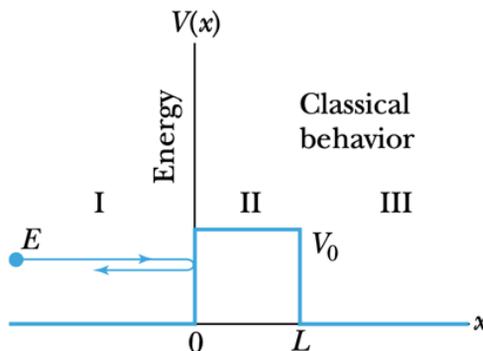
Dari persamaan 5.52 kita peroleh bahwa probabilitas transmisi akan dicapai saat $k_{II}L = n\pi$, dengan n adalah bilangan bulat

2. Potensial Penghalang dengan $E < V_0$

Sekarang kita perhatikan jika partikel memiliki energi yang lebih kecil dari potensial penghalangnya $E < V_0$. Secara klasik, partikel tidak akan mungkin dapat menembus penghalang. Gelombang yang datang hanya akan dipantulkan. Sehingga pada region I pada mekanika klasik hanya ada fungsi gelombang datang dan fungsi gelombang pantul (gambar 5.16). Partikel dari $x = \pm\infty$ akan mengalami pantulan saat $x = 0$.

Prediksi klasik ini ternyata bertentangan dengan hasil eksperimen Friedrich Hund, Leonid Mandelstam dan Mikhail Leontovoch. Mereka menemukan bahwa pada keadaan partikel berenergi rendah sekalipun, ternyata pada daerah II dan III masih terdapat energi dari partikel, artinya fungsi gelombang di region II dan III tidak nol. Fenomena partikel berenergi rendah yang dapat menembus potensial penghalang ini kemudian disebut sebagai **efek tunneling**. Probabilitas partikel yang mengalami efek tunneling ini memang kecil, namun berhingga dan hanya bisa dijelaskan melalui fenomena kuantum.

Gambar 5. 16 Potensial Penghalang dengan $E < V_0$



Sumber: Thornton, 2013

Bagaimana partikel masih dapat menerobos potensial penghalang? Partikel masih dapat menerobos potensial penghalang karena partikel berperilaku juga sebagai gelombang. Seperti yang telah dijelaskan dibagian awal, kita bisa menjelaskannya dengan menganalogikan gelombang partikel sebagai gelombang cahaya. Gelombang cahaya ini masih bisa menembus benda – benda bening. Demikian juga gelombang partikel juga masih bisa menembus potensial penghalang, meskipun hanya pada lebar tertentu. Apabila dinding potensial penghalang terlalu lebar, maka partikel juga tidak dapat menembusnya. Perilaku partikel sebagai gelombang inilah yang membuat seakan-akan muncul “terowongan” atau *tunnel* pada dinding penghalang, sehingga partikel dapat menembus potensial penghalang.

Efek tunneling menunjukkan bahwa pada daerah potensial batas masih terdapat fungsi gelombang. Fungsi gelombang pada daerah batas (region II) ini dinyatakan sebagai :

$$\psi_{II} = C e^{ik_{II}x} + D e^{-ik_{II}x} \quad 5.53$$

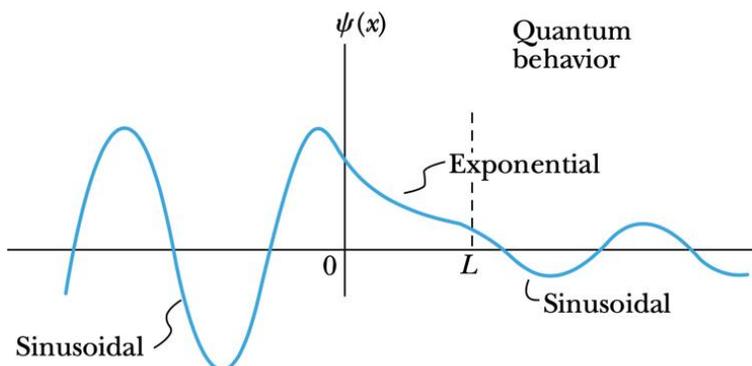
Persamaan gelombang 5.53 pada efek tunneling kini bisa kita nyatakan juga sebagai

$$\psi_{II} = C e^{\kappa x} + D e^{-\kappa x} \quad 5.53$$

Dengan $ik_{II} = \kappa$. Fungsi Gelombang pada daerah barrier akan memiliki panjang gelombang lebih besar karena energi kinetiknya lemah (Gambar 5.17) Dimana bilangan gelombangnya kita nyatakan sebagai

$$\kappa = \sqrt{\frac{2m}{\hbar^2} (E - V_0)} \quad 5.54$$

Gambar 5. 17 Keadaan Kuantum pada Efek Tunneling



Sumber: Thornton, 2013

Bilangan gelombang k_{II} pada persamaan 5.54 bernilai negatif dan riil, karena $V_0 > E$. Saat kita terapkan syarat batas, maka kemudian kita bisa menentukan nilai konstanta C dan D. Probabilitas refleksi dan transmisi masih kita tentukan menggunakan persamaan 5.49 dan 5.50 hanya saja kini kita nyatakan $ik_{II} = \kappa$. Mekanika kuantum mengijinkan partikel untuk benar – benar berada di luar potensial penghalang, dengan probabilitas transmisi kita nyatakan sebagai

$$T = \left| 1 + \frac{V_0^2 \sinh^2(\kappa L)}{4E(V_0 - E)} \right|^{-1} \quad 5.55$$

Perhatikan bahwa fungsi sin pada persamaan 5.52 kita gantikan dengan sin hiperbolik (sinh). Ketika $\kappa L \gg 1$, maka probabilitas transmisi ddari persamaan 5.52 tereduksi menjadi

$$T = 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0} \right) e^{-2\kappa L} \quad 5.56$$

Contoh Kasus Efek *Tunneling* pada Elektron dalam perangkat semikonduktor

Pada sebuah perangkat semikonduktor, elektron elektron berakselarasi melalui potensial 5 V mencoba untuk menerobos sebuah penghalang dengan lebar 0,8 nm dan tinggi potensial 10 V. Berapa bagian dari elektron – elektron yang dapat mengalami efek tunneling jika potensial di luar penghalang adalah nol?

Strategi

Probabilitas tunneling kita hitung menggunakan persamaan 5.55 atau 5.56, dan hasilnya bergantung pada nilai κL . Kita perlu mengetahui V_0 , E, κ dan L. Kita telah diberikan nilai L dan potensial penghalang $V_0 = 10\text{eV}$, sementara potensial selain penghalang adalah nol. Kita memperoleh besar tegangan pemercepat adalah 5 V, sehingga energi kinetik elektron adalah $K = 5 \text{ eV}$. Kita tentukan nilai κ dari variasi persamaan 5.42 dan 5.43 dengan $ik_{II} \rightarrow \kappa$.

Penyelesaian

Kita tentukan κ menggunakan massa elektron dan energi kinetik.

$$\begin{aligned} \kappa &= \sqrt{\frac{2m(V_0 - E)}{\hbar}} \\ &= \sqrt{\frac{2(0,511 \times 10^6 \text{ eV}/c^2)(10 \text{ eV} - 5 \text{ eV})}{6,58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}}} \\ &= \frac{3,43 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}}{c} = \frac{3,43 \times 10^{18} \text{ s}^{-1}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 1,15 \times 10^{10} \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Nilai κL dapat kita nyatakan

$$\kappa L = (1,15 \times 10^{10} \text{ m}^{-1})(0,8 \times 10^{-9} \text{ m}) = 9,2$$

Karena κL lebih besar dari 1, maka kita dapat menggunakan persamaan 5.56

$$\begin{aligned} T &= 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right) e^{-2\kappa L} \\ &= 16 \frac{5 \text{ eV}}{10 \text{ eV}} \left(1 - \frac{5 \text{ eV}}{10 \text{ eV}}\right) e^{-2(9,2)} \\ &= 4,1 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

Hasil yang lebih akurat diperoleh dengan persamaan 5.55

$$\begin{aligned} T &= \left| 1 + \frac{(10 \text{ eV})^2 \sinh^2(9,2)}{4(5 \text{ eV})(10 \text{ eV} - 5 \text{ eV})} \right|^{-1} \\ &= 4,1 \times 10^{-8} \end{aligned}$$

Kedua persamaan akan menunjukkan hasil yang sama saat diperoleh $\kappa L \gg 1$

Contoh Kasus – Probabilitas Tunneling Elektron jika diketahui persamaan transmisi

Jika diberikan persamaan transmisi sebuah elektron menerobos (tunneling) potensial penghalang sebagai berikut :

$$T = M e^{-2\kappa L}$$

Dengan

$$M = 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right)$$

Tentukan:

- Nilai M saat elektron berakselerasi pada potensial $V = 2 \text{ eV}$, potensial penghalang 10 eV dan lebar potensial penghalang adalah $0,8 \text{ nm}$!
- Probabilitas elektron menerobos potensial penghalang!

Strategi

a. masukkan saja nilai E dan Vo untuk memperoleh nilai M pada persamaan diatas.

b. Masukkan nilai M pada persamaan probabilitas. Nilai κ diperoleh dari persamaan :

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}$$

Penyelesaian:

a. nilai M yang diperoleh adalah

$$M = 16 \frac{2eV}{10eV} \left(1 - \frac{2eV}{10eV}\right) = \frac{64}{25}$$

b. nilai κ diberikan oleh

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}$$

$$\kappa = \frac{\sqrt{2(0,511 \times 10^6 \text{ eV}/c^2)(10eV - 2eV)}}{6,58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}}$$

$$\kappa = \frac{6,518 \times 10^{19} \text{ s}^{-1}}{c} = \frac{6,518 \times 10^{19} \text{ s}^{-1}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2,173 \times 10^{11} \text{ m}^{-1}$$

Nilai κL memberikan

$$\kappa L = 2,173 \times 10^{11} \text{ m}^{-1} (0,8 \times 10^{-9}) = 17$$

Kemudian masukkan ke persamaan probabilitas T

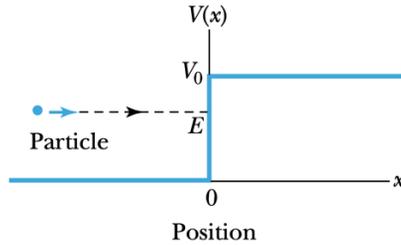
$$T = M e^{-2\kappa L} = \frac{64}{25} e^{-2\kappa L}$$

$$T = \frac{64}{25} e^{-2(17)} = \frac{64}{25} (2 \times 10^{-15}) = 5,12 \times 10^{-15}$$

Contoh Kasus – Jarak Penetrasi Elektron Jika Diberikan Besar Pontensial Undak

Sebuah partikel bergerak dengan energi kinetik K mendekati sebuah dinding penghalang (Gambar 5.18). Partikel bergerak dari arah kiri dan dinding penghalang ada di $x = 0$, dengan potensial V_0 . Tentukan besar kedalaman penetrasi Δx elektron jika diberikan probabilitas partikel menembus dinding adalah $1/e$. Tentukan nilai penetrasi elektron pada dinding jika elektron berenergi 5eV mendekati potensial penghalang 10 eV!

Gambar 5. 18 Elektron Terhadap Dinding Potensial Undak



Sumber: Thornton, 2013

Strategi:

Kita nyatakan terlebih dahulu fungsi gelombang di region I dan di region II dengan region I pada $x < 0$ sedangkan region II pada $x > 0$.

Fungsi gelombang pada kedua region kita nyatakan sebagai

region I $x < 0$ $\psi_I = Ae^{ikx} + Be^{-ikx}$

region II $x > 0$ $\psi_{II} = Ce^{\kappa x} + De^{-\kappa x}$

Karena fungsi gelombang pada region II hanya mengarah ke kanan (tidak ada gelombang pantul pada potensial undak) maka $C = 0$, sehingga

region II $x > 0$ $\psi_{II} = De^{-\kappa x}$

Dengan bilangan gelombang pada masing – masing gelombang diberikan oleh:

a. untuk region I:

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar} = \frac{\sqrt{2mK}}{\hbar}$$

Dan

b. untuk region II (daerah penghalang):

$$\kappa = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}$$

Kemudian kita anggap elektron dapat menembus dinding potensial penghalang hanya sejauh ℓ dengan probabilitas $\frac{1}{e}$. Sehingga

$$T = \frac{|\psi_{II}(transmisi)|^2}{|\psi_I(incident)|^2} = \frac{1}{e}$$

Penyelesaian:

Di dalam potensial penghalang (barrier) dengan rentang $0 < x < \ell$ suku $e^{-\kappa x}$ mendominasi fungsi gelombang ψ_{II} , sehingga

$$\psi_{II}^2 \approx e^{-2\kappa x}$$

Khusus untuk daerah barrier, kita dapat nyatakan:

$$\frac{1}{e} = \frac{|\psi_{II}(x = \ell)|^2}{|\psi_{II}(x = 0)|^2} = e^{-2\kappa \ell}$$

Sehingga

$$e^{-1} = e^{-2\kappa \ell}$$

Atau

$$\ell = \frac{1}{2\kappa}$$

Dengan demikian, jarak penetrasi elektron pada dinding potensial adalah

$$\ell = \frac{1}{2\kappa} = \frac{1}{2} \frac{\hbar}{\sqrt{2m(V_0 - E)}}$$

dan besar jarak penterasinya jika $E = 5 \text{ eV}$ dan $V_0 = 10 \text{ V}$ adalah

$$\ell = \frac{1}{2} \frac{\hbar}{\sqrt{2m(V_0 - E)}}$$

$$\ell = \frac{1}{2} \frac{(6,58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s})}{\sqrt{2(0,511 \times 10^6 \frac{\text{eV}}{c^2})(10 \text{ eV} - 5 \text{ eV})}}$$

$$\ell = \frac{1}{2} \frac{(6,58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}) c}{\sqrt{2(0,511 \times 10^6 \text{ eV})(10 \text{ eV} - 5 \text{ eV})}}$$

$$\ell = \frac{1}{2} \frac{(6,58 \times 10^{-16} \text{ eV} \cdot \text{s}) (3 \times 10^{17} \text{ nm/s})}{\sqrt{2(0,511 \times 10^6 \text{ eV})(10 \text{ eV} - 5 \text{ eV})}}$$

$$\ell = \frac{1}{2} \frac{(197,3 \text{ eV} \cdot \text{nm})}{\sqrt{2(0,511 \times 10^6 \text{ eV})(10 \text{ eV} - 5 \text{ eV})}}$$

$$\ell = 0,044 \text{ nm}$$

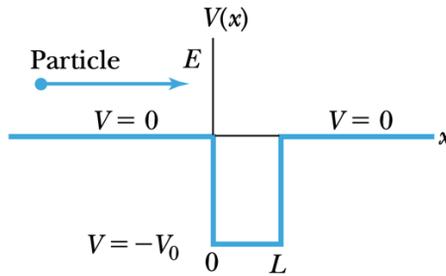
catatan: elektron ternyata hanya dapat menembus dinding potensial yang tipis (perhatikan hanya pada orde nanometer jarak penterasinya).

3. Peluruhan Partikel Alfa

Fenomena *tunneling* juga bisa menjelaskan tentang peluruhan partikel alfa dari peluruhan radioaktif inti atom. Banyak nucleus yang lebih berat dari

nucleus atom timbal yang mengemisikan partikel alfa, namun laju emisinya hanya bervariasi pada faktor 10^{13} dan energinya berkisar antara 4 – 8 MeV (baca : mega elektron volt). Di dalam nucleus, partikel alfa mengalami gaya ikat inti yang sangat kuat. Partikel alfa juga mengalami gaya tolak akibat dari Gaya Coulomb. Partikel alfa di dalam inti atom dideskripsikan sama seperti sebuah partikel yang mendekati sebuah sumur potensial (Gambar 5.19).

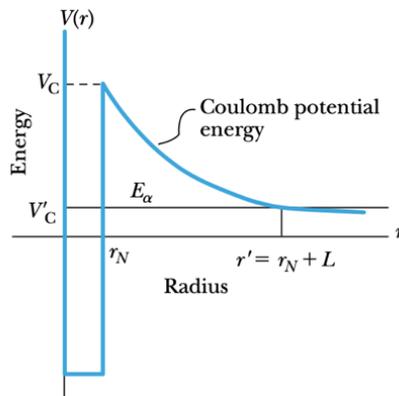
Gambar 5. 19 Partikel yang bergerak mendekati sebuah sumur potensial



Sumber: Thornton, 2013

Gaya tarik nuklir mendominasi hingga pada radius nuklir (r_N) dan potensialnya bisa didekati dengan potensial persamaan kuadrat. Di sisi lain, diluar nucleus, Gaya Coulomb mendominasi, sehingga potensial penghalang pada kasus ini adalah potensial yang ditimbulkan dari gaya Coulomb. Potensial akibat gaya Coulomb ini digambarkan pada Gambar, dan nilainya dapat berapa kali-lipat dari energi kinetik partikel alfa (energi kinetik alfa ada pada kisaran 5 MeV).

Gambar 5. 20 Partikel alfa terjebak dalam nukleus oleh potensial nuklir



Sumber: Thornton, 2013

Partikel alfa kemudian terperangkap di dalam nukleus. Secara klasik partikel alfa tidak memiliki energi yang cukup untuk melampaui penghalang yang ditimbulkan dari Gaya Coulomb (Gambar 5.20). Tapi berdasarkan mekanika kuantum, partikel alfa dapat menerobos dinding penghalang ini pada efek “*tunneling*”. Laju emisi partikel alfa yang bervariasi luas dari sebuah nukleus radioaktif dapat dijelaskan dengan perubahan kecil dalam dinding potensial (bisa tinggi dan lebarnya). Perubahan yang kecil dari penghalang ini menunjukkan besar pengaruhnya pada probabilitas transmisi. Karena di dalam penghalang (barrier) ini probabilitasnya didominasi oleh $e^{-2\kappa L}$.

Contoh Kasus – Jarak Tunneling dari partikel Alpha

Sebuah partikel alfa diemisikan dari nukleus U^{238} , yang mengemisikan sebuah partikel α dengan energi 4,2 MeV. Partikel alfa berada di dalam jari-jari nuklir $r_N = 7 \times 10^{-15} \text{m}$ (Gambar 5.19). Tentukan tinggi penghalang dan jarak yang bisa diterobos oleh partikel saat mengalami efek *tunneling* gunakan potensial dengan kuadrat pada bagian atas untuk menghitung probabilitas *tunneling*!

Strategi

- Tinggi penghalang dinyatakan dengan V_C , ada pada $r = r_N$ (Gambar 5.19). tinggi penghalang atau besar potensial penghalang ini dicari dengan menghitung besar energi potensial Coulomb antara partikel dengan nukleus uranium, yang terpisah pada jari – jari $7 \times 10^{-15} \text{m}$.
- Jarak *tunneling* diatur oleh besar energi kinetik yang setara dengan energi potensial Coulomb.
- Probabilitas tunneling kemudian kita tentukan menggunakan persamaan 5.56.

Penyelesaian:

- Tinggi penghalang dinyatakan dengan

$$\begin{aligned}
 V_C &= \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_N} \\
 &= \frac{10^{-6} \text{MeV}}{1,6 \times 10^{-19} \text{J}} \frac{2(92)(1,6 \times 10^{-19} \text{C})^2 (9 \times 10^9 \text{N} \cdot \text{m}^2 / \text{C}^2)}{7 \times 10^{-15}}
 \end{aligned}$$

$$= 38 \text{ MeV}$$

Jarak yang mampu diterobos oleh partikel alfa pada dinding penghalang adalah r' . Jarak ini dapat diperoleh dengan menetapkan energi kinetik partikel setara dengan Potensial dinding tepat pada jarak *tunneling* ($r = r'$) (Gambar 5.19). Karena $K = 4,2 \text{ MeV}$, maka

$$4,2 \text{ MeV} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r'}$$

Besar r' dapat ditentukan dengan

$$\begin{aligned} \frac{4,2 \text{ MeV}}{38 \text{ MeV}} &= \frac{r_N}{r'} \\ r' &= \frac{38 \text{ MeV}}{4,2 \text{ MeV}} (7 \times 10^{-15}) \\ &= 6,3 \times 10^{-14} \text{ m} = 63 \text{ fm} \end{aligned}$$

fm dibaca: femto meter.

c. Untuk mencari probabilitas tunneling dari partikel alfa, kita gunakan persamaan 5.55 atau 5.56. persamaan 5.56 dipakai jika $\kappa L \gg 1$. Sehingga kita perlu menentukan besar κ (region II, pada daerah $7 \text{ fm} < r < 63 \text{ fm}$) terlebih dulu, dengan menggunakan

$$\begin{aligned} \kappa &= \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar} \\ &= \frac{\sqrt{2 \left(3727 \frac{\text{MeV}}{c^2} \right) (38 \text{ MeV} - 4,2 \text{ MeV})}}{6,58 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}} \\ &= 2,5 \times 10^{15} \text{ m}^{-1} \end{aligned}$$

Dengan massa partikel alfa adalah $3727 \frac{\text{MeV}}{c^2}$.

Maka lebar penghalang yang kita nyatakan dengan L adalah sebesar

$$L = r' - r_N = 63 \text{ fm} - 7 \text{ fm} = 56 \text{ fm}$$

Setelah diperoleh lebar dinding penghalang (L), kita bisa menentukan nilai κL , yaitu

$$\kappa L = 2,5 \times 10^{15} \text{ m}^{-1} (56 \times 10^{15} \text{ m}) = 140$$

karena $\kappa L \gg 1$, maka kita gunakan persamaan 5.56 untuk menentukan probabilitas *tunnelingnya*:

$$\begin{aligned}
 T &= 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right) e^{-2\kappa L} \\
 &= 16 \left(\frac{4,2 \text{ MeV}}{38 \text{ MeV}}\right) \left(1 - \frac{4,2 \text{ MeV}}{38 \text{ MeV}}\right) e^{-280} \\
 &= 1,6e^{-280} = 4 \times 10^{-121}
 \end{aligned}$$

Hasil diatas menunjukkan nilai yang sangat kecil, sehingga kita perlu meninjau ulang pendekatan potensial kuadrat di bagian atas. Probabilitas 4×10^{-121} diperoleh jika kita menganggap besar potensial penghalang adalah seluruh energi potensial kuadrat. Hasil ini sangat kecil, sehingga tidak mungkin kita gunakan.

Pendekatan yang lebih baik sesuai Gambar 5.19 adalah bahwa potensial penghalang adalah setengah dari potensial coulomb (kita gunakan $V_C = 19 \text{ MeV}$ dan bukan 38 MeV). Demikian juga lebar dari sumur, $L = 28 \text{ fm}$ dan bukan 56 fm . Jika kita gunakan 19 MeV sebagai potensial penghalang, maka kita peroleh nilai $\kappa = 1,7 \times 10^{15} \text{ m}^{-1}$, dan probabilitas tunnelingnya diberikan oleh

$$\begin{aligned}
 T &= 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right) e^{-2\kappa L} \\
 &= 16 \left(\frac{4,2 \text{ MeV}}{19 \text{ MeV}}\right) \left(1 - \frac{4,2 \text{ MeV}}{19 \text{ MeV}}\right) \exp(2(1,7 \times 10^{15} \text{ m}^{-1})(2,8 \times 10^{14} \text{ m})) \\
 &= 2,8e^{-95} = 1,5 \times 10^{-41}
 \end{aligned}$$

Probabilitas tunneling yang kita peroleh ini lebih sesuai , karena mendekati nilai waktu paruh uranium dari eksperimen. Dengan menggunakan pendekatan non relativistik kita bisa mencari besar kecepatan partikel alpha

$$\begin{aligned}
 K &= \frac{1}{2} m v^2 \\
 v &= \sqrt{\frac{2K}{m}} = \sqrt{\frac{2(4,2 \text{ MeV})}{3727 \text{ MeV}/c^2}} \\
 &= 0,047 c = 1,4 \times 10^7 \text{ m/s}
 \end{aligned}$$

Diameter nukleus uranium adalah sebesar $1,4 \times 10^{-14} \text{ m}$, maka partikel alpha akan memerlukan waktu untuk menyeberang sekitar

$$t = \frac{1,4 \times 10^{-14} \text{ m}}{1,4 \times 10^7 \text{ m/s}} = 10^{-21} \text{ s}$$

Sebelum meluruh, partikel alpha harus mengalami gerak bolak bali. Berdasarkan probabilitas yang kita peroleh adalah sebesar $1,5 \times 10^{-41}$,

artinya partikel harus melakukan gerak bolak – balik sebanyak 10^{-41} . Sehingga waktu yang diperlukan partikel alfa sebelum keluar dari nukleus uranium adalah sekitar 10^{20} sekon. Artinya uranium memerlukan waktu 10^{20} sekon untuk meluruh dan menghasilkan partikel alfa. Waktu ini kemudian disebut sebagai waktu paruh. Secara eksperimen, waktu paruh uranium adalah sebesar 10^{17} sekon, sehingga pendekatan yang lebih tepat adalah pada probabilitas transmisi sebesar $1,5 \times 10^{-41}$.

Rangkuman

1. Osilator harmonik sederhana, dimana energi potensialnya dinyatakan dengan $\frac{1}{2}kx^2$ adalah sebuah aplikasi Persamaan Schrodinger yang sangat penting karena mendekati banyak sistem kompleks di alam dengan solusi yang dapat dipecahkan dengan tepat.

2. Fungsi keadaan potensial osilator harmonik diberikan oleh

$$\psi_n = H_n(x) e^{-\frac{\alpha x^2}{2}}$$

Dengan $H_n(x)$ adalah fungsi polynomial Hermitian

3. Empat fungsi keadaan paling dasar dari potensial osilator harmonik sederhana dinyatakan dengan

- a. Fungsi keadaan dasar (ground state), $n = 0$

$$\psi_0 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} e^{-\alpha x^2/2}$$

- b. Fungsi keadaan eksitasi pertama, $n = 1$

$$\psi_1 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \sqrt{2\alpha} e^{-\alpha x^2/2}$$

- c. Fungsi keadaan eksitasi kedua, $n = 2$

$$\psi_2 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2}} (2\alpha x^2 - 1) e^{-\alpha x^2/2}$$

- d. Fungsi keadaan eksitasi ketiga $n = 3$

$$\psi_3 = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{3}} (\sqrt{\alpha} x) (2\alpha x^2 - 3) e^{-\alpha x^2/2}$$

4. Tingkat energi dari osilator harmonik sederhana adalah

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar \omega$$

5. *Ground state* pada potensial osilator harmonik sederhana dipenuhi saat $n = 0$, sehingga Energi Dasar (ground state) adalah

$$E_0 = \frac{1}{2} \hbar \omega$$

6. Energi terendah dari potensial osilator harmonik sederhana ini juga disebut sebagai Energi Titik Nol (*Zero Level Energy*). Kenyataan bahwa nilai energi terendah tidak nol adalah konsekuensi dari ketidakpastian Heisenberg.
7. Pada osilator harmonik sederhana pada tinjauan kuantum akan menyerupai tinjauan klasik pada nilai n yang semakin besar.
 - a. Pada n yang besar, probabilitas menemukan partikel ada pada simpangan maksimum.
 - b. Nilai – nilai puncak dari rapat probabilitas kuantum yang makin besar di bagian tepi atau ujung dari sistem osilator harmonik.
8. Potensial berhingga memungkinkan adanya probabilitas partikel dengan energi rendah ($E < V_0$) memasuki daerah penghalang (barrier) yang secara klasik dilarang.
9. Ketika partikel dengan energi rendah ini bisa memasuki daerah penghalang, maka terjadi efek *tunneling* atau efek terobosan, yang hanya bisa dijelaskan dengan mekanika kuantum. Efek tunneling dipelajari pada berbagai bentuk potensial.
10. Probabilitas partikel mengalami efek tunneling diberikan oleh

$$T = \left| 1 + \frac{V_0^2 \sinh^2(\kappa L)}{4E(V_0 - E)} \right|^{-1}$$

Ketika $\kappa L \gg 1$, maka probabilitas transmisi ddari persamaan 5.52 tereduksi menjadi

$$T = 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0} \right) e^{-2\kappa L}$$

11. Beberapa contoh penting dari fenomena tunneling adalah peluruhan partikel alfa dan dioda *tunnel*. Efek tunneling konsisten dengan prinsip ketidakpastian Heisenberg dan hanya muncul pada jarak dekat.

Uji Formatif

Pilihan Ganda

1. Selisih dua tingkat energi berdekatan pada partikel dalam potensial osilator harmonik sederhana adalah

A. $\frac{1}{2} \hbar \omega$

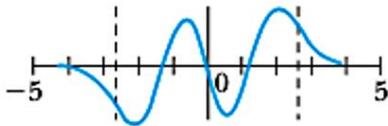
B. $\hbar \omega$

C. $(n + \frac{1}{2}) \hbar \omega$

D. $h \omega$

E. $\frac{1}{2} h \omega$

2. Perhatikan gambar berikut



Fungsi keadaan yang sesuai dengan grafik keadaan diatas adalah

A. $\psi = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} e^{-\alpha x^2/2}$

B. $\psi = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \sqrt{2\alpha} e^{-\alpha x^2/2}$

C. $\psi = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{2}} (2\alpha x^2 - 1) e^{-\alpha x^2/2}$

D. $\psi = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} \frac{1}{\sqrt{3}} (\sqrt{\alpha} x)(2\alpha x^2 - 3) e^{-\alpha x^2/2}$

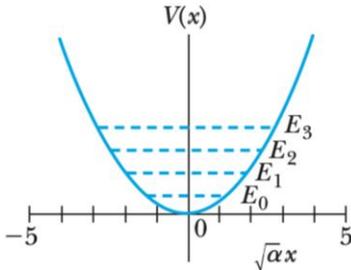
E. $\psi = \sqrt{\frac{2}{L}} \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right)$

3. Pernyataan yang sesuai dengan perbandingan osilator harmonik sederhana secara klasik dan kuantum adalah...

	Kuantum	Klasik
A.	Energi Partikel Kontinu	Energi Partikel Diskrit
B.	Energi pada ground state = 0	Energi pada ground state = $\frac{1}{2} \hbar \omega$
C.	Nilai energi gap sembarang	Nilai energi <i>gap</i> atau selisih antara 2 nilai energi berdekatan selalu sama atau homogen, yaitu besarnya $\Delta E = \hbar \omega$
D.	Probabilitas tertinggi untuk mendapatkan partikel Ada di lokasi yang terdekat dengan dinding potensial untuk nilai n yang besar	Probabilitas tertinggi untuk mendapatkan partikel Ada di dekat dinding potensial osilator harmonik

	Kuantum	Klasik
E.	Fungsi gelombang hiperbolik	Fungsi gelombang sinusoidal

4. Perhatikan grafik tingkat energi pada potensial osilator harmonik berikut



Persamaan yang sesuai untuk tingkat energi eksitasi ketiga adalah

- A. $\frac{1}{2} \hbar \omega$
 B. $\frac{3}{2} \hbar \omega$
 C. $\frac{5}{2} \hbar \omega$

- D. $\frac{7}{2} \hbar \omega$
 E. $\frac{8}{2} \hbar \omega$

5. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Peristiwa dimana partikel berenergi lemah ($E < V_0$) dapat menembus potensial penghalang berhingga (V_0)
- (2) Fenomena tunneling bisa terjadi pada dinding penghalang yang tipis dengan probabilitas tinggi namun berhingga.
- (3) Probabilitas partikel yang mengalami efek tunneling dinyatakan dengan $T = 16 \frac{E}{V_0} \left(1 - \frac{E}{V_0}\right) e^{-2\kappa L}$ untuk $\kappa L \gg 1$
- (4) Efek tunneling bisa dijelaskan dengan tinjauan klasik, dengan menganalogikannya seperti bola yang ingin melampaui bukit.

Pernyataan yang sesuai dengan efek tunneling adalah ...

- A. (1) (2) dan (3)
 B. (1) dan (3)
 C. (2) dan (4)

- D. (4) saja
 E. Semua benar

6. Sebuah partikel alfa dengan energi 5,0 MeV ditransmisikan menuju dinding potensial setinggi $V_0 = 15 \text{ MeV}$ dan lebarnya $L = 1,3 \times 10^{-14} \text{ m}$.

Besar probabilitas *tunneling* partikel alfa tersebut adalah ...

A. $\frac{32}{9} e^{-449,5}$

D. $\frac{32}{9} e^{-17,9}$

$$B. \frac{32}{9} e^{-44,95}$$

$$E. \frac{32}{9} e^{-179}$$

$$C. \frac{32}{9} e^{-4,495}$$

7. Energi potensial dari sistem osilator harmonik sederhana dinyatakan dengan

$$A. mgh$$

$$D. \frac{1}{2} kx^2$$

$$B. \pm\infty$$

$$E. \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_1 Z_2 e^2}{r_N}$$

$$C. kx$$

8. Persamaan Schrodinger yang sesuai dengan potensial harmonik sederhana diberikan oleh ...

$$A. \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \left(E - \frac{1}{2} kx^2 \right)$$

$$D. \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{1}{2} kx^2 \right) \psi$$

$$B. \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \left(E - \frac{1}{2} kx^2 \right) \psi$$

$$E. \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{1}{2} kx^2 \right) \psi$$

$$C. \frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = -\frac{2m}{\hbar^2} \left(E - \frac{1}{2} kx^2 \right)$$

9. Jika sebuah elektron berenergi 12,0 eV bergerak mendekati sebuah potensial penghalang setinggi 4,2 eV, maka pernyataan yang benar adalah

...

A. Tebal potensial penghalang akan mempengaruhi probabilitas refleksi dan transmisi

B. Refleksi tidak akan terjadi saat saat $\sin \kappa L = 1$

C. Berapa pun lebar potensial penghalang akan menghasilkan transmisi maksimum

D. Berapa pun lebar potensial penghalang akan menghasilkan refleksi maksimum

E. Elektron pasti akan mengalami efek tunneling

10. Molekul diatom hidrogen berperilaku seperti osilator harmonik sederhana dengan konstanta pegas $k = 1,1 \times 10^3 N/m$. Tingkat- tingkat energinya dinyatakan dengan

$$A. E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) 0,0755 eV$$

$$D. E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) 75,5 eV$$

$$B. E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) 0,755 eV$$

$$E. E_n = \left(n + \frac{1}{2} \right) 755 eV$$

$$C. E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) 7,55 \text{ eV}$$

Essay

1. Buktikan bahwa fungsi keadaan paling dasar (*ground state*) partikel pada potensial osilator harmonik dinyatakan dengan

$$\psi_0(x) = \left(\frac{\alpha}{\pi}\right)^{1/4} e^{-\alpha x^2/2}$$

Jawab

2. Tentukan juga nilai ekspektasi dari $\langle p \rangle$ dan $\langle p^2 \rangle$ untuk partikel pada potensial harmonik sederhana.

Jawab

3. Jelaskan bagaimana efek tunneling dan apa manfaat yang ditimbulkan oleh efek tunneling pada:

a. Dioda

Jawab

b. card reader

Jawab

4. Jika sebuah elektron berenergi 12,0 eV bergerak mendekati sebuah potensial penghalang setinggi 4,2 eV, maka tentukan:

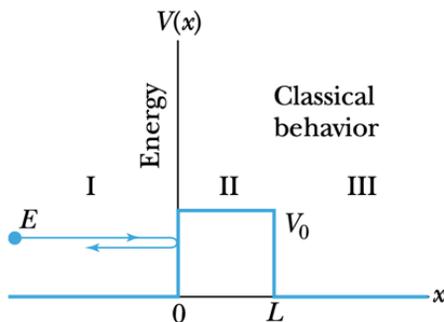
a. Lebar potensial penghalang agar tidak ada gelombang yang direfleksikan.

Jawab

b. Lebar potensial penghalang agar terjadi refleksi maksimum

Jawab

5. Jika sebuah partikel berenergi E ditransmisikan pada dinding potensial penghalang setinggi V_0 , seperti pada Gambar.



Jika $E < V_0$, gambarkan sketsa fungsi gelombang yang terjadi di daerah bagian dalam dan di luar potensial penghalang. Jelaskan sketsa yang kamu buat!

Jawab

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal

dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 80% , berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.

Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi

Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress

Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.

Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York.

<https://archive.org/details/quantumtheoryoft0000raza>

<https://www.youtube.com/watch?v=RF7dDt3tVmI>

https://web.pa.msu.edu/courses/2012fall/phy215/handouts/HW9_solns.pdf

Penutup

Rangkuman

Solusi persamaan schrodinger mengantarkan kita untuk menyetakan elektron dan energi pada tom dalam empat bilangan kuantum .

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Eisntein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & SOns, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, S. T. (University O. V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengange Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York

MODUL 6

MODEL ATOM BERELEKTRON TUNGGAL

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang di mekanika gelombang. Disini kita akan mempelajari tentang bagaimana solusi persamaan chrodinger menjelaskan posisi elektron pada atom. Model atom berelektron tunggal mengalami perkembangan mulai dari teori atom John Dalton, Joseph John Thomson, Ernest Rutherford, dan Niels Henrik David Bohr. Perkembangan teori atom menunjukkan adanya perubahan konsep susunan atom dan reaksi kimia antaratom. Kelemahan model atom yang dikemukakan Rutherford disempurnakan oleh Niels Henrik David Bohr. Bohr mengemukakan gagasannya tentang penggunaan tingkat energi elektron pada struktur atom. Model ini kemudian dikenal dengan model atom Rutherford-Bohr. Tingkat energi elektron digunakan untuk menerangkan terjadinya spektrum atom yang dihasilkan oleh atom yang mengeluarkan energi berupa radiasi cahaya.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).

3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).

4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)

2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)

2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)

3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)

4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu mengaplikasikan persamaan Schrodinger dan interpretasinya dalam bilangan kuantum
Sikap	a. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan simulasi dan melaporkan hasil simulasinya.

3. Prasyarat Kompetensi

a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.

- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang riset fisika murni,

5.. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Perkembangan Model Atom	A. Perkembangan Model atom mula- mula B. Model Atom Thomson C. Model Atom Rutherford D. Spektrum Atom Hidrogen E. Model Atom Bohr
Simulasi Tetes Minyak Milikan	Simulasi Tetes Minyak Milikan
Tinjauan Kuantum Atom Hidrogen	A. Aplikasi fungsi gelombang pada model Hidrogen B. Solusi persamaan Schrodinger untuk atom hidrogen C. hubungan antar bilangan kuantum

Kegiatan Pembelajaran 1 PERKEMBANGAN MODEL ATOM

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan perkembangan model atom	<ol style="list-style-type: none">Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan model atom RutherfordMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan spektrum Atom HidrogenMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan model Atom Bohr pada jejari atom hidrogen, momentum elektron mengitari nukleus pada atom hidrogen dan kuantisasi energi atom hidrogen.

Uraian Materi

A. Perkembangan Model Atom Mula – Mula

Setiap material / bahan terusun atas partikel - partikel yang berukuran lebih kecil. Partikel-partikel penyusun suatu material bisa berupa molekul dan / atau atom - atom. Kelahiran Fisika Modern juga telah mengantarkan kita pada pemahaman bahwa atom merupakan dasar pembentuk materi yang ada di alam semesta ini. Jika ditanya bagaimana struktur atom, hampir semua orang tahu bahwa struktur atom itu mirip seperti struktur tata surya. Akan tetapi untuk mencapai kesimpulan ini sejarahnya sangat panjang. Dengan mengikuti sejarah perkembangan model atom kita dapat melihat bagaimana para ilmuwan menerapkan metode ilmiah dalam mencari kebenaran, sesuai yang kita pelajari saat ini.

1. Model Atom Fisika Democritus

Model Atom mulai digagas sekitar abad kelima sebelum masehi oleh seorang ahli filsafat Yunani, Democritus (sekitar tahun 460-370 SM). Democritus mengekspresikan gagasannya bahwa semua materi tersusun atas partikel-partikel yang sangat kecil dan tidak dapat dibagi-bagi yang disebut

“**atomos**” (yang berarti tidak dapat dibagi-bagi). Gagasan ini kemudian ditentang oleh Aristoteles yang menyatakan bahwa atomos masih bisa terus dibelah sampai tak hingga.

Meskipun gagasan Democritus saat itu tidak dapat diterima oleh para ahli filsafat lainnya seperti Plato dan Aristoteles, konsepnya tetap bertahan selama beberapa abad. Model atom terus mengalami koreksi seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan. Hingga sekarang sudah diketahui bagian dan peranannya masing-masing

2. Model Atom Dalton

Pada tahun 1803, seorang ilmuwan Inggris yang bernama John Dalton merumuskan definisi yang tepat tentang atom. Dalton mengagaskan model atom yang lebih terperinci daripada Democritus. Beberapa poin penting dari model atom Dalton, antara lain:

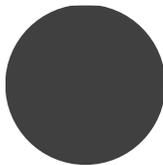
- a. Atom- atom dari elemen kimiawi yang berbeda memiliki ukuran, massa dan sifat berbeda lainnya.

Model Atom Dalton menyatakan bahwa atom dari suatu unsur berbeda dengan atom dari unsur lain. Namun Dalton tidak menjelaskan struktur dan komposisi dari atom, ia tidak mempunyai ide seperti apa atom itu sebenarnya tetapi ia menyadari bahwa sifat-sifat yang berbeda yang ditunjukkan oleh unsur-unsur seperti hidrogen dan oksigen dapat dijelaskan dengan menganggap bahwa atom-atom hidrogen tidak sama dengan atom-atom oksigen.

- b. Elemen- elemen kimiawi (senyawa dan molekul) terdiri dari partikel berukuran sangat kecil yang disebut atom.

Menurut Dalton, atom-atom itu merupakan partikel-partikel yang tidak dapat dibagi lagi. Setiap atom dapat membentuk molekul dan senyawa. Atom ini berbentuk bola pejal (Gambar 6.1).

Gambar 6. 1 Model Atom Dalton



- c. Atom – atom dari sebuah elemen kimiawi memiliki massa dan sifat- sifat yang sama.

Setiap elemen kimia memiliki atom – atom dengan sifat yang khas. Setiap atom dari suatu unsur memiliki sifat yang sama (seragam).

- d. Atom- atom saling berinteraksi satu sama lain dan mengikuti hukum kekekalan massa dan perbandingan tetap

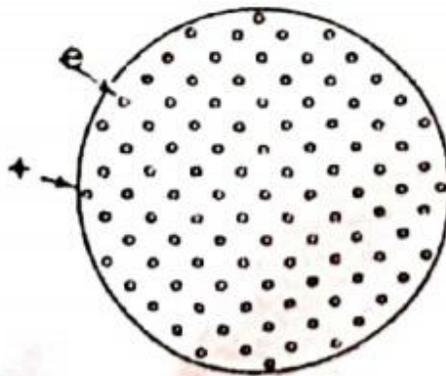
Suatu reaksi kima hanya melibatkan penataan ulang atom-atom, sehingga tidak ada atom yang berubah akibat reaksi kimia. Teori atom tersebut ditunjang oleh dua hukum kekekalan alam yaitu hukum kekekalan massa (hukum Lavoisier) dan hukum perbandingan tetap (hukum proust). Hukum Lavoisier menyatakan bahwa massa zat sebelum dan sesudah reaksi adalah sama. Hukum Proust menyatakan bahwa perbandingan massa unsur-unsur yang menyusun suatu zat adalah tetap.

B. Model Atom Thomson

JJ Thomson adalah ilmuwan asal amerika yang pertama kali menjelaskan tentang kelistrikan atom. Model atom Thomson dicetuskan pada tahun 1904. Model atom ini digagas berdasarkan dua penemuan, yaitu

1. Penemuan proton oleh Eugene Goldsetein pada tahun 1886
2. Penemuan elektron oleh JJ Thomson pada tahun 1897

Gambar 6. 2 Model Atom Thomson



Thomson menemukan elektron dari eksperimen tabung sinar katoda. Dari eksperimen ini ia memperoleh bahwa sinar katode adalah partikel

bermuatan negatif yang berasal dari suatu atom. Dari dua eksperimen yang menunjukkan keberadaan muatan negatif dan muatan positif di dalam atom, Thomson menggagas model atomnya.

Thomson memodelkan atom sebagai suatu objek berbentuk bola pejal seragam (*uniform*) yang terdiri dari muatan positif dan negatif yang saling terdistribusi merata dalam volume atom (Gambar 6.2). Muatan positif dan negatif tersebut saling menetralkan satu sama lain karena jumlah elektron sama dengan jumlah muatan positif. Massa atom berasal dari massa muatan positif, sedangkan massa elektron tidak berkontribusi terhadap massa atom. Model atom Thomson sering disebut model roti kismis dengan muatan positif sebagai roti dan elektron bermuatan negatif sebagai kismisnya.

Dari percobaan tabung sinar katoda ini, JJ Thomson juga memperoleh rasio muatan:massa (e/m) dari elektron. Nilai dari rasio ini adalah sama untuk semua atom, tidak bergantung pada elemen kimiawi yang dibentuknya. Nilai muatan elektron ini dipublikasikan oleh Robert Milikan pada tahun 1913, melalui eksperimen tetes minyak (*oil drop experiment*)

C. Model atom Rutherford

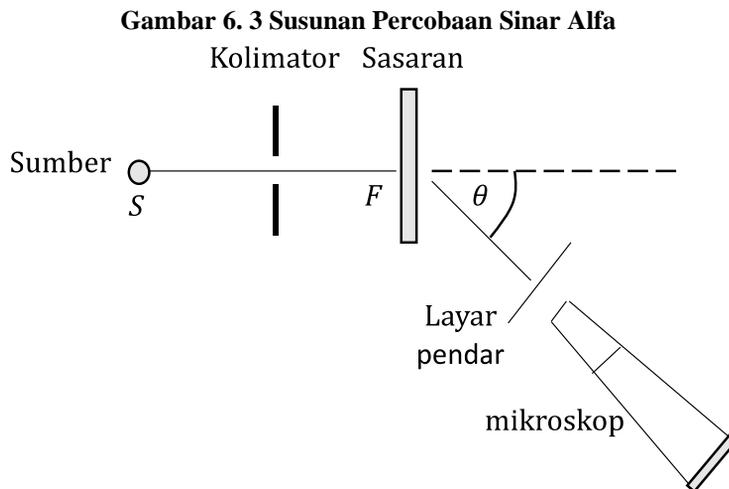
Model atom Thomson ini gagal menjelaskan hamburan partikel α oleh lembaran emas tipis, yang dianalisis secara matematis oleh Ernest Rutherford dan dibuktikan secara eksperimen oleh Hans Geiger dan Ernest Marsden. Eksperimen hamburan partikel α dilakukan dengan menembakkan partikel ini ke suatu lembaran emas tipis (Gambar 6.3). Partikel alfa adalah inti dari helium yang diemisikan dari peluruhan inti radioaktif. Partikel alfa bermuatan $+2e$ dan bermassa $4x$ massa atom hidrogen. Massa partikel α ini jauh lebih besar di bandingkan dengan massa elektron.

Untuk mengamati bagaimana perilaku partikel α setelah mengenai sasaran, di bagian ujung setelah sasaran diberikan layar pendar dari bahan Zink Sulfida (ZnS). Pola yang dibentuk pada layar pendar kemudian diamati menggunakan mikroskop (Gambar 6.3)

1. Hamburan Partikel Alpha

Rutherford mengamati bahwa tidak semua partikel α diteruskan, melainkan ada sedikit partikel α yang dihamburkan. Sudut hamburan partikel α ini ada yang besar dan ada sebagian kecil yang di hambur-balikan ke arah datangnya partikel. Rutherford tidak dapat menginterpretasikan hasil ini

berdasarkan model roti kismis. Karena jika muatan positif dan negatif yang saling terdistribusi merata pada volume atom, maka partikel α yang bermuatan positif akan diteruskan saat melalui atom-atom emas. Berdasarkan temuan ini, Rutherford kemudian menyusun gagasannya tentang model atom yang baru.



Untuk memahami partikel α yang diteruskan, Rutherford mengagaskan bahwa atom – atom emas memiliki sebagian besar ruang yang berisi muatan bermassa ringan yang dapat meneruskan partikel bermuatan positif. Bagian dominan ini meneruskan sinar alfa karena terdiri dari elektron – elektron bermassa ringan ini tidak memiliki kemampuan untuk menolak partikel alfa. Bagian dominan dari volume atom diisi oleh elektron-elektron. Kemudian untuk memahami hamburan pada sebagian kecil partikel α , Rutherford menjelaskan hamburan partikel alfa dengan sudut hamburan besar.

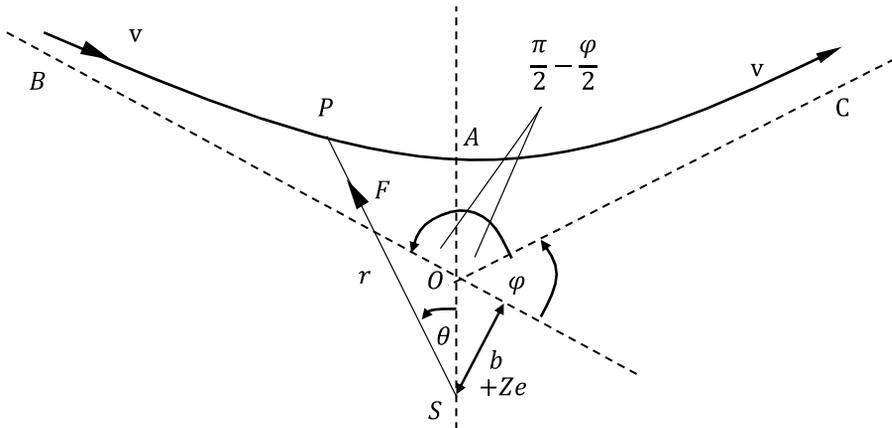
2. Interaksi Partikel Alfa dan Inti Atom pada Partikel Alfa yang Terhambur oleh Atom Emas

Pada fenomena sudut hamburan yang besar, Rutherford mengasumsikan bahwa partikel α telah mengalami interaksi dengan suatu bagian dari atom yang berukuran kecil namun massif (bermassa besar) dan menolak partikel alfa. Sifatnya yang menolak partikel alfa menunjukkan fraksi ini bermuatan positif. Bagian massif ini terletak pada pusat bola atom, yang kemudian disebut sebagai inti atom. Model atom menurut Rutherford,

dijelaskan dengan bentuk bola yang di bagian tengahnya terdapat inti masif bermuatan positif dan disekitar inti tersebut terdapat elektron-elektron bermassa sangat ringan yang memenuhi ruang pada atom dengan volume jauh lebih besar dari intinya.

Untuk memahami lebih lanjut asumsi ini, mari kita tinjau interaksi berkas partikel α yang bermuatan $+2e$ dengan inti atom bermuatan $+Ze$ dengan Z adalah bilangan bulat (Gambar 6.4).

Gambar 6. 4 Interaksi Partikel Alfa dan Inti Atom



Jika tidak ada interaksi dengan inti, maka partikel α akan melintasi garis BO. Namun ternyata partikel α melintasi garis BC yang timbul akibat gaya Coloumb. Partikel α dan inti atom memiliki muatan yang sejenis, yaitu sama sama positif, sehingga saling tolak menolak. Akibatnya partikel α akan menempuh lintasan berupa hiperbola dengan garis BO dan OC sebagai garis asimtotnya.

Jika kita lihat dari arah semula, partikel α meninggalkan inti dengan sudut simpangan φ . Dalam tinjauan ini, inti atom dianggap tidak mengalami hamburan balik. Jika letak inti atom dipakai sebagai acuan, maka besar momentum sudut partikel α adalah:

$$Mvb = Mr^2 \frac{d\theta}{dt} \tag{6.1}$$

Dengan keterangan: v adalah laju mula mula dari partikel α semula; b adalah parameter benturan; $r \frac{d\theta}{dt}$ adalah komponen kecepatan partikel α disuatu titik p dalam lintasan dekat inti; dan M adalah massa partikel α . Besar gaya tolak akibat gaya Coulomb antara partikel α dan inti atom adalah:

$$F = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad 6.2$$

Dengan r adalah jarak antara partikel α dan inti atom. Karena energi potensial partikel α dalam medan inti sangat kecil untuk jarak pemisahan yang besar dan energi total partikel α adalah konstan, maka energi kinetik sebelum dan sesudah interaksi adalah sama besar. Oleh sebab itu, impuls total selama proses hamburan oleh komponen gaya F adalah nol kecuali komponen di arah sumbu Y .

3. Momentum Partikel Alfa yang terhambur

Impuls total selama proses hamburan adalah

$$\int_0^\infty F_y dt = \int_0^\infty \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \cos \theta dt \quad 6.3$$

Variabel t dalam persamaan 6.3 diganti dengan variabel θ melalui persamaan 6.1 sehingga diperoleh

$$\begin{aligned} \int F_y dt &= \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 vb} \int_{-\left(\frac{\pi-\varphi}{2}\right)}^{+\left(\frac{\pi-\varphi}{2}\right)} \cos \theta d\theta \\ &= \frac{Ze^2}{\pi\epsilon_0 vb} \cos \frac{\varphi}{2} \end{aligned} \quad 6.4$$

Berdasarkan keadaan simetri di atas, perubahan momentum totalnya pun hanya terjadi pada komponen y sehingga:

$$\begin{aligned} \Delta p &= \Delta p_y \\ &= 2Mv \cos \left(\frac{\pi - \varphi}{2} \right) \\ \Delta p &= 2Mv \sin \frac{\varphi}{2} \end{aligned} \quad 6.5$$

Impuls pada persamaan (6.4) inilah yang terjadi momentum pada persamaan (6.5)

$$\begin{aligned} \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 vb} \cos \frac{\varphi}{2} &= 2Mv \sin \frac{\varphi}{2} \\ \cot \frac{\varphi}{2} &= \frac{8Mv^2 b\pi\epsilon_0}{Ze^2} \end{aligned}$$

$$\cot \frac{\varphi}{2} = 4\pi \frac{\epsilon_0 E_k b}{Ze^2} \quad 6.6$$

Dengan E_k adalah energi kinetik partikel α .

4. Cacah Partikel Alfa yang Terhambur

Apabila ada sejumlah Q partikel α yang mengenai secara tegak lurus satuan luas permukaan lembaran logam tebal t sebagian q partikel mendekati inti dengan jarak lebih kecil dari b . Jika rapat atom-atom inti sasaran per satuan volume adalah n maka:

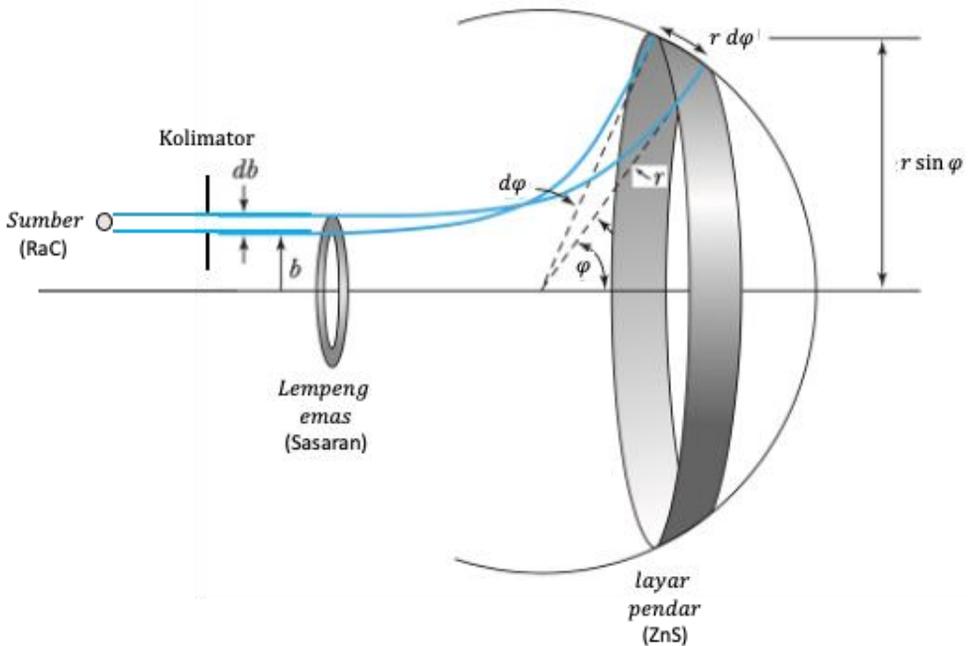
$$q = \pi b^2 t n Q \quad 6.7$$

Dengan mengeliminasi b dari persamaan 6.6 dalam persamaan 6.7, maka diperoleh

$$q = \pi \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E_k} \right)^2 t n Q \cdot \cot^2 \frac{\varphi}{2} \quad 6.8$$

Persamaan 6.8 menyatakan cacah partikel α terhambur ke arah sudut hamburan lebih besar dari pada φ .

Gambar 6. 5 Geometri Hamburan Partikel Alfa ke arah sudut antara φ dan $\varphi + d\varphi$



Cacah partikel α yang terhambur ke arah sudut antara φ dan $\varphi + d\varphi$ adalah

$$dq = \pi \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E_k} \right)^2 \tan Q \cot \frac{\varphi}{2} \operatorname{cosec}^2 \frac{\varphi}{2} d\varphi \quad 6.9$$

Pada percobaan ini partikel-partikel α yang terhambur dideteksi pada layar pendar yang diletakkan sejauh r dari tegak lurus arah pengamatan (Gambar 6.5). Dari Gambar 6.5 terlihat secercah dq partikel α terhambur pada luasan

$$dA = (2\pi r) (\sin \varphi) r d\varphi$$

Dengan demikian, cacah partikel yang terhambur ke arah sudut φ per satuan luas adalah

$$\begin{aligned} \frac{dq}{dA} &= \frac{\pi \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E_k} \right)^2 \tan Q \cot \frac{\varphi}{2} \operatorname{cosec}^2 \frac{\varphi}{2} d\varphi}{(2\pi r) (\sin \varphi) r d\varphi} \\ &= \frac{Qnt}{r^2} \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E_k} \right)^2 \operatorname{cosec}^4 \left(\frac{\varphi}{2} \right) \end{aligned} \quad 6.10$$

Persamaan 4.10 sangat cocok dengan hasil pengamatan Rutherford dan didukung pula oleh hasil-hasil percobaan Geiger dan Marsden.

5. Perkiraan Rutherford tentang Ukuran Inti Atom

Dari percobaan ini, Rutherford juga dapat memperkirakan ukuran inti atom. Anggap partikel α dapat mencapai jarak terdekat d dengan inti atom. Pada saat itu partikel α akan mengalami benturan sentral, artinya partikel α akan dihambur balik. Tepat di titik balik inilah seluruh energi kinetik partikel α telah berubah menjadi energi potensial Coloumb. Berdasarkan hukum kekekalan energi, kemudian berlaku:

$$\frac{1}{2} Mv^2 = \frac{2Ze^2}{4\pi\epsilon_0 d} \quad 6.11$$

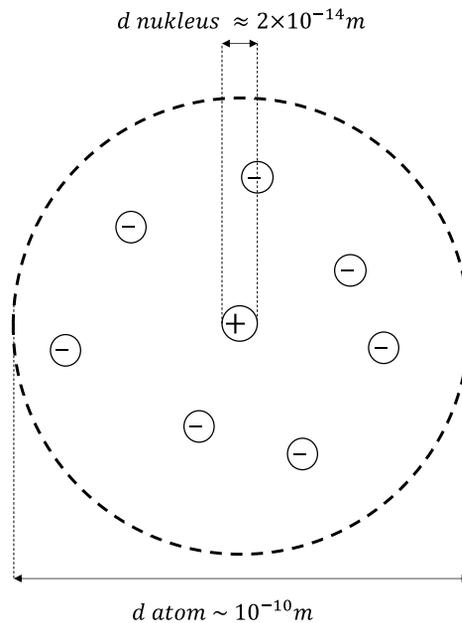
Jika partikel α yang digunakan berasal dari sumber *RaC* dan logam sasaran adalah emas, maka $v = 2,1 \times 10^7$ m/s dan $Z = 79$ sehingga kita peroleh ukuran inti atom adalah $d = 2,5 \times 10^{-14}$ m. Dari hasil ini kemudian ukuran inti atom terhadap atom dapat digambarkan pada Gambar 6.6.

6. Simpulan dari Model Atom Rutherford

Hasil eksperimen hamburan partikel alfa memberi simpulan bahwa atom memiliki beberapa sifat dasar, yaitu:

- Atom berukuran sangat kecil. Radius atom ada dalam orde 0,1 nm ($10^{-10}m$)
- Atom terdiri dari inti yang bermuatan listrik positif dan masif. Inti atom dikelilingi oleh elektron yang bermuatan listrik negatif, sedemikian sehingga secara total atom bermuatan netral.
- Atom bersifat stabil
- Ukuran inti atom jauh lebih kecil dari radius atom
- Atom dapat mengemisikan atau menyerap radiasi elektromagnetik

Gambar 6. 6 Ilustrasi Model Atom Rutherford



Model atom Rutherford ini kemudian disempurnakan oleh penemuan neutron oleh James Chadwick pada tahun 1932 sebagai partikel subatomic ketiga. Neutron bermuatan netral, terletak di dalam inti atom dan massanya hampir sama dengan massa dari proton. Dengan demikian, secara umum atom dari tiap elemen kimia terdiri dari proton, elektron dan neutron. Masing – masing partikel subatomik ini memiliki muatan dan massanya masing-masing (Tabel)

Meskipun telah disempurnakan oleh penemuan Chadwick, model atom Rutherford kemudian masih ditemukan kelemahannya. Elektron yang

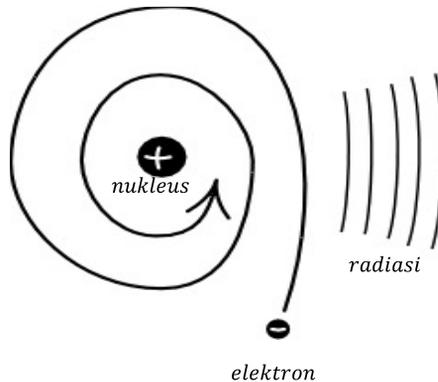
mengitari inti atom harus mengalami percepatan terus menerus. Percepatan ini diperoleh elektron dengan meradiasikan gelombang elektromagnetik.

Tabel 10 Massa dan Muatan Proton, Elektron dan Neutron

Partikel Subatomik	Massa	Muatan
Proton	$m_p = 1,673 \times 10^{27} kg$	$+e = +1,602 \times 10^{-19} C$
Elektron	$m_e = 9,109 \times 10^{-31} kg$	$-e = -1,602 \times 10^{-19} C$
Neutron	$m_n = 1,675 \times 10^{27} kg$	Tidak bermuatan

Karena radiasi energi terus menerus, maka jari-jari orbit elektron terhadap inti atom akan semakin kecil dan akhirnya elektron akan bergabung dengan inti atom yang menyebabkan atom musnah (Gambar 6.7). Model atom Rutherford menunjukkan bahwa atom bersifat tidak stabil dan atom meradiasikan gelombang elektromagnetik dengan spektrum kontinu. Kelemahan ini yang kemudian direvisi oleh model atom berikutnya.

Gambar 6. 7 Ilustrasi Kelemahan Model Atom Rutherford

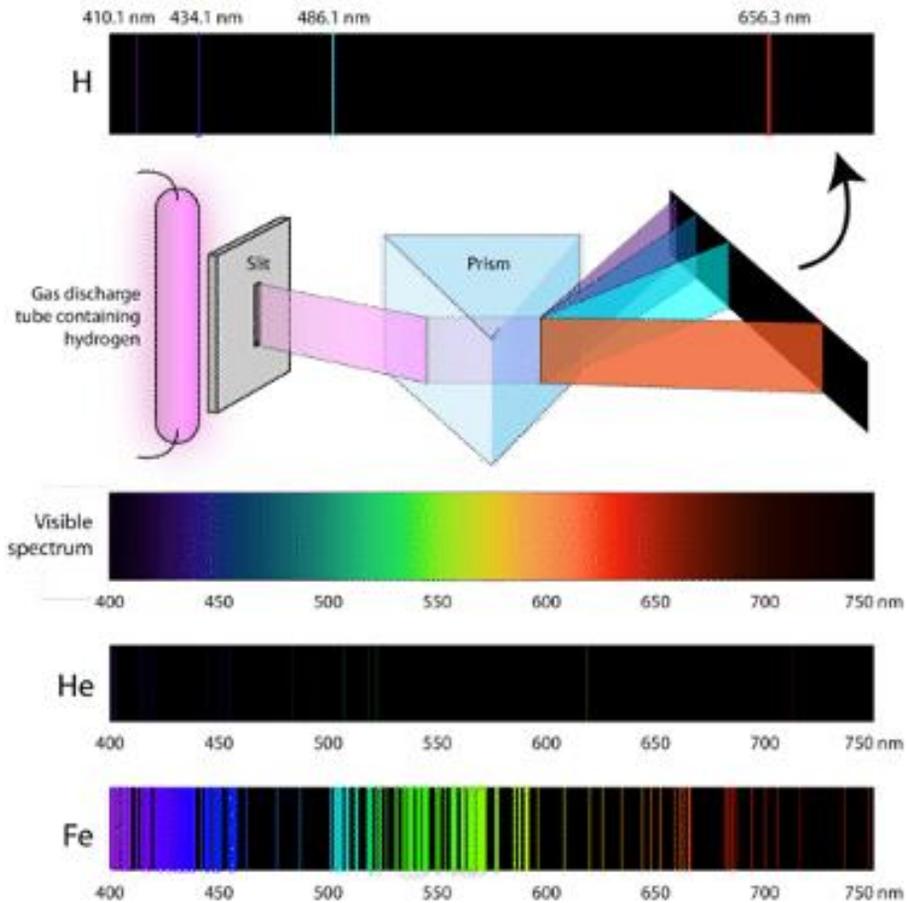


D. Spektrum Atom Hidrogen

Rutherford menjelaskan bahwa elektron mengitari atom dengan lintasan kontinu dan juga meradiasikan gelombang elektromagnetik secara kontinu. Kelemahan dari model atom Rutherford ini kemudian diuji dengan mengamati spektrum dari energi yang diradiasikan oleh atom-atom. Spektrum pada penjelasan ini didefinisikan sebagai distribusi cahaya (atau gelombang elektromagnetik) sebagai fungsi dari panjang gelombang atau frekuensinya. Dari seluruh eksperimen yang dilakukan, radiasi dari atom –

atom diklasifikasikan menjadi spektrum kontinu dan spektrum garis (spektrum diskrit).

Gambar 6. 8 Spektrometer untuk pengamatan spektrum emisi



Sumber: https://chem.libretexts.org/@api/deki/files/77927/CK12_Screenshot_5-5-2.png?revision=1&size=bestfit&width=506&height=504

Spektrum kontinu menunjukkan bahwa energi yang diemisikan bisa dalam nilai berapapun atau panjang gelombangnya bisa berapapun, dan ada dimanapun (sembarang). Spektrum kontinu biasanya dihasilkan dari emisi benda panas yang menyala atau bersinar dengan warna putih. Spektrum sinar putih menunjukkan semua panjang gelombang sinar tampak (Gambar 6.8, bagian visible spectrum).

Di sisi lain, spektrum garis dihasilkan dari proses pelepasan listrik di dalam sebuah tabung yang mengandung sejumlah kecil gas atau uap dari

unsur tertentu, misalnya merkuri, natrium atau neon. Secara umum interpretasi spektrum garis dari atom kompleks sangat sulit dilakukan. Sehingga pembahasan akan dibatasi pada spektrum garis dari atom yang paling sederhana, yaitu hidrogen.

Pada Tahun 1885 Johann Balmer berhasil menunjukkan bahwa garis-garis emisi dari hidrogen ada dalam daerah cahaya tampak. Garis-garis tersebut diberi label sebagai garis H_α H_β H_γ dan seterusnya dengan intensitas berturut-turut semakin kecil dan jarak antar garis yang berturutan semakin kecil pula. Panjang gelombang semua garis dalam spektrum dirumuskan sebagai:

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad 6.12$$

Dengan $R=1,0967758 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$ disebut tetapan Rydberg dan n adalah bilangan bulat =3,4,5..., dengan mengambil $r=3$ hasilnya adalah $\lambda_\alpha=6564,7 \text{ \AA}$.

Sesuai kegiatan pembelajaran 3.1, penemuan deret Balmer kemudian dilanjutkan dengan penemuan spektrum atom hidrogen di daerah ultra ungu dan beberapa deret di daerah inframerah. Masing-masing deret dapat dinyatakan dengan formula seperti rumus Balmer yang secara umum dinyatakan dalam persamaan Rydberg.

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_I^2} - \frac{1}{n_{II}^2} \right) \quad 6.13$$

Dengan

$n_I = 1$ dan $n_{II} = 2,3,4 \dots$ disebut deret Lyman

$n_I = 2$ dan $n_{II} = 3,4,5, \dots$ disebut deret Balmer

$n_I = 3$ dan $n_{II} = 4,5,6, \dots$ disebut deret paschen

$n_I = 4$ dan $n_{II} = 5,6,7, \dots$ disebut deret Bracket

Hasil eksperimen yang menunjukkan bahwa spektrum energi yang diradiasikan dari atom hidrogen ini menunjukkan kekeliruan yang digagas oleh Model atom Rutherford. Radiasi yang dipancarkan atom-atom tidak bersifat kontinu, melainkan diskrit. Pola dari spektrum atom hidrogen yang selalu sama juga menunjukkan bahwa atom adalah stabil. Lintasan elektron tidak berubah – ubah. Revisi dari model atom Rutherford inilah yang kemudian dilakukan oleh Bohr.

E. Model Atom Bohr

Pada 1913 Niels Bohr pertama kali mengajukan model atom yang sesuai dengan teori kuantum. Bohr menjelaskan model atomnya pada atom hidrogen. Teori kuantum atom hidrogen model Bohr merupakan transisi antara model mekanika klasik dan mekanika gelombang.

1. Hipotesis Bohr

Untuk mengatasi kesulitan yang berkaitan dengan radiasi elektromagnetik dari elektron, Bohr mengajukan beberapa hipotesis, yaitu:

1. Pada keadaan stasioner, elektron mengorbit inti tanpa memancarkan energi elektromagnetik secara kontinu. Keadaan stasioner tertentu dari elektron di dalam atom berbeda dengan keadaan stabil secara klasik. Keadaan – keadaan stasioner tersebut memiliki nilai energi total yang tertentu
2. Emisi atau absorpsi dari radiasi elektromagnetik hanya dapat terjadi dalam hubungannya dengan transisi antara dua keadaan stasioner. Frekuensi yang berkaitan dengan emisi atau absorpsi dari radiasi tersebut sebanding dengan perbedaan energi dari dua keadaan stasioner, yaitu

$$h\nu = E_{\mu} - E_I \quad 6.14$$

dengan keadaan energi tinggi E_{μ} dan keadaan energi lebih rendah E_I , h adalah tetapan Planck dan ν adalah frekuensi yang dipancarkan oleh foton. $h\nu$ adalah besar energi dari sebuah foton yang diemisikan. Jika sebuah foton dipancarkan, maka elektron akan bertransisi dari keadaan energi tinggi ke keadaan rendah. Sebaliknya, jika foton diserap maka elektron bertransisi dari keadaan energi rendah ke keadaan energi tinggi

3. Kestimbangan dinamik dari sistem pada keadaan stasioner diatur oleh hukum-hukum fisika klasik, tetapi hal ini tidak berlaku untuk transisi antar keadaan stasioner.
4. Nilai rata-rata energi kinetik K dari sistem elektron-inti diberikan oleh

$$K = \frac{1}{2} n h f_{orb} \quad 6.15$$

Dengan f_{orb} adalah frekuensi rotasi. Untuk sebuah orbit melingkar, Bohr menunjukkan bahwa asumsi ini setara dengan momentum sudut dari sistem dalam keadaan stasioner yang bernilai kelipatan bulat dari

$$L = n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$$

Untuk orbit melingkar, vektor posisi \vec{r} yang menggambarkan posisi dari elektron relatif terhadap inti atom selalu tegak lurus terhadap momentum linearnya \vec{p} . Sehingga momentum sudut yang didefinisikan dengan

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{v}$$

Memiliki nilai

$$L = rp = mvr \quad 6.17$$

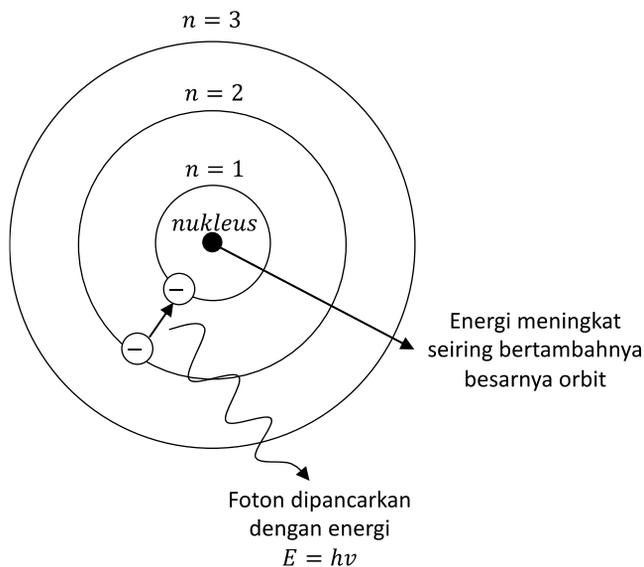
Maka hipotesis Bohr yang keempat, yang kemudian disebut sebagai **kuantisasi momentum sudut** yang memenuhi

$$m_e v r = n \hbar \quad 6.18$$

Dengan n adalah bilangan bulat $n = 1, 2, 3, \dots$

Dari keempat hipotesis ini, kita dapat mengilustrasikan model atom Bohr sesuai Gambar 6.9.

Gambar 6. 9 Model Atom Bohr



2. Jejari Bohr

Dari mekanika klasik, interaksi antara nukleus dan elektron adalah saling tarik menarik, karena berlakunya gaya Coulomb. Jika orbit elektron terhadap nukleus dianggap berbentuk lingkaran, maka Gaya Coulomb ini setara dengan Gaya Sentripetal yang dialami elektron. Jika jari-jari orbit r , massa elektron m_e dan muatan elektron dinyatakan dengan e , maka:

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \quad 6.19$$

Dengan v adalah laju elektron mengedari inti

$$v^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{m_e r} \quad 6.20$$

Dan dari persamaan 6.18, laju elektron mengitari inti diperoleh

$$v^2 = \left(\frac{n\hbar}{m_e r} \right)^2 \quad 6.21$$

Dari persamaan 6.20 dan 6.21 kita peroleh jejari lintasan elektron pada keadaan n sebesar :

$$\begin{aligned} r_n &= 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} n^2 \\ r_n &= a_o n^2 \end{aligned} \quad 6.23$$

Dengan a_o disebut jejari Bohr yang memenuhi

$$a_o = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0,0529 \text{ nm} = 0,529 \text{ \AA} \quad 6.24$$

Dari persamaan 6.23 terlihat bahwa menurut model Bohr, orbit elektron pada inti haruslah pada jari-jari tertentu dengan orbit pada keadaan dasar (*ground state*) dipenuhi saat $n = 1$ adalah

$$r_1 = 0,059 \text{ nm}$$

3. Tingkat energi hidrogen

Energi total elektron terdiri atas energi kinetik dan energi potensial listrik. Dengan memanfaatkan persamaan 6.19 kita dapat memperoleh besar energi kinetik K elektron saat mengitari nukleus sebagai

$$K = \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r^2} \right) r = \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad 6.25$$

Energi potensial dari sistem elektron-nukleus adalah energi potensial Coulomb yang berbentuk:

$$U = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad 6.26$$

Dengan menggunakan persamaan 6.25 dan 6.26 kita dapat memperoleh Energi Total elektron adalah:

$$E = U + K = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} + \frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} = -\frac{1}{8\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r} \quad 6.26$$

Nilai energi total yang negatif mengindikasikan sebuah sistem yang terikat, yaitu elektron terikat pada inti atom hidrogen.

Jika nilai r pada persamaan 6.26 diganti dengan nilai r dari persamaan 6.23 maka kita peroleh energi elektron pada keadaan n sebagai:

$$E_n = \frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2} \cdot \frac{1}{n^2} \quad 6.27$$

Pada keadaan dasar (*ground state*) dipenuhi oleh $n = 1$, kita peroleh nilai energi dasar

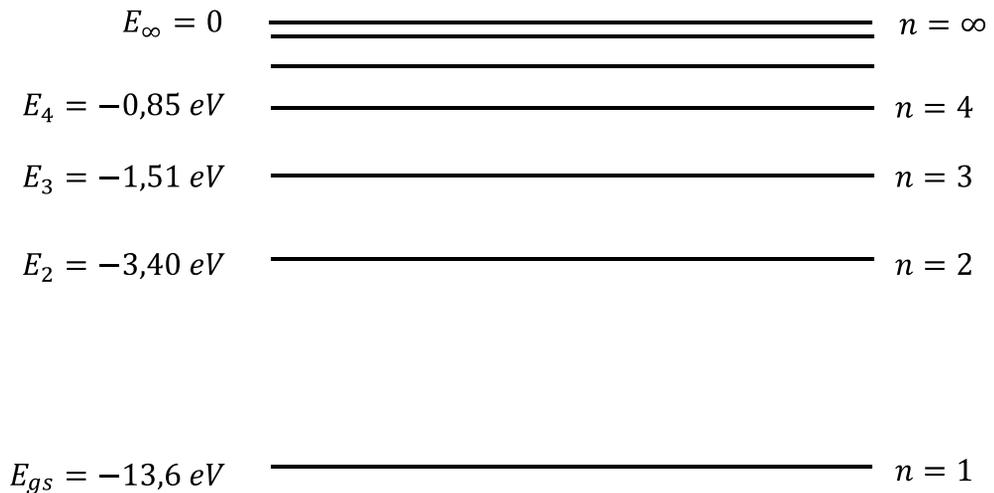
$$E_{gs} = E_0 = E_1 = -13,6 \text{ eV} \quad 6.28$$

Persamaan 6.28 adalah besar energi ikat elektron dalam atom hidrogen. Tingkat – tingkat energi elektron pada atom hidrogen kemudian diberikan oleh:

$$E_n = \frac{13,6}{n^2} \text{ eV} \quad 6.29$$

Sehingga pada keadaan – keadaan tereksitasi dipenuhi oleh energi $E_2 = -3,40 \text{ eV}$ untuk $n = 2$, $E_3 = -1,51 \text{ eV}$ untuk $n = 3$ dan seterusnya. Tingkat – tingkat energi ini digambarkan pada Gambar 6.11

Gambar 6. 10 Diagram Tingkat Energi Elektron dalam Atom Hidrogen



Jadi jika terjadi transisi dari keadaan awal dengan energi E_i ke keadaan akhir E_f , maka selisih energi pada dua keadaan terdekat dinyatakan dengan:

$$\Delta E = E_i - E_f \quad 6.30$$

Dengan menggunakan persamaan 6.27, kita peroleh hubungan :

$$\Delta E = -\frac{me^4}{32\pi^2\epsilon_0^2\hbar^2}\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_f^2}\right) = -13,6\left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_f^2}\right)eV \quad 6.31$$

Ada tiga jenis energi dari kuantisasi energi elektron pada atom hidrogen ini, yaitu

a. Energi Eksitasi

Energi eksitasi adalah energi yang diperlukan bagi elektron untuk bertransisi dari keadaan dasar menuju tingkat energi yang lebih tinggi. Eksitasi pertama dipenuhi saat elektron bertransisi dari keadaan dasar ke tingkat energi selanjutnya yaitu $n = 2$. Eksitasi pertama ini memiliki energi senilai :

$$\Delta E = E_2 - E_{gs} = -3,40eV - (-13,60 eV) = 10,20 eV$$

Eksitasi kedua dipenuhi saat elektron bertransisi dari keadaan dasar $n = 1$ menuju tingkat energi ketiga $n = 3$. Sehingga besar energi eksitasi kedua ini adalah:

$$\Delta E = E_3 - E_{gs} = -1,51eV - (-13,60 eV) = 12,09 eV$$

energi eksitasi juga bisa dipandang sebagai energi yang diperlukan elektron untuk bertransisi ke tingkat energi yang lebih tinggi. Misalnya jika atom hidrogen menyerap energi sejumlah $10,20eV$ ketika elektronnya berada pada tingkat dasar ($n= 1$), maka elektron tersebut akan pindah pada keadaan eksitasi pertama ($n = 2$).

B. Energi ikat

Energi ikatan (*binding energy*) adalah besar energi pada tiap tingkatan energi $|E_n|$. Sebagai contoh, energi ikatan dari elektron pada tingkat keadaan $n = 2$ adalah $3,40 eV$. Jika atom menyerap sejumlah energi yang sama dengan energi ikatan dari elektron, maka elektron akan dilepaskan dari atom dan menjadi elektron bebas.

Energi ikatan juga dapat diartikan sebagai besar energi yang harus dilepaskan ketika sebuah atom terbentuk dari ikatan antara sebuah elektron dan sebuah inti yang awalnya terpisah oleh jarak yang cukup besar. Jika kita sudah membawa sebuah elektron dari sebuah jarak yang sangat jauh dan menempatkannya pada orbit dari keadaan n dengan nilai energi $-E_n$, maka energi sebesar $|E_n|$ akan dilepaskan dan biasanya akan membentuk satu atau lebih foton.

C. Energi ionisasi

Atom yang telah melepaskan elektron kemudian disebut ion. Energi ionisasi dari sebuah atom mengindikasikan energi yang diperlukan untuk melepas sebuah elektron dari keadaan dasar. Sehingga energi ionisasi dari atom hidrogen adalah 13,6 eV. Nilai ini sesuai dengan eksperimen. Jika atom menyerap lebih banyak energi daripada nilai minimum yang diperlukan untuk melepas elektron, maka kelebihan energi ini akan muncul sebagai energi kinetik dari elektron (yang dibebaskan dari atomnya).

4. Panjang gelombang hidrogen dalam model atom Bohr

Dengan menggunakan persamaan 6.31,

$$\Delta E = -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_f^2} \right)$$

maka kemudian kita bisa memperoleh panjang gelombang dari foton yang diradiasikan atau diserap sebagai :

$$\begin{aligned} h \frac{c}{\lambda} &= -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2} \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \\ \frac{1}{\lambda} &= -\frac{m_e e^4}{32\pi^2 \epsilon_0^2 c \hbar^2} \left(\frac{1}{n_1^2} - \frac{1}{n_f^2} \right) \end{aligned}$$

Atau

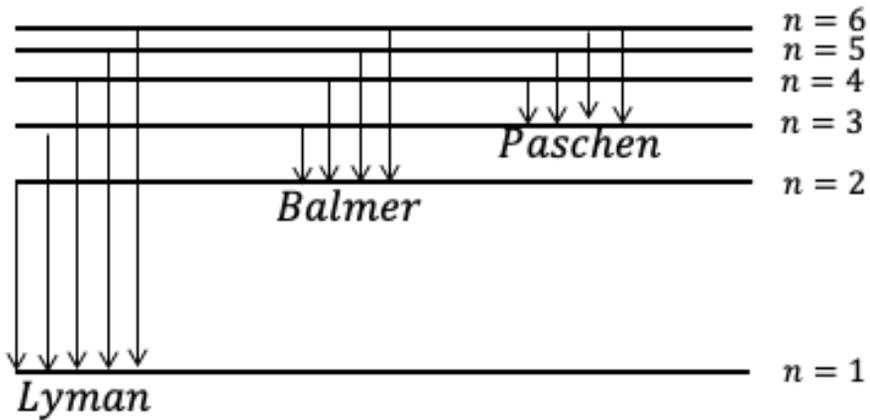
$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) \quad 6.32$$

Dengan R_H merupakan tetapan Rydberg atom hidrogen yang dinyatakan dengan:

$$R_H = \frac{m_e}{4\pi c \hbar^3} \quad 6.33$$

Persamaan (4-20) sesuai dengan persamaan empiris Balmer dan deret-deret Lyman, Balmer Paschen, dan sebagainya dapat dijelaskan sebagai hasil transisi dari suatu keadaan energi tinggi ke keadaan energi lebih rendah (Gambar 6.11)

Gambar 6. 11 model atom bohr dalam transisi antar tingkat energi untuk menghasilkan spektrum emisi



5. Koreksi untuk Massa Inti Berhingga

Penurunan rumus-rumus sebelumnya telah menggunakan pengandaian bahwa massa inti besar tak berhingga dibandingkan dengan massa elektron sehingga inti dianggap tidak bergerak dalam ruang pendekatan tersebut cukup baik karena untuk inti atom hidrogen yang merupakan inti teringan dengan massa 1846 kali massa elektron .namun data spektroskopi yang diperoleh dengan alat berdaya pisah tinggi menunjukkan adanya perbedaan.

Marilah kita tinjau sistem inti dan elektron .elektron massa m_e danhadap pusat massa inti M sama-sama bergerak mengelilingi pusat massa . Jika r adalah jarak elektron-inti maka jarak x inti terhadap pusat massa adalah:

$$X = \frac{m_e r}{m_e + M} \tag{6.34}$$

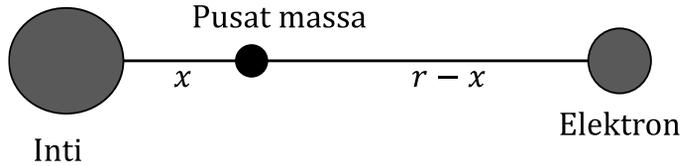
Dan jarak elektron ke pusat massa adalah

$$r - X = \frac{mr}{m_e + M} \tag{6.35}$$

Elektron dan inti mengelilingi pusat massa dengan kecepatan sudut ω momentum orbitalnya sistem adalah

$$L = m_e(r - x)^2 \omega + mx^2 \omega \tag{6.36}$$

Gambar 6. 12 Sistem inti dan elektron dengan pusat massanya



Dengan menggunakan persamaan 6.34 dan 6.35 persamaan 6.35 menjadi :

$$\begin{aligned}
 L &= m_e \left(\frac{mr}{m_e+M} \right)^2 \omega + M \left(\frac{mr}{m_e+M} \right)^2 \omega \\
 &= m_e \left(\frac{mr}{m_e+M} \right)^2 \omega \\
 L &= \mu r^2 \omega
 \end{aligned}
 \tag{6.37}$$

Dengan

$$\mu = \frac{m_e M}{m_e + M}
 \tag{6.38}$$

μ = massa efektif sistem yang lebih kecil dari m dengan faktor $\frac{1}{1 + \frac{m_e}{M}}$

Dengan demikian massa m_e pada penurunan rumus harus diganti dengan μ dan tetapan Rydberg menjadi:

$$R_M = \frac{\mu e^4 k^2}{4\pi e h^3}
 \tag{6.39}$$

Rangkuman

1. Model Atom Democritus

Istilah atom pertama kali digagas pada zaman Yunani Kuno oleh Democritus. Model atom Democritus menggagas bahwa atom adalah penyusun materi / bahan. Atom tidak dapat dibagi lagi karena sudah merupakan bagian terkecil dari bahan.

2. Model Atom Dalton

Beberapa poin penting dari model atom Dalton, antara lain:

- Atom- atom dari elemen kimiawi yang berbeda memiliki ukuran, massa dan sifat berbeda lainnya.
- Elemen- elemen kimiawi (senyawa dan molekul) terdiri dari partikel berukuran sangat kecil yang disebut atom.

- c. Atom – atom dari sebuah elemen kimiawi memiliki massa dan sifat- sifat yang sama.
- d. Atom- atom saling berinteraksi satu sama lain dan mengikuti hukum kekekalan massa dan perbandingan tetap

3. Model Atom Thomson

- a. Model atom Thomson dicetuskan pada tahun 1904, didasarkan pada:
 - 1) Penemuan proton oleh Eugene Goldsetein pada tahun 1886
 - 2) Penemuan elektron oleh JJ Thomson pada tahun 1897
- b. Thomson memodelkan atom sebagai suatu objek berbentuk bola pejal seragam (*uniform*) yang terdiri dari muatan positif dan negatif yang saling terdistribusi merata dalam volume atom

4. Model Atom Rutherford

Model atom Thomson ini gagal menjelaskan hamburan partikel α oleh lembaran emas tipis, yang dianalisis secara matematis oleh Ernest Rutherford dan dibuktikan secara eksperimen oleh Hans Geiger dan Ernest Marsden.

- a. Hamburan partikel alfa
Rutherford mengamati bahwa tidak semua partikel α diteruskan, melainkan ada sedikit partikel α yang dihamburkan.
- b. Interaksi Parikel alfa dengan inti atom
Pada fenomena sudut hamburan yang besar, Rutherford mengasumsikan bahwa partikel α telah mengalami interaksi dengan suatu bagian dari atom yang berukuran kecil namun massif (bermassa besar) dan menolak partikel alfa. Sifatnya yang menolak partikel alfa menunjukkan fraksi ini bermuatan positif. Bagian masif ini terletak pada pusat bola atom, yang kemudian disebut sebagai inti atom.
- c. Cacah partikel alfa yang terhambur
cacah partikel yang terhambur ke arah sudut φ per satuan luas adalah

$$\frac{dq}{dA} = \frac{Qnt}{r^2} \left(\frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 E_k} \right)^2 \text{cosec}^4 \left(\frac{\varphi}{2} \right)$$

- d. Perkiraan Rutherford tentang ukuran inti
Jika partikel α yang digunakan berasal dari sumber RaC dan logam sasaran adalah emas, maka $v = 2,1 \times 10^7$ m/s dan $Z = 79$ sehingga kita peroleh ukuran inti atom adalah $d = 2,5 \times 10^{-14}$ m.
- e. Simpulan model atom Rutherford
Hasil eksperimen hamburan partikel alfa memberi simpulan bahwa atom memiliki beberapa sifat dasar, yaitu:

- 1) Atom berukuran sangat kecil. Radius atom ada dalam orde 0,1 nm ($10^{-10}m$)
 - 2) Atom terdiri dari inti yang bermuatan listrik positif dan masif. Inti atom dikelilingi oleh elektron yang bermuatan listrik negatif, sedemikian sehingga secara total atom bermuatan netral.
 - 3) Atom bersifat stabil
 - 4) Ukuran inti atom jauh lebih kecil dari radius atom
 - 5) Atom dapat mengemisikan atau menyerap radiasi elektromagnetik
- f. Model atom Rutherford ini kemudian disempurnakan oleh penemuan neutron oleh James Chadwick pada tahun 1932 sebagai partikel subatomic ketiga. Neutron bermuatan netral, terletak di dalam inti atom dan massanya hampir sama dengan massa dari proton
- g. Model atom Rutherford menunjukkan bahwa atom bersifat tidak stabil dan atom meradiasikan gelombang elektromagnetik dengan spektrum kontinu. Kelemahan ini yang kemudian direvisi oleh model atom berikutnya.

5. Spektrum atom Hidrogen

- a. Spektrum atom hidrogen berupa spektrum garis yang menunjukkan Radiasi yang dipancarkan atom-atom tidak bersifat kontinu, melainkan diskrit. Pola dari spektrum atom hidrogen yang selalu sama juga menunjukkan bahwa atom adalah stabil.
- b. Panjang gelombang yang dipancarkan dari spektrum atom hidrogen mengikuti persamaan Rydberg

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n_I^2} - \frac{1}{n_{II}^2} \right)$$

Dengan

- $n_I = 1$ dan $n_{II} = 2,3,4 \dots$ disebut deret Lyman
 $n_I = 2$ dan $n_{II} = 3,4,5, \dots$ disebut deret Balmer
 $n_I = 3$ dan $n_{II} = 4,5,6, \dots$ disebut deret paschen
 $n_I = 4$ dan $n_{II} = 5,6,7, \dots$ disebut deret Bracket

6. Model Atom bohr

- a. 4 Hipotesis Bohr tentang model Atom:
 - 1) Pada keadaan stasioner, elektron mengorbit inti tanpa memancarkan energi elektromagnetik secara kontinu.
 - 2) Emisi atau absorbs dari radiasi elektromagnetik hanya dapat terjadi dalam hubungannya dengan transisi antara dua keadaan stasioner.

Frekuensi yang berkaitan dengan emisi atau absorpsi dari radiasi tersebut sebanding dengan perbedaan energi dari dua keadaan stasioner.

$$h\nu = E_\mu - E_l$$

- 3) Kestimbangan dinamik dari sistem pada keadaan stasioner diatur oleh hukum-hukum fisika klasik, tetapi hal ini tidak berlaku untuk transisi antar keadaan stasioner.
- 4) Hipotesis Bohr yang keempat disebut **kuantisasi momentum sudut** momentum sudut dari sistem dalam keadaan stasioner yang bernilai kelipatan bulat dari $n\hbar = n \frac{h}{2\pi}$

b. Jejar Bohr

jejar lintasan elektron pada keadaan n sebesar :

$$r_n = a_0 n^2$$

Dengan a_0 disebut jejar Bohr yang memenuhi

$$a_0 = 4\pi\epsilon_0 \frac{\hbar^2}{m_e e^2} = 0,0529 \text{ nm} = 0,529 \text{ \AA}$$

c. Tingkat – tingkat energi elektron pada atom hidrogen kemudian diberikan oleh:

$$E_n = \frac{13,6}{n^2} \text{ eV}$$

- d. Energi eksitasi adalah energi yang diperlukan bagi elektron untuk bertransisi dari keadaan dasar menuju tingkat energi yang lebih tinggi. Energi ikatan (*binding energy*) adalah besar energi pada tiap tingkatan energi $|E_n|$. Energi ionisasi dari sebuah atom mengindikasikan energi yang diperlukan untuk melepas sebuah elektron dari keadaan dasar.
- e. Panjang gelombang radiasi atom hidrogen

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Dengan R_H merupakan tetapan Rydberg atom hidrogen yang memenuhi

$$R_H = \frac{m_e}{4\pi c \hbar^3}$$

f. Koreksi massa inti

massa m_e pada penurunan rumus harus diganti dengan μ dan tetapan Rydberg menjadi:

$$R_M = \frac{\mu e^4 k^2}{4\pi e h^3}$$

Uji Formatif

Pilihan Ganda

1. Pernyataan berikut yang merupakan teori atom menurut Dalton adalah
 - A. Bagian terkecil dari suatu atom adalah elektron
 - B. Elektron dari suatu unsur sama dengan elektron unsur lain
 - C. Sebagian besar massa atom terkumpul pada intinya
 - D. Atom dari suatu unsur tidak dapat bergabung dengan atom unsur lain
 - E. Atom dari unsur-unsur yang sama mempunyai sifat yang sama pula
2. Pernyataan berikut yang tepat menggambarkan nilai perbandingan muatan dan massa sinar katoda yang diperoleh Thomson adalah
 - A. Bergantung pada jenis gas dalam tabung
 - B. Bergantung pada jenis bahan elektroda
 - C. Bergantung pada jenis bahan tabung
 - D. Bergantung pada tegangan pemercepat
 - E. Lebih besar daripada nilai yang diperoleh pada proton
3. Dalam eksperimen Rutherford, sejumlah partikel alfa yang mulanya ditembakkan ke lempeng tipis emas, ternyata sebagian kecilnya dihamburkan pada sudut besar. Hamburan ini terjadi karena partikel alfa
 - A. Menumbuk partikel berat bermuatan negatif yang tersebar pada seluruh lempeng emas
 - B. Ditolak oleh partikel berat bermuatan positif yang tersebar pada seluruh lempeng emas
 - C. Menumbuk partikel berat bermuatan negatif yang terkonsentrasi pada daerah kecil dari lempeng emas
 - D. Ditolak oleh partikel berat bermuatan positif yang terkonsentrasi pada daerah kecil dari lempeng emas
 - E. Bertumbukan dengan partikel alfa yang lain
4. Dalam model atomnya, Bohr menganggap bahwa elektron – elektron ...
 - A. Didistribusikan secara seragam dalam keseluruhan atom
 - B. Dilokasikan hanya dalam inti atom
 - C. Dilokasikan hanya dalam sejumlah orbit- orbit tertentu

- D. Memancarkan cahaya ketika beredar dalam orbitnya
 E. Memancarkan cahaya ketika berpindah dari orbit dalam ke orbit luar
5. Garis-garis spektrum Paschen dihasilkan jika dalam atom hidrogen terjadi transisi elektron dari tingkat yang lebih tinggi ke tingkat $n = 3$. Jika tetapan Rydberg $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, panjang gelombang terpendek dari deret Paschen adalah
- | | |
|------------------------------------|------------------------------------|
| A. $8,2 \times 10^{-7} \text{ m}$ | D. $16,7 \times 10^{-7} \text{ m}$ |
| B. $11,3 \times 10^{-7} \text{ m}$ | E. $18,8 \times 10^{-7} \text{ m}$ |
| C. $14,4 \times 10^{-7} \text{ m}$ | |
6. Jika konstanta Rydberg $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$, panjang gelombang terpendek pada deret Balmer adalah (dalam angstrom)
- | | |
|----------|----------|
| A. 6.563 | D. 3.646 |
| B. 6.352 | E. 3464 |
| C. 5.678 | |
7. Keberadaan tingkat energi di dalam atom dapat ditunjukkan secara langsung dengan mengamati bahwa
- Atom dapat memancarkan spektrum garis
 - Fotoelektron hanya dapat dipancarkan dari permukaan logam ketika cahaya yang menyinari memiliki panjang gelombang kritis
 - Partikel alfa dipantulkan balik dengan sudut besar oleh atom – atom dalam zat padat
 - Sinar X terhambur apabila mengenai padatan kristal
 - Atom – atom di dalam zat padat mendifraksikan elektron seperti pada gejala difraksi sinar X oleh kristal
8. Energi ikatan (binding energy) pada elektron adalah energi yang
- Diperlukan untuk menyatukan proton – proton dan neutron – neutron
 - Diperlukan untuk memutuskan inti atom menjadi proton – proton dan neutron – neutron
 - Diperlukan untuk elektron untuk bertransisi dari keadaan dasar menuju tingkat energi yang lebih tinggi
 - besar energi pada tiap tingkatan energi
 - Diperlukan untuk melepaskan sebuah elektron dari keadaan dasar.

9. Diberikan pernyataan berikut

- (1) Atom terdiri dari inti yang bermuatan listrik positif dan masif. Inti atom dikelilingi oleh elektron yang bermuatan listrik negatif, sedemikian sehingga secara total atom bermuatan netral.
- (2) Ukuran inti atom jauh lebih kecil dari radius atom
- (3) Atom dapat mengemisikan atau menyerap radiasi elektromagnetik
- (4) Atom tidak stabil atau mudah musnah

Pernyataan yang sesuai dengan kelemahan model atom rutherford adalah ...

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

10. Radius orbit Bohr berbanding lurus dengan ...

- A. $\frac{1}{n}$
- B. $\frac{1}{n^2}$
- C. n
- D. n^2
- E. $\frac{n^2}{2}$

Essay

1. Berapakah panjang gelombang terpendek dan terpanjang pada:

a. Deret Brackett

Jawab

b. Deret Pfund

Jawab

2. Panjang gelombang terpendek dari suatu deret adalah $1,45 \mu\text{m}$. Deret apakah ini?

Jawab

3. Untuk atom hidrogen pada orbit Bohr $n = 2$. Tentukan:

a. Jari – jari orbit

Jawab

b. Gaya listrik yang bekerja pada elektron

Jawab

c. Gaya sentripetal pada elektron

Jawab

d. Kelajuan elektron. bandingkan dengan kelajuan cahaya

Jawab

4. Jika jari- jari orbit ke – 2 untuk atom hidrogen adalah 2,112 angstrom, tentukan jari – jari pada orbit ke – 3 , ke – 4 , dan ke – 5

Jawab

5. Sebuah elektron bertumbukan dengan sebuah atom gas hidrogen yang berada dalam kulit ke dua. Berapakah energi minimum (dalam eV) yang harus elektron berikan untuk menyebabkan hidrogen memancarkan foton garis Balmer?

Jawab

6. Energi ionisasi atom hidrogen adalah 3,4 eV. Hitung:

a. Kelajuan sebuah elektron yang tepat dapat mengionisasi atom hidrogen

Jawab

b. Panjang gelombang minimum yang dapat dipancarkan atom hidrogen

Jawab

7. Sebuah atom hidrogen dalam keadaan $n = 3$ membuat transisi ke keadaan dasar dengan memancarkan sebuah foton. Hitung panjang gelombang foton yang dipancarkan

Jawab

8. Perkirakan kesalahan yang timbul dalam menghitung energi elektron dalam atom hidrogen karena Gerakan inti atom! (petunjuk: energi elektron sebanding dengan tetapan Rydberg yang harus dikoreksi karena Gerakan inti). (Jawab: 0,0545%)

Jawab

9. Hitung energi yang diperlukan untuk mengeksitasi atom hidrogen ke tingkat eksitasi pertamanya! (jawab: 10,2 eV)

Jawab:

10. Hitung frekuensi dari garis Lyman akibat transisi dari $n = 2$ ke $n = 1$.

Jawab:

11. Molekul HCl dikenai radiasi cahaya merkuri 2536,5 angstrom. Jika momen inersia HCl adalah $2,7 \times 10^{-47} \text{ kg m}^2$, tentukanlah panjang gelombang garis Raman yang pertama dan kedua! (Jawab : $\Delta\lambda = 3,98 \text{ \AA}$ dan $6,64 \text{ \AA}$)

Jawab

12. Hitung berapa perbandingan antara emisi terstimulasi dan emisi spontan antara dua aras energi dari sebuah atom yang memancarkan cahaya

tampak (2 eV) dan dalam kesetimbangan termal pada 300 K dan 30.000 K. (Jawab 3×10^{-34} dan 0,86)

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika jawaban benar belum mencapai 80%, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

https://chem.libretexts.org/@api/deki/files/77927/CK12_Screenshot_5-5-2.png?revision=1&size=bestfit&width=506&height=504

Kanginan, Marthen. (2018). Fisika untuk SMA/MA Kelas XII. Erlangga: Jakarta.

Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi

Sutjahja, Inge M. (2018). Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress

Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.

Kegiatan Pembelajaran 2 SIMULASI TETES MINYAK MILIKAN

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan simulasi tetes minyak milikan	<ol style="list-style-type: none">Mahasiswa bisa melakukan simulasi tetes minyak milikan menggunakan Software Milikan Oil Drop Apparatus SimulationMahasiswa bisa menganalisis data hasil pengamatannya dalam sebuah laporan praktikum

Uraian Materi

A. Judul Percobaan

Simulasi Tetes Minyak Milikan

B. Tujuan Praktikum:

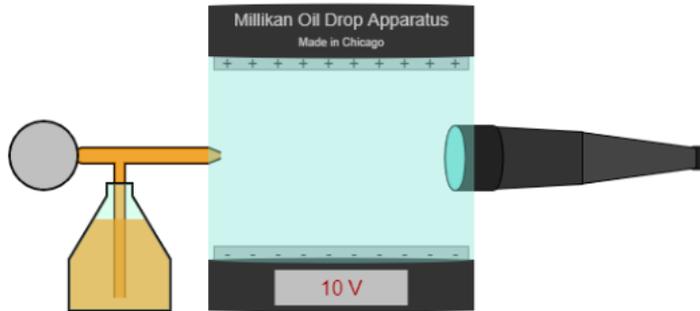
1. Mempelajari sifat diskrit muatan listrik secara simulasi.
2. Menentukan muatan elementer elektron muatan e secara simulasi.

C. Landasan Teori

1. Konsep – Konsep Dasar pada Eksperimen Tetes Minyak Milikan

Eksperimen tetes minyak milikan berguna untuk menentukan besarnya muatan elementer elektron e . *Setup* eksperimen tetes minyak Milikan sebenarnya ditunjukkan pada Gambar 6.13. Dua keping logam parallel horizontal A dan B dipisahkan dengan jarak d dalam orde milimeter. Minyak disemprotkan pada bagian atas keping dan ada beberapa tetes minyak yang memasuki lubang kecil pada keping A. Sinar diarahkan horizontal di antara kedua keping. Sebuah teleskop diatur sehingga sumbunya tegak lurus pada sinar. Minyak yang jatuh kemudian disinari dengan cahaya sehingga dapat diamati melalui teleskop. Tetes itu terlihat seperti bintang kecil yang sangat terang, jatuh perlahan dengan suatu kecepatan terminal. Kecepatan minyak dapat ditentukan melalui hubungan berat minyak dengan gaya hambat udara karena kekentalannya.

Gambar 6. 13 *Setup* Aparatus Tetes Minyak Milikan



<https://binlinwu.files.wordpress.com/2021/04/image.png>

Metode sederhana untuk mengukur muatan tetes minyak yang jatuh adalah sebagai berikut. Anggap tetes minyak bermuatan negatif. Kedua keping diberi beda potensial sehingga di antara kedua keping terdapat medan listrik yang arahnya ke bawah sebesar:

$$E = \frac{V_{AB}}{d} \quad 6.40$$

Dengan mengatur tegangan listrik V_{AB} maka dapat dihasilkan gaya listrik yang tepat sama dengan berat tetes minyak sehingga dalam keadaan ini tetes minyak akan diam:

$$\begin{aligned} F_{\text{listrik}} &= W_{\text{tetes minyak}} \\ E e &= m_{\text{tetes minyak}} g \\ \frac{V_{AB}}{d_{AB}} e &= m_{\text{tetes minyak}} g \end{aligned}$$

Sehingga,

$$e = \frac{m_{\text{tetes minyak}}}{V_{AB}} g d_{AB} \quad 6.41$$

Massa tetes minyak sama dengan hasil kali massa jenis dan volumenya (dianggap berbentuk bola di mana $V_{\text{bola}} = \frac{4}{3}\pi r^3$);

$$\begin{aligned} m_{\text{tetes minyak}} &= \rho_{\text{tetes minyak}} V_{\text{tetes minyak}} \\ &= \frac{4}{3} \rho_{\text{tetes minyak}} \pi r_{\text{tetes minyak}}^3 \end{aligned} \quad 6.42$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 6.42 ke dalam persamaan 6.41 diperoleh:

$$e = \frac{4 \rho_{\text{tetes minyak}}}{3 V_{AB}} \pi r_{\text{tetes minyak}}^3 g d_{AB} \quad 6.43$$

Semua besaran yang terdapat di ruas kanan dapat diukur dari eksperimen kecuali jari – jari tetes minyak $r_{\text{tetes minyak}}$ karena orde tetes minyak yang berukuran 10^{-5} cm terlalu kecil untuk diukur langsung. Jari – jari tersebut dapat kita hitung dengan mengukur kecepatan terminal tetes minyak $v_{\text{tetes minyak}}$ di mana tetes minyak jatuh melalui jarak d_{AB} yang diukur dari garis acuan dalam okuler (medan penglihatan) teleskop.

Suatu zat baik zat cair maupun zat yang mudah terionisasi jika dimasukkan ke dalam alat pengionisasi maka zat tersebut akan mengalami penguraian menjadi ion positif dan ion negatif dengan adanya fenomena tersebut maka jika zat itu minyak silikon maka setelah mengalami proses ionisasi maka akan terurai menjadi ion positif maupun ion negatif.

Gambar 6. 14 Reaksi Ionisasi pada Tetes Minyak Milikan



Hasil/produk reaksi diatas sudah mengalami proses ionisasi, sehingga dapat dicari nilai e^- . Robert A Millikan pada tahun 1906 melalui percobaan tetes minyak itu berhasil menentukan nilai muatan ion.

2. Kecepatan terminal

Eksperimen tetes minyak Milikan berguna untuk menentukan besarnya muatan elementer elektron e . Kecepatan terminal adalah kecepatan tetes minyak yang terjadi saat berat tetes minyak tepat setimbang dengan gaya hambat kekentalan udara. Gaya hambat kekentalan udara terhadap tetes minyak yang bergerak dengan kecepatan terminal dalam fluida (yaitu udara) dengan kekentalan η_{udara} , diberikan oleh hukum Stokes yaitu :

$$F_{\text{hambat udara}} = 6\pi\eta_{\text{udara}} r_{\text{tetes minyak}} v_{T_{\text{tetes minyak}}} \quad 6.44$$

Dengan demikian,

$$\begin{aligned} F_{\text{hambat udara}} &= W_{\text{tetes minyak}} \\ 6\pi\eta_{\text{udara}} r_{\text{tetes minyak}} v_{T_{\text{tetes minyak}}} &= m_{\text{tetes minyak}} g \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{4}{3} \rho_{\text{tetes minyak}} \pi r_{\text{tetes minyak}}^3 g \\
 r_{\text{tetes minyak}} &= \sqrt[3]{\frac{9 \eta_{\text{udara}} v_{T_{\text{tetes minyak}}}}{2 \rho_{\text{tetes minyak}}}} \quad 6.45
 \end{aligned}$$

Dengan mensubstitusikan persamaan 6.45 ke dalam persamaan 6.43 maka diperoleh muatan elementer elektron sebesar:

$$e = 18\pi \frac{d_{AB}}{V_{AB}} \sqrt[3]{\frac{\eta_{\text{udara}}^3 v_{T_{\text{tetes minyak}}}^3}{\rho_{\text{tetes minyak}} \cdot g}} \quad 6.46$$

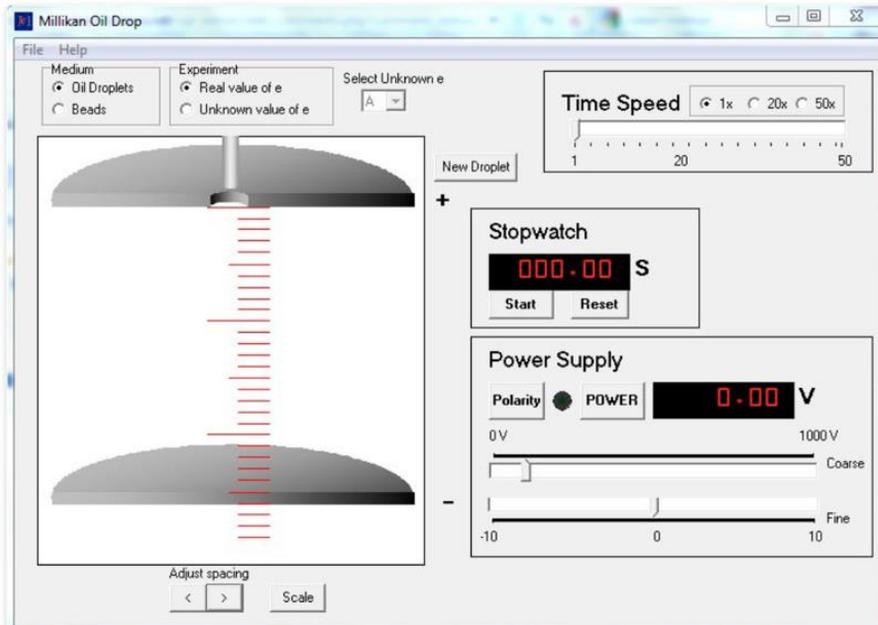
Milikan dan asistennya mengukur ribuan tetes minyak. Ia mendapatkan bahwa dalam batas kesalahan eksperimen setiap tetes selalu memiliki muatan yang sama dengan kelipatan muatan elementer elektron e dan tidak pernah bernilai kelipatan dalam bentuk decimal atau selalu bernilai bulat positif (e , $2e$, $3e$, dst). Dari eksperimennya, nilai muatan elementer elektron e yang didapat oleh Milikan adalah sebesar $1,602192 \times 10^{-19}$ Coulomb atau sering dibulatkan menjadi $1,6 \times 10^{-19}$ C.

3. Software Simulasi Tetes Minyak Milikan

Salah satu software yang dapat digunakan untuk melakukan simulasi eksperimen tetes minyak milikan adalah *Milikan Oil Drop Apparatus Simulation*. Software tersebut dapat diunduh secara gratis di internet ada link http://www.teachscience.net/wp-content/uploads/2011/02/milikan_.zip. Setelah anda mengunduh software tersebut, anda dapat langsung menginstalnya di laptop atau PC dengan membutuhkan ruang penyimpanan hard drive sebesar 712 kB.

Tampilan awal software ditunjukkan pada Gambar 6.15. Menu dan fungsinya diberikan pada Tabel.

Gambar 6. 15 Software Milikan Oil Experiment



<https://www.teachscience.net/2011/02/07/millikan-oil-drop-simulation/>

Tabel 11 Menu beserta fungsinya pada Software Milikan Oil Drop

Menu / ikon	Fungsi
Medium	memilih jenis minyak yang akan digunakan. Pada kotak tersebut terdapat dua pilihan yaitu “Oil Experiment” dan “Beads”.
Experiment	Mengetahui atau tidaknya nilai muatan elementer elektron e. Pada kotak ini terdapat dua piluhan, yaitu “Real value of e” dan “Unknown value of e”.
Select unknown e	Untuk memilih salah satu nilai e yang telah deprogram dalam software.
New Droplet	Simulasi penyemprotan tetes minyak
Stopwatch	Mencatat rentang waktu gerak tetes minyak , pada ikon stopwatch terdapat dua tombol yaitu “Start” dan “Reset”.
Start	Memulai perhitungan waktu akan berjalan pada stopwatch. Setelah tombol Start ditekan maka perhitungan waktu akan berjalan dan tombol Start berubah menjadi tombol “Stop”.
Stop	Mengakhiri perhitungan waktu pada Stopwatch.

Menu / ikon	Fungsi
Reset	Mengatur ulang Stopwatch ke angka 0.
Power Supply	Power Supply terdiri dari tombol “Power” dan dua bar “Coarse” Memberikan tegangan pada setup experiment dan berwarna hijau ketika di klik tombol Power.
Coarse	Mengubah variasi tegangan
Fine	Dalam simulasi ini bar Fine tidak kita gunakan.
Display	Menampilkan simulasi tetes minyak. Pada kotak ini terdapat dua keping logam dan sebuah penggaris. Ada dua tombol pada kotak Display, yaitu “Adjust Spacing” dan “Scale”.
Adjust Spacing	Mengatur jarak antara dua keping logam d_{AB} .
Scale	Menghilangkan atau memunculkan penggaris pada kotak Display.
Time Speed	Mengubah kecepatan jatuh tetes minyak, yang bisa kita atur menjadi 1x, 20x atau 50 x.

D. Alat dan Bahan

1. Laptop atau PC
2. Software Milikan Oil Drop Apparatus Simulation

E. Prosedur Eksperimen

1. Bukalah software Milikan Oil Drop Apparatus Simulation. Anda akan melihat tampilan seperti Gambar 6.15.
2. Pada kotak Display, ukur jarak bawaan software antara kedua keping logam dan jarak tersebut diberi simbol d_{AB} . Pada eksperimen ini kita tidak mengubah-ubah jarak tersebut.
3. Pada kotak pilihan Medium pilih Oil Droplet.
4. Pada kotak pilihan Experiment pilih Unknown value of e. Pada ikon Select unknown e pilih D.
5. Pada ikon Power Supply, ubah tegangan awal menjadi 500 V.
6. Klik New Droplet kemudian perhatikan tetes minyak yang jatuh di kotak Display. Tentukan titik awal dan titik akhir jatuhnya tetes minyak namun pastikan bahwa jarak jatuhnya tetes minyak dari titik awal ke titik akhir

sebesar 5 mm. Jarak antara titik awal dan titik akhir jatuhnya tetes minyak diberi simbol s . Bersamaan dengan itu klik tombol Start pada ikon Stopwatch dan klik tombol Stop pada ikon Stopwatch ketika tetes minyak sudah jatuh sejauh 5 mm. Rentang waktu tersebut diberi simbol t . Catat nilai s dan t .

7. Kecepatan terminal tetes minyak yang jatuh secara sederhana dapat dihitung dengan rumus $v_T = s/t$ dimana nilai s dan t sudah diperoleh dari langkah 6. Setelah mendapatkan nilai s dan t hitung nilai v_T -nya.
8. Perhatikan kembali kotak Display dan anda akan melihat tetes minyak akan terus jatuh. Selanjutnya klik Power pada kotak Power Supply dan atur tegangan pada bar Coarse kemudian perhatikan pada tegangan berapa tetesan minyak tepat akan berhenti.

Catatan :

Anda mungkin akan sulit untuk melihat dengan jelas pergerakan jatuhnya tetes minyak apabila pada kotak Time Speed dipilih kecepatannya 1x. Untuk mempermudah, cobalah untuk menambah kecepatan sampai 10x.

9. Ulangi langkah 2 s/d sampai 10 kali.
10. Dari Tabel 12, untuk percobaan ke – 1 kita dapat menghitung nilai muatan elementer (e) dengan menggunakan nilai muatan elementer (e) dengan menggunakan Persamaan 6.46. Jika masukkan nilai massa jenis tetes minyak, massa jenis udara dan kekentalan udara, maka nilai konstanta dari ruas berikut kita peroleh:

$$18\pi \sqrt{\frac{\eta_{\text{udara}}^3 v_{T_{\text{tetes minyak}}}^3}{2\rho_{\text{tetes minyak}} \cdot g}} = 3,3 \times 10^{-8} (v_T)^{3/2} \quad 6.47$$

Dengan nilai v_T sudah kita hitung dari Tabel 12. Selanjutnya Anda tinggal mengalikan nilai dari 6.47 dengan $\frac{d_{AB}}{V_{AB}}$, yang telah kita ukur di Langkah 2 dan nilai V_{AB} telah Anda catat di Tabel 12.

11. Lakukanlah perhitungan pada Langkah 10 untuk sembilan Langkah percobaan lainnya.

F. Tabel Pengamatan

Tabel 12 Data Pengamatan Eksperimen Simulasi Tetes Minyak Milikan

Percobaan ke-	s (mm)	t (s)	V_{AB} (volt)	v_T (mm/s)	e
1	5				
2	5				
3	5				
4	5				
..... dst					

TUGAS

Lakukanlah Eksperimen Simulasi Tetes Minyak Milikan sesuai dengan prosedur eksperimen yang telah dijelaskan dalam modul ini !

Rangkuman

Percobaan Milikan atau yang dikenal juga dengan nama percobaan oil drop dirancang untuk mengukur muatan listrik elektron. Alat dan bahan yang diperlukan yaitu laptop atau PC dan software Milikan Oil Drop Apparatus Simulation. Kecepatan naik dan kecepatan turun tetes minyak milikan berpengaruh terhadap penentuan nilai muatan tetes dimana pada keduanya bekerjainteraksi gaya stokes dan percepatan gravitasi dari bumi.

Uji Formatif

Essay

1. Sebutkan tujuan eksperimen simulasi tetes minyak milikan!

Jawab

2. Sebutkan alat dan bahan pada eksperimen simulasi tetes minyak milikan!

Jawab

3. Berapakah nilai muatan elementer e hasil eksperimen yang akurat?

Jawab

4. Hitunglah nilai e dari kesepuluh percobaan yang Anda lakukan!

Jawab

5. Buatlah analisis hasil pengamatan sesuai dengan tujuan praktikum!

Jawab

6. Buatlah kesimpulan dari analisis hasil pengamatanmu tersebut!

Jawab

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika skor benar belum mencapai 80%, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi

Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress

Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.

<https://binlinwu.files.wordpress.com/2021/04/image.png>

<https://www.teachscience.net/2011/02/07/millikan-oil-drop-simulation/>

Kegiatan Pembelajaran 3 TINJAUAN KUANTUM ATOM HIDROGEN

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk menampilkan keadaan kuantum dan tingkatan energi Atom Hidrogen	a. Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk menampilkan keadaan kuantum, yaitu untuk memperoleh bilangan kuantum utama, bilangan kuantum azimuth dan bilangan kuantum magnetik. b. Mahasiswa bisa menjelaskan interpretasi dari bilangan kuantum utama, bilangan kuantum azimuth dan bilangan kuantum magnetic. c. Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan persamaan Schrodinger untuk menampilkan tingkatan energi Atom Hidrogen

Uraian Materi

A. Aplikasi fungsi gelombang pada model hidrogen

Pada kegiatan pembelajaran ini kita akan menyelesaikan Persamaan Schrodinger untuk menampilkan keadaan kuantum serta tingkatan energi pada atom Hidrogen. Atom hidrogen terdiri atas inti bermuatan $+e$ dan elektron yang mengedarinya. Jika r adalah jarak elektron dari inti atomnya, maka energi potensialnya diperoleh dari hukum Coulomb sebesar.

$$V(r) = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \quad 6.48$$

Karena potensialnya V hanya bergantung pada jarak r , maka persamaan Schrodinger dalam 3 dimensi (tak bergantung waktu) menjadi

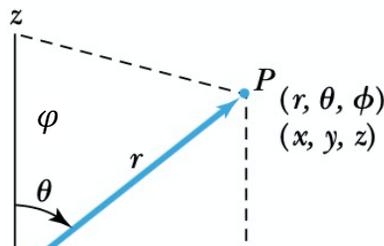
$$\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi = (E - V(r)) \psi$$

$$\frac{\hbar^2}{2m} \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right) \psi = (E - V(r))\psi$$

Persamaan Schrodinger diatas dinyatakan dalam koordinat x, y z. karena interaksi antara proton dan elektron dapat dimodelkan sebagai sebuah bola, maka kita bisa memanfaatkan sifat simetri dari bola yang kemudian bisa mempermudah kita dalam mencari solusi dari persamaan Schrodinger diatas .

Untuk mengkonversi persamaan koordinat kartesius menjadi koordinat bola, kita gunakan transformasi yang diberikan pada Gambar 6.

Gambar 6. 16 Hubungan koordinat kartesian dengan koordinat polar



Dengan transformasi dari koordinat kartesian ke koordinat polar diberikan oleh

$$x = r \sin \theta \cos \varphi$$

$$y = r \sin \theta \sin \varphi$$

$$z = r \cos \theta$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2 + z^2}$$

$$\theta = \cos^{-1} \frac{z}{r} \quad (\text{sudut polar})$$

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{y}{x} \quad (\text{sudut Azimuth})$$

Persamaan Schrodinger diatas menjadi sederhana jika digunakan sistem koordinat bola dengan:

$$\nabla^2 = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \cdot \left(\sin \theta \frac{\partial}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} \quad 6.49$$

Persamaan Schrodinger Tak Gayut Waktu dalam koordinat bola menjadi berbentuk:

$$\frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} \left(r^2 \frac{\partial \psi}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta} \frac{\partial}{\partial \theta} \cdot \left(\sin \theta \frac{\partial \psi}{\partial \theta} \right) + \frac{1}{r^2 \sin^2 \theta} \frac{\partial^2}{\partial \varphi^2} + \frac{2\mu}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \psi = 0$$

Dengan μ adalah massa efektif $\frac{mM}{m+M}$

Persamaan diatas adalah persamaan *separable*, artinya penyelesaian atau solusinya berupa hasil perkalian tiga fungsi, masing masing bergantung pada koordinat r , θ dan φ . Fungsi gelombang ψ merupakan fungsi r , θ dan φ yang dapat diandaikan berbentuk:

$$u(r, \theta, \varphi) = R(r)f(\theta)g(\varphi) \quad 6.50$$

Dengan memasukan persamaan 6.50 ke dalam persamaan Schrodinger Tak gayut waktu dalam koordinat bola dan membaginya dengan $R \phi$ maka kita dapat melakukan pemisahan variabel-variabelnya sebagai berikut:

$$\frac{1}{r^2 R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \frac{1}{r^2 \sin \theta \phi} \frac{d^2 \phi}{d^2 \varphi} + \frac{1}{r^2 \sin \theta \phi} \left(\sin \theta \frac{d}{d\theta} \right) + \frac{2\mu}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) = 0 \quad 6.51$$

Persamaan di atas dikalikan dengan $r^2 \sin^2 \theta$ maka suku keduanya menjadi $\frac{1}{\phi} \frac{d^2 \phi}{d\varphi^2}$ yang hanya bergantung pada variabel φ , sehingga harus sama dengan suatu tetapan, misalnya sama dengan $-m^2$.

$$\frac{d^2 \phi}{d\varphi^2} = -m^2 \phi \quad 6.52$$

Persamaan dalam r dan θ dapat ditulis menjadi:

$$\frac{1}{R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\Theta \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) + \frac{2\mu r^2}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) = 0$$

Dalam persamaan ini suku kedua dan ketiga hanya berisi variabel θ , sedangkan suku pertama dan keempat hanya berisi variabel r . Dengan demikian, mereka dapat dikelompokkan dan harus sama dengan suatu tetapan. Jika kita pilih suku yang mengandung θ sama dengan $-\beta$ maka suku dengan variabel r sama dengan $+\beta$.

$$-\frac{m^2}{\sin^2 \theta} + \frac{1}{\Theta \sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d\Theta}{d\theta} \right) = -\beta = - \left[\frac{1}{R} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) + \frac{2\mu r^2}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) \right]$$

Persamaan demikian dapat dipisahkan menjadi dua persamaan, yaitu:

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{d}{d\theta} \right) - \frac{m^2}{\sin^2 \theta} + \beta = 0 \quad 6.53$$

Dan

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) \frac{\beta}{r^2} R + \frac{2\mu}{h^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) R = 0 \quad 6.54$$

B. Solusi persamaan Schrodinger untuk Atom Hidrogen

Fungsi $u(r, \theta, \varphi)$ dapat diperoleh dengan menyelesaikan persamaan 6.52, 6.53 dan 6.54.

1. Penyelesaian dalam φ

Penyelesaian pertama diferensial $\frac{d^2\phi}{d\varphi^2} = -m^2\phi$ dapat ditulis dalam bentuk eksponensial yang bentuk ternormalisasinya adalah

$$\phi_m(\varphi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{im\varphi} \quad 6.55$$

Fungsi ini merupakan bagian fungsi seluruhnya yang melukiskan keadaan sistem di suatu titik, sehingga nilai fungsinya harus tunggal untuk suatu titik. Misalnya, ϕ untuk titik dengan $\varphi=0$ harus sama dengan ϕ untuk titik dengan $\varphi = 2\pi, 4\pi, \dots$ dengan demikian, nilai tetapan m tidak boleh sembarang, melainkan dibatasi oleh syarat tersebut, sehingga nilai yang mungkin adalah $m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$. Tetapan m disebut **bilangan kuantum magnetic** yang artifisialnya akan dijelaskan kemudian.

2. Penyelesaian persamaan dalam θ

Untuk menyelesaikan persamaan dalam θ kita melakukan penggantian variabel θ dengan variabel z melalui $z = \cos \theta$. Persamaan dalam θ Kembali menjadi persamaan dalam z sebagai:

$$\frac{d}{dz} \left\{ (1 - z^2) \frac{dP(z)}{dz} \right\} + \left\{ \beta - \frac{m^2}{1 - z^2} \right\} P(z) = 0 \quad 6.56$$

Persamaan diferensial diatas belum dapat diselesaikan dengan metode polinomial sehingga perlu suatu substitusi lebih lanjut, yaitu:

$$P(z) = (1 - z^2) G(z) \quad 6.57$$

Substitusikan kepersamaan (6.56) menjadi:

$$(1 - z^2) \frac{d^2G}{dz^2} - (|m| + 1)z \frac{dG}{dz} + \{\beta - |m| + 1\}G = 0 \quad 6.58$$

Jika G dimisalkan dalam bentuk polinomial:

$$G(z) = a_0 + a_1z + a_2z^2 + \dots$$

$$G(z) = \sum_{v=0}^{\infty} a_v z^v \quad 6.59$$

Maka diperoleh persamaan rekurensi yang menghubungkan koefisien a_{v+2} dan a_v dalam deret fungsi G

$$a_{v+2} = \frac{(v + |m|)(v + |m| + 1) - \beta}{(v + 1)(v + 2)} a_v \quad 6.60$$

Agar fungsi $G(z)$ mempunyai arti fisis, maka deret harus merupakan deret behingga. Artinya, suku dalam deret harus berhenti pada suatu v tertentu. Hal ini dicapai jika koefisien suku sama dengan nol. Misalkan terjadi pada sukuk v' maka:

$$\beta = (v' + |m|)(v' + |m| + 1), \quad v' = 0, 1, 2, \dots \quad 6.61$$

Jika $v' + |m| = l$ maka

$$\beta = l(l + 1) \quad 6.62$$

Nilai l yang dimungkinkan adalah $|m|, |m| + 1, |m| + 2, \dots$ dan disebut sebagai bilangan **kuantum azimuth atau orbital**.

3. Penyelesaian Persamaan dalam r

Dengan mengganti $\beta = l(l + 1)$ seperti diperoleh di persamaan diferensial dalam r (6.54) menjadi :

$$\frac{1}{r^2} \frac{d}{dr} \left(r^2 \frac{dR}{dr} \right) - \frac{l(l + 1)}{r^2} R + \frac{2\mu}{h^2} \left(E + \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r} \right) R = 0 \quad 6.63$$

Kita ambil bentuk substitusi:

$$a^2 = -\frac{2\pi E}{h^2} \quad 6.64$$

$$\lambda = \frac{\mu e^2}{4\pi\epsilon_0 h^2 a} \quad 6.65$$

Dan menggunakan variable baru $\rho = 2ar$ serta fungsi $R(r)$ menjadi $S(\rho)$ maka persamaan 6.63 menjadi:

$$\frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho^2 \frac{dS}{d\rho} \right) + \left\{ -\frac{1}{4} - \frac{l(l + 1)}{\rho^2} + \frac{\lambda}{\rho} \right\} S = 0 \quad 6.66$$

Pertama-tama, kita selesaikan persaman 6.66 diatas untuk nilai ρ yang besar (penyelesaian asimotik) yang memberikan persamaan diferensial berbentuk:

$$\frac{d^2 S}{d\rho^2} - \frac{1}{4} S = 0 \quad 6.67$$

Persamaan demikian mempunyai penyelesaian $S \sim e^{+\frac{\rho}{2}}$ dan $S \sim e^{-\frac{\rho}{2}}$.

Karena fungsi gelombang harus berhingga di semua tempat maka hanya $e^{-\frac{\rho}{2}}$ yang dapat diterima. Sebagai penyelesaian umum dari persamaan 6.66, kita dapat mengandaikan berbentuk:

$$S = e^{-\frac{\rho}{2}} F(\rho) \quad 6.68$$

$F(\rho)$ adalah fungsi yang harus dicari lebih lanjut dengan memasukan persamaan 6.68 ke persamaan 6.66 fungsi $F(\rho)$ memenuhi:

$$\begin{aligned} \frac{1}{\rho} \frac{d}{d\rho} \left(\rho^2 \frac{dS}{d\rho} \right) + \left\{ -\frac{1}{4} - \frac{l(l+1)}{\rho^2} + \frac{\lambda}{\rho} \right\} S = 0 \\ \frac{d^2 F}{d\rho^2} + \left(\frac{2}{\rho} - 1 \right) \frac{dF}{d\rho} + \left\{ \frac{\lambda}{\rho} - \frac{l(l+1)}{\rho^2} - \frac{1}{\rho} \right\} F = 0 \end{aligned} \quad 6.69$$

Substitusi lebih lanjut dengan:

$$F(\rho) = \rho^2 L(\rho) \quad 6.70$$

Dan menuliskan $L(\rho)$ dalam bentuk polinomial $\sum_{v=0}^{\infty} a_v \rho^v$ maka kita memperoleh persamaan rekurensi

$$a_{v+1} = \frac{\lambda - l - 1 - v}{v(v+1) - 1(v+1)(l+1)} a_v \quad 6.71$$

Agar penyelesaian umum persamaan 6.66 berhingga maka deret dalam polinomial harus putus di suatu suku. Seperti tinjauan sebelumnya, hal ini terjadi jika koefisien suku sama dengan nol. Andaikan terjadi pada sukuk $v = n'$ maka berlaku:

$$\lambda - l - 1 - n' = 0 \quad 6.72$$

Atau

$$\lambda = n' + l + 1 \quad 6.73$$

$$\lambda = n \quad 6.74$$

Dengan $n = n' + l + 1$. Karena n' dan l dapat bernilai $0, 1, 2, \dots$ maka nilai n yang diperbolehkan adalah $1, 2, 3, \dots$ jadi, penyelesaian persamaan dalam variable r adalah

$$R(r) = e^{\frac{\rho}{2}} \rho^l L(\rho) \quad 6.74$$

Yang jika dituliskan dalam bentuk fungsi Laguerre terasosiasi menjadi :

$$R_{nl}(r) = - \left[\left(\frac{2}{na} \right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]^3} \right]^{\frac{1}{2}} \rho^l e^{\frac{\rho}{2}} L_{n+l}^{2l+1}(\rho) \quad 6.75$$

Dengan $\rho = \frac{2r}{na_1}$, $a_1 = \frac{h^2}{\mu} \left(\frac{4\pi\epsilon_0}{e^2} \right)$

$$L_j^i(\rho) = \frac{d^i}{d\rho^2} L_j(\rho) \quad \text{fungsi Laguerre tersosiasi} \quad 6.76$$

$$L_j(\rho) = e^\rho \frac{d^j}{d\rho^j} L_j(\rho^j e^\rho) \quad \text{fungsi Laguerre} \quad 6.77$$

Dari persamaan 6.74, 6.64 dan 6.65 kita memperoleh:

$$E_n = - \frac{\mu e^4}{8\pi\epsilon_0 h^2} \frac{1}{n^2} \quad 6.78$$

Ini adalah energi elektron atom hidrogen di suatu keadaan yang hanya bergantung pada nilai n yang disebut **bilangan kuantum utama**. Dengan demikian, terjadi suatu degenerasi terhadap perubahan l dan m .

C. Hubungan antar bilangan kuantum m , l dan n

Mari kita lihat Kembali nilai-nilai yang diperbolehkan untuk bilangan-bilangan kuantum m , l , dan n serta kita cari hubungan antara ketiganya. Dalam penurunan fungsi gelombang sebelumnya, kita telah mengetahui bahwan ilai-nilai yang diperbolehkan adalah

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \quad 6.79$$

$$l = |m|, |m| + 1, |m| + 2, \dots \quad 6.80$$

$$n = l + 1, l + 2, \dots \quad 6.81$$

$$m = -l, -l + 1, \dots, -1, 0, +1, \dots, l - 1, +l \quad 6.82$$

Jika nilai n ditentukan lebih dahulu, maka l dan m dapat dituliskan:

$$n = 0, 1, 2, \dots (n - l) \quad 6.83$$

Tingkat degenerasi yang telah disebutkan dimuka dapat dihitung sebagai berikut. Untuk suatu nilai n , nilai m ada sebanyak $(2l + 1)$ dengan nilai l dari 0 sampai dengan $(n - 1)$. Jadi, tingkat degenerasinya adalah

$$\sum_{l=0}^{n-1} (2l + 1) = n^2 \quad 6.84$$

Fungsi gelombang untuk beberapa keadaan dapat dilihat dalam Table 13 dengan $a_0 = 4\pi\epsilon_0 h^2 l m e^2$ adalah jejari bohr. Untuk menyertakan efek massa tereduksi, a_0 diganti dengan $a_{\mu=a_0} \left(\frac{m}{\mu} \right)$.

Tabel 13 Fungsi Gelombang lengkap elektron dalam Atom Hidrogen setelah normalisasi

n	ℓ	m	$\psi_{n\ell m_\ell}(r, \theta, \varphi)$
1	0	0	$\frac{1}{\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} e^{-\frac{r}{a_0}}$
2	0	0	$\frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{a_0}}$
2	1	0	$\frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{a_0}} \cos \theta$
2	1	± 1	$\frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(\frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{a_0}} \sin \theta e^{\pm i\varphi}$
3	0	0	$\frac{1}{81\sqrt{3\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(27 - 18\frac{r}{a_0} + 2\frac{r^2}{a_0^2}\right) e^{-\frac{r}{2a_0}}$
3	1	0	$\frac{\sqrt{2}}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(6 - \frac{r}{a_0}\right) \frac{r}{a_0} e^{-\frac{r}{3a_0}} \cos \theta$
3	1	± 1	$\frac{1}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(6 - \frac{r}{a_0}\right) \frac{r}{a_0} e^{-\frac{r}{3a_0}} \sin \theta e^{\pm i\varphi}$
3	2	0	$\frac{1}{81\sqrt{6\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-\frac{r}{3a_0}} (3 \cos^2 \theta - 1)$
3	2	± 1	$\frac{1}{81\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-\frac{r}{3a_0}} \sin \theta \cos \theta e^{\pm i\varphi}$
3	2	± 2	$\frac{1}{162\sqrt{\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \frac{r^2}{a_0^2} e^{-\frac{r}{3a_0}} \sin^2 \theta e^{\pm i\varphi}$

Rangkuman

1. Persamaan gelombang Schrodinger diaplikasikan untuk menjelaskan fisika atom, dimulai dari atom hidrogen.
2. Aplikasi dari syarat batas mengantarkan kita pada tiga bilangan kuantum , yaitu
 n : bilangan kuantum utama

ℓ : bilangan kuantum momentum angular orbital

m : Bilangan kuantu magnetic

Dengan nilai dan batasannya (semuanya bilangan bulat) dinyatakan dengan :

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad n > 0$$

$$\ell = 0, 1, 2, 3, \dots, n - 1 \quad \ell < n$$

$$m = -\ell, -\ell + 1, \dots, 0, 1, \dots, \ell - 1, \ell \quad |m| \leq \ell$$

Uji Formatif

Essay

1. Jelaskan apa yang dimaksud dengan:

a. Bilangan kuantum utama

jawab:

b. Bilangan kuantum orbital

Jawab:

c. Bilangan kuantum magnetic

Jawab:

2. Buktikan bahwa fungsi harmonik bola dari $Y_{11}(\theta, \varphi)$ memenuhi persamaan angular berikut:

$$\frac{1}{\sin \theta} \frac{d}{d\theta} \left(\sin \theta \frac{df}{d\theta} \right) + \left[\ell(\ell + 1) - \frac{m_\ell^2}{\sin^2 \theta} \right] f = 0$$

Petunjuk : Thornton halaman 248

Jawab:

3. Tulisakan Bilangan – bilangan kuantum yang mungkin untuk keadaan $n = 4$ pada atom hidrogen !

Petunjuk : Thornton halaman 249

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 8 soal dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika skor benar belum mencapai 80%, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling Edisi 2 Cetakan 1*. Bandung: ITBPress
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.

Penutup

Rangkuman

Model hidrogen menjelaskan tentang bilangan kuantum dan fungsi distribusi elektron pada atom berelektron tunggal .

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York

MODUL 7

FISIKA ATOM

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang di mekanika gelombang. Disini kita akan mempelajari tentang bagaimana solusi persamaan chrodinger menjelaskan posisi elektron pada atom. Model atom berelektron tunggal mengalami perkembangan mulai dari teori atom John Dalton, Joseph John Thomson, Ernest Rutherford, dan Niels Henrik David Bohr. Perkembangan teori atom menunjukkan adanya perubahan konsep susunan atom dan reaksi kimia antaratom. Kelemahan model atom yang dikemukakan Rutherford disempurnakan oleh Niels Henrik David Bohr. Bohr mengemukakan gagasannya tentang penggunaan tingkat energi elektron pada struktur atom. Model ini kemudian dikenal dengan model atom Rutherford-Bohr. Tingkat energi elektron digunakan untuk menerangkan terjadinya spektrum atom yang dihasilkan oleh atom yang mengeluarkan energi berupa radiasi cahaya.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).

2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).

3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).

4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)

2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)

2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)

3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)

4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAHAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu mengaplikasikan Fisika ATOM
Sikap	a. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan simulasi dan melaporkan hasil simulasinya.

3. Prasyarat Kompetensi

- a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.
- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang riset fisika murni,

5.. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Bilangan Kuantum	<ul style="list-style-type: none"> A. Defisiensi dari Model Atom Bohr B. Bilangan Kuantum elektron dalam atom hidrogen C. Fungsi distribusi probabilitas D. Notasi spektroskopik dan kaidah seleksi dari transisi elektron E. Efek zeeman normal F. Eksperimen Stern Gerlach G. Spin Intrinsik Elektron H. Kopliling antara momentum sudut orbital dan spin elektron
Model Atom berelektron jamak	<ul style="list-style-type: none"> A. Struktur atom, tabel periodik dan prinsip pauli B. Konfigurasi elektron dan tabel periodik 'C. Efek perisai dari elektron di sub petala terluar D. Kaidah Hund E. Efek Zeeman anomali

Kegiatan Pembelajaran 1 BILANGAN KUANTUM

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan bilangan kuantum sebagai konsep yang paling valid saat ini untuk menjelaskan model atom.	<ol style="list-style-type: none">Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan konsep – konsep dasar dari Bilangan kuantumMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan aturan seleksi Dan Spin ElektronMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan Magnet dan efek Zeeman NormalMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan Eksklusi Paulli

Uraian Materi

A. Defisiensi dari Model Atom Bohr

Model Bohr adalah model atom pertama yang bisa menjelaskan bagaimana elektron bergerak di sekitar inti atom. Namun deskripsi yang diberikan lewat model atom ini mengabaikan beberapa efek penting yang harus diperhitungkan untuk meningkatkan akurasi model.

1. Model Bohr didasarkan pada elektron yang mengorbit di sekitar inti atom yang diam berkaitan dengan massa inti yang bernilai jauh lebih besar dari massa elektron. Bila massa inti diperhitungkan, maka perlu didefinisikan pusat massa sistem. Dengan demikian massa elektron yang muncul dalam persamaan untuk tingkat energi perlu digantikan dengan massa reduksi dari sistem proton-elektron, yaitu:

$$\mu_e = \frac{m_e m_p}{m_e + m_p} = \frac{m_e}{1 + \frac{m_e}{m_p}} \quad 7.1$$

Dengan m_e dan m_p masing – masing adalah massa elektron dan massa proton. Dengan memasukkan nilai – nilai yang bersesuaian untuk m_e dan m_p diperoleh $\mu_e = 0,999456 m_e$. Selain itu konstanta Rydberg untuk massa inti tak hingga R_∞ juga perlu dikoreksi menjadi R_H , yaitu:

$$R_H = \frac{\mu_e}{m_e} R_\infty = \frac{1}{1 + \frac{m_e}{m_p}} R_\infty = \frac{\mu_e e^4}{64 \pi^3 \epsilon_0^2 \hbar^3 c} = 1,096776 \times 10^7 m^{-1} \quad 7.2$$

2. Pengukuran panjang gelombang radiasi umumnya dilakukan di udara, sehingga panjang gelombang foton harus dihitung sebagai

$$\lambda = \frac{v_{udara}}{f}$$

Dengan v_{udara} adalah kecepatan cahaya di udara. Koreksi ini memiliki efek penurunan nilai panjang gelombang sekitar 0,03%.

3. Menurut teori Bohr, momentum sudut orbital terkuantisasi pada kelipatan bilangan bulat dari \hbar . Prediksi ini hanya benar untuk keadaan selain $n = 1$, karena secara eksperimen diperoleh bahwa $L = 0$ untuk keadaan tersebut.

4. Keadaan elektron menurut teori Bohr melanggar hubungan ketidakpastian Heisenberg yang menyatakan bahwa $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$. Misalkan elektron pada atom hidrogen bergerak mengitari inti pada bidang orbit $x - y$. dalam hal ini diketahui dengan pasti koordinat z dari elektron, misalnya $z = 0$ dan dengan demikian $\Delta z = 0$, demikian pula komponen z dari momentumnya sehingga $\Delta p_z = 0$. Dengan demikian, keadaan elektron tersebut melanggar hubungan ketidakpastian Heisenberg yang menyatakan bahwa $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$.

5. Model Bohr hanya berlaku untuk atom dengan satu elektron (hidrogen) atau atom dengan elektron tunggal di petala/sub petala terluarnya, yang biasa disebut sebagai atom “H” (*hydrogenlike*), seperti ion – ion He^+ dan Li^{++} . Perubahan yang perlu dilakukan dalam perhitungan gaya Coulomb adalah menggantikan suku e^2 dengan Ze^2 untuk memperhitungkan muatan inti Ze . Persamaan panjang gelombang foton yang menyangkut transisi elektron antar dua tingkat energi dengan spesifikasi bilangan kuantum n_u dan n_ℓ menjadi

$$\frac{1}{\lambda} = Z^2 R \left(\frac{1}{n_\ell^2} - \frac{1}{n_u^2} \right) \quad 7.3$$

Dengan konstanta Rydberg diberikan pada persamaan 7.2.

6. Model Bohr tidak berhasil menjelaskan struktur halus dari garis – garis spektral, baik pelebaran atau pemisahan (*splitting*) garis – garis spektral, yang berkaitan dengan interaksi antara momentum sudut orbital dan spin dari elektron, aplikasi dari medan magnetic eksternal (efek Zeeman) atau medan listrik eksternal (efek Stark)

7. Model Bohr tidak dapat menjelaskan ikatan dari atom – atom menjadi molekul atau senyawa kimiawi.

Walaupun mengandung beberapa kekurangan, model atom Bohr dipandang sebagai model atom yang cukup valid karena berhasil memprediksi beberapa garis spektral yang berkaitan dengan transisi elektron antar tingkat energi dalam atom hidrogen. Dalam hal ini model atom Bohr dipandang sebagai model semiklasik karenan memandang elektron sbagai partikel. Pada pembahasan berikutnya akan dibahas kembali atom hidrogen berdasarkan gambaran gelombang dari elektron menurut model mekanikan gelombang Schrodinger sebagai perbaikan dari model atom Bohr.

B. Bilangan Kuantum Elektron dalam Atom Hidrogen

Keadaan elektron dalam atom hidrogen dinyatakan oleh fungsi gelombang :

$$\psi_{n\ell m_\ell}(r, \theta, \varphi) = R_{n\ell}(r) Y_{\ell m_\ell}(\theta, \varphi) \quad 7.4$$

Diidentifikasi oleh tiga bilangan kuantum, yang ketiganya merupakan bilangan bulat, yaitu

$$n : \text{bilangan kuantun utama} \quad 7.5.a$$

$$\ell : \text{bilangan kuantum orbital (momentum sudut)} \quad 7.5.b$$

$$m_\ell : \text{bilangan kuantu magnetic} \quad 7.5.c$$

Aplikasi dari kondisi batas yang sesuai menghasilkan kebebasan untuk bilangan kuantum n dan Batasan untuk nilai – nilai bilangan kuantum ℓ dan m_ℓ sebagai berikut:

$$n = 1, 2, 3, 4, \dots \quad \text{Atau } n > 0 \quad 7.6.a$$

$$\ell = 0, 1, 2, 3, \dots, (n - 1) \quad \text{Atau } \ell < n \quad 7.6.b$$

$$m_\ell = -\ell, -\ell + 1, \dots, 0, 1, \dots, \ell - 1, \ell \quad \text{Atau } |m_\ell| \leq \ell \quad 7.6.c$$

Sebagai ilustrasi, untuk keadaan dasar elektron pada atom hidrogen ($n = 1$), maka hanya $\ell = 0$ dan $m_\ell = 0$ yang diperbolehkan. Set bilangan kuantum lengkap untuk keadaan dasar ini adalah

$$(n, \ell, m_\ell) = (1, 0, 0)$$

Dan ungkapan fungsi gelombang lengkap diberikan pada baris pertama Tabel 13. Keadaan eksitasi pertama ($n = 2$) dapat memiliki nilai $\ell = 0$ atau $\ell = 1$. Untuk $\ell = 0$ maka $m_\ell = 0$. Keadaan ini memiliki set bilangan kuantum :

$$(n, \ell, m_\ell) = (2, 0, 0)$$

Dan fungsi gelombangnya dinyatakan dengan baris kedua pada Tabel 13:

$$\psi_{n\ell m_\ell}(r, \theta, \varphi) = \frac{1}{4\sqrt{2\pi}} \left(\frac{1}{a_0}\right)^{\frac{3}{2}} \left(2 - \frac{r}{a_0}\right) e^{-\frac{r}{a_0}}$$

Sedangkan untuk $\ell = 1$ maka $m_\ell = 0$ atau $m_\ell = \pm 1$. Dengan demikian terdapat tiga kemungkinan set bilangan kuantum, yaitu

$$(n, \ell, m_\ell) = (2, 1, 0)$$

Dan

$$(n, \ell, m_\ell) = (2, 1, \pm 1)$$

Fungsi gelombang untuk masing – masing set tersebut diberikan pada baris ketiga dan keempat dari Tabel 13.

1. Bilangan Kuantum Utama

Bilangan kuantum utama n berkaitan dengan solusi **fungsi gelombang radial** $R(r)$ pada persamaan (setelah ternormalisasi) diberikan oleh

$$R_{n\ell}(r) = - \left\{ \left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n - \ell - 1)!}{2n[(n + \ell)!]^3} \right\}^{\frac{1}{2}} e^{-\rho/2} \rho^\ell L_{n+\ell}^{2\ell+1}(\rho) \quad 7.7$$

Dengan

$$\rho = \frac{2}{na_0} r$$

Dan

$$a_0 = \frac{4\pi\epsilon_0 \hbar^2}{\mu e^2}$$

Adalah radius Bohr yang diperoleh dari teori atom Bohr.

Tingkat – tingkat energi elektron diberikan oleh persamaan

$$E_n = \frac{-\mu}{2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar} \right)^2 \frac{1}{n^2} = -\frac{E_0}{n^2} \quad 7.8$$

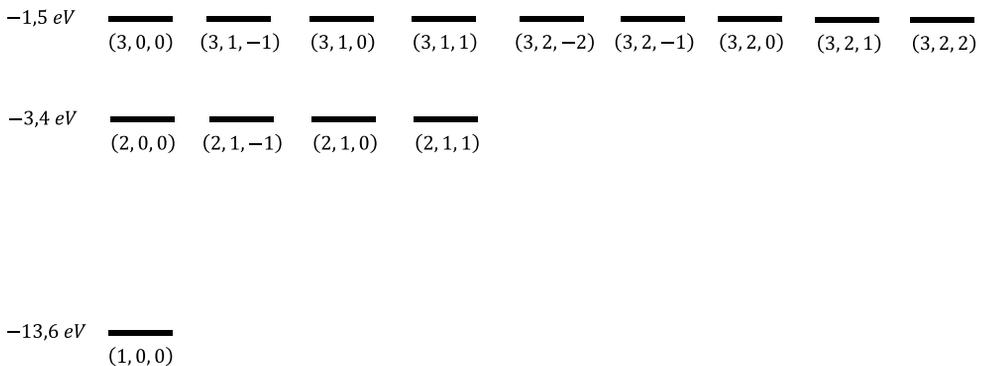
Dengan $E_0 = 13,6 \text{ eV}$ adalah energi keadaan dasar dari elektron pada atom hidrogen . Beberapa hal penting yang berkaitan dengan hal ini diantaranya:

- Kuantisasi energi elektron yang persis sama diperoleh dari teori Bohr
- Nilai negatif dari energi E mengindikasikan bahwa elektron dan proton saling terikat satu sama lain.
- Tingkat – tingkat energi elektron pada atom hidrogen hanya bergantung pada bilangan kuantum utama (n)

Keadaan degenerasi tiap tingkat energi diberikan oleh:

- Untuk tingkat dasar dengan $n = 1$
Hanya ada 1 kemungkinan keadaan kuantum, maka keadaan dasar ini disebut tak berdegenerasi (*non-degenerate*).
- Untuk eksitasi pertama, dengan $n = 2$
Terdapat 4 (empat) set bilangan kuantum (n, ℓ, m_ℓ) yang berbeda dengan nilai yang sama. Keadaan ini disebut keadaan berdegenerasi (*degeneracy*). Dengan demikian keadaan $n = 2$ memiliki degenerasi lipat 4.
- Untuk eksitasi kedua, dengan $n = 3$
Merupakan keadaan yang memiliki degenerasi lipat 9.
- Secara umum keadaan dengan spesifikasi bilangan kuantum n memiliki jumlah degenerasi n^2 .

Gambar 7. 1 Ilustrasi tingkat - tingkat energi elektron pada Atom Hidrogen, disertai label set bilangan kuantum



Gambar 7.1 berikut memberikan ilustrasi tingkat – tingkat energi elektron dalam atom hidrogen dengan garis – garis sejajar yang menunjukkan keadaan dengan nilai energi yang sama.

Penting untuk dicatat bahwa degenerasi ini terdiri dari degenerasi terhadap 2 bilangan kuantum berbeda, yaitu ℓ dan m_ℓ . Degenerasi terhadap ℓ bersumber dari bentuk energi potensial yang sederhana yaitu hanya bergantung pada r atau jarak antara elektron dan inti, sedangkan degenerasi terhadap m_ℓ bersumber dari simetri bola sistem. Selain itu tingkat energi yang berdegenerasi tersebut pada kenyataannya terpisah satu sama lain pada jarak energi yang sangat kecil, yaitu sekitar 10^{-5} eV. Aplikasi dari medan magnet eksternal akan menyebabkan pengurangan sebagian dari degenerasi tersebut atau pemisahan tingkat energi – energi yang akan dibahas lebih lengkap pada bagian tentang efek magnetic pada spektrum atomic.

2. Bilangan Kuantum Momentum Angular Orbital

Bilangan kuantum momentum sudut orbital ℓ berkaitan dengan besar momentum sudut orbital L , sebagai

$$L = \sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar \quad 7.9$$

Dengan $\ell, 1, 2, \dots$. Tabel 14 berikut memberikan notasi abjad untuk bilangan kuantum ini sebagai berikut:

Tabel 14 Penggunaan Abjad untuk Bilangan Kuantum ℓ

ℓ	Abjad	Kepanjangan abjad
0	<i>s</i>	<i>Sharp</i>
1	<i>p</i>	<i>Principal</i>
2	<i>d</i>	<i>Diffuse</i>
3	<i>f</i>	<i>Fundamental</i>

Penting untuk dicatat bahwa teori Bohr untuk atom hidrogen menghasilkan gambaran kuantisasi momentum sudut orbital elektron sebagai

$$L = n\hbar$$

Dengan demikian, teori Bohr dan Teori kuantum memberikan hasil yang berbeda untuk momentum sudut orbital elektron dalam keadaan dasar:

$$(n = 1, \ell = 0)$$

Yaitu

$$L = \hbar$$

Menurut teori Bohr

Dan

$$L = 0$$

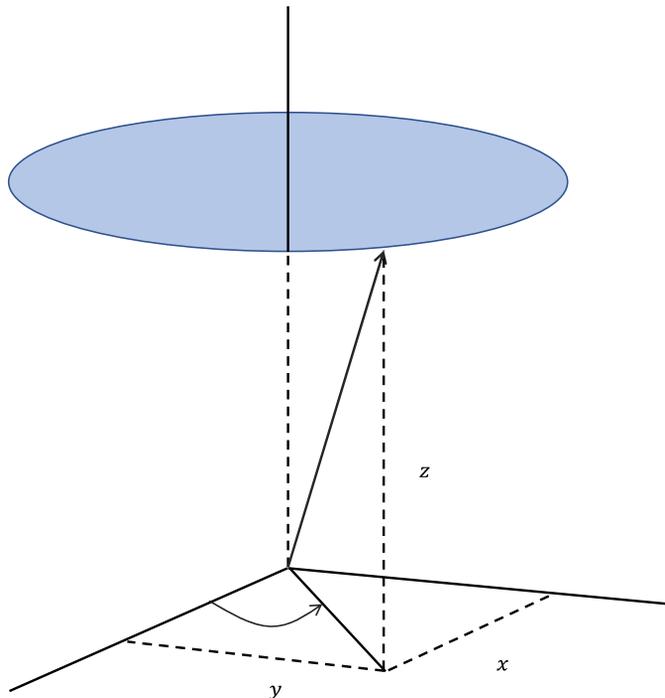
Menurut teori kuantum

Hal ini sangat jelas menunjukkan kelemahan teori Bohr yang bersifat klasik, yaitu memandang elektron bergerak mengelilingi inti atom dalam suatu lintasan orbit tertentu, seperti halnya planet-planet mengorbit matahari dalam sistem tata surya.

3. Bilangan Kuantum Magnetic

Ilustrasi sebuah vektor \vec{L} yang mengalami rotasi atau presesi di sekitar sumbu z diberikan oleh Gambar 7.2. Secara klasik, dalam ruang 3 D dan menggunakan koordinat kartesian, vektor momentum sudut \vec{L} dibagi kedalam komponennya menjadi \vec{L}_x , \vec{L}_y , dan \vec{L}_z .

Gambar 7. 2 Vektor momentum sudut yang mengalami presesi di sekitar sumbu z



Secara kuantum, momentum sudut \vec{L} hanya dapat digambarkan oleh 2 parameter, yaitu: besar vektor $|\vec{L}|$ dan salah satu komponen dari vektor

tersebut misalkan L_z . Komponen – komponen lain yaitu L_x dan L_y tidak dapat ditentukan dengan pasti. Bilangan kuantum magnetic berkaitan dengan kuantisasi ruang dari momentum sudut orbital elektron terhadap arah tertentu, sebagai contoh:

Jika diambil arah sumbu z

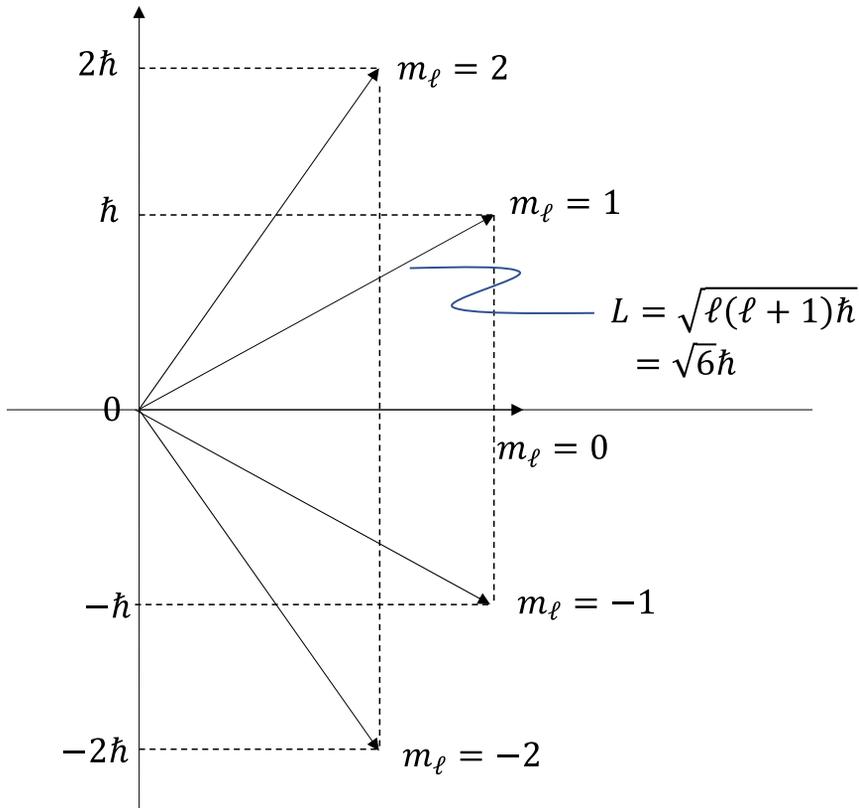
$$L_z = m_\ell \hbar \quad 7.10$$

Dengan

$$m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$$

Dengan demikian untuk setiap nilai ℓ terdapat $(2\ell + 1)$ nilai m_ℓ yang mungkin.

Gambar 7.3 Diagram Skematik dari hubungan antara vektor momentum sudut dengan komponennya dalam arah sumbu z untuk nilai $\ell = 2$



Ilustrasi dari vektor \vec{L} untuk nilai $n = 2$ diberikan pada Gambar 7.3. dari gambar tersebut masing – masing orientasi ruang dari vektor \vec{L} berkaitan

dengan nilai m_ℓ yang berbeda, yaitu $m_\ell = -2, -1, 0, 1, 2$ dan komponen L_z yang berdekatan memiliki nilai sebesar \hbar . Sudut polar θ yang dibentuk antara vektor \vec{L} dan sumbu z dapat diperoleh dari hubungan

$$L_z = |\vec{L}| \cos \theta$$

Atau

$$\cos \theta = \frac{L_z}{|\vec{L}|} = \frac{m_\ell}{\sqrt{\ell(\ell + 1)}} \quad 7.11$$

C. Fungsi Distribusi Probabilitas

Dalam teori Bohr untuk atom hidrogen, elektron digambarkan sebagai partikel yang bergerak mengitari inti atom dalam orbit berbentuk lingkaran (atau elips). Dalam hal ini vektor posisi \vec{r} dari elektron terdefiniskan dengan baik. Dalam gambaran gelombang dari elektron, fungsi gelombang elektron digunakan untuk menghitung distribusi probabilitas dari elektron. Dalam hal ini gambaran “posisi” elektron digantikan oleh penyebaran (awan atau kabut) elektron di dalam ruang. Fungsi distribusi dapat diperoleh dengan mengevaluasi fungsi – fungsi gelombang partikel (elektron) yang saling terpisah atau gabungannya.

1. Rapat Probabilitas Total

Probabilitas mendapatkan elektron di dalam interval ruang sembarang ditentukan oleh kuadrat dari fungsi gelombang. Untuk elektron dalam atom hidrogen $|\psi(r, \theta, \varphi)|^2$ adalah rapat probabilitas volume (probabilitas per satuan volume) pada lokasi (r, θ, φ) . Untuk menghitung probabilitas sesungguhnya mendapatkan elektron, maka rapat probabilitas volume tersebut perlu dikalikan dengan elemen volume dV pada lokasi (r, θ, φ) . Dalam koordinat bola, elemen volume diberikan oleh persamaan berikut (Gambar 7.4):

$$d\tau = r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta \, d\varphi \quad 7.12$$

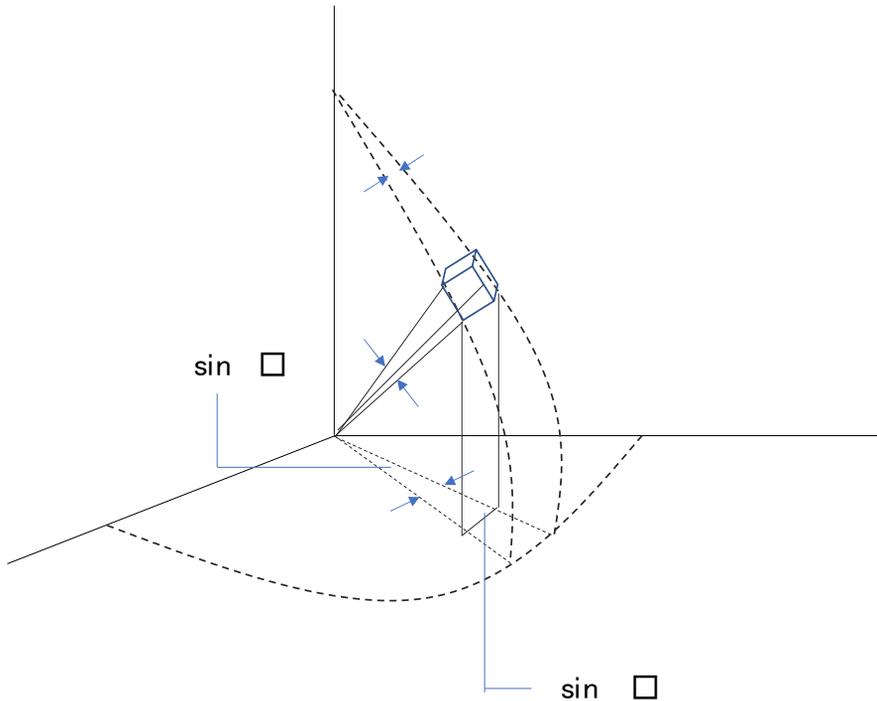
Dengan demikian, probabilitas total untuk mendapatkan elektron dalam elemen volume pada lokasi tersebut adalah

$$\begin{aligned} & |\psi(r, \theta, \varphi)|^2 dV \quad 7.13 \\ & = |R_{n,\ell}(r)|^2 |\Theta_{\ell,m_\ell}(\theta)|^2 |\Phi_{m_\ell}(\varphi)|^2 r^2 \sin \theta \, dr \, d\theta \, d\varphi \end{aligned}$$

Gambar 7.4 memberikan beberapa representasi dari rapat probabilitas volume $|\psi(r, \theta, \varphi)|^2$ dari elektron dalam atom hidrogen yang menunjukkan

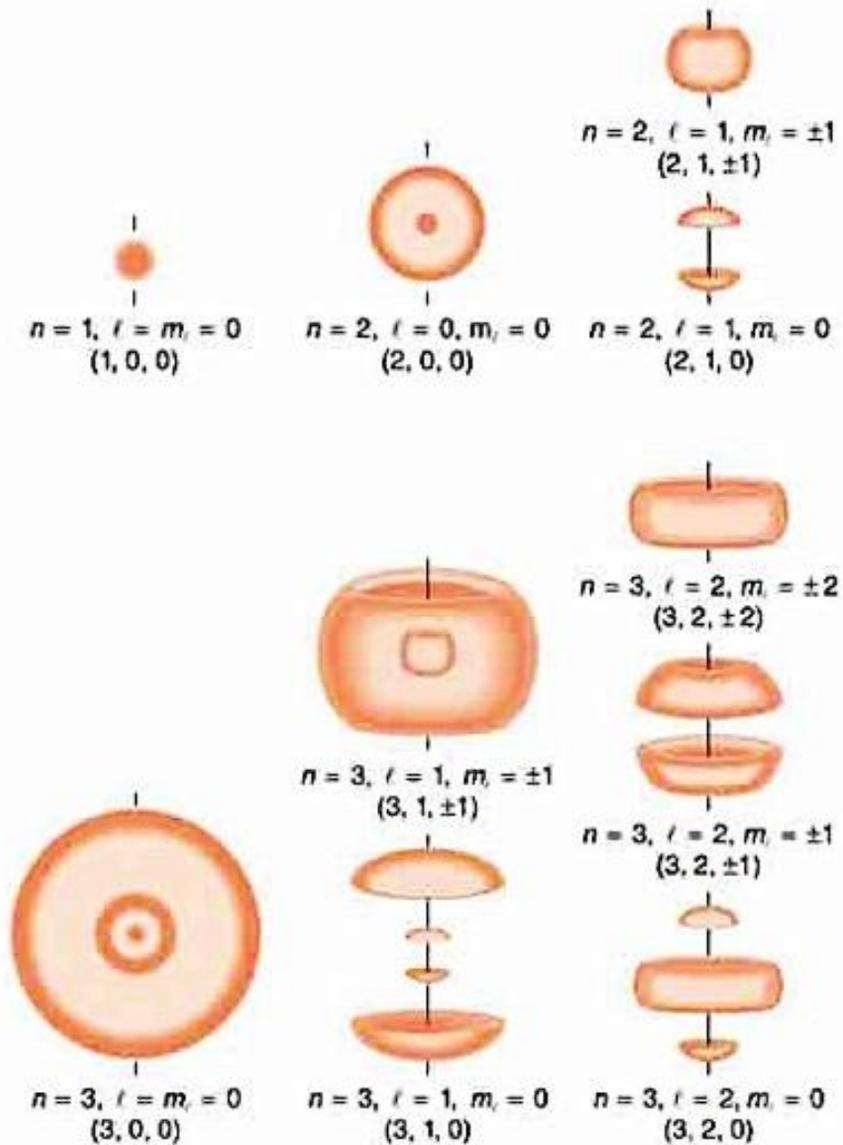
gambaran distribusi muatan elektronik di dalam atom yang dihasilkan dari ketidakpastian posisi elektron. Gambaran tersebut juga merepresenasikan hasil luaran statistic dari sejumlah besar hasil pengukuran dari posisi elektron di dalam atom.

Gambar 7. 4 Elemen Volume dalam Koordinat Bola



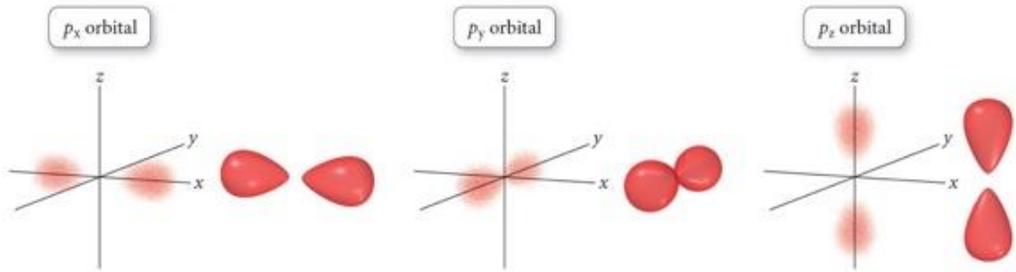
Penting untuk dicatat bahwa rapat probabilitas yang ditunjukkan pada Gambar 7.5 tidak menunjukkan secara eksplisit kebergantungannya pada bilangan kuantum n . dengan kata lain untuk n berbeda maka gambaran rapat probabilitas serupa untuk nilai ℓ dan m_ℓ yang sama.

Gambar 7. 5 Ilustrasi untuk probabilitas distribusi elektron untuk set bilangan kuantum berbeda. Sumbu z adalah dalam arah vertikal.



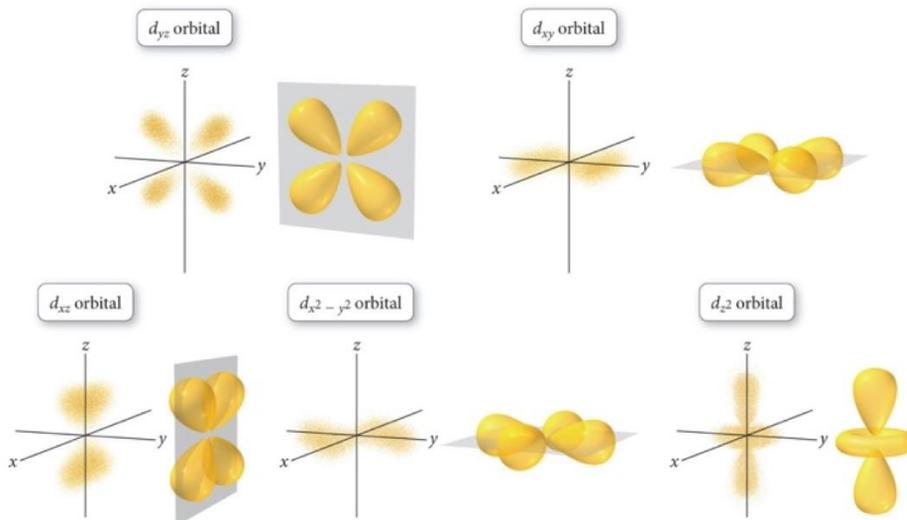
Sumber: <http://kolibri.teacherinabox.org.au/modules/en-boundless/www.boundless.com/chemistry/textbooks/boundless-chemistry-textbook/introduction-to-quantum-theory-7/quantum-mechanical-description-of-the-atomic-orbital-65/indeterminacy-and-probability-distribution-maps-303-6584/images/probability-density-of-hydrogen-electrons/index.html>

Gambar 7. 6 Keadaan Orbital 2px, 2py, dan 2pz dari elektron atom H



https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjP6ZbsovHwAhXGIbcAHR_vAAwQFjAFegQICRAD&url=https%3A%2F%2Feverettcc.instructure.com%2Fcourses%2F1232740%2Ffiles%2F62084051%2Fdownload%3Fdownload_frd%3D1&usg=AOvVaw1JAm0voPWKL_IlgxECjVw

Gambar 7. 7 Keadaan orbital pada sub kulit d



https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjP6ZbsovHwAhXGIbcAHR_vAAwQFjAFegQICRAD&url=https%3A%2F%2Feverettcc.instructure.com%2Fcourses%2F1232740%2Ffiles%2F62084051%2Fdownload%3Fdownload_frd%3D1&usg=AOvVaw1JAm0voPWKL_IlgxECjVw

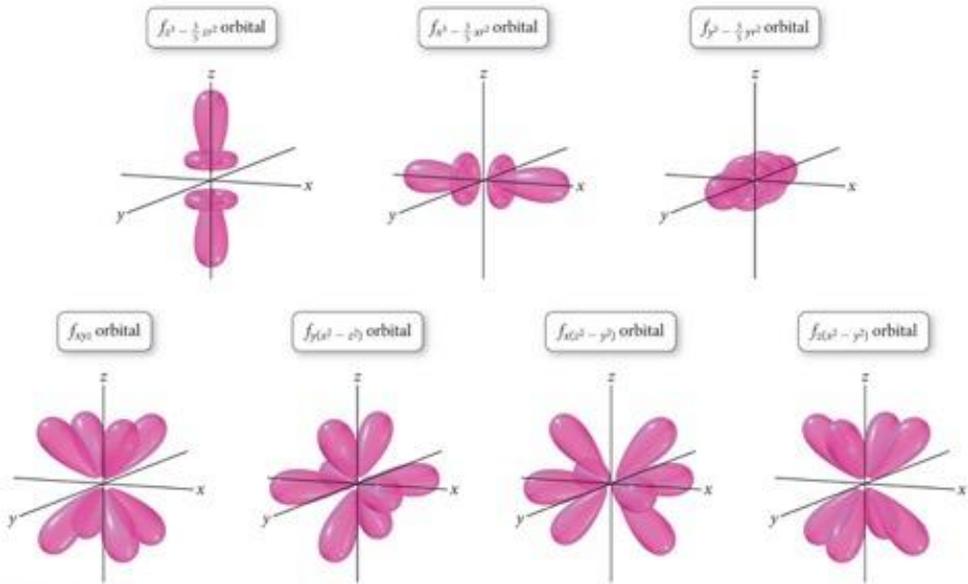
Sebagai contoh untuk $n = 2$, maka keadaan dengan $\ell = 1$ dan $m_\ell = 0$ memiliki preferensi dalam arah sumbu z dan disebut pula sebagai keadaan orbital $(2p)_z$ yang berkaitan dengan fungsi keadaan ψ_{2pz} . Di sisi lain, fungsi keadaan ψ_{2px} dan ψ_{2py} dapat dibentuk sebagai kombinasi linear dari keadaan dengan dengan $\ell = 1$ dan $m_\ell = \pm 1$ sebagai berikut:

$$\psi_{2px} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{211} + \psi_{21-1})$$

$$\psi_{2py} = \frac{1}{\sqrt{2}}(\psi_{211} - \psi_{21-1})$$

Tiap keadaan orbital $(2p)_x$, $(2p)_y$, $(2p)_z$ yang berkaitan dengan kuadrat masing – masing fungsi keadaan ψ_{2px} , ψ_{2py} dan ψ_{2pz} membentuk gambaran *lobe* ganda sepanjang sumbu x, y, dan z (Gambar 7.6), demikian pula pada sub kulit d (Gambar 7.7) dan sub kulit f (Gambar 7.8).

Gambar 7. 8 Keadaan orbital sub kulit f



Sumber:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwjP6ZbsovHwAhXGlbcaHR_vAAwQFjAFegQICRAD&url=https%3A%2F%2Feverettcc.instructure.com%2Fcourses%2F1232740%2Ffiles%2F62084051%2Fdownload%3Fdownload_frd%3D1&usg=AOvVaw1JAm0voPWKL_IlgxECjVw

2. Rapat Probabilitas Radial

Distribusi probabilitas radial dari elektron di dalam atom menggambarkan probabilitas elektron berada pada jarak r dan $r + dr$ dari inti atom (Gambar 7.9).

Distribusi probabilitas radial diperoleh dari probabilitas total (Pers. 7.13) yang diintegrasikan terhadap koordinat θ dan ϕ ,

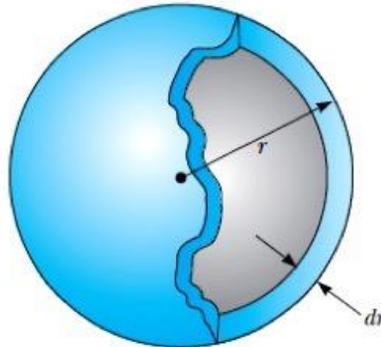
$$P(r)dr = r^2 R^*(r)R(r)dr \int_0^\pi |\Theta(\theta)|^2 \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} |\Phi(\phi)|^2 d\phi \quad 7.14$$

Dalam hal ini integrasi terhadap θ dan ϕ dilakukan karena hanya diinginkan ketergantungan terhadap jarak radial. Mengingat bahwa masing – masing fungsi $R(r)$, $\Theta(\theta)$, dan $\Phi(\phi)$ sudah ternormalisasi, maka nilai integral. Dari

masing – masing fungsi tersebut adalah satu. Dengan demikian probabilitas radial adalah

$$P_{n\ell}(r)dr = r^2 |R_{n\ell}(r)|^2 dr \quad 7.15$$

Gambar 7. 9 Probabilitas Radial $P(r)dr$ untuk mendapatkan elektron di dalam volume dari sebuah kulit bola dengan radius r dan ketebalan dr



Sumber:

https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjSq_z9o_HwAhVGxTgGHWdlAkoQFjALegQIAxAD&url=http%3A%2F%2Fweb.pdx.edu%2F~pmoeck%2Flectures%2Fmodern%2FTRM-7.ppt&usg=AOvVaw2BVwitZTGoMrCwO1-XNMIu

Yang berkaitan dengan rapat probabilitas radial

$$P_{n\ell}(r) = r^2 |R_{n\ell}(r)|^2 \quad 7.16$$

Gambar 7.9 memberikan ilustrasi fungsi gelombang bagian radial $R_{n\ell}(r)$ (kolom sebelah kiri) dan rapat probabilitas radial $P_{n\ell}(r)$ (kolom sebelah kanan) untuk elektron dalam atom hidrogen pada beberapa nilai bilangan kuantum n dan ℓ .

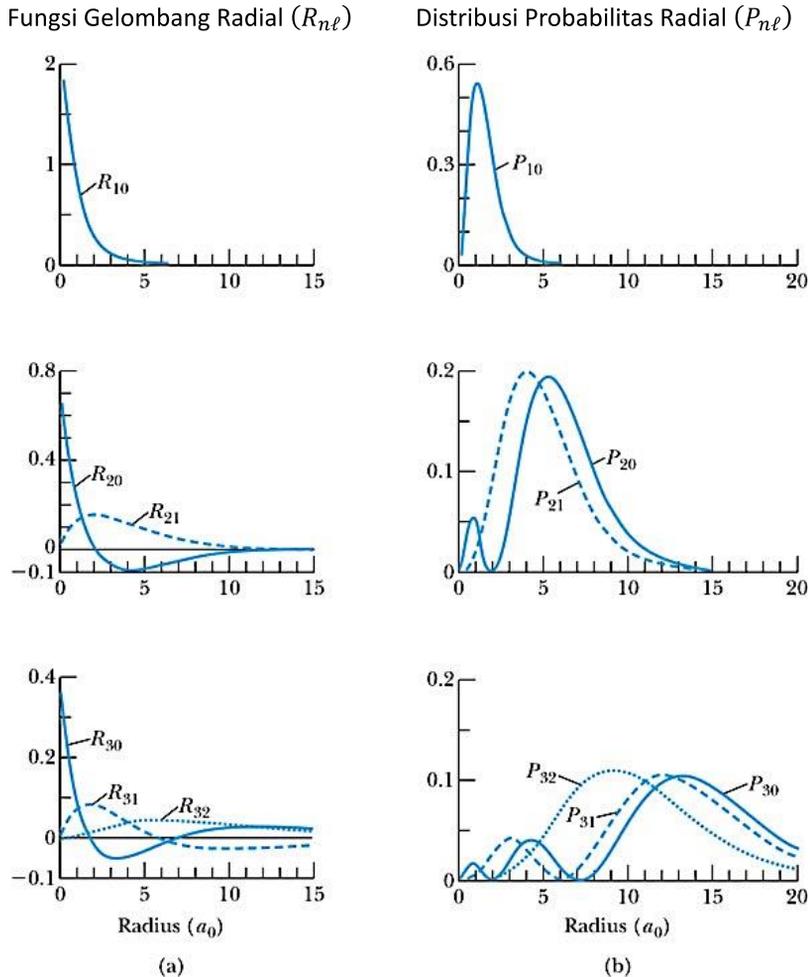
Dari gambar tersebut terlihat perbedaan gerak elektron untuk keadaan – keadaan yang berbeda. Sebagai contoh, untuk nilai $n = 2$, keadaan dengan nilai $\ell = 0$ dan $\ell = 1$ memiliki nilai energi yang sama. Namun demikian, pada $r = 0$ terlihat bahwa $R_{n\ell}(r)$ menuju nilai nol untuk $\ell = 1$, sedangkan $R_{n\ell}(r)$ bernilai berhingga untuk $\ell = 0$. Selain itu terlihat bahwa karena factor r^2 , maka nilai $P_{n\ell}(r)$ selalu sama dengan nol. Pada $r = 0$ walaupun $R_{n\ell}(r)$ tidak demikian. Dengan kata lain, probabilitas untuk posisi elektron di dalam sebuah kult bola selalu bernilai nol untuk $r \rightarrow 0$ karena volume dari kulit bola juga menuju nol, tetapi rapat probabilitas $|\psi|^2$ tak bernilai nol pada $r = 0$

Pada hakikatnya $P_{n\ell}(r)$ dan $|R_{n\ell}(r)|^2$ juga memberikan informasi yang berbeda tentang perilaku elektron. Sebagai contoh, fungsi gelombang radial $R_{n\ell}(r)$ untuk $n = 1, \ell = 0$ memiliki nilai maksimum pada $r = 0$ tetapi

rapat probabilitas radial untuk keadaan tersebut memiliki nilai maksimum pada $r = a_0$. Radius paling mungkin yang ditempati elektron ditentukan dari posisi dengan rapat probabilitas radial $P_{n\ell}(r)$ bernilai maksimum, yaitu nilai r yang ditentukan dengan kondisi :

$$\frac{d}{dr}P_{n\ell}(r) = 0$$

Gambar 7. 10 (a) Fungsi Gelombang elektron bagian radial; (b) Rapat Probabilitas Radial untuk beberapa keadaan kuantum pada atom hidrogen.



Sumber: Thornton, 2013

Gambar 7.10 menunjukkan bahwa untuk setiap n , $P_{n\ell}(r)$ untuk keadaan dengan $\ell = n - 1$ hanya memiliki sebuah maksimum tunggal yang terdapat

pada lokasi orbit Bohr, yaitu $r = n^2 a_0$. Selain itu, untuk $n = 2$ dan $\ell = 0$ rapat probabilitas radial memiliki puncak ganda, dengan puncak pertama yang nilainya lebih rendah berada pada nilai r yang lebih kecil ($r \sim a_0$), dan puncak kedua yang nilainya lebih tinggi berada pada r yang lebih besar ($r \sim 5a_0$). Dengan demikian elektron pada $\ell = 0$ lebih mungkin berada dekat dengan inti atom dan sekaligus juga lebih mungkin berada lebih jauh dari inti atom dan sekaligus juga lebih mungkin berada lebih jauh dari inti atom (daripada elektron pada keadaan kuantum $\ell = 1$). Hal ini menjadi hasil umum yang berlaku untuk setiap nilai n : semakin kecil nilai ℓ , semakin besar probabilitas untuk menemukan elektron dekat dengan inti dan jauh dari inti atom.

Parameter lain menyangkut posisi elektron adalah nilai rata-rata koordinat radial, yaitu jarak rata-rata antara proton dan elektron sebagai:

$$\bar{r} = \int_0^{\infty} rP(r) dr \quad 7.17$$

Dari Gambar 7.9 (garis vertikal pada sumbu x) bahwa radius rata-rata terutama lebih tergantung pada nilai n daripada nilai ℓ . Dengan demikian **bilangan kuantum utama n selain menentukan tingkat energi elektron, juga menentukan jarak rata-rata elektron terhadap inti atom**. seperti pada model Bohr, radius rata-rata ini bervariasi dengan n^2 , sehingga sebuah elektron pada $n = 2$ berada sekitar 4 kali lebih jauh dari inti dibanding dengan sebuah elektron pada $n = 1$, elektron dengan $n = 3$ berada sekitar 9 kali lebih jauh dari inti daripada sebuah elektron dengan $n = 1$ dan seterusnya.

3. Rapat Probabilitas Sudut

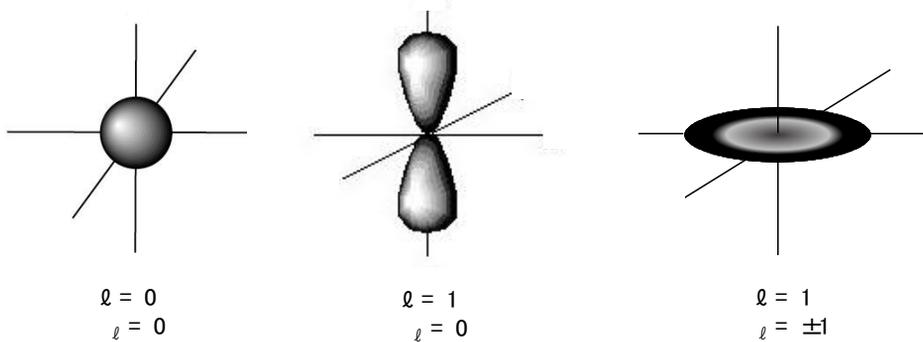
Rapat probabilitas sudut diperoleh dari kuadrat besarnya fungsi gelombang bagian sudut, yaitu

$$P(\theta, \varphi) = |\Theta_{\ell, m_\ell}(\theta)\Phi_{m_\ell}(\varphi)|^2 \quad 7.18$$

Rapat probabilitas sudut untuk fungsi gelombang elektron dengan nilai $\ell = 0$ dan $\ell = 1$ (Gambar 7.11) menunjukkan fungsi gelombang dengan nilai $\ell = 0$ bersifat simetrik bola, yaitu rapat probabilitas tidak bergantung pada arah. Di sisi lain rapat probabilitas $\ell = 1$ memiliki dua bentuk yang berbeda: untuk $m_\ell = 0$ elektron terutama berada di dua daerah dengan probabilitas maksimum sepanjang sumbu z positif dan negatif, sedangkan untuk $m_\ell = \pm 1$, elektron terutama berada dekat bidang xy . Secara klasik diketahui bahwa vektor momentum sudut tegak lurus terhadap bidang orbit. Dengan demikian,

untuk $m_\ell = 0$ maka vektor momentum sudut elektron terletak pada bidang xy (Gambar 7.2) dan sesuai dengan gambaran bahwa elektron paling mungkin berada di lokasi yang jauh dari bidang xy , yaitu sepanjang sumbu z . untuk $m_\ell = \pm 1$ maka vektor momentum sudut memiliki proyeksi maksimum sepanjang sumbu z dan sesuai dengan kemungkinan keberadaan elektron pada bidang xy . Dengan demikian rapat probabilitas sudut ini sesuai dengan informasi yang diberikan oleh orientasi vektor momentum sudut, dan simetri silinder dari rapat probabilitas sesuai dengan ketidakpastian dari orientasi \vec{L} yang ditunjukkan pada gambar 7.11.

Gambar 7. 11 Pengaruh Sudut dari rapat probabilitas dengan $\ell = 0$ dan $\ell = 1$



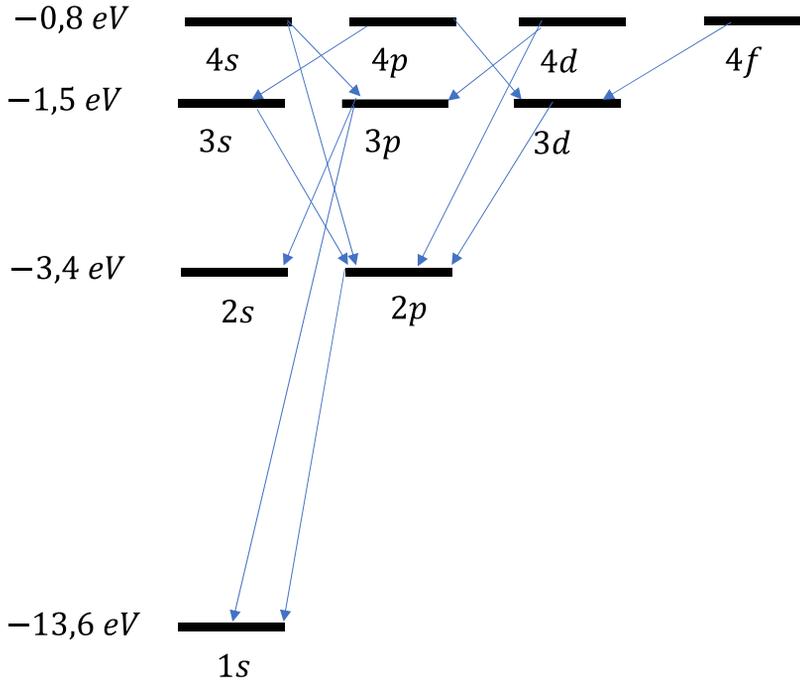
D. Notasi Spektroskopik & Kaidah Seleksi dan Transisi Elektron

Seperti yang telah dijelaskan sebelumnya, keadaan kuantum elektron di dalam atom hidrogen diberikan oleh tiga set bilangan kuantum (n, ℓ, m_ℓ). Dalam notasi spektroskopik $n\ell$, elektron pada keadaan dasar dari atom H diberi label sebagai $1s$, sedangkan keadaan eksitasi adalah $2s$ dan $2p$ untuk $n = 2$, serta $3s, 3p$ dan $3d$ untuk $n = 3$ dan seterusnya. Gambar 7.12 memberikan ilustrasi tingkat – tingkat energi elektron dalam atom H dalam notasi tersebut.

Pada Gambar tersebut, garis – garis panah menunjukkan transisi elektron yang diperbolehkan ke tingkat – tingkat energi yang lebih rendah yang menghasilkan emisi foton. Transisi yang tidak diperbolehkan (misalnya $4d$ ke $3s$) tidak ditunjukkan dengan garis panah. Probabilitas transisi elektron dapat ditentukan dengan menghitung laju transisi untuk operator Hamiltonian tertentu yang menggambarkan transisi elektron dan fungsi gelombang

keadaan awal dan akhir elektron (tidak dibahas pada buku ini). Batasan transisi elektron ini dikenal dengan **kaidah seleksi** (*Selection rule*).

Gambar 7. 12 Diagram Tingkat Energi Elektron dalam Atom H, tanpa kehadiran medan magnet



Kaidah seleksi untuk transisi dipol yang berkaitan dengan transisi atomic dari elektron dalam atom hidrogen adalah

$$\begin{aligned} \Delta n &: \text{sembarang} \\ \Delta \ell &= \pm 1 \end{aligned} \tag{7.19}$$

Artinya, kaidah seleksi tersebut menyatakan tidak ada Batasan untuk perubahan nilai bilangan kuantum n , sedangkan perubahan nilai bilangan kuantum ℓ adalah ± 1 . Sebagai contoh, elektron dari keadaan kuantum $3s$ ($\ell = 0$) tidak dapat mengalami transisi ke tingkat $2s$ ($\ell = 0$) karena berarti $\Delta \ell = 0$. Namun elektron dari tingkat $3s$ dapat mengalami transisi ke tingkat $2p$ ($\ell = 1$).

E. Efek Zeeman Normal

Efek Zeeman mendeskripsikan pengaruh medan magnetik terhadap spektrum atomic. Di Tahun 1896 seorang fisikawan Belanda bernama Pieter

Zeeman (1865 – 1943) menyatakan bahwa garis- garis spektral yang diemisikan oleh atom – atom yang diletakkan dalam sebuah daerah medan magnetic mengalami pelebaran atau pemisahan (*splitting*). Fenomena ini dikenal sebagai efek Zeeman dan dapat dijelaskan sebagai berikut.

Sebuah elektron yang bergerak mengitari inti dapat dipandang sebagai sebuah arus listrik yang bergerak secara melingkar dalam loop kawat. Loop arus tersebut memiliki momen magnetic sebesar

$$\mu = IA$$

Dengan A adalah luasan dari loop arus dan arus listrik diberikan oleh:

$$I = \frac{dq}{dt}$$

Yaitu muatan elektron ($q = -e$) dibagi dengan periode waktu T untuk satu revolusi gerak elektron

$$T = \frac{2\pi r}{v}$$

Sehingga

$$\mu = IA = \frac{q}{T}A = \frac{(-e)\pi r^2}{\frac{2\pi r}{v}} = \frac{-erv}{2} = -\frac{e}{2m}L \quad 7.20$$

Dengan

$$L = mvr$$

L adalah momentum sudut orbital elektron. Bentuk persamaan vektor dari persamaan 7.20 adalah

$$\vec{\mu}_L = -\frac{e}{2m}\vec{L} \quad 7.21$$

Tanda negatif menunjukkan bahwa vektor \vec{L} dan $\vec{\mu}_L$ saling berlawanan arah dan indeks bawah L pada $\vec{\mu}_L$ menunjukkan secara eksplisit bahwa momen magnetic ini berkaitan dengan momentum sudut orbital \vec{L} dari elektron. Hubungan antara \vec{L} dan $\vec{\mu}_L$ diberikan pada Gambar 7.13.

Komponen z dari momen magnetic tersebut adalah:

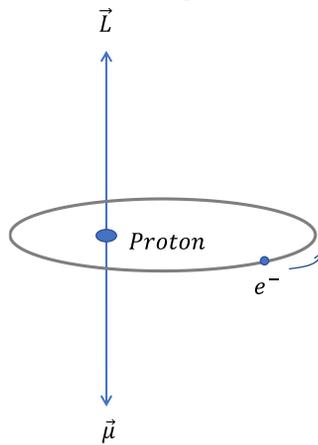
$$\vec{\mu}_{L,z} = -\frac{e}{2m}L_z = -\frac{e}{2m}m_\ell\hbar = -\mu_B m_\ell \quad 7.22$$

Dengan

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 9,27 \times 10^{-24} J/T \quad 7.23$$

Yang kemudian disebut sebagai Bohr Magneton.

Gambar 7. 13 Representasi momentum sudut orbital dan momen magnetik yang saling berlawanan arah berkaitan dengan muatan negatif elektron pada atom hidrogen



Tanpa kehadiran medan magnetik eksternal, momen magnetik $\vec{\mu}_L$ dari atom memiliki arah yang acak. Sebaliknya, jika sebuah dipol magnetik yang memiliki nilai momen magnetik $\vec{\mu}_L$ diletakkan dalam sebuah daerah medan magnet eksternal \vec{B} , maka dipol akan mengalami torsi $\vec{\tau} = \vec{\mu}_L \times \vec{B}$ yang menyebabkannya cenderung berputar dan terarah pada arah medan magnetik tersebut. Energi potensial magnetik dari dipol tersebut diberikan oleh:

$$U_B = -\vec{\mu}_L \cdot \vec{B} \quad 7.24$$

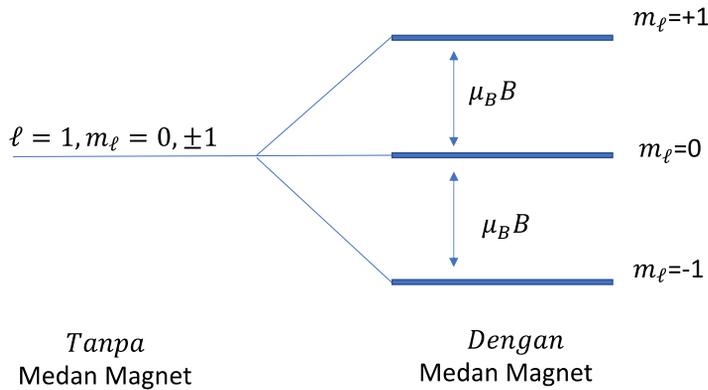
Dari persamaan terakhir terlihat bahwa energi potensial magnetik sistem bernilai minimum (keadaan stabil) bila $\vec{\mu}_L$ dan \vec{B} memiliki arah pada komponen yang sama. Selanjutnya bila \vec{B} maka energi potensial magnetik mengambil bentuk

$$U_B = -\vec{\mu}_{L,z} \vec{B} = +\mu_B m_\ell B \quad 7.25$$

Dengan rumusan diatas terlihat bahwa nilai energi potensial magnetik terkuantisasi menurut bilangan kuantum magnetik m_ℓ , sehingga untuk nilai ℓ tertentu maka tingkat – tingkat energi atomic akan terpisah menjadi $2\ell + 1$ tingkat energi berbeda sesuai dengan nilai m_ℓ . Dengan kata lain degenerasi untuk suatu tingkat energi $n\ell$ akan terhapus oleh medan magnetik eksternal. Sebagai contoh, jika tanpa medan magnet eksternal nilai energi yang berdegenerasi adalah E_0 , maka aplikasi medan eksternal untuk keadaan $\ell = 1$ akan menghasilkan 3 nilai energi berbeda menurut $E_0 + m_\ell \mu_B B$, yaitu $E_0 -$

$\mu_B B, E_0, E_0 + \mu_B B$, yaitu masing – masing untuk nilai $m_\ell = -1, 0, 1$ (Gambar 7.14)

Gambar 7. 14 Ilustrasi Pemisahan dari sebuah tingkat energi $\ell = 1$ di dalam sebuah medan magnet eksternal, yang menunjukkan nilai energi yang berbeda- beda sesuai dengan nilai m_ℓ (Efek spin elektron diabaikan)



Untuk menentukan perubahan kecil dari nilai energi E tersebut terhadap panjang gelombang foton, misalnya ketika elektron mengalami transisi dari tingkat – tingkat energi eksitasi ($\ell = 1$) tersebut ke keadaan dasar ($n = 1, \ell = 0$), maka dilakukan operasi diferensial dari ungkapan $E = \frac{hc}{\lambda}$ terhadap λ , yaitu :

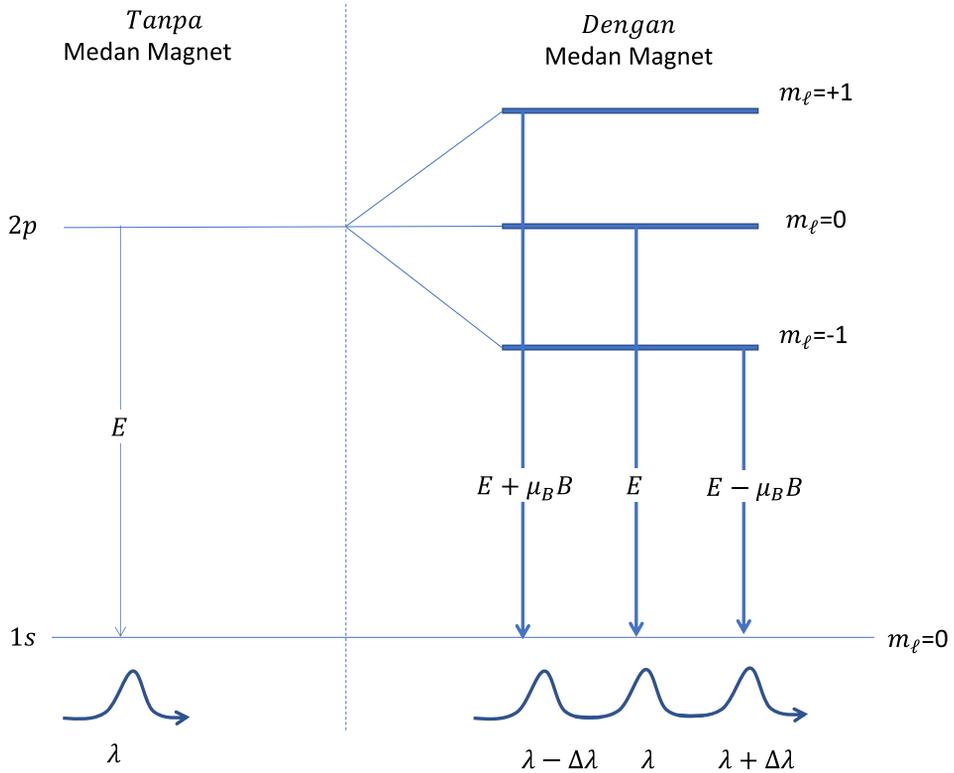
$$dE = -\frac{hc}{\lambda^2} d\lambda \tag{7.26}$$

Selanjutnya, dengan menggantikan diferensial tersebut dengan perubahan kecil dan mengambil nilai mutlaknya, maka perubahan panjang gelombang foton dinyatakan oleh:

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{hc} \Delta E \tag{7.27}$$

Dengan ΔE adalah nilai perbedaan energi antar tingkat keadaan ketika medan magnetic diaktifkan ($\Delta E = \mu_B B$). Gambar 7.15 memberikan ilustrasi dari ketiga transisi yang terjadi dan pergeseran panjang gelombang foton emisi yang dihasilkan dari transisi tersebut.

Gambar 7. 15 Ilustrasi efek Zeeman normal: transisi elektron dari keadaan eksitasi ($n = 2, \ell = 1$) ke keadaan dasar ($n = 1, \ell = 0$) dibawah pengaruh medan magnet luar yang menghasilkan pergeseran panjang gelombang foton



Dalam menganalisis transisi antara keadaan – keadaan m_ℓ yang berbeda, diperlukan aturan atau kaidah seleksi lain, yaitu transisi yang boleh terjadi adalah yang menyangkut perubahan nilai m_ℓ sebagai berikut:

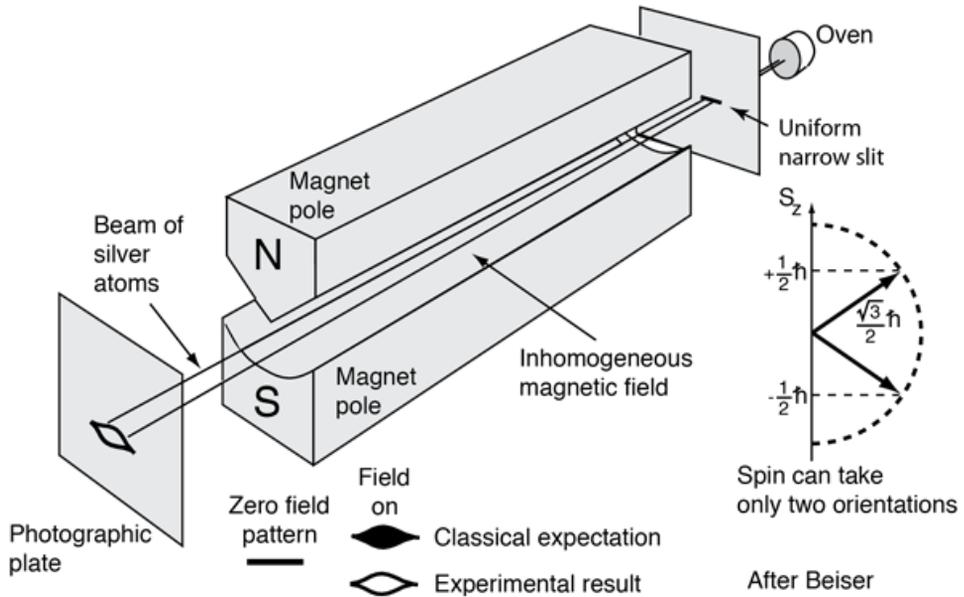
$$\Delta m_\ell = 0, \pm 1 \qquad 7.28$$

F. Eksperimen Stern - Gerlach

Bukti eksperimen pertama untuk pengamatan efek kuantisasi ruang (m_ℓ) dengan mengukur perbedaan energi E di bawah pengaruh medan magnet eksternal dilaporkan pada tahun 1922 oleh dua ilmuwan, yaitu Otto Stern dan Walter Gerlach. Eksperimen Stern dan Gerlach menggunakan seberkas atom hidrogen dengan elektron yang berada dalam keadaan tereksitasi dengan $n = 2, \ell = 1$ dilewatkan pada suatu daerah dengan medan magnetic non homogen (Gambar). Kemudian asumsikan bahwa eksperimen ini dilakukan secara tepat

sehingga elektron pada keadaan kuantum $n = 2$ tidak meluruh ke keadaan dasar $n = 1$.

Gambar 7. 16 Ilustrasi Skematik eksperimen Stern - Gerlach



Sumber: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/spin.html>

Pada keadaan ini elektron dalam atom dengan nilai $m_\ell = 1$ dan $\mu_{L,z} = -\mu_B m_\ell = -\mu_B$ akan mengalami gaya total ke arah atas (sehingga akan mengalami defleksi ke atas), sedangkan elektron dalam atom dengan nilai $m_\ell = -1$ dan $\mu_{L,z} = +\mu_B$ akan mengalami defleksi ke bawah. Di sisi lain elektron dengan nilai $m_\ell = 0$ tidak akan mengalami defleksi. Penting untuk dicatat bahwa defleksi yang berbeda dari berkas partikel dengan nilai m_ℓ yang berbeda berkaitan dengan gaya yang berbeda sesuai dengan persamaan:

$$F_z = -\left(\frac{dU_B}{dz}\right) = \mu_{L,z} \left(\frac{dB}{dz}\right)$$

Untuk

$$U_B = -\mu_{L,z} B = +\mu_B m_\ell B$$

Eksperimen Stern-Gerlach menggunakan sebuah berkas atom perak (silver, Ag). Walaupun struktur elektronik dari Ag berbeda dengan H, namun keadaan kuantum elektron pada kedua atom ini sama, yaitu memiliki nilai bilangan kuantum $\ell = 0, 1, 2, 3, \dots$, sehingga diharapkan jumlah ganjil dari

spektrum muncul pada layar. Pada kenyataannya, Stern-Gerlach mengamati berkas atom terpecah menjadi dua komponen dan menghasilkan dua spektrum pada layar.

Hasil pengamatan Eksperimen Stern – Gerlach yang menunjukkan pemisahan spektrum merupakan bukti pertama dari konsep kuantisasi ruang. Dengan kata lain momen – momen magnetic elektron dalam atom hanya dapat memiliki orientasi diskrit tertentu dalam ruang, yang berkaitan dengan orientasi diskrit dari momen magnetic (atau momentum sudut). Namun demikian, jumlah spektrum diskrit pada layar tidak sesuai dengan harapan bahwa jumlahnya adalah suatu angka ganjil. Dari prediksi $(2\ell + 1)$ spektra, untuk hasil eksperimen yang menunjukkan dua spektrum, maka haruslah diambil nilai $\ell = \frac{1}{2}$ yang tak sesuai dengan hasil yang diperoleh dari persamaan Schrodinger.

Ketidaksesuaian ini dapat diatasi jika diasumsikan adanya kontribusi lain untuk momentum sudut elektron pada atom, yaitu momentum sudut spin yang sifatnya intrinsic. Dengan kata lain, elektron di dalam atom memiliki dua jenis momentum sudut, yaitu momentum sudut orbital \vec{L} dan momentum sudut spin \vec{S} . Momentum sudut orbital dapat dipandang sederhana atau klasik sebagai gerak elektron terhadap inti atom, sedangkan momentum sudut spin berkaitan dengan elektron yang berputar terhadap porosnya.

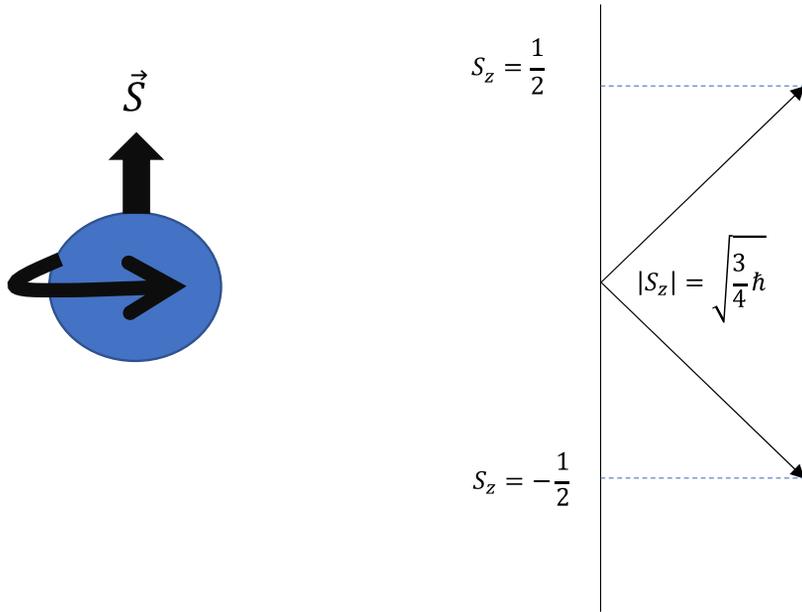
Ide dari spin elektron diusulkan oleh S.A. Goudsmit dan G.E. Uhlenbeck pada tahun 1925. Selanjutnya Paul Ehrenfest menunjukkan bahwa permukaan awan elektron yang berputar memiliki nilai kecepatan lebih besar dari kecepatan cahaya dan dengan demikian momentum sudut spin elektron harus dipandang sebagai fenomena mekanika kuantum murni. Paul Adrien Dirac pada tahun 1928 menunjukkan bahwa teori kuantum relativistik untuk elektron memberikan secara langsung spin sebagai atribut (bilangan kuantum) tambahan dari elektron tanpa analogi dengan kasus klasik. Paul Dirac memperoleh penghargaan Nobel Fisika 1933 bersama Erwin Schrodinger.

G. Spin Intrinsic Elektron

Dari hasil eksperimennya, Stern dan Gerlach kemudian menggagas bahwa elektron harus memiliki sebuah spin intrinsic dengan bilangan kuantum $s = 1/2$. Spin elektron ini berlaku seperti momentum sudut orbital. Vektor momentum sudut spin \vec{S} memiliki komponen S_z dalam sumbu z

(Gambar 7.17) momen magnetic $\vec{\mu}_s$ dan bilangan kuantum magnetic m_s . Perbandingan antara momentum Sudut Orbital dan Spin Elektron diberikan pada Tabel.

Gambar 7. 17 Ilustrasi Momentum Sudut Spin Elektron dan orientasi ruang dari Vektor Momentum Sudut Spin



Tabel 15 Perbandingan antara Momentum Sudut Orbital dan Spin dari Elektron di dalam Atom

	Orbital	Spin
Bilangan Kuantum	$\ell = 0, 1, 2, , \dots$	$s = \frac{1}{2}$
Panjang Vektor	$ \ell = \sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar$	$ \vec{S} = \sqrt{s(s + 1)}\hbar = \sqrt{3/4}\hbar$
Komponen z dari Vektor	$L_z = m_\ell \hbar$	$S_z = m_s \hbar$
Bilangan kuantum magnetic	$m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$	$m_s = \pm \frac{1}{2}$
Momen magnetic	$\vec{\mu}_\ell = -\frac{g_\ell \mu_B \vec{L}}{\hbar}$ Atau $\vec{\mu}_\ell = -\frac{e}{2m} g_\ell \vec{L}$	$\vec{\mu}_s = -\frac{g_s \mu_B \vec{S}}{\hbar} = -2 \frac{\mu_B \vec{S}}{\hbar}$ Atau $\vec{\mu}_s = -\frac{e}{2m} g_s \vec{S}$
Nilai raigiromagnetik	$g_\ell = 1$	$g_s = 2$

Seperti yang ditunjukkan Tabel 15, walaupun formula untuk momentum sudut orbital dan spin serupa, namun memiliki perbedaan yang penting, yaitu berupa factor rasio giromagnetik (g). Factor rasio giromagnetik pada momentum sudut orbital bernilai 1 sedangkan momentum sudut spin bernilai 2, yang diperoleh dari teori relativitas Dirac.

Dengan adanya tambahan bilangan kuantum spin elektron, maka spesifikasi legkap dari elektron dalam atom adalah set bilangan kuantum yang dinyatakan dengan:

$$(n, \ell, m_\ell, s, m_s)$$

Atau

$$(n, \ell, m_\ell, m_s)$$

Karena s bernilai pasti, yaitu $s = \frac{1}{2}$ untuk elektron. Sebagai contoh, keadaan dasar dari elektron pada atom hidrogen dengan tambahan spin elektron dispesifikasi oleh set bilangan kuantum

$$(n, \ell, m_\ell, m_s) = \left(1, 0, 0, +\frac{1}{2}\right)$$

Atau

$$(n, \ell, m_\ell, m_s) = \left(1, 0, 0, -\frac{1}{2}\right)$$

Dengan demikian, degenerasi dari masing – masing keadaan menjadi $2n^2$ dari yang sebelumnya n^2 bila tidak memperhitungkan spin elektron. Sebagai ilustrasi, degenerasi dari keadaan dasar adalah 2, sedangkan keadaan tereksitasi pertama memiliki nilai degenerasi 8, yang sesuai dengan 8 kemungkinan keadaan yang berbeda, yaitu

$$\begin{aligned} &(2, 0, 0, +1/2), (2, 0, 0, -1/2) \\ &(2, 1, +1, +1/2), (2, 1, +1, -1/2) \\ &(2, 1, 0, +1/2), (2, 1, 0, -1/2) \\ &(2, 1, -1, +1/2), (2, 1, 0 - 1, -1/2) \end{aligned}$$

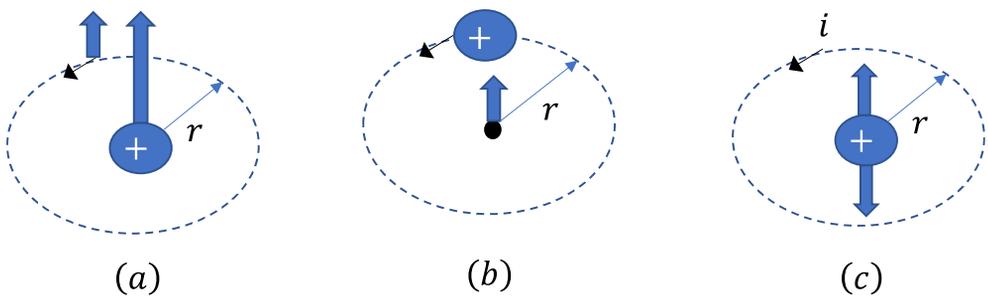
H. Kopling Antara Momentum Sudut Orbital dan Spin Elektron

Kajian detil dari garis- garis emisi atom hidrogen menunjukkan bahwa banyak dari garis spektrum tersebut yang merupakan gabungan dari dua garis yang sangat rapat atau berdekatan, yang dikenal sebagai struktur halus (*fine structure*). Pada bagian ini akan dikaji penyebab dari efek tersebut dari kerangka referensi elektron, yaitu proton yang mengitari elektron. Selanjutnya

model atom Bohr akan digunakan untuk memperoleh estimasi efek yang dihasilkan.

Gambar 7.18 (a) menunjukkan atom hidrogen dilihat dari kerangka referensi proton yang diam. Dalam hal ini diasumsikan elektron mengorbit proton dalam arah berlawanan jarum jam sehingga momentum sudut orbital \vec{L} dalam arah sumbu z. selain itu diasumsikan pula bahwa spin \vec{s} dalam arah sumbu z. Situasi yang sama dari sudut pandang elektron ditunjukkan pada Gambar 7.18 (b) yaitu proton bergerak dalam orbit melingkar di sekitar elektron.

Gambar 7. 18 Ilustrasi Elektron dalam atom hidrogen yang bergerak mengitari Proton (a) dari sudut pandang proton, (b) dari sudut pandang elektron , (c) Proton yang bergerak dipresentasikan oleh arah i yang menyebabkan munculnya medan magnet pada lokasi elektron



Pada kerangka referensi elektron, gerak proton dalam orbit melingkar dengan radius r dapat dianggap sebagai sebuah loop arus yang menyebabkan munculnya medan magnet B pada posisi elektron seperti pada gambar 7.18 (c) . Medan magnetic ini berinteraksi dengan momen magnetic spin dari elektron

$$\vec{\mu}_s = -\left(\frac{e}{m}\right)\vec{S}$$

Besarnya medan magnetic tersebut dapat diestimasi dari model klasik (hukum Biot Savart), yaitu sebuah arus melingkar dengan radius r pada bidang xy akan menghasilkan medan magnetic pada pusat lingkaran sebesar

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2r} i \hat{z} \tag{7.29}$$

Arus I tidak lain adalah muatan yang bergerak sepanjang loop (dalam hal ini adalah muatan proton $+e$) dibagi oleh periode waktu T untuk satu kali mengorbit. Di sisi lain, waktu untuk menempuh satu orbit adalah jarak yang

ditempuh (keliling lingkaran $2\pi r$) dibagi dengan laju gerak melingkar v , sehingga

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{2r} = \frac{\mu_0 e}{2r T} = \frac{\mu_0 e v}{2r 2\pi r} \hat{z} \quad 7.30$$

Di sisi lain, besar momentum sudut orbitak dari elektron adalah

$$L = mvr$$

Sehingga

$$\vec{B} = \frac{\mu_0 e}{4\pi m r^3} \vec{L} \quad 7.31$$

Energi interaksi dari momen magnetic $\vec{\mu}_s$ dengan medan magnetic tersebut adalah :

$$U = -\vec{\mu}_s \cdot \vec{B} \quad 7.32$$

Untuk medan magnetik dalam arah sumbu z , maka

$$U = \pm \frac{e\hbar}{2m} \vec{B} = \pm \mu_B B \quad 7.33$$

Seperti ditunjukkan pada Gambar 7.19, efek ini menghasilkan pemisahan (splitting) dari tingkat energi keadaan menjadi 2 komponen sesuai dengan orientasi dari vektor \vec{L} dan \vec{S} , dengan vektor \vec{L} dan \vec{S} saling parallel yang memberikan nilai energi yang lebih tinggi daripada keadaan dengan vektor \vec{L} dan \vec{S} yang saling antiparalel. Penting untuk dicatat bahwa medan magnet B dalam kasus ini adalah medan magnetic internal yang dihasilkan dari gerak relatif antara proton dan elektron (bukan medan magnet eksternal seperti halnya dalam efek zeeman).

Dengan menggunakan ungkapan Bohr Magneton (Persamaan 7.23), nilai perbedaan energi antara keadaan – keadaan ini adalah

$$\Delta E = 2\mu_B B = \frac{\mu_0 e^2 \hbar}{4\pi m^2 r^3} L \quad 7.34$$

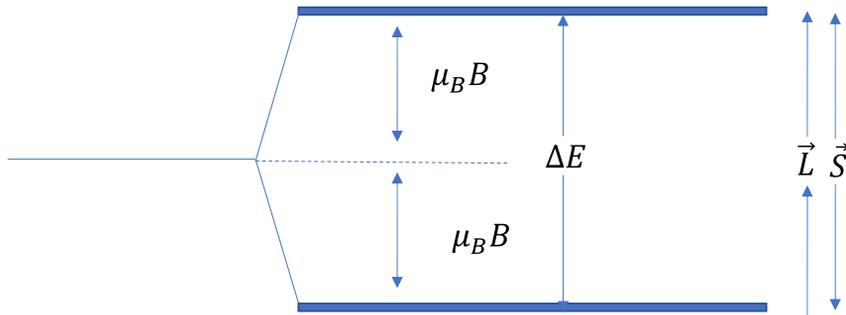
Model Bohr dapat digunakan untuk mendapatkan estimasi besarnya splitting energi tersebut. menurut model ini $L = n\hbar$ sehingga :

$$\Delta E = n \frac{\mu_0 e^2 \hbar^2}{4\pi m^2 r^3} \quad 7.35$$

Dengan substitusi persamaan radius orbit elektron dalam model Bohr, maka diperoleh hasil:

$$\Delta E = n \frac{\mu_0 e^2 \hbar^2}{4\pi m^2} \left(\frac{me^2}{4\pi\epsilon_0 n^2} \right)^3 = \frac{\mu_0 m e^8}{256\pi^4 \epsilon_0^3 \hbar^4 n^5} \quad 7.36$$

Gambar 7. 19 Ilustrasi Splitting Struktur Halus (Fine Structure) dari Atom Hidrogen



Selanjutnya dengan mengingat bahwa

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}$$

Dan menggunakan konstanta tak berdimensi α yang dikenal sebagai konstanta struktur halus (*fine structure constant*)

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \cong \frac{1}{137} \quad 7.37$$

Maka diperoleh

$$\Delta E = mc^2 \alpha^4 \frac{1}{n^5} \quad 7.38$$

Untuk elektron dalam atom hidrogen dalam keadaan kuantum dengan $n = 2$, maka perbedaan energi antara keadaan dengan vektor \vec{L} dan \vec{S} saling paralel dan keadaan dengan \vec{L} dan \vec{S} saling antiparalel adalah:

$$\Delta E = (0,511 \text{ MeV}) \left(\frac{1}{137}\right)^4 \frac{1}{2^5} = 4,53 \times 10^{-5} \text{ eV} \quad 7.39$$

Nilai ini dapat dibandingkan dengan nilai eksperimental berdasarkan *splitting* yang teramati dari garis pertama dari deret Lyman, yaitu $4,54 \times 10^{-5} \text{ eV}$. Dari hasil yang diperoleh ini terlihat kesesuaian yang cukup baik antara model atom Bohr dan Model Schrodinger untuk atom hidrogen.

Rangkuman

1. Defisiensi dari Model Atom Bohr
 - a. Model Atom Bohr belum memperhitungkan massa reduksi dari sistem proton-elektron.
 - b. Model Atom Bohr belum memperhitungkan koreksi panjang gelombang foton

- c. Prediksi Model Atom Bohr bahwa momentum sudut orbital terkuantisasi pada kelipatan bilangan bulat dari \hbar hanya berlaku untuk keadaan selain $n = 1$.
- d. Keadaan elektron menurut teori Bohr melanggar hubungan ketidakpastian Heisenberg yang menyatakan bahwa $\Delta z \Delta p_z \geq \hbar$
- e. Model Bohr hanya berlaku untuk atom "H" (hydrogenlike)
- f. Model Bohr tidak berhasil menjelaskan struktur halus dari garis – garis spektral.
- g. Model Bohr tidak dapat menjelaskan ikatan dari atom – atom menjadi molekul atau senyawa kimiawi

2. Bilangan Kuantum Elektron dalam Atom Hidrogen

Keadaan elektron dalam atom hidrogen diidentifikasi dalam tiga bilangan kuantum:

a. Bilangan Kuantum Utama

Bilangan kuantum utama n berkaitan dengan dengan solusi **fungsi gelombang radial** $R(r)$, dengan persamaan setelah ternormalisasi menjadi:

$$R_{n\ell}(r) = - \left\{ \left(\frac{2}{na_0} \right)^3 \frac{(n - \ell - 1)!}{2n[(n + \ell)!]^3} \right\}^{\frac{1}{2}} e^{-\rho/2} \rho^\ell L_{n+\ell}^{2\ell+1}(\rho)$$

Bilangan kuantum utama n selain menentukan tingkat energi elektron, juga menentukan jarak rata – rata elektron terhadap inti atom.

Tingkat – tingkat energi elektron diberikan oleh persamaan

$$E_n = \frac{-\mu}{2} \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar} \right)^2 \frac{1}{n^2} = -\frac{E_0}{n^2}$$

Dengan $E_0 = 13,6 \text{ eV}$ adalah energi keadaan dasar dari elektron pada atom hidrogen.

b. Bilangan Kuantum Momentum Angular Orbital

Bilangan kuantum momentum sudut orbital ℓ berkaitan dengan besar momentum sudut orbital L , sebagai

$$L = \sqrt{\ell(\ell + 1)}\hbar$$

Dengan $\ell, 1, 2, \dots$

Notasi abjad untuk bilangan kuantum ini sebagai berikut:

Abjad untuk Bilangan Kuantum ℓ

ℓ	Abjad	Kepanjangan abjad
0	<i>s</i>	<i>Sharp</i>
1	<i>p</i>	<i>Principal</i>
2	<i>d</i>	<i>Diffuse</i>
3	<i>f</i>	<i>Fundamental</i>

c. Bilangan Kuantum Magnetic

Bilangan kuantum magnetic berkaitan dengan kuantisasi ruang dari momentum sudut orbital elektron terhadap arah tertentu, sebagai contoh: Jika diambil arah sumbu z

$$L_z = m_\ell \hbar \quad 7.10$$

Dengan $m_\ell = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \pm \ell$

Untuk setiap nilai ℓ terdapat $(2\ell + 1)$ nilai m_ℓ yang mungkin.

3. Fungsi Distribusi Probabilitas

Dalam gambaran gelombang dari elektron, fungsi gelombang elektron digunakan untuk menghitung distribusi probabilitas dari elektron, gambaran “posisi” elektron digantikan oleh penyebaran (awan atau kabut) elektron di dalam ruang.

a. Rapat Probabilitas Total

b. Probabilitas mendapatkan elektron di dalam interval ruang sembarang ditentukan oleh kuadrat dari fungsi gelombang. Rapat Probabilitas Total adalah rapat probabilitas volume (probabilitas per satuan volume) pada lokasi (r, θ, φ) , yang persamaannya dituliskan:

$$|\psi(r, \theta, \varphi)|^2 dV = |R_{n,\ell}(r)|^2 |\Theta_{\ell,m_\ell}(\theta)|^2 |\Phi_{m_\ell}(\varphi)|^2 r^2 \sin \theta dr d\theta d\varphi$$

c. Rapat Probabilitas Radial

Distribusi probabilitas radial dari elektron di dalam atom menggambarkan probabilitas elektron berada pada jarak r dan $r + dr$ dari inti atom yang diperoleh dari probabilitas total yang diintegrasikan terhadap koordinat θ dan φ ,

$$P(r)dr = r^2 R^*(r)R(r)dr \int_0^\pi |\Theta(\theta)|^2 \sin \theta d\theta \int_0^{2\pi} |\Phi(\varphi)|^2 d\varphi$$

d. Rapat Probabilitas Sudut

Rapat probabilitas sudut memberikan informasi orientasi vektor momentum sudut.

Rapat probabilitas sudut diperoleh dari kuadrat besarnya fungsi gelombang bagian sudut, yaitu

$$P(\theta, \varphi) = |\Theta_{\ell, m_\ell}(\theta)\Phi_{m_\ell}(\varphi)|^2$$

4. Notasi Spektroskopik & Kaidah Seleksi dan Transisi Elektron

Notasi Spektroskopik memberikan ilustrasi tingkat – tingkat energi elektron dalam atom H diberikan oleh tiga set bilangan kuantum (n, ℓ, m_ℓ). Batasan transisi elektron keadaan awal dan akhir elektron disebut **kaidah seleksi** (*Selection rule*).

5. Efek Zeeman Normal

Efek Zeeman mendeskripsikan pengaruh medan magnetik terhadap spektrum atomic, yaitu garis- garis spektral yang diemisikan oleh atom – atom yang diletakkan dalam sebuah daerah medan magnetic mengalami pelebaran atau pemisahan (*splitting*).

6. Eksperimen Stern – Gerlach

Eksperimen pertama untuk pengamatan efek kuantisasi ruang (m_ℓ) dengan mengukur perbedaan energi E di bawah pengaruh medan magnet eksternal. Momen – momen magnetic elektron dalam atom hanya dapat memiliki orientasi diskrit tertentu dalam ruang, yang berkaitan dengan orientasi diskrit dari momen magnetic (atau momentum sudut). Namun demikian, jumlah spektrum diskrit pada layar tidak sesuai dengan harapan bahwa jumlahnya adalah suatu angka ganjil.

Ketidaksesuaian ini dapat diatasi jika diasumsikan adanya kontribusi lain untuk momentum sudut elektron pada atom, yaitu momentum sudut spin yang sifatnya intrinsic. Dengan kata lain, elektron di dalam atom memiliki dua jenis momentum sudut, yaitu momentum sudut orbital \vec{L} dan momentum sudut spin \vec{S} . Momentum sudut orbital dapat dipandang sederhana atau klasik sebagai gerak elektron terhadap inti atom, sedangkan momentum sudut spin berkaitan dengan elektron yang berputar terhadap porosnya.

7. Spin Intrinsic Elektron

Spin intrinsic dengan bilangan kuantum $s = 1/2$. spin elektron ini berlaku seperti momentum sudut orbital.

Dengan adanya tambahan bilangan kuantum spin elektron, maka spesifikasi lengkap dari elektron dalam atom adalah set bilangan kuantum yang dinyatakan dengan:

$$(n, \ell, m_\ell, s, m_s)$$

Atau

$$(n, \ell, m_\ell, m_s)$$

Karena s bernilai pasti, yaitu $s = 1/2$ untuk elektron.

8. Kopling Antara Momentum Sudut Orbital Spin Elektron

Struktur halus (*fine structure*) garis spektrum pada atom hidrogen yang merupakan gabungan dari dua garis yang sangat rapat atau berdekatan. Dari penyebab terjadinya struktur halus ini kita dapat menjelaskan nilai eksperimental berdasarkan *splitting* yang teramati dari garis pertama dari deret Lyman.

Uji Formatif

Pilihan Ganda

1. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Telah memperhitungkan massa reduksi dari sistem proton-elektron.
- (2) Berhasil menjelaskan struktur halus dari garis – garis spektral.
- (3) Momentum sudut orbital terkuantisasi pada kelipatan bilangan bulat dari \hbar berlaku untuk seluruh n
- (4) Model Bohr hanya berlaku untuk atom “H” (hydrogenlike)

Pernyataan yang sesuai dengan dan kelemahan dari model atom Bohr adalah

- | | |
|--------------------|----------------|
| A. (1) (2) dan (3) | D. (4) saja |
| B. (1) dan (3) | E. Semua benar |
| C. (2) dan (4) | |

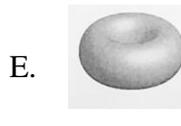
2. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Kuantisasi energi elektron yang persis sama diperoleh dari teori Bohr
- (2) Nilai negatif dari energi E mengindikasikan bahwa elektron dan proton saling terikat satu sama lain.

- B. $(E) \rightarrow (C) \rightarrow (A)$
 C. $(A) \rightarrow (C) \rightarrow (G)$

- E. $(C) \rightarrow (F) \rightarrow (G)$

5. Probabilitas distribusi elektron untuk set bilangan kuantum $(n, \ell, m_\ell) = (3, 2, 0)$ diberikan oleh gambar ...



6. Jika sebuah elektron pada $n = 2$ berada sejauh a dari inti, maka elektron pada $n = 3$ berjarak dari inti atom

A. $4a$

D. $\frac{4}{9}a$

B. $9a$

E. $\frac{9}{4}a$

C. $\frac{1}{4}a$

7. Perhatikan pernyataan berikut:

(1) Keadaan dasar ($n = 1$) dinyatakan dengan $1s$

(2) Keadaan eksitasi pertama ($n = 2$) adalah $2s$ dan $2p$

(3) Keadaan eksitasi kedua ($n = 3$) adalah $3s, 3p$ dan $3d$

(4) Elektron hanya diperbolehkan bertransisi sesuai dengan kaidah seleksi

Pernyataan yang sesuai dengan notasi spektroskopik elektron pada atom hidrogen (tanpa bilangan kuantum spin) yang benar adalah

A. (1) (2) dan (3)

D. (4) saja

B. (1) dan (3)

E. Semua benar

C. (2) dan (4)

8. Pernyataan yang sesuai dengan efek Zeeman normal adalah

- A. Garis- garis spektral yang diemisikan oleh atom – atom yang diletakkan dalam sebuah daerah medan magnetic mengalami pelebaran atau pemisahan (*splitting*).
- B. Menjelaskan keberadaan bilangan kuantum utama (radial)
- C. Dapat dijelaskan menggunakan hukum Coulomb
- D. Energi potensial magnetik sistem bernilai minimum (stabil) saat $\vec{\mu}_L$ dan \vec{B} saling tegak lurus
- E. Splitting dari garis- garis spektral pada efek Zeeman normal menunjukkan momentum orbital elektron
9. Eksperimen pertama untuk pengamatan efek kuantisasi ruang (m_ℓ) yang menunjukkan keberadaan bilangan kuantum spin adalah
- A. Eksperimen Ampere D. Eksperimen Celah Ganda
- B. Eksperimen Stern – Gerlach D. Eksperimen Hamburan Rutherford
- C. Eksperimen muon
10. Perhatikan pernyataan berikut:
- (1) Merupakan fenomena tergabungnya dua garis yang sangat rapat atau berdekatan membentuk sebuah spektrum yang diemisikan oleh atom.
 - (2) Pada kerangka referensi elektron, gerak proton dalam orbit melingkar dengan radius r dapat dianggap sebagai sebuah loop arus yang menyebabkan munculnya medan magnet B pada posisi elektron.
 - (3) Medan magnetic ini berinteraksi dengan momen magnetic spin dari elektron
 - (4) Energi interaksi dari momen magnetic $\vec{\mu}_s$ dengan medan magnetic inilah yang mengakibatkan tergabungnya dua struktur super halus menjadi sebuah spektrum.
- Pernyataan yang sesuai dengan struktur halus (*fine structure*) adalah
- A. (1) (2) dan (3) D. (4) saja
- B. (1) dan (3) E. Semua benar
- C. (2) dan (4)

Essay

1. Sebutkan 7 kelemahan dari Model Atom Bohr!

Jawab:

2. Deskripsikan kembali apa yang dimaksud dengan :

a. Bilangan kuantum utama

Jawab:

b. Bilangan kuantum magnetic

Jawab:

c. Bilangan kuantum momentum orbital

Jawab:

d. Bilangan kuantum spin

Jawab:

3. Jelaskan apa yang sebenarnya dideskripsikan oleh Efek Zeeman normal!

Jawab:

4. Jelaskan kembali apa yang dapat diperoleh / diketahui dari eksperimen Stern – Gerlach

Jawab:

5. Mengapa Spin intrinsic elektron hanya bernilai $-\frac{1}{2}$ atau $+\frac{1}{2}$?

Jawab:

6. Apa yang dimaksud dengan kopling antara momentum sudut orbital dan spin elektron? Bagaimana bisa terjadi dan apa penyebabnya?

Jawab:

7. Sebutkan dan jelaskan 5 perbedaan momentum sudut orbital dengan momentum spin !

Jawab:

8. Gambarkan rapat probabilitas elektron pada keadaan orbital:

a. Sub kulit p

Jawab:

b. Sub kulit d

Jawab:

c. Sub kulit f

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

- Kenneth Krane, Modern Physics, 3rd ed., John Willey & Son, 2011.
Stephen Thornton, Modern Physics (for scientist and engineers), 4th ed.,
Ceengage Learning, 2011.
Beiser, A., Concept of Modern Physics, 6th ed., McGraw Hill, 2003.
Paul A. Tipler, Ralph A. Llewellyn, Modern Physics, 6th ed., W. H. Freeman
and Company New York, 2012.
Sutjahja, M., Inge, Fisika Modern (Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena
Tunneling) 2nd ed., ITB Press, 2018.

Kegiatan Pembelajaran 2 MODEL ATOM BERLEKTRON JAMAK

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan tentang model atom berelektron jamak.	<ol style="list-style-type: none">Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan struktur atom, tabel periodik dan prinsip Pauli.Mahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan konfigurasi elektron dan tabel periodikMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan efek perisai dari elektron di sub petala terluarMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan kaidah HundMahasiswa bisa menjelaskan, menurunkan, mengaplikasikan efek Zeeman anomaly.

Uraian Materi

Perkembangan teori fisika kuantum untuk atom hidrogen menghasilkan solusi eigen dari atom – atom berelektron jamak yang terdiri dari fungsi eigen dan susunan tingkat energi orbital atom. Hasil ini akan menjadi dasar penyusunan petala atom serta konfigurasi elektron pada tabel periodik. Selain itu, kegiatan pembelajaran ini juga akan dibahas secara singkat konfigurasi spin elektron berdasarkan prinsip larangan Pauli dan kaidah Hund serta pengaruhnya pada atom unsur khusus dan analisis spektroskopinya.

A. Struktur Atom, Tabel Periodik dan Prinsip Pauli

Hamiltonian sistem atom berelektron jamak yang berkaitan dengan persamaan nilai eigen dalam rangka penentuan tingkat energi dan fungsi gelombang elektron dapat dituliskan sebagai berikut:

$$\hat{H} = - \sum_i \frac{\hbar^2}{2m} \nabla_i^2 - \sum_i \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Ze^2}{r_i} + \frac{1}{2} \sum_{i,j}^N \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left| \frac{e^2}{\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j} \right| \quad 7.40$$

Setiap suku dalam Hamiltonian tersebut adalah jumlah energi kinetik semua elektron, jumlah energi interaksi antara elektron dan inti atom, dan jumlah energi interaksi repulsive antar elektron yang berbeda. Dalam kasus ini diasumsikan massa inti atom yang tak berhingga sehingga suku energi kinetik inti dapat diabaikan.

Secara umum penentuan solusi persamaan Schrodinger untuk sistem atom berelektron jamak dengan Hamiltonian yang dinyatakan pada persamaan 7.40 tersebut tidak dapat dilakukan secara eksak karena bentuk energi potensial sistem yang kompleks. Namun demikian, dengan kecanggihan computer yang ada sekarang telah dimungkinkan untuk memperoleh hasil perhitungan secara numerik dengan tingkat ketelitian yang cukup tinggi untuk berbagai model yang ada. Pada bagian ini akan dipelajari beberapa hasil yang penting tanpa membahas secara eksplisit metode perhitungannya.

Di awal dekade tahun 1900-an telah diketahui bahwa atom dan molekul dengan jumlah elektron genap lebih banyak jumlahnya dan bersifat stabil dibandingkan dengan atom dan molekul dengan jumlah elektron ganjil. Pada waktu tersebut tabel periodik telah berhasil disusun oleh seorang kimiawan Rusia bernama Dmitri Mendeleev pada tahun 1869. Susunan elemen dalam Tabel periodik dapat dijelaskan dengan sistem pengelompokkan elektron – elektron dalam suatu petala tertutup. Di tahun 1922 Bohr memperbaharui model atomnya dengan mengusulkan bahwa atom – atom dapat dikelompokkan dalam jumlah elektron 2, 8 dan 18 yang bersesuaian dengan petala tertutup yang stabil. Pada saat bersamaan, muncul fisika kuantum dan diikuti oleh akumulasi data akurat dari spektroskopi atom untuk rentang frekuensi optic.

Untuk menjelaskan data eksperimen spektroskopi dan bilangan *magic* yang menyatakan jumlah elektron tersebut, Wolfgang Pauli di tahun 1925

menggagas suatu prinsip fundamental yang kini dikenal dengan **larangan pauli**, yaitu:

Tidak ada dua elektron dalam sebuah atom yang memiliki set bilangan kuantum yang (n, ℓ, m_ℓ, m_s) persis sama.

Prinsip Pauli ini adalah aturan paling penting untuk struktur atom, dan untuk alasan tersebut Pauli memperoleh penghargaan Nobel Fisika di tahun 1945. Prinsip ini memiliki implikasi yang mendalam, yaitu mengatur keadaan kuantum elektron atomic dalam elemen – elemen kimiawi. Prinsip eklusi Pauli berlaku untuk semua partikel dengan spin setengah bulat yang disebut fermion dan dapat pula digeneralisasi untuk partikel dalam inti atom (proton dan neutron).

Umumnya elemen – elemen kimiawi dalam tabel periodik diberi notasi



Dengan Z adalah nomor atom elemen, A adalah nomor massa dan X adalah symbol kimia yang mengidentifikasi elemen tersebut. Nomor atom Z merepresentasikan jumlah proton dalam inti atom sedangkan nomor massa A menunjukkan jumlah neutron dan proton dalam inti atom. Sebagai contoh:



Adalah elemen Lithium (Li) yang memiliki nomor atom $Z = 3$ dan nomor massa $A = 7$. Dengan demikian, jumlah elektron dalam elemen tersebut sama dengan 3 dan jumlah neutron = 4. Di sisi lain, isotop adalah elemen dengan nomor atom Z yang sama tetapi nomor massa A berbeda. Yang berkaitan dengan perbedaan jumlah neutron di dalam inti atom. Sebagai contoh atom karbon (C) dengan nomor atom $Z = 6$ memiliki beberapa isotopy aitu C_{12}^6 , C_{13}^6 , dan C_{14}^6 .

Struktur elektron atomic berperan pada pengamatan keteraturan (*ordering*) dari atom – atom pada tabel periodik yang dapat dimengerti dengan aplikasi dari dua kaidah berikut:

Prinsip Aufbau: Elektron – elektron dalam atom cenderung menempati tingkat energi terendah yang tersedia.

Kaidah Pauli : Hanya satu elektron yang dapat berada pada suatu keadaan kuantum yang dispesifikasi secara lengkap oleh keempat bilangan kuantum (n, ℓ, m_ℓ, m_s).

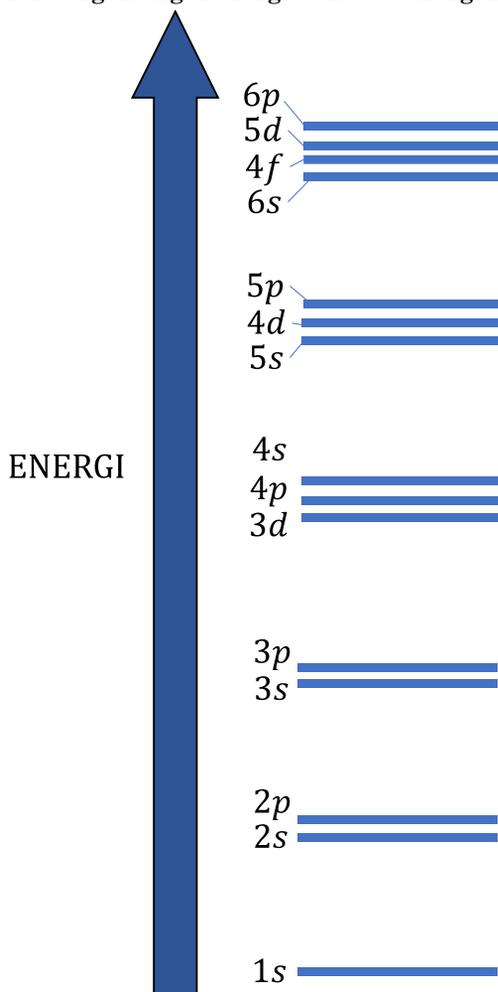
Bilangan kuantum utama n yang menyatakan petala elektron dan menentukan energi ikatan elektron terhadap inti atom diberi tanda huruf besar sebagai berikut, dengan jumlah maksimum elektron yang dapat ditempati:

Tabel 16 Jumlah maksimum elektron pada tiap bilangan kuantum utama n

n	1	2	3	4	...
Notasi huruf	K	L	M	N	...
Jumlah maksimum elektron	2	8	18	32	...

Deskripsi $n\ell$ kemudian disebut sebagai **sub petala**, yaitu subpetala $1s, 2p, 3d$, dan seterusnya. Dengan demikian, untuk sistem elektron jamak energi elektron ditentukan oleh bilangan kuantum n dan ℓ . Gambar 7. 20 berikut memberikan ilustrasi urutan tingkat energi berdasarkan bilangan kuantum n dan ℓ . Khususnya untuk atom dengan nomor atom Z yang relatif kecil.

Gambar 7. 20 Ilustrasi urutan tingkat energi elektron pada atom berelektron jamak yang menunjukkan ketergantungan energi terhadap bilangan kuantum n dan ℓ



Sebagai contoh dari Gambar 7. 20 terlihat bahwa tingkat energi 3d lebih tinggi dari tingkat energi 4s, walaupun nilai $n = 3$ lebih rendah dari $n = 4$. Meskipun ada efek – efek yang berkaitan dengan medan magnet internal, tanpa kehadiran medan magnet eksternal bilangan kuantum m_ℓ dan m_s tidak mempengaruhi energi total elektron. Dengan demikian, energi elektron dalam sistem atom berelektron jamak memiliki degenerasi terhadap kedua bilangan kuantum m_ℓ dan m_s tersebut. Jumlah elektron maksimum yang dapat menempati masing – masing subpetala agar tidak melanggar prinsip larangan dapat dihitung sebagai berikut:

Ket	Jumlah Total Elektron
Untuk masing – masing m_ℓ : Terdapat 2 nilai m_s	2
Untuk masing masing ℓ : Terdapat $(2\ell + 1)$ nilai m_ℓ	$2(2\ell + 1)$

Dengan demikian masing – masing subpetala $n\ell$ dapat ditempati oleh maksimum $2(2\ell + 1)$ elektron. Dengan kata lain subpetala $1s, 2s, 3s, 4s$ ($\ell = 0$) hanya dapat ditempati maksimum dua elektron; subpetala $2p, 3p, 4p$ ($\ell = 1$) dapat ditempati maksimum enam elektron; dan sub petala $3d, 4d, 5d$ ($\ell = 2$) dapat ditempati oleh maksimum sepuluh elektron, dan seterusnya.

Tabel 17 Urutan Pengisian Elektron dalam Subpetala atomik, kapasitas maksimum dan jumlah elektron total yang menempati semua subpetala

n	ℓ	Subpetala	Kapasitas subpetala	Jumlah elektron total pada semua petala
1	0	1s	2	2
2	0	2s	2	4
2	1	2p	6	10
3	0	3s	2	12
3	1	3p	6	18
4	0	4s	2	20
3	2	3d	10	30
4	1	4p	6	36
5	0	5s	2	38
4	2	4d	10	48
5	1	5p	6	54
6	0	6s	2	56
4	3	4f	14	70
5	2	5d	10	80
6	1	6p	6	86
7	0	7s	2	88
5	3	5f	14	102
6	2	6d	10	112

Jumlah elektron pada suatu subpetala dinyatakan oleh angka yang ditulis di atas setelah notasi subpetala. Tabel 17 memberikan urutan pengisian elektron dalam subpetala atomic, serta kapasitas maksimum masing – masing subpetala dan jumlah elektron total yang menempati subpetala- subpetala atomic secara detail dan eksplisit.

Pengisian elektron dalam sebuah atom umumnya dilakukan sampai setiap subpetala terisi penuh. Ketika sebuah subpetala telah terisi dengan jumlah maksimum elektron, dikatakan bahwa subpetala tersebut berdifat tertutup. Untuk suatu nilai n , urutan pengisian subpetala adalah sesuai dengan urutan s, p, d, f, \dots . Namun untuk nilai n yang cukup besar ($n > 2$), maka akan terjadi pembalikan tingkat energi orbital dari yang ideal. Sebagai contoh, untuk $Z = 30$ tingkat energi $3d$ berada di sebelah bawah dari tingkat energi $4s$.

Fenomena pembalikan tingkat – tingkat energi orbital ini semakin banyak dan jelas dengan nilai Z yang semakin besar. Hal ini berkaitan dengan efek perisai, yaitu elektron – elektron dengan nilai ℓ yang lebih besar akan lebih terperisai dari muatan inti Ze , sehingga lebih merasakan gaya tarik – menarik Coulomb yang lebih kecil dan memiliki energi yang lebih tinggi daripada elektron-elektron dengan nilai ℓ yang lebih kecil. Efek perisai ini berhasil menjelaskan kehadiran kelompok elemen logam transisi (*transition metal*) dan tanah jarang (*rare earth*) yang terdiri dari lanthanide dan aktinida pada tabel periodik.

B. Konfigurasi Elektron dan Tabel Periodik

Konfigurasi elektron dari suatu unsur kimia adalah deskripsi struktur elektronik unsur tersebut berdasarkan hasil penerapan prinsip Aufbau dan kaidah larangan Pauli, yang digunakan untuk pengelompokan elemen -elemen dalam tabel periodik. Konfigurasi elektron dari sembarang elemen dituliskan sebagai $n\ell^i$ dengan i adalah jumlah elektron yang menempati petala (n) dan subpetala (ℓ) tersebut.

Sebagai contoh, helium ($\text{He}, Z = 2$) memiliki konfigurasi elektron $1s^2$ yaitu subpetala $1s$ yang terisi penuh dan dengan demikian petala K yang tertutup. Lithium ($\text{Li}, Z = 3$) memiliki konfigurasi elektron $1s^2 2s^1$, sedangkan Berilium ($\text{Be}, Z = 4$) adalah $1s^2 2s^2$, yaitu subpetala $1s$ dan $2s$ yang terisi penuh. Selanjutnya untuk boron ($\text{B}, Z = 5$) mulai dilakukan pengisian pada subpetala $2p$ sehingga konfigurasi elektronnya adalah $1s^2 2s^2 2p^1$. Pengisian subpetala $2p$ dengan jumlah berikutnya lebih banyak

terjadi untuk elemen – elemen berikutnya sampai subpetala 2p tersebut terisi elektron dengan jumlah maksimum enam, yaitu untuk elemen neon (Ne, Z = 10) yang memiliki konfigurasi elektron $1s^2 2s^2 2p^6$, yaitu subpetala 2p juga petala L (n =2) yang terisi penuh.

Tabel periodik (Gambar 7.21) menunjukkan Tabel Periodik yaitu susunan teratur dari elemen – elemen kimia menurut urutan dari nomor atom Z berdasarkan konfigurasi elektronnya. Dalam hal ini pengaturan kolom vertikal disebut **grup**, terdiri dari unsur – unsur dengan sifat fisik dan kimia yang serupa. Hal ini terjadi karena elemen – elemen tersebut memiliki struktur elektron valensi yang sama, yaitu memiliki jumlah elektron yang sama di subpetala l terluar dan dapat membentuk ikatan kimia yang serupa dengan elemen lain. Di sisi lain, baris horizontal disebut sebagai perioda yang berkaitan dengan pengisian dari subpetala tertentu.

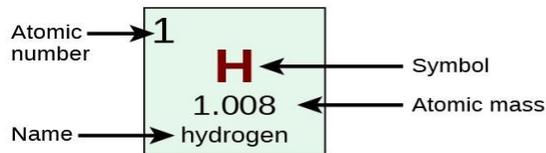
Sebagai contoh: untuk pengelompokan elemen berdasarkan grup dikenal grup IA (alkali), grup IIA (alkali tanah), grup IIIA-VIA, grup VIIA (halogen) dan grup VIIIA (Gas Mulia). Untuk elemen perioda pertama terdiri dari H dan He. Perioda kedua terdiri dari 8 elemen pada masing-masing grup IA (Li) sampai VIIIA (Ne). Perioda ketiga terdiri dari 8 elemen pada masing – masing grup IA (Natrium) sampai dengan VIIIA (argon, Ar). Dua elemen pertama pada perioda keempat terdiri dari kalium (K) dan kalsium (Ca), masing – masing menempati grup IA dan IIA, dilanjutkan dengan grup elemen transisi yang menempati subpetala 3d dengan jumlah elektron yang bervariasi, yaitu dari 1 elektron 3d untuk scandium (Sc) hingga 10 elektron 3d untuk Zinc (Zn) dan akhirnya pengisian subpetala 4p dengan maksimum 6 elektron dimulai dengan grup IIIA untuk gallium (Ga) sampai dengan VIIIA untuk krypton (Kr).

Dengan demikian dalam tabel periodik ini terlihat bahwa elemen – elemen logam alkali yang menempati kolom yang sama (grup IA) dalam tabel periodik (Li, Na, K, Rb, Cs, dan Fr) memiliki konfigurasi elektron terluar yang sama yaitu ns^1 . Konfigurasi elektron ini menunjukkan bahwa unsur – unsur dalam grup IA bersifat **monovalent**, yaitu cenderung melepaskan 1 elektron terluarnya atau bereaksi dengan elemen lain yang membutuhkan 1 elektron untuk membentuk senyawa yang stabil.

Gambar 7. 21 Tabel Periodik

Periodic Table of the Elements

Period	Group																					
	1																	18				
1	1 H 1.008 hydrogen																	2 He 4.003 helium				
2	3 Li 6.94 lithium	4 Be 9.012 beryllium															5 B 10.81 boron	6 C 12.01 carbon	7 N 14.01 nitrogen	8 O 16.00 oxygen	9 F 19.00 fluorine	10 Ne 20.18 neon
3	11 Na 22.99 sodium	12 Mg 24.31 magnesium															13 Al 26.98 aluminum	14 Si 28.09 silicon	15 P 30.97 phosphorus	16 S 32.06 sulfur	17 Cl 35.45 chlorine	18 Ar 39.95 argon
4	19 K 39.10 potassium	20 Ca 40.08 calcium	21 Sc 44.96 scandium	22 Ti 47.87 titanium	23 V 50.94 vanadium	24 Cr 52.00 chromium	25 Mn 54.94 manganese	26 Fe 55.85 iron	27 Co 58.93 cobalt	28 Ni 58.69 nickel	29 Cu 63.55 copper	30 Zn 65.38 zinc	31 Ga 69.72 gallium	32 Ge 72.63 germanium	33 As 74.92 arsenic	34 Se 78.97 selenium	35 Br 79.90 bromine	36 Kr 83.80 krypton				
5	37 Rb 85.47 rubidium	38 Sr 87.62 strontium	39 Y 88.91 yttrium	40 Zr 91.22 zirconium	41 Nb 92.91 niobium	42 Mo 95.95 molybdenum	43 Tc [97] technetium	44 Ru 101.1 ruthenium	45 Rh 102.9 rhodium	46 Pd 106.4 palladium	47 Ag 107.9 silver	48 Cd 112.4 cadmium	49 In 114.8 indium	50 Sn 118.7 tin	51 Sb 121.8 antimony	52 Te 127.6 tellurium	53 I 126.9 iodine	54 Xe 131.3 xenon				
6	55 Cs 132.9 cesium	56 Ba 137.3 barium	57-71 La-Lu *	72 Hf 178.5 hafnium	73 Ta 180.9 tantalum	74 W 183.8 tungsten	75 Re 186.2 rhenium	76 Os 190.2 osmium	77 Ir 192.2 iridium	78 Pt 195.1 platinum	79 Au 197.0 gold	80 Hg 200.6 mercury	81 Tl 204.4 thallium	82 Pb 207.2 lead	83 Bi 209.0 bismuth	84 Po [209] polonium	85 At [210] astatine	86 Rn [222] radon				
7	87 Fr [223] francium	88 Ra [226] radium	89-103 Ac-Lr **	104 Rf [267] rutherfordium	105 Db [270] dubnium	106 Sg [271] seaborgium	107 Bh [270] bohrium	108 Hs [277] hassium	109 Mt [276] meitnerium	110 Ds [281] darmstadtium	111 Rg [282] roentgenium	112 Cn [285] copernicium	113 Uut [285] ununtrium	114 Fl [289] flerovium	115 Uup [288] ununpentium	116 Lv [293] livermorium	117 Uus [294] ununseptium	118 Uuo [294] ununoctium				
			* 57 La 138.9 lanthanum	58 Ce 140.1 cerium	59 Pr 140.9 praseodymium	60 Nd 144.2 neodymium	61 Pm [145] promethium	62 Sm 150.4 samarium	63 Eu 152.0 europium	64 Gd 157.3 gadolinium	65 Tb 158.9 terbium	66 Dy 162.5 dysprosium	67 Ho 164.9 holmium	68 Er 167.3 erbium	69 Tm 168.9 thulium	70 Yb 173.1 ytterbium	71 Lu 175.0 lutetium					
			** 89 Ac [227] actinium	90 Th 232.0 thorium	91 Pa 231.0 protactinium	92 U 238.0 uranium	93 Np [237] neptunium	94 Pu [244] plutonium	95 Am [243] americium	96 Cm [247] curium	97 Bk [247] berkelium	98 Cf [251] californium	99 Es [252] einsteinium	100 Fm [257] fermium	101 Md [258] mendelevium	102 No [259] nobelium	103 Lr [262] lawrencium					



Color Code	
 Metal	Solid
 Metalloid	Liquid
 Nonmetal	Gas

Sumber: https://s3-us-west-2.amazonaws.com/courses-images/wp-content/uploads/sites/1333/2016/12/2221402/CNX_Chem_02_05_PerTable11.jpg

Di sisi lain, elemen – elemen alkali tanah (grup IIA) pada kolom kedua (Be, Mg, Ca, Sr, Ba dan Ra) memiliki konfigurasi elektron terluar ns^2 dan bersifat **divalent**. Golongan berikutnya adalah variasi pengisian orbital p yang dimulai dengan grup IIIA (ns^2np^1), grup IVA (ns^2np^2), grup VA (ns^2np^3), grup VIA (ns^2np^4), dan grup VIIA (ns^2np^5). Secara singkat dapat disebutkan bahwa elemen-elemen grup IIIA (B, Al, Ga, In dan Tl), IVA (C, Si, Ge, Sn dan Pb) dan VA (N, P, As, Sb, dan Bi) cenderung melepaskan elektron p di subpetala terluar untuk membentuk senyawa yang stabil. Sedangkan elemen – elemen di grup VIA (O, S, Se, Te dan Po) dan VIIA (F, Cl, Br, I, dan At) cenderung menangkap elektron lain untuk memenuhi kekurangan elektron di orbital p.

Di sisi lain, elemen -elemen gas mulai pada kolom terakhir (grup VIIIA yang terdiri dari Ne, Ar, Kr, Xe, dan Rn) memiliki konfigurasi elektron terakhir (np^6) dan bersifat stabil atau inert. Sifat inert ini artinya sulit bereaksi dengan elemen atom lain atau atom sejenis berkaitan dengan orbital p yang telah terisi penuh. Elemen logam transisi terdiri dari elemen – elemen baris pertama, kedua, ketiga dan keempat yang masing – masing ditandai oleh konfigurasi elektron berbentuk umum $4s^23d^i$, $5s^24d^i$, $6s^25d^i$, dan $7s^26d^i$ Dengan $i = 1, 2, \dots, 10$ yang menandai variasi jumlah elektron d yang menempati orbital nd di luar orbital $(n + 1)s$ yang terisi penuh.

Sebagai contoh elemen logam transisi baris pertama terdiri dari Sc, Ti, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu dan Zn. Dalam hal ini penyimpangan konfigurasi elektron dari yang ideal untuk mencapai keadaan yang lebih stabil terjadi untuk beberapa unsur, seperti Cr^{24} yaitu konfigurasi elektron yang sesuai dengan hasil eksperimen adalah $(4s^13d^5)$ dan bukan $(4s^23d^4)$. Begitu pula unsur Cu^{29} yaitu konfigurasi elektron yang sesuai dengan hasil eksperimen adalah $(4s^13d^{10})$ dan bukan $(4s^23d^9)$. Dalam kedua kasus ini pengisian elektron dalam orbital 4s tidak terjadi sepenuhnya sebelum pengisian elektron 3d. penyimpangan serupa juga ditemukan pada atom – atom elemen logam transisi pada baris berikutnya.

Penyimpangan konfigurasi elektron yang serupa juga terjadi pada unsur – unsur deretan lanthanide ($Z = 58 - 71$) dan deretan aktinida ($Z = 90 - 103$), masing – masing memiliki pola pengisian elektron di bagian luar dengan konfigurasi elektron $(4f^i5d^06s^2)$ untuk deretan lanthanide dan $(5f^i6d^07s^2)$ untuk deretan aktinida dengan $i = 1, 2, \dots, 14$. berbeda dengan unsur logam transisi dengan elektron terakhir menempati orbital 3d atau 4d

yang merupakan orbital terluar, elektron – elektron terakhir dari unsur tanah jarang ini menempati orbital 4 f atau 5 f yang terletak di sebelah dalam dari orbital atom 6s atau 7s yang terisi penuh.

Tabel 18 Konfigurasi elektronik dari beberapa kelompok elemen dalam tabel periodik

Grup	Konfigurasi Elektronik
IA	ns^1
IIA	ns^2
IIIA	ns^2np^1
IVA	ns^2np^2
VA	ns^2np^3
VIA	ns^2np^4
VIIA	ns^2np^5
VIIIA	ns^2np^6
Elemen Logam Transisi	$4s^23d^i$
Elemen Tanah Jarang	$4f^i5d^06s^2$ $5f^i6d^07s^2$

Tabel berikut memberikan rangkuman (resume) konfigurasi elektronik berdasarkan kelompok elemen dalam tabel periodik. Sebagai catatan, perlu ditekankan bahwa selain material logam dan semikonduktor, kelompok-kelompok unsur logam transisi dan tanah jarang merupakan unsur-unsur yang membentuk senyawa atau material fungsional yang menghasilkan material maju yang mendukung perkembangan teknologi dan industri bagi aplikasi yang berdampak jauh dan luas.

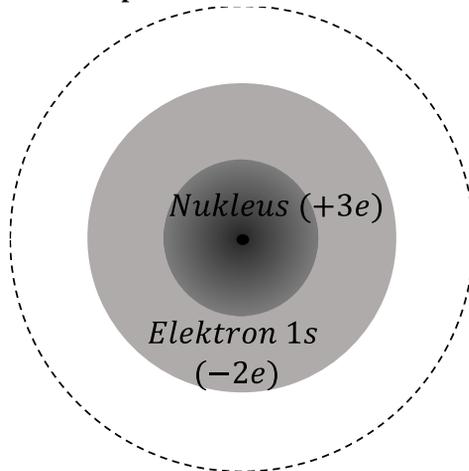
C. Efek Perisai dari Elektron di sub Petala Terluar

Sesuai dengan penjelasan sebelumnya, konfigurasi elektron dari elemen logam alkali (IA) menunjukkan sebuah elektron s tunggal di luar inti yang bersifat inert. Unsur – unsur ini bersifat sangat reaktif, karena berkaitan dengan mudah lepasnya elektron s dan bergabung dengan unsur lain. Sebagai contoh Lithium ($1s^22s^1$) mudah melepas elektron 2s untuk membentuk ion positif Li^+ . Kajian eksperimen dari energi ionisasi menunjukkan bahwa energi ionisasi Li adalah 5,39 eV, yaitu lebih kecil dari energi ionisasi atom H yang bernilai 13,6 eV. Hal ini tidak sesuai dengan prediksi teori Bohr yang

menyatakan bahwa semua energi elektron dalam atom berelektron jamak akan meningkat secara kuadratik seiring dengan peningkatan nomor atom Z .

Dengan konfigurasi elektron tersebut, atom Lithium ditandai dengan dua elektron pada petala $1s$ yang berada di sebelah dalam dan sebuah elektron tunggal pada subpetala $2s$. dalam hal ini bilangan kuantum utama n menentukan jarak rata – raya dari elektron terhadap inti, seperti halnya atom hidrogen. Dengan demikian elektron $2s$ berada pada posisi yang lebih jauh dari inti daripada elektron $1s$ (Gambar).

Gambar 7. 22 Ilustrasi Atom Lithium yang menunjukkan konfigurasi inti bersama elektron sebelah dalam ($1s$) dan elektron terluar ($2s$). garis putus - putus mewakili permukaan Gaussian



Muatan listrik yang dialami oleh elektron $2s$ dapat diestimasi dengan menggunakan hukum Gauss, yaitu medan listrik pada jarak tertentu ditentukan oleh muatan total yang terkandung dalam permukaan Gauss tersebut. Dengan demikian untuk elektron pada orbit $n = 2$ muatan total yang terkandung di dalam permukaan Gauss terdiri dari muatan inti nukleus ($+3e$) ditambah dua elektron ($-2e$) pada petala bagian dalam ($n = 1$), sehingga menghasilkan muatan total $+e$. dengan demikian atom Lithium dapat dipandang menyerupai atom satu elektron (Hydrogenlike) dengan elektron terluar yang berada pada petala atau orbit dengan $n = 2$ di sekitar inti dan muatan efektif $Z_{eff} = +e$. Dengan demikian persamaan energi elektron tersebut adalah

$$E_n = (-13,6eV) \frac{Z_{eff}}{n^2} = -3,40eV \quad 7.41$$

Terlihat bahwa model sederhana ini memberikan prediksi nilai energi ionisasi dari atom lithium netral sebesar 3,40 eV, dibandingkan dengan hasil eksperimen 5,39eV. Walaupun kurang akurat, setidaknya nilai estimasi ini cukup baik dibandingkan dengan nilai prediksi dengan factor $Z^2 = 9$. Perbedaan antara nilai estimasi dan nilai yang teukur ini disebabkan penetrasi dari elektron 1s melalui petala – petala yang lebih dalam atau dekta dengan inti. Selain itu terdapat kemungkinan pula elektron 2s berada lebih dekat pada inti dibandingkan dengan radius orbit rata- rata dan kemungkinan pula berada pada petala $n = 1$.

Perbedaan antara muatan inti sebenarnya (Z) dan muatan inti efektif (Z_{eff}) yang dirasakan oleh elektron di petala atau orbital sebelah luar akibat pengaruh elektron- elektron di petala yang lebih dalam ini dikenal sebagai **efek perisai** (*shielding* atau *screening*) elektron. Perbedaan antara Z dan Z_{eff} lazim dinyatakan sebagai parameter perisai σ , yaitu:

$$Z_{eff} = Z - \sigma \quad 7.42$$

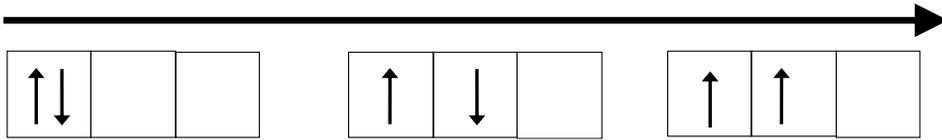
D. Kaidah Hund

Aturan Hund diperkenalkan pada tahun 1925 oleh fisikawan Jerman Friedrich Hund lazim digunakan untuk penentuan keadaan dasar dari atom berelektron jamak. Sebagai catatan penting keberlakuan kaidah Hund bukan tanpa pengecualian, tetapi karena keterbatasan dari prinsip larangan Pauli untuk kasus orbital yang berdegenerasi. Sebagai contoh, untuk kasus 2 elektron yang menempati orbital p (orbital p berdegenerasi lipat 3 yaitu p_x , p_y dan p_z), maka terdapat beberapa alternatif untuk penempatan kedua elektron tersebut, misalnya:

- A. Kedua elektron berkumpul di orbital yang sama (misalkan p_x) dengan arah spin berlawanan
- B. Kedua elektron menempati orbital berbeda (misalnya p_x dan p_y) dengan arah spin berlawanan.
- C. Kedua elektron menempati orbital p_x dan p_y yang berbeda dengan arah spin sejajar (Gambar 7.23)

Dalam hal ini ,yang menjadi pertimbangan kualitatif adalah kompetisi antara energi elektrostatis (repulsive antar elektron) dan interaksi magnetic spin – spin.

Gambar 7. 23 Tiga Kemungkinan Penempatan 2 elektron di orbital p. Dari kiri ke kanan energi sistem berkurang sehingga sistem bersifat lebih stabil



Tiga kaidah Hund dapat dirangkum sebagai berikut:

Kaidah 1

Momentum sudut spin total S bernilai maksimum dengan

$$S = \left(\sum m_s \right)_{maksimum}$$

Kaidah 2

Momentum sudut orbital total L bernilai maksimum, dengan

$$L = \left(\sum m_l \right)_{maksimum}$$

Kaidah 3

Momentum sudut total J bernilai minimum untuk atom dengan subpetala kurang dari setengah penuh, sedangkan J bernilai maksimum untuk atom dengan subpetala lebih dari setengah penuh.

E. Efek Zeeman Anomali

Pada kegiatan pembelajaran 7.1 telah dibahas efek Zeeman normal yang memberikan dampak *splitting* dari sebuah garis spektral optik menjadi tiga komponen di bawah pengaruh kehadiran sebuah medan magnetic eksternal dan dapat pula dipandang sebagai interaksi antara momen magnetic dari momentum sudut dan medan magnetic eksternal yang memiliki bentuk $\vec{\mu}_L \cdot \vec{B}_{eksternal}$. Segera setelah penemuan efek Zeeman tersebut pada tahun 1896, seringkali diamati lebih dari tiga garis optik yang sangat berdekatan. Pengamatan ini disebut **efek Zeeman anomali**. Efek ini sangat berkaitan dengan efek dari spin intrinsic elektron.

Dengan memperhitungkan momen magnetic yang berkaitan dengan kontribusi orbital $\vec{\mu}_L$ dan momen magnetic yang berkaitan dengan spin elektron $\vec{\mu}_s$, maka efek Zeeman anomaly dapat dijelaskan sebagai aplikasi medan magnet eksternal yang akan menghasilkan *splitting* dari masing – masing keadaan J menjadi $2J + 1$, masing – masing dengan identitas nilai m_j

yang berbeda dan nilai energi gap yang seragam. Contoh efek Zeeman anomaly diberikan oleh efek Zeeman anomaly pada natrium.

Rangkuman

1. Struktur Atom, Tabel Periodik dan Prinsip Pauli

- a. Untuk menjelaskan data eksperimen spektroskopi dan bilangan *magic* yang menyatakan jumlah elektron tersebut, Wolfgang Pauli menggagas **larangan pauli**, yaitu:

Tidak ada dua elektron dalam sebuah atom yang memiliki set bilangan kuantum yang (n, ℓ, m_ℓ, m_s) persis sama.

- b. Susunan elemen dalam Tabel periodik dapat dijelaskan dengan sistem pengelompokkan elektron – elektron dalam suatu petala tertutup.
- c. Umumnya elemen – elemen kimiawi dalam tabel periodik diberi notasi



Dengan Z adalah nomor atom elemen , A adalah nomor massa dan X adalah symbol kimia yang mengidentifikasi elemen tersebut. Nomor atom Z merepresentasikan jumlah proton dalam inti atom sedangkan nomor massa A menunjukkan jumlah neutron dan proton dalam inti atom.

- d. Struktur elektron atomic berperan pada pengamatan keteraturan (*ordering*) dari atom – atom pada tabel periodik yang dapat dimengerti dengan aplikasi dari dua kaidah berikut:

- 1) Prinsip Aufbau: Elektron – elektron dalam atom cenderung menempati tingkat energi terendah yang tersedia.
- 2) Kaidah Pauli : Hanya satu elektron yang dapat berada pada suatu keadaan kuantum yang dispesifikasi secara lengkap oleh keempat bilangan kuantum (n, ℓ, m_ℓ, m_s) .

- e. Jumlah maksimum elektron pada tiap bilangan kuantum utama n

n	1	2	3	4	...
Notasi huruf	K	L	M	N	...
Jumlah maksimum elektron	2	8	18	32	...

2. Konfigurasi Elektron dan Tabel Periodik

Rangkuman (resume) konfigurasi elektronik berdasarkan kelompok elemen dalam tabel periodik

Grup	Konfigurasi Elektronik
IA	ns^1
IIA	ns^2
IIIA	ns^2np^1
IVA	ns^2np^2
VA	ns^2np^3
VIA	ns^2np^4
VIIA	ns^2np^5
VIIIA	ns^2np^6
Elemen Logam Transisi	$4s^23d^i$
Elemen Tanah Jarang	$4f^i5d^06s^2$ $5f^i6d^07s^2$

3. Efek Perisai dari Elektron di sub Petala Terluar

Perbedaan antara muatan inti sebenarnya (Z) dan muatan inti efektif (Z_{eff}) yang dirasakan oleh elektron di petala atau orbital sebelah luar akibat pengaruh elektron- elektron di petala yang lebih dalam ini dikenal sebagai **efek perisai** (*shielding* atau *screening*) elektron. Perbedaan antara Z dan Z_{eff} lazim dinyatakan sebagai parameter perisai σ , yaitu:

$$Z_{eff} = Z - \sigma \quad 7.42$$

4. Kaidah Hund

- Aturan Hund diperkenalkan pada tahun 1925 oleh fisikawan Jerman Friedrich Hund lazim digunakan untuk penentuan keadaan dasar dari atom berelektron jamak.
- Tiga kaidah Hund dapat dirangkum sebagai berikut:

Kaidah 1

Momentum sudut spin total S bernilai maksimum dengan

$$S = \left(\sum m_s \right)_{maksimum}$$

Kaidah 2

Momentum sudut orbital total L bernilai maksimum, dengan

$$L = \left(\sum m_l \right)_{maksimum}$$

Kaidah 3

Momentum sudut total J bernilai minimum untuk atom dengan subpetala kurang dari setengah penuh, sedangkan J bernilai maksimum untuk atom dengan subpetala lebih dari setengah penuh.

5. Efek Zeeman Anomali

efek Zeeman anomali adalah teramatinya tiga garis optik yang sangat berdekatan pada spektrum atom saat berada dalam medan magnetic.. Efek ini sangat berkaitan dengan efek dari spin intrinsic elektron.

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Pernyataan yang menunjukkan kelemahan teori atom hidrogen sehingga perlu ada pengembangan model pada atom berelektron banyak adalah...
 - A. perlu adanya bilangan kuantum utama
 - B. perlu adanya bilangan kuantum orbital
 - C. perlu adanya bilangan kuantum magnetik
 - D. perlu adanya bilangan kuantum spin
 - E. tidak bisa menjelaskan efek Zeeman
2. Penggambaran dari elektron berotasi diperkenalkan oleh...

A. Goudsmidt- Uhlenbeck	D. Stern-Gerlach
B. Fermi- Dirac	E. Stefan - Boltzmann
C. Gauge-Boson	
3. Dua ilmuwan yang membuktikan elektron berotasi dan terkuantisasi adalah ...

A. Goudsmidt- Uhlenbeck	D. Stern-Gerlach
B. Fermi- Dirac	E. Stefan - Boltzmann
C. Gauge-Boson	
4. Set bilangan kuantum dari elektron valensi natrium ($Z = 11$) adalah ...

A. $n=3$, $l=2$, $m_s=0$, $s =+1/2$	D. $n=3$, $l=1$, $m_s=1$, $s =-1/2$
B. $n=3$, $l=0$, $m_s=0$, $s =-1/2$	E. $n=3$, $l=2$, $m_s=0$, $s =-1/2$
C. $n=3$, $l=0$, $m_s=0$, $s =+1/2$	

5. "Dua elektron dalam atom tidak dapat berada dalam keadaan kuantum yang sama." adalah bunyi pernyataan ...
- A. Prinsip Aufbau
B. Prinsip Pauli
C. Prinsip Schrodinger
D. Prinsip Dirac
E. Kaidah Hund
6. Yang merupakan ciri petala/kulit tertutup adalah
- A. jika kulit/subkulit berisi penuh jatah elektronnya
B. Momentum sudut orbital total dan momentum sudut spin total adalah satu
C. Distribusi muatan efektifnya tidak memiliki simetri
D. Energi ionisasi secara umum menurun dengan bertambahnya nomor atom
E. memiliki elektron bebas
7. Jumlah proton, elektron, dan neutron dari unsur tersebut adalah ..



- A. 47, 47, dan 61
B. 108, 108, dan 61
C. 47, 47, dan 155
D. 108, 108, dan 155
E. 47, 108, dan 155
8. Set bilangan kuantum yang memungkinkan adalah
- A. (3,1,1,-1/2)
B. (2,1,-2,+1/2)
C. (2,1,-2,-1/2)
D. (1,1,0,-1/2)
E. (1,-1,0,-1/2)
9. Jumlah total elektron pada orbital f adalah ...
- A. 2
B. 6
C. 10
D. 14
E. 0

10. Nama grup dan nomor atom neon yang benar adalah ...

- A. Logam Alkali Tanah (IIA) dengan $Z = 2$
- B. Gas Mulia (VIII A) dengan $Z=18$
- C. Halogen (VIIA) dengan $Z = 17$
- D. Logam Alkali (IA) dengan $Z=1$
- E. Tanah Jarang dengan $Z=18$

Essay

1. Lengkapi tabel berikut: dengan mengisi sifat umum dari elemen -elemen sesuai grup nya pada tabel periodik!

Elemen	Sifat umum elemen – elemen kimiawi pada grup yang sama			
	Radius Atomik	Energi Ionisasi	Energi Ionisasi	Suseptibilitas Magnetik
Alkali Tanah (IA)				
Alkali Tanah (IIA)				
Gas Halogen (VII A)				
Gas Mulia (VIII A)				
Logam Transisi				
Lanthanida				
Aktinida				

2. Jelaskan bagaimana terjadinya efek Zeeman anomaly dan apa dampaknya!

Jawab:

3. Apa yang dimaksud dengan efek perisai? Bagaimana terjadinya dan apa dampaknya ? Jelaskan!

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kenneth Krane, Modern Physics, 3rd ed., John Willey & Son, 2011.

- Stephen Thornton, Modern Physics (for scientist and engineers), 4th ed., Ceengage Learning, 2011.
- Beiser, A., Concept of Modern Physics, 6th ed., McGraw Hill, 2003.
- Paul A. Tipler, Ralph A. Llewellyn, Modern Physics, 6th ed., W. H. Freeman and Company New York, 2012.
- Sutjahja, M., Inge, Fisika Modern (Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling) 2nd ed., ITB Press, 2018.

Penutup

Rangkuman

Fisika atom menjelaskan tentang bilangan kuantum dan fungsi distribusi elektron pada atom berelektron jamak

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York

MODUL 8

STRUKTUR MOLEKUL

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang di mekanika gelombang. Disini kita akan mempelajari tentang bagaimana solusi persamaan chrodinger menjelaskan posisi elektron pada atom. Model atom berelektron tunggal mengalami perkembangan mulai dari teori atom John Dalton, Joseph John Thomson, Ernest Rutherford, dan Niels Henrik David Bohr. Perkembangan teori atom menunjukkan adanya perubahan konsep susunan atom dan reaksi kimia antaratom. Kelemahan model atom yang dikemukakan Rutherford disempurnakan oleh Niels Henrik David Bohr. Bohr mengemukakan gagasannya tentang penggunaan tingkat energi elektron pada struktur atom. Model ini kemudian dikenal dengan model atom Rutherford-Bohr. Tingkat energi elektron digunakan untuk menerangkan terjadinya spektrum atom yang dihasilkan oleh atom yang mengeluarkan energi berupa radiasi cahaya.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).

3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).

4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)

2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)

2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)

3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)

4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu mengaplikasikan pstruktur molekul untuk mendeskripsikan tingkat energi pada molekul
Sikap	a. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan simulasi dan melaporkan hasil simulasinya.

3. Prasyarat Kompetensi

a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.

- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang riset fisika murni,

5.. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Ikatan molekul	A. Molekul hidrogen B. ikatan Kovalen C. Ikatan Ionik
Spektrum molekular	A. Energi vibrasi B. energi rotasi C. Spektrum molekuler

Kegiatan Pembelajaran 1 IKATAN MOLEKUL

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan jenis – jenis ikatan pada molekul	a. Mahasiswa bisa menjelaskan jenis – jenis ikatan pada molekul Hidrogen b. Mahasiswa bisa menjelaskan ikatan kovalen pada molekul c. Mahasiswa bisa menjelaskan ikatan ion pada molekul

Uraian Materi

Variasi konfigurasi elektron menyebabkan atom – atom di alam semesta cenderung untuk saling bereaksi sama lain (kecuali gas mulia). Antar atom ini kemudian bisa saling terikat, terutama saat berdekatan ($10^{-10} m$), karena adanya gaya Coulomb. Saat hanya sekelompok kecil atom bergabung maka akan menghasilkan molekul. Sementara jika tergabung dalam kelompok yang besar maka akan menghasilkan liquid dan solid. Untuk mempelajari ikatan molekul, maka kita dapat meninjau molekul yang paling sederhana, yaitu molekul hidrogen. Ikatan molekul dapat dipahami lebih mudah dengan menggunakan **densitas probabilitas spasial dari orbit – orbit atom**.

A. Molekul Hidrogen

1. Energi Ikat Molekul Hidrogen H_2^+

Sebagai langkah awal mempelajari molekul, maka kita menggunakan molekul yang hanya memiliki satu elektron saja, yaitu **ion molekul hidrogen (H_2^+)**. Molekul ion hidrogen ini dapat dihasilkan setelah melepas satu elektron dari molekul hidrogen biasa (H_2). Molekul ion hidrogen ini tidak dapat dihasilkan dari penggabungan satu atom hidrogen biasa dengan satu proton. Kenapa? Karena satu atom hidrogen biasa bermuatan netral dan setiap benda netral tidak dapat mengalami Gaya Coulomb.

Elektron tunggal pada molekul H_2^+ ini dipakai secara bersama sama oleh kedua atom, sehingga pada keadaan atom stabil, elektron akan banyak menghabiskan waktunya berada di daerah antara dua proton. Artinya probabilitas menemukan elektron tinggi pada region diantara dua proton, yang

dalam istilah mekanika kuantum disebut densitas probabilitas elektron harus memiliki nilai yang besar pada region diantara kedua proton.

a. Penjumlahan fungsi gelombang pada H_2^+

Pada Modul 6 kita telah memperoleh besar energi dasar (*ground state*) dari Atom Hidrogen adalah $E_{gs} = -13,6eV$ dengan fungsi gelombang $\psi = (\pi a_0^3)^{-\frac{1}{2}} e^{-\frac{r}{a_0}}$ dengan a_0 adalah jari – jari Bohr dan densitas probabilitas $|\psi|^2$. Awalnya dua proton terpisah pada jarak yang sangat jauh (Gambar 8.1), sehingga tidak terjadi overlapping pada dua fungsi gelombang atom ini.

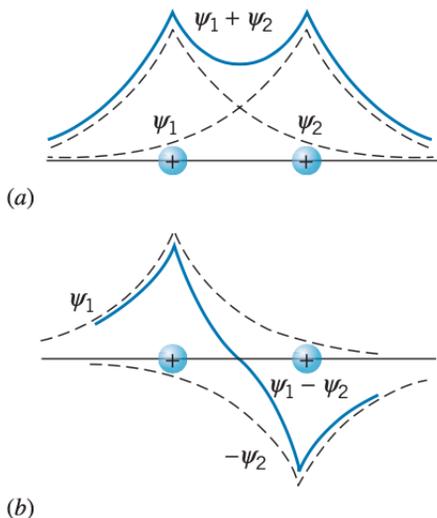
Gambar 8. 1 Sketsa fungsi gelombang dua atom hidrogen yang terpisah pada jarak besar



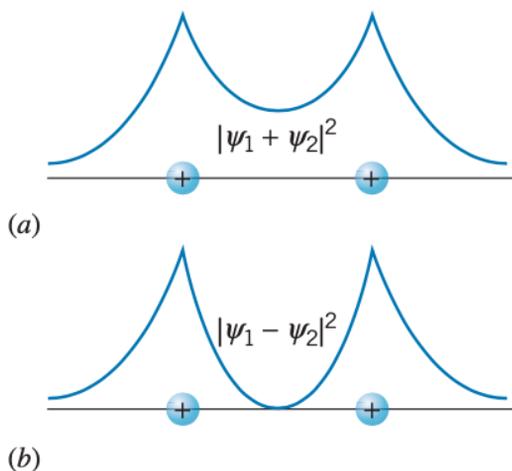
Jika kemudian kedua atom saling mendekat, maka kemudian akan terjadi overlapping pada kedua fungsi gelombang. Overlapping ini mengakibatkan kedua fungsi gelombang harus dikombinasikan. Kombinasi kedua fungsi gelombang dapat dilakukan dengan dua cara. Cara pertama dilakukan jika kedua fungsi gelombang sefasa (Gambar 8.2 (a)) dan cara kedua dilakukan jika kedua fungsi gelombang berbeda fasa (Gambar 8.2.(b)). Hasil penjumlahan kedua fungsi gelombang ini kemudian kita kuadratkan untuk memperoleh densitas probabilitas orbit atom.

Densitas probabilitas orbit atom diberikan pada Gambar 8.3. Pada penjumlahan kedua fungsi gelombang sefasa (Gambar 8.3 (a)) maka akan menunjukkan nilai probabilitas yang lebih besar pada region diantara kedua proton, jika dibandingkan pada penjumlahan beda fasa (Gambar 8.3(b)). Probabilitas yang lebih besar ini menunjukkan bahwa konsentrasi elektron di daerah tepat diantara dua proton lebih besar, sehingga gaya tarik elektron - atom lebih besar dan membuat molekul H_2^+ menjadi lebih stabil. Sebaliknya probabilitas menemukan elektron yang bernilai rendah di Gambar 8.3(b) menunjukkan molekul H_2^+ yang tidak stabil, karena konsentrasi elektron yang kurang cukup untuk menarik proton.

Gambar 8. 2 Overlap fungsi gelombang hidrogen, garis putus putus menunjukkan fungsi gelombang dan garis solid menunjukkan penjumlahan dua fungsi gelombang
 (a) Sefase (bonding state atau keadaan simetri) (b) Berlawanan fase (antibonding state atau anti simetri)



Gambar 8. 3 Densitas probabilitas pada masing – masing kombinasi fungsi gelombang dari Gambar 8.2



b. Energi Ikat dari Molekul Ion Hidrogen H_2^+

Energi ikat molekul H_2^+ berasal dari gaya tolak proton-proton dengan gaya tarik proton-elektron. Gaya tolak proton-proton memiliki energi potensial bernilai positif dan energi potensial dari gaya tarik proton-elektron

bernilai negatif. Agar molekul dapat stabil, maka energi potensial haruslah negatif, sehingga yang memegang peranan penting adalah seberapa besar kontribusi elektron dalam menghasilkan energi (dari gaya tarik) yang dapat mengatasi energi dari gaya tolak proton.

Untuk menentukan besar energi minimum yang diperlukan agar H_2^+ lebih stabil, maka kita akan membedah energi apa saja yang berkontribusi pada ikatan molekul ini. Energi ikat molekul ini bergantung pada jarak antar proton (R). Oleh kedua proton, dihasilkan energi potensial yang bernilai positif sebesar

$$U_p = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \quad 8.1$$

Untuk memplot besar energi terhadap jarak pisah R , maka kita anggap kedua proton awalnya terpisah sangat jauh, sehingga energi pada ground state adalah $-13,6eV$.

Ketika dua proton telah berdekatan, maka elektron akan terikat lebih kuat karena ditarik oleh dua proton, sehingga energi potensialnya menjadi lebih negatif. Ketika $R \rightarrow 0$ maka sistem akan mendekati konfigurasi atom tunggal dengan $Z = 2$. Untuk fungsi gelombang $\psi_1 + \psi_2$ (Gambar 8.2(a)), kombinasi gelombang akan maksimum saat $R \rightarrow 0$ dan membentuk keadaan dasar untuk $Z = 2$, yang dapat diperoleh menggunakan persamaan tingkat energi atom mirip hidrogen:

$$E_n = (-13,6eV) \frac{Z^2}{n^2} \quad 8.2$$

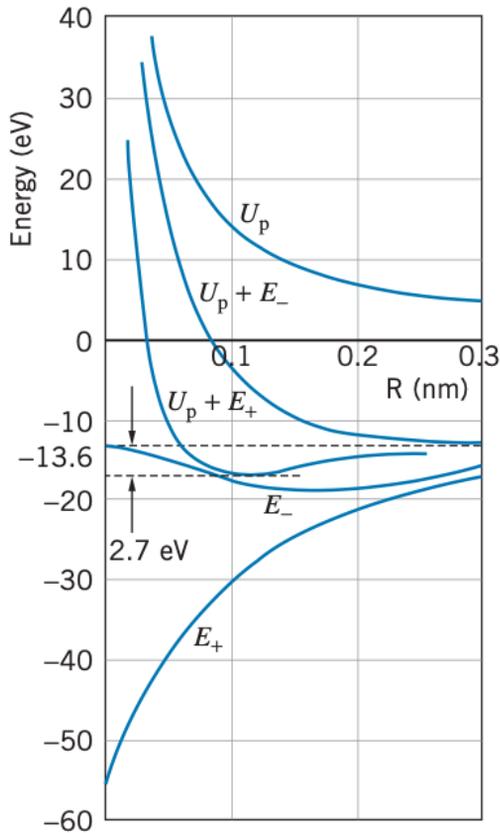
Dengan n adalah bilangan kuantum utama. Saat kita masukkan nilai $n = 1$ dan $Z = 2$ pada persamaan 8.2, maka diperoleh energi pada keadaan dasar $Z = 2$ adalah $-54,4eV$. Energi ini adalah keadaan dasar untuk penjumlahan dua fungsi sefasa (E_+). Artinya E_+ memiliki nilai $-13,6eV$ pada R yang sangat besar dan $E = -54,4eV$ pada $R=0$. Perhitungan eksak dari E_+ diberikan pada Gambar 8.4.

Untuk penjumlahan fungsi gelombang beda fase (E_-) dari penjumlahan $\psi_1 - \psi_2$ diperoleh energi terendah $-13,6eV$ untuk R yang sangat besar. Untuk $R \rightarrow 0$, fungsi gelombangnya mendekati nol (Gambar 8.2(a)). Molekul mencapai tingkat energi terendah dengan fungsi gelombang yang menghilang pada $R = 0$ di keadaan $2p$. Pada keadaan $2p$ dengan $Z = 2$ ini masih merupakan atom mirip hidrogen, sehingga energinya $-13,6eV$. Dengan

demikian penjumlahan fungsi gelombang beda fase (E_-) memiliki keadaan yang sama (energinya sama) baik saat R sangat besar maupun saat $R \rightarrow 0$.

Energi total molekul H_2^+ adalah sumasi dari energi potensial proton U_p dengan energi potensial elektron E_+ dan E_- . Dua jenis sumasi energi elektron – proton ini juga diplot pada Gambar 8.4. Perhatikan bahwa kombinasi $U_p + E_-$ tidak memiliki minimum, yang menunjukkan tidak memiliki keadaan dasar atau tidak menunjukkan kestabilan. Sementara kombinasi $U_p + E_+$ menunjukkan keadaan yang sebaliknya, yaitu memiliki energi minimum sehingga memiliki kestabilan. Energi minimum berada pada jarak ekuilibrium sebesar $R_{eq} = 0,106\text{nm}$ dengan besar energi $16,3\text{eV}$.

Gambar 8. 4 Hubungan energi dengan jarak pisah R untuk H_2^+



Sumber: Kenneth (2012)

Energi ikat (B) untuk molekul H_2^+ adalah besar energi yang diperlukan untuk memisahkan H_2^+ menjadi H dan H^+ . Energi ikat (B) ini dapat diperoleh dengan mencari selisih antara energi komponen terpisah (H dan H^+) dengan energi pada sistem kombinasi (H_2^+). Persamaan B dapat dituliskan :

$$B = E(H + H^+) - E(H_2^+) = -13,6eV - (-16,3eV) = 2,7eV \quad 8.3$$

Yang menarik pula adalah bahwa $R_{eq} = 2a_0$ dengan a_0 adalah jejari Bohr. Telah kita pelajari sebelumnya bahwa atom hidrogen memiliki densitas probabilitas orbit paling tinggi pada jejari Bohr. Berdasarkan nilai jejari ekuilibrium ini, maka kita dapat menunjukkan bahwa pada molekul H_2^+ yang stabil, elektron tepat berada diantara dua atom hidrogen. Sebagai rangkuman bahwa, dari ikatan molecular sederhana ini kita mengetahui tentang pemakaian bersama elektron oleh dua atom. Pemakaian elektron secara bersama – sama ini mempengaruhi stabilitas molekul.

2. Molekul Hidrogen H_2

Anggap kita memiliki dua atom hidrogen yang terpisah pada jarak sangat besar. Pada keadaan ini, setiap atom menempati keadaan dasar 1s dengan energi -13,6eV. Kemudian kita dekatkan kedua atom dan terbentuklah molekul H_2 , kedua fungsi gelombang mengalami overlap, sehingga terjadilah pemakaian elektron secara bersama- sama. Sebagaimana telah dijelaskan sebelumnya, penjumlahan dua fungsi gelombang sefasa akan menghasilkan molekul yang stabil dan penjumlahan dua fungsi gelombang beda fasa akan menghasilkan molekul tidak stabil. Keadaan elektron pada tiap atom kemudian menjadi keadaan elektron pada tingkat molekuler.

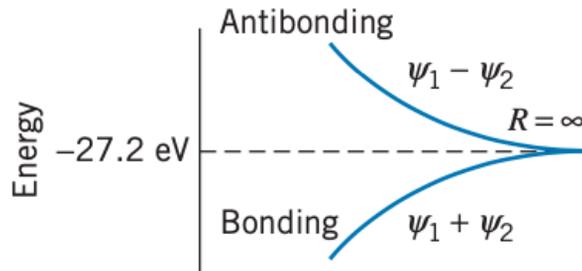
Perhatikan kombinasi energi fungsi gelombang Hidrogen (Gambar 8.5) menunjukkan bahwa jumlah state tidak mengalami perubahan terhadap jarak pisah R. Ketika atom – atom terpisah pada jarak yang sangat besar, maka tiap – tiap elektron menempati keadaan dasar, yaitu -13,6eV, sehingga total energinya saat R_∞ adalah -27,2eV. Kemudian ketika dua atom didekatkan, terlihat bahwa masih terdapat dua keadaan namun dengan energi yang berbeda. Tiap keadaan mempengaruhi jumlah dua fungsi gelombang, yang juga mempengaruhi kestabilan molekul. Keadaan molekul saat molekul stabil juga disebut sebagai keadaan ikatan (*bonding state*) dan keadaan saat molekul tidak stabil disebut sebagai *antibonding state*.

Dari penjelasan sebelumnya, telah diketahui bahwa untk membentuk molekul, maka kemungkinan memperoleh elektron paling besar adalah berada

di daerah diantara dua proton. Untuk molekul H_2 , asumsi ini juga sangat benar (sangat sesuai dengan perkiraan). Ketika berada pada daerah yang sama, sesuai dengan larangan pauli, maka tiap – tiap elektron akan berada pada keadaan spin yang berlawanan, satunya $m_s = -1/2$ sementara yang lain $m_s = +1/2$. Selama bilangan kuantum momentum spinnya berbeda, maka kedua elektron dapat menempati *bonding state* dan menghasilkan molekul yang stabil.

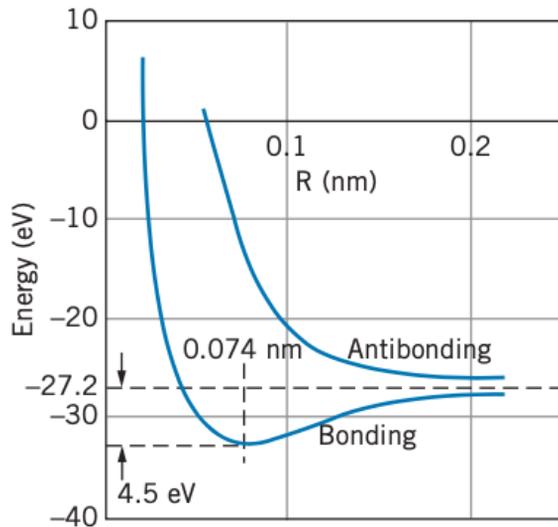
H

Gambar 8. 5 Perbedaan Energi pada kombinasi fungsi gelombang H_2



Sumber: Krane (2012)

Gambar 8. 6 Bonding dan Antibonding pada H_2



Sumber: Krane (2012)

Besar energi dari *bonding state* molekul H_2 ditunjukkan oleh Gambar 8.6, yang menunjukkan energi minimum sebesar $E = -31,7eV$ pada $R = 0,074$ nm. Energi ikat molecular dari molekul H_2 adalah selisih energi pemisahan molekul H_2 menjadi dua atom H dan energi sistem kombinasi, yang dituliskan sebagai berikut:

$$B = E(H + H) - E(H_2) = 2(-13,6eV) - (-31,7eV) = 4,5eV \quad 8.4$$

Dengan membandingkan Gambar 8.4 dengan gambar 8.6, maka kemudian kita melihat efek penambahan dari sebuah elektron pada molekul H_2^+ , yaitu: Energi ikat yang lebih besar (molekulnya terikat lebih kuat) dan proton-protonnya lebih dekat satu sama lain. Kedua efek ini timbul karena adanya peningkatan densitas probabilitas elektron pada daerah diantara kedua proton.

B. Ikatan Kovalen

Pemakaian bersama elektron dalam sebuah molekul adalah asal muasal dari ikatan kovalen. Ikatan kovalen umumnya muncul pada molekul yang mengandung dua atom identik, sehingga dapat juga kita sebut sebagai ikatan homophor atau ikatan homonuklir.

Beberapa sifat khusus pada ikatan kovalen diantaranya:

1. Disaat dua atom digabung menjadi satu, maka interaksi antar elektron, keadaan atomic dan tingkatan energi bertransformasi menjadi keadaan molekuler.
2. Tiap keadaan molekuler terjadi overlapping fungsi gelombang sebagai upaya untuk menemukan energi terendah dibandingkan energi pemisahan molekul. Upaya ini juga dilakukan agar molekul mencapai kestabilan.
3. keadaan molecular lainnya (*antibonding state*) memiliki energi yang meningkat relatif terhadap pemisahan antar atom dan tidak memberikan formasi molekul stabil.
4. larangan pauli diaplikasikan pada keadaan molekuler sama seperti pada keadaan atomic. Tiap keadaan molekuler memiliki okupansi maksimum sebanyak dua elektron yang berhubungan dengan dua orientasi spin berbeda.

Atom – atom *Hydrogenlike* lainnya dengan elektron tunggal s juga dapat membentuk molekul stabil melalui ikatan kovalen. Misanya atom Li ($Z = 3$, dengan konfigurasi $1s^2 2s^1$) dapat membentuk molekul Li_2 . Empat elektron 1s (masing masing atom 2) mengisi *bonding* dan *antibonding states* 1s dan

menyisakan dua elektron 2s yang keduanya mengisi *bonding state* 2s. energi ikat Li_2 sebesar 1,1eV, yang lebih kecil dari energi ikat H_2 (4,52 eV) dengan jarak pisah ekuilibrium sebesar 0,267nm yang lebih besar dari H_2 (0,074nm).

Tabel 19 Sifat Molekul s-bonded

Molecule	Dissociation Energy (eV)	Equilibrium Separation (nm)
H_2	4.52	0.074
Li_2	1.10	0.267
Na_2	0.80	0.308
K_2	0.59	0.392
Rb_2	0.47	0.422
Cs_2	0.43	0.450
LiH	2.43	0.160
LiNa	0.91	0.281
NaH	2.09	0.189
KNa	0.66	0.347
NaRb	0.61	0.359

Sumber; krane (2012)

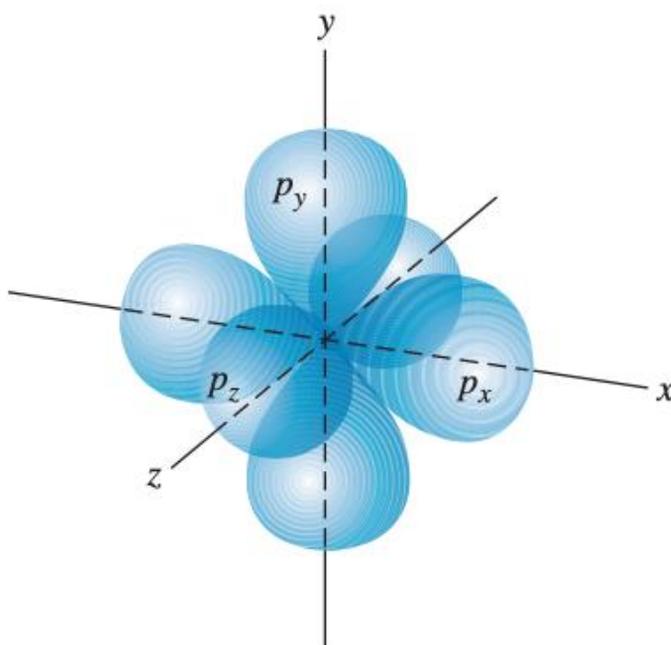
Molekul homonuklir lain yang terbentuk pada state – s diberikan pada Tabel. Besar energi ikat molekuler dinyatakan dalam **energi disosiasi** atau *dissosiative energy* dan bukan energi ikatan. Kedua istilah ini kadangkala ekuivalen dan menunjukkan besar energi yang diperlukan untuk memutus molekul menjadi atom – atom netral. Energi disosiatif tidak terlalu dipengaruhi oleh temperature. Jika nomor atom Z meningkat, maka bilangan kuantum utama juga akan semakin besar. Hal ini akan membuat energi disosiatif menurun dan jarak ekuilibrium meningkat.

Kita juga dapat membentuk ikatan molekul dengan dua elemen logam alkali, yang sebagian ada pada Tabel 19. energi disosiasi dan jarak ekuilibrium konsisten dengan molekul – molekul homonuklir. Misalnya energi disosiatif LiH ada diantara H_2 dan Li_2 . Atom dengan elektron valensi pada subpetala p juga bisa membentuk molekul diatomic dengan menggunakan ikatan kovalen., misanya oksigen, nitrogen.

Pada sub petala p terdapat 3 orbital terdapat tiga keadaan (state) atau orbital yang berbeda, yang ditunjukkan dengan $m_\ell = -1, 0$ dan $+1$. Setiap

orbital ini dapat menampung 2 elektron dengan arah spin berlawanan. Distribusi probabilitas yang dinotasikan dengan m_ℓ perlu digambarkan konfigurasinya secara geometri, sehingga dijelaskan juga menggunakan distribusi probabilitas sesuai komponen arah (p_x, p_y, p_z) yang disketsakan pada Gambar 8.7. P_z menunjukkan $m_\ell = 0$, sementara P_x dan P_y adalah gabungan dari $m_\ell = -1$ dan $m_\ell = +1$. Distribusi probabilitas sesuai komponen arah (p_x, p_y, p_z) digambarkan seperti 2 lobus pada arah positif dan negatif yang keduanya membentuk angka delapan.

Gambar 8. 7 Distribusi Probabilitas dari elektron p yang berbeda



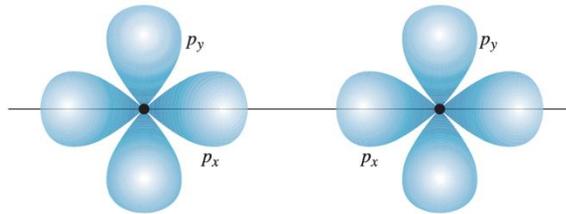
Sumber: Kenneth (2012)

1. Ikatan Kovalen pp

Jika terdapat dua atom dengan elektron valensi di sub kulit p yang terpisah sangat jauh, maka belum ada fungsi gelombang yang overlap (Gambar 8.8). Kemudian saat kedua atom ini didekatkan, maka densitas probabilitasnya akan mengalami perubahan (Gambar 8.9) yang dipengaruhi oleh overlapping distribusi probabilitas masing-masing. Overlapping yang segaris dengan arah distribusi akan menghasilkan resultan gaya tarik yang lebih besar (Gambar 8.9(a)), yaitu overlapping yang terjadi di arah sumbu x.

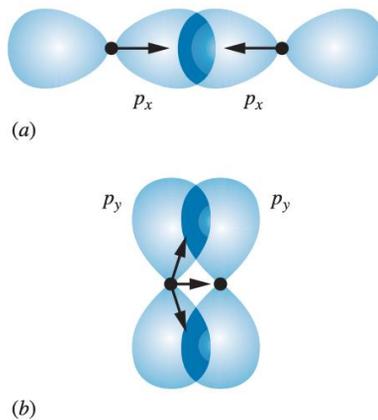
Namun jika overlapping tidak sejaris dengan arah distribusi probabilitas, maka akan terjadi reduksi gaya tarik, sebagaimana yang terjadi di sumbu y (Gambar 8.9(b)). Inilah sebabnya kenapa ikatan molekuler di sumbu x lebih kuat dibanding di sumbu y dan z.

Gambar 8. 8 Dua atom dengan elektron valensi di sub kulit p yang terpisah jauh



Sumber: Kenneth (2012)

Gambar 8. 9 Overlapping distribusi probabilitas mempengaruhi kekuatan ikatan pada molekul (a) searah (b) tidak searah

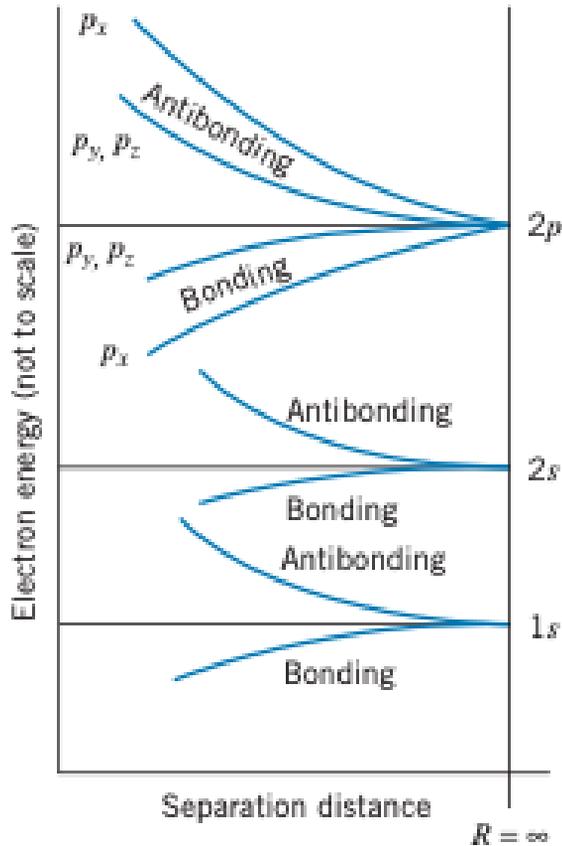


Sumber: Kenneth (2012)

Kemudian kita akan membahas bagaimana keadaan molekuler (*molecular state*) sebagai fungsi jarak pisah antar nuklir R . Asumsikan bahwa kita menggunakan dua atom yang masing – masing sudah terisi penuh di sub kulit 1s dan 2s dan hanya memiliki elektron valensi di sub kulit 2p. ketika keadaan 1s saling overlapping, maka akan menghasilkan keadaan simetri (*bonding state*) dan anti simetri (*antibonding state*), sebagaimana molekul H_2 .

Maka kemudian terdapat empat elektron 1s dalam satu atom, masing – masing 2 elektron pada keadaan simetri dan non simetri. Keadaan yang sama juga terjadi pada keadaan 2s. Atom pada tingkatan 2s akan membentuk keadaan molecular simetri dan antisimetri; karena tiap atom akan menemoti kulit 2s dan keempat elektron 2s akan mengisi keadaan simetri dan antisimetri.

Gambar 8. 10 Keadaan simetri (bonding) dan antisimetri (antibonding) pada sub kulit 2p



Sumber: Krane, 2012

Atom yang terisi sebagian pada sub kulit 2p akan memiliki ikatan molekuler yang bergantung pada keadaan molecular di 2p. tiap keadaan atomic di sub kulit 2p (p_x , p_y dan p_z) akan berhubungan dengan keadaan simetri atau non simetri. Namun keadaan simetri dan anti simetri pada keadaan 1s, 2s dan 2p ini masing – masing tidak saling ekuivalen (Gambar

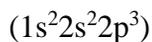
8.10). Keadaan p yang searah (px) akan memiliki efek yang lebih signifikan dibanding yang tak searah dengan arah distribusi probabilitas (py dan pz). Kurva energi keadaan simetri px harus berada dibawah kurva energi keadaan simetri(bonding state) py dan pz, dan kurva energi keadaan anti simetri px harus berada diatas keadaan anti simetri py dan pz. Gambar 8.10 menunjukkan energi dari keadaan simetri dan non simetri dari sebuah molekul berdasarkan jumlah elektron yang mengisi keadaan simetri dan anti simetri (maksimum dua elektron per state (per keadaan), berdasarkan spin up dan spin down.

Contoh Kasus

Berdasarkan pengisian pada keadaan simetri dan anti simetri, prediksikan kestabilan relatif molekul molekul (a) N₂ , (b) O₂ , (c) F₂ ?

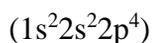
Solusi

(a) Nitrogen memiliki 7 elektron. Konfigurasi elektron dari Nitrogen diberikan oleh



Yang artinya memiliki dua elektron di sub kulit 1s, dua elektron di sub kult 2s dan 3 elektron di sub kulit 2p. pada molekul N₂ terdapat 14 elektron. Kita mulai dengan menggunakan Gambar 8.10 dengan dua elektron memenuhi keadaan bonding di 1s, kemudian dua di keadaan antibonding 1s, kemudian diikuti dengan 2 elektron di keadaan bonding 2s dan 2 elektron di keadaan anti bonding. Sehingga terdapat 8 elektron yang telah mengisi keadaan molekuler di kulit s, dan menyisakan 6 elektron 2p yang belum mengisi keadaan 2p di molekul. Kita dapat menempatkan masing – masing 2 elektron di tiga orbital sub kulit p pada keadaan bonding (simetri). Tidak ada elektron yang mengisi keadaan 2p antibonding (anti simetri). Dengan hanya memiliki keadaan simetri, maka molekul N₂ adalah molekul yang stabil.

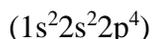
(b) Oksigen memiliki nomor atom delapan (memiliki delapan elektron) dengan konfigurasi elektron diberikan oleh:



Maka molekul O₂ memiliki total enam belas elektron. Sebagaimana molekul N₂, maka delapan dari enam belas elektron ini akan menempati keadaan bonding dan antibonding pada sub kulit 1s dan 2s. kemudian 6 elektron

berikutnya akan menempati keadaan bonding pada sub kulit 2p. dua elektron terakhir kemudian menempati keadaan antibonding pada sub kulit 2p. Karena molekul oksigen memiliki 6 elektron valensi pada keadaan bonding dan 2 elektron valensi pada keadaan antibonding, maka kita dapat memprediksikan molekul O₂ memiliki kestabilan yang lebih rendah jika dibandingkan dengan N₂.

(c) Fluorine , Fluorine memiliki nomor atom 9, sehingga konfigurasi elektronnya dinyatakan dengan



Dengan demikian molekul F₂ memiliki 18 elektron, dengan distribusi 10 elektron valensi di kulit 2p sebagai berikut: 6 elektron di keadaan bonding 2p dan 4 elektron di keadaan antibonding. Dengan demikian, molekul F₂ memiliki kestabilan yang lebih rendah dari O₂.

Sesuai eksperimen, energi disosiatif akan menunjukkan kestabilan dari molekul. Energi disosiatif dari N₂ adalah 9,8eV, sementara O₂ adalah 5,1eV dan F₂ menunjukkan 1,6eV. Semakin rendahnya energi disosiatif menunjukkan semakin lemahnya kestabilan molekul. Semakin rendah kestabilan suatu molekul, maka molekul ini akan cenderung reaktif dengan elemen lainnya. Gas F₂ akan lebih mudah terurai, bahkan cukup dengan disinari cahaya tampak (energi foton dari cahaya tampak adalah sekitar 2 – 4 eV). Proses terurainya suatu gas atau suatu senyawa menggunakan penyinaran ini disebut *photodissociation*. Sifat dari molekul 2p ini sangat sesuai dengan perkiraan yang disusun menggunakan pengisian keadaan simetri (bonding state) dan anti simetri (anti bonding state). Hubungan yang mirip seperti ini juga ditemukan pada molekul homonuklir pada sub kulit 3p, 4p, 5p, dan 6p.

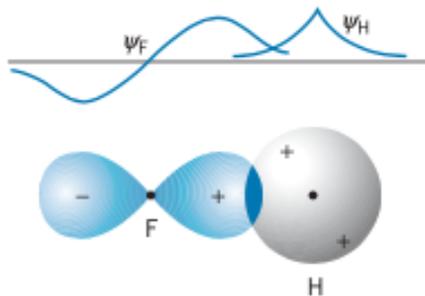
2. Ikatan Molekular *sp*

Molekul yang terbentuk dari oleh atom dengan elektron valensi s dan p adalah molekul yang stabil, contohnya adalah molekul HF. Atom F memiliki 5 elektron valensi di sub kulit p, sehingga dari 2 dari 3 orbital di sub kulit p akan terisi penuh elektron dan menyisakan satu orbital setengah penuh. Kita dapat mengabaikan empat elektron yang telah berpasangan dan hanya

berfokus pada elektron tunggal di orbital separuh penuh karena elektron tunggal inilah yang mempengaruhi ikatan molekuler.

Atom F yang memiliki atom tunggal di salah satu orbital sub kulit p akan menghasilkan probabilitas densitas elektron berbentuk seperti dua lobus dengan salah satu lobus bermuatan positif sementara di lobus lainnya bermuatan negatif (berlainan tanda). Fungsi gelombang atom F ditandai dengan ψ_F . Untuk mencapai kestabilan, atom F kemudian bereaksi (berikatan) dengan atom yang hanya memiliki satu elektron yaitu salah satunya atom H. Atom H memiliki fungsi gelombang yang bertanda positif (memiliki elektron tunggal di sub kulit 1s), dengan distribusi probabilitas elektron berupa bola.

Gambar 8. 11 Overlapping fungsi gelombang pada sub kulit s dan p



Sumber: Krane, 2013

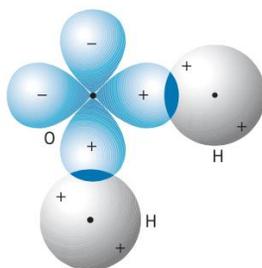
Tabel 20 Sifat molekul yang terikat pada sub kulit sp

Molecule	Dissociation Energy (eV)	Equilibrium Separation (nm)
HF	5.90	0.092
HCl	4.48	0.128
HBr	3.79	0.141
HI	3.10	0.160
LiF	5.98	0.156
LiCl	4.86	0.202
NaF	4.99	0.193
NaCl	4.26	0.236
KF	5.15	0.217
KCl	4.43	0.267

Sumber: Krane, 2013

Keadaan berbeda tanda (berbeda muatan) ini akan mengakibatkan atom H dan atom F akan saling tarik menarik. Lobus negatif dari atom F akan berikatan (tarik menarik) dengan atom H (Gambar 8.11). Ketika kedua fungsi gelombang dari atom H dan atom F ini overlapping, maka kemudian akan terjadi kombinasi dari kedua fungsi gelombang yang dinyatakan dalam keadaan simetri (bonding state) dan antisimetri (anti bonding state). Keadaan simetri terjadi jika densitas probabilitas elektron cukup besar pada daerah diantara nukleus, yang meningkatkan ikatan dan menghasilkan molekul stabil. Sementara keadaan antisimetri terjadi jika sebaliknya. Energi disosiasi dan jarak pisah kedua nukleus diberikan pada Tabel 20 untuk beberapa molekul diatomic yang terikat pada sub kulit sp.

Gambar 8. 12 Overlap Fungsi gelombang elektron pada H₂O



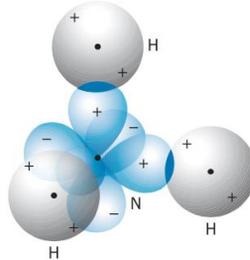
Sumber: Krane, 2013

Kemudian mari kita pertimbangkan struktur dari molekul air, H₂O. Oksigen memiliki 8 elektron, 4 diantaranya telah menempati kulit 1s dan 2s. ketika kita menempatkan elektron – elektron ini pada sub kulit atomic 2p, kita mulai dengan menempatkan satu persatu elektron di px, py dan pz, sehingga kemudian elektron keempat pastilah akan berpasangan dengan salah satu dari tiga elektron pertama tadi. Sehingga, sebuah atom oksigen memiliki dua elektron yang tak berpasangan di sub kulit 2p, setiap elektron ini bisa membentuk sebuah ikatan dengan elektron 1s dari H untuk membentuk molekul H₂O yang stabil.

Gambar 8.12 menunjukkan distribusi probabilitas elektron yang mungkin diperoleh dari molekul H₂O. Molekul yang stabil memiliki sudut ikatan yang tetap. Awalnya diharapkan sudut antar ikatan adalah 90°, namun sudut antara momen dipol yang terukur adalah sebesar 104,5°. Sudut ini lebih

besar dari yang diharapkan karena adanya gaya tolak antara sesama molekul H.

Gambar 8. 13 Overlap fungsi gelombang elektron pada NH₃



Sumber: Krane, 2013

Tabel 21 Sudut ikatan dari ikatan langsung sp

Molecule	Bond Angle
H ₂ O	104.5°
H ₂ S	93.3°
H ₂ Se	91.0°
H ₂ Te	89.5°
NH ₃	107.3°
PH ₃	93.3°
AsH ₃	91.8°
SbH ₃	91.3°

Sumber: Krane, 2013

Pada contoh yang lain, kita akan memperhatikan molekul ammonia (NH₃), yang terdiri dari nitrogen ($Z = 7$) dan tiga atom Hidrogen ($Z=1$). Atom hidrogen memiliki tiga elektron tunggal (tak berpasangan) pada ketiga orbital sub kulit atom 2p, masing masing di px, py dan pz. Setiap atom tunggal ini kemudian berpasangan dengan elektron dari atom H dan membentuk molekul NH₃. Sekali lagi kita mengharapkan terjadi sudut tegak lurus pada ketiga ikatan, namun ternyata sudut ikatan yang terbentuk adalah 103°, yang kembali mengindikasikan adanya gaya tolak pada sesama atom H. Tabel 21

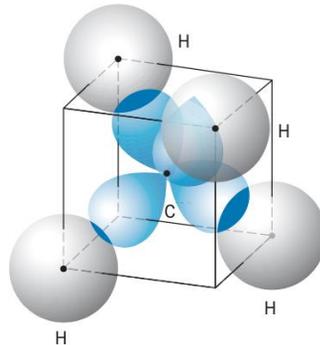
menunjukkan besar sudut ikatan yang terukur pada molekul – molekul yang berikatan langsung (directed) pada antara sub kulit sp. Sudut ikatan tidak mendekati 90° pada banyak kasus.

3. Keadaan Hibrida *sp*

Salah satu atom 2p yang banyak dipelajari adalah karbon, karena atom karbon memiliki banyak sekali variasi ikatan molecular yang menghasilkan keberagaman dan kekompleksan molekul yang mengandung karbon. Keberagaman inilah yang menjadi basis dari banyak senyawa organik. Sehingga molekul dengan basis karbon ini menjadi fundamental untuk banyak penelitian.

Karbon ($Z = 6$) memiliki konfigurasi elektron ($1s^2 2s^2 2p^2$). Dari konfigurasi ini kita lihat bahwa ada 2 elektron tunggal di sub kulit p, mestinya molekul ini telah stabil saat berikatan dengan 2 atom H, sehingga membentuk molekul CH_2 , dengan ikatan langsung pada ikatan sp sebagaimana H_2O dengan sudut 90° . Namun ternyata molekul ini lebih stabil dengan struktur CH_4 yang strukturnya tetrahedral, yang disebut sebagai metana dan memiliki empat ikatan ekuivalen (Gambar 8.14).

Gambar 8. 14 Struktur tetrahedral pada molekul CH_4



Untuk contoh lain yang serupa terjadi pada elemen pada kolom ketiga dari tabel periodik, (boron, aluminium, gallium, ...) memiliki konfigurasi elektron terluar $ns^2 np$ ($n = 2$ untuk boron, $n = 3$ untuk aluminium, dan seterusnya) dengan demikian kita mengekspektasikan elemen ini memiliki sebuah elektron (elektron tunggal) di sub kulit p. dari keterangan ini, mungkin kita mengekspektasikan keberadaan molekul stabil dengan berikatan golongan halide, menjadi BCl atau GaF, oksida misalnya B_2O atau Al_2O ,

nitrida misalnya B_3N atau Al_3N , hidrida misalnya BH atau GaH . Namun ternyata kenyataannya kita menemukan bahwa boron, aluminium, dan gallium umumnya bertindak seakan – akan mereka memiliki tiga elektron valensi sehingga membentuk molekul BCl_3 atau Al_2O_3 , AlN , dan B_2H_6 . Lebih jauh ketiga elektron ini adalah ekuivalen, yang secara umumnya tidak membentuk ikatan dengan 2 elektron lain dari sub kulit s dengan satu elektron di sub kulit p. ikatan ini dibentuk oleh tiga elektron yang membentuk sudut 120° satu sama lain.

Efek dari hibridisasi sp yang diakibatkan dari tiga elektron valensi (dan bukan satu) pada boron dan empat (dibanding 2) pada karbon. Keempat ikatan pada CH_4 adalah ekuivalen dan identik, yang tidak sesuai anggapan dari dua ikatan ss dan dua ikatan sp; hal serupa juga diperoleh di BF_3 atau BCl_3 , ketiga ikatan masing pada molekul ini juga identik dan secara jelas tidak diidentifikasi dengan dua ikatan sp dan satu ikatan pp.

Artinya dari hybrid pada umumnya adalah keturunan yang dihasilkan dari persatuan atau persilangan dari dua induk yang berbeda tipe. Pada kasus molekul, hibridisasi mengacu pada proses yang state (keadaannya) tidak lagi dapat diidentifikasi ada pada sub kulit s atau p, namun merupakan perpaduan keduanya. Formasi sp hibrida ini biasanya terjadi pada:

Dengan atom yang berkonfigurasi elektron $2s^2 2p^n$, satu dari elektron 2s tereksitasi di sub kulit 2p sehingga menghasilkan konfigurasi $2s^1 2p^{n+1}$.

Keadaan hybrid terbentuk dengan menggunakan campuran setara dengan fungsi gelombang yang menunjukkan keadaan 2s dan tiap keadaan 2p. sebagai contoh, pada kasus boron, konfigurasi $2s^2 2p^1$ dikonversi menjadi $2s^1 2p^2$. Asumsikan keadaan 2p berasal dari $2p_x$ dan $2p_y$ dan resultan fungsi gelombang hibrida merepresentasikan kombinasi berbeda dari ψ_{2s} , ψ_{2p_x} dan ψ_{2p_y} , menjadi

$$\psi = \psi_{2s} + \psi_{2p_x} + \psi_{2p_y}$$

Atau

$$\psi = \psi_{2s} - \psi_{2p_x} + \psi_{2p_y}$$

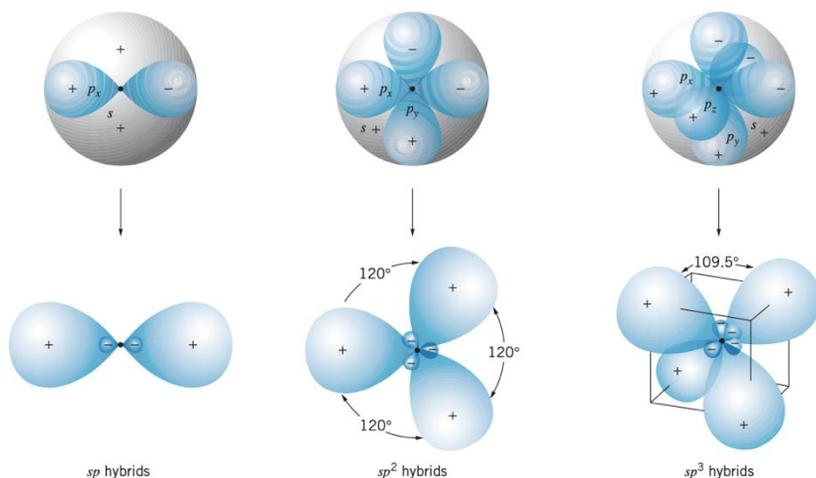
Atau

$$\psi = \psi_{2s} + \psi_{2p_x} - \psi_{2p_y}$$

Ilustrasi distribusi probabilitas untuk hibrida sp, sp^2 dan sp^3 diberikan oleh Gambar 8.15. ingat bahwa ini belum menampilkan struktur molekul, gambar ini menunjukkan kontribusi satu atom dengan atom yang lain.

Struktur tetrahedral dari CH_4 adalah hasil dari susunan simetrik dari empat keadaan sp^3 hibrida dari c, dimana tiap keadaan hybrid terikat dengan satu H. sudut ikatan misalkan tetrahedron simetrik adalah $109,5^\circ$ pada CH_4 dan hibrida sp^3 lainnya ada di Tabel 8.17.

Gambar 8. 15 Distribusi Probabilitas hibrida sp , sp^2 dan sp^3



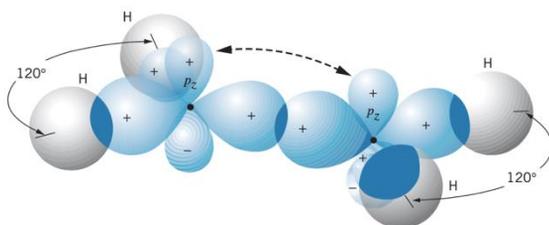
Tabel 22 Sudut ikatan oleh hibrida sp^3

Molecule	Bond Angle
CCl_4	109.5°
C_2H_6	109.3°
C_2Cl_6	109.3°
CClF_3	108.6°
CH_3Cl	110.5°
SiHF_3	108.2°
SiH_3Cl	110.2°
GeHCl_3	108.3°
GeH_3Cl	110.9°

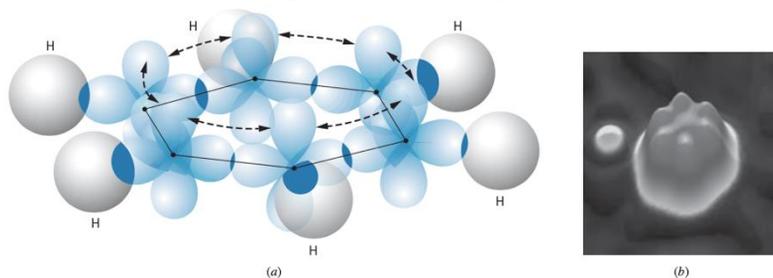
Ada juga kemungkinan hanya untuk elektron $2p$ pada konfigurasi $2s^1 2p^3$ dari karbon mengalami keadaan hibridisasi; tiga elektron $2p$ membentuk keadaan molekuler p . molekul etilena (C_2H_4) adalah salah satu contoh struktur ini. Sudut ikatan hibrida yang terukur pada molekul ini adalah 120° , tiap atom karbon memiliki dua dari tiga keadaan sp^2 hibrid yang

bergabung dengan atom H dan elektron yang ketiga bergabung dengan atom karbon lainnya. Elektron p unhibrida juga membentuk ikatan antara dua atom karbon. Gambar 8.16 menunjukkan ikatan pada C_2H_4 . Ada dua ikatan diantara pasangan karbon, satu dari hibrida sp^2 dan yang lain dari p_z unhibrida. Contoh lain hibrida sp^2 adalah benzene (C_6H_6), yang setiap karbon berikatan dengan satu hidrogen dan dua karbon lain oleh hibrida sp^2 serta ikatan orbital p unhibrid. Struktur dasar dari benzene adalah cincin karbon (Gambar 8.17) dengan sudut ekspansi 120° antar keadaan hibrida yang memberikan karakteristik heksagonal.

Gambar 8. 16 Ikatan molekuler pada C_2H_4 , untuk memperjelas overlap p_z tidak dapat diperlihatkan, anak panah putus -putus mengindikasikan adanya ikatan yang terbentuk oleh keadaan p_z unhibridisasi



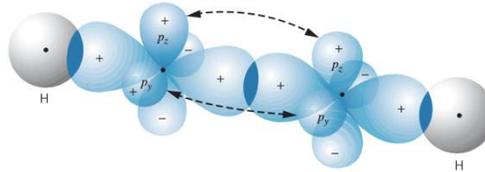
Gambar 8. 17 (a) Ikatan molekuler pada benzena, overlap pada p_z tidak diperlihatkan namun garis panah putus - putus menunjukkan ikatan p_z , (b) image Scanning Electron Microscope menunjukkan distribusi elektron dari molekul benzena pada permukaan tembaga



Dengan demikian, atom karbon juga memungkinkan untuk mengalami ikatan sp hibrida dengan meninggalkan dua keadaan unhibrid di sub kulit p , contohnya adalah asetilen (C_2H_2), dengan dua karbon terikat pada keadaan p unhibrida dan satu dari sp hibrida (Gambar 8.18). keberagaman ikatan dari atom karbon ini menghasilkan banyak senyawa organic, dari struktur yang

sederhana (yang kita pelajari disini) hingga pada struktur yang lebih kompleks.

Gambar 8. 18 Ikatan molekuler di C_2H_2 atom karbon mengalami tiga ikatan di px hibrida dan dua lagi py dan pz unbihrida (garis putus-putus)



Meskipun demikian, tidak hanya carbon yang memiliki ikatan sp hybrid, atom – atom lain juga bisa memilikinya, salah satunya adalah NH_3 , silicon (3s-3p hibrida) dan germanium (4s-4p hibrida). Ikatan hibrida ini membuat molekul -molekul ini memiliki sifat seperti molekul dengan basis karbon, yaitu memiliki valensi 4 dan susunan ikatan yang saling simetrik. Keadaan ini membuat silicon dan germanium menjadi bahan semikonduktor yang baik.

C. Ikatan Ionik

Pada ikatan kovalen kita melihat bahwa elektron bukan milik sebuah atom saja, namun dipakai secara bersama oleh atom lainnya. Namun jika sebuah molekul terbentuk dari ikatan dimana elektron hanya digunakan oleh salah satu atom, maka akan terbentuk molekul dengan ikatan ionik. Molekul dengan ikatan ionik salah satunya adalah garam ($NaCl$). Apabila atom natrium netral (konfigurasinya $1s^2 2s^2 2p^6 3s^1$) dengan satu elektron terluar yang berada di kulit 3s didekatkan dengan satu atom klorin. Atom klorin konfigurasinya $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^5$, yang hanya memiliki satu elektron pada orbital sub kulit 3p. untuk menghilangkan elektron terluar dari atom Na memerlukan energi 5,14eV, energi **ionisasi** dari Na sehingga terbentuk ion Na^+ . Elektron yang telah keluar ini kemudian didekatkan dengan atom Cl sehingga menghasilkan ion Cl^- , energi yang dikeluarkan adalah 3,61eV (disebut **afinitas elektron**). Energi ini dikeluarkan karena pengisian sub kulit 3p sehingga terbentuk konfigurasi stabil. Maka jika kita meminjam 5,14eV untuk mengionisasi Na, maka kita memperoleh kembali 3,61 eV dengan mendekati elektron ke C.. kita masih memperoleh sisa energi sebesar 1,53eV ($= 5,14eV - 3,61eV$) dengan memindahkan Na^+ dan Cl^- menjadi cukup dekat sehingga terjadi gaya

tarik. Menarik (gaya coulomb) pada dua muatan berlawanan tanda dengan energi potensial sebesar $-1,53\text{eV}$. Jarak pemisahan ini berhubungan dengan energi potensial dari persamaan energi potensial

$$R = -\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{1}{U} = \frac{1,44\text{eV}\cdot\text{nm}}{1,53\text{eV}} = 0,941\text{ nm}$$

Maka antara ion Cl^- dan Na^+ terpisah sejauh $0,941\text{ nm}$. Pada jarak ini, energi potensial coulomb akan dapat mengatasi perbedaan energi antara energi ionisasi Na dan afinitas elektron dari Cl. Jika ion Na^+ dan Cl^- berada pada jarak kurang dari $0,941\text{ nm}$ maka molekul NaCl yang terbentuk akan lebih stabil dibanding atom netral dari Na dan Cl.

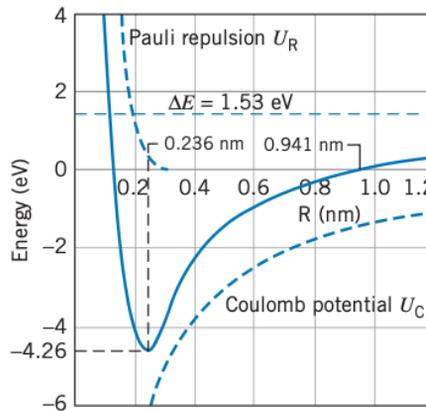
Meski demikian, kita tidak dapat mendorong Na dan Cl terlalu dekat, karena terdapat overlapping di kulit p sehingga menimbulkan gaya tolak antara ion. Prinsip Pauli melarang elektron – elektron tambahan mengisi sub kulit p. jika kita mendorong kedua ion mendekat satu sama lain maka akan memerlukan beberapa elektron untuk terlontar keluar dari sub kulit 2p atau 3p ke sub kulit lain yang berenergi lebih tinggi, sehingga menghasilkan “ruang baru” atau “kamar baru” pada daerah overlapping. Karena fenomena ini memerlukan energi, maka kita perlu menambahkan energi pada sistem Na^+Cl^- untuk mengurangi jarak pisah antar dua ion. Kita bisa membayangkan energi ini sebagai kumpulan “energi potensial” dari tolakan, yang meningkat secara cepat saat kita semakin mendorong kedua ion mendekat.

Sebagai kesimpulan, jika kedua ion terpisah jauh, maka mereka akan saling tarik menarik dan ketika kita dekatkan maka kedua ion akan saling tolak menolak. Sehingga antara kedua ion ini harus berada pada jarak yang sesuai agar molekul mengalami kesetimbangan. Posisi ekuilibrium (posisi setimbang) inilah yang menghasilkan ukuran dari molekul ionik.

Gambar 8.20 ini menunjukkan energi dari molekul NaCl sebagai fungsi jarak pisah antara kedua nukleus. Energi pada skala nol menunjukkan atom netral, kita dapat memisahkan energi molekuler ke dalam tiga sistem: energi konstan $\Delta E=1,53\text{eV}$, yang merepresentasikan beda energi antara ion dan atom netral; Potensial Coulomb (U_C) akibat gaya tarik menarik antar ion dan energi “tolakan” akibat prinsip pauli (U_R) yang ditunjukkan oleh Gambar 8.20 sebagai energi potensial yang mengalami peningkatan untuk R yang kecil dan turun hingga 0 pada R yang mendekati jari – jari ionik, di titik mana orbit elektron tak lagi muncul dan tolakan pauli juga tidak lagi muncul. Sumasi

dari ketiga energi ini menunjukkan energi molekuler dari NaCl, dengan jarak separasi sekuilibrium minimum sebesar $R = 0,236$ nm. Pada jarak ini energinya $-4,26$, sehingga energi ikat atau energi disosiasi (energi yang diperlukan untuk menguraikan molekul menjadi atom-atom netralnya) adalah $4,26$ eV. Tabel menunjukkan energi disosiasi dan jarak pisah ekuilibrium untuk beberapa molekul ionik. Ingat bahwa yang dibahas disini adalah molekul terisolasi bukan NaCl pada padatan (solid). Jarak pisah antar atom pada padatan lebih kompleks perhitungannya daripada molekul terisolasi.

Gambar 8. 19 Energi Molekuler NaCl. Energi pada skala nol menunjukkan keadaan netral dari atom Na dan Cl. Kurva garis solid adalah sumasi dari tiga kontribusi energi molekuler



Sumber: Krane (2013)

Tabel 23 Sifat beberapa molekul ionik diatom

Molecule	Dissociation Energy (eV)	Equilibrium Separation (nm)
NaCl	4.26	0.236
NaF	4.99	0.193
NaH	2.08	0.189
LiCl	4.86	0.202
LiH	2.47	0.239
KCl	4.43	0.267
KBr	3.97	0.282
RbF	5.12	0.227
RbCl	4.64	0.279

Sumber: Krane (2013)

Contoh kasus

- (a) Berapa nilai energi larangan Pauli dari NaCl pada jarak pisah ekuilibrium?
(b) Estimasi nilai dari energi tolakan Pauli pada jarak pisah 0,1nm!

Solusi

(a) pada jarak pisah ekuilibrium , besar Energi Coulombnya dinyatakan dengan

$$U_C = -\frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{R_{eq}} = \frac{-1,44eV \cdot nm}{0,236nm} = -6,10eV$$

Maka energi tolakan akibat prinsip Pauli dapat kita peroleh dari energi molecular E:

$$U_R = E - U_C - \Delta E = -4,26eV - (-6,10eV) - 1,53eV = 0,31eV$$

(b) dari Gambar 8.20 kita dapat mengestimasi $E = +4,0eV$ pada $R = 0,1 \text{ nm}$. Energi Coulomb pada $R = 0,1 \text{ nm}$ adalah $-14,4eV$ dan besar energi tolakannya adalah

$$U_R = E - U_C - \Delta E = +4,0eV - (-14,4eV) - 1,53eV = 16,9eV$$

Perhatikan bagaimana besar energi repulsive (tolakan) meningkat jika jarak pisah diperkecil.

Ikatan ionik dan kovalen menampilkan dua sifat berbeda yang saling menonjol. Elektron pada ikatan ionik hanya dimiliki oleh sebuah atom dalam molekul, sementara elektron pada ikatan kovalen dimiliki beberapa atom secara bersama sama. Bagaimana kita mengklasifikasikan apakah sebuah molekul terikat secara kovalen atau secara ionik? Jawabannya ada pada ketersediaan atom untuk membagi elektronnya atau derajat ekivalensi sebuah atom mendominasi elektron yang dilihat dari momen dipol dari molekul.

Untuk menentukan sebuah molekul merupakan molekul dengan ikatan kovalen atau ionik pada molekul homonuklir tentu kita tidak akan mengalami kesulitan, sebab dua molekul yang sama akan memakai elektronnya secara bersamaan, maka secara langsung kita mendefinisikannya sebagai molekul kovalen. Namun pada molekul heteronuklir, kita akan sedikit sulit mendefinisikan secara langsung apakah ini ikatan ionik atau kovalen. Jika kita menyebutkan bahwa molekul tersebut adalah molekul kovalen murni, maka berdasarkan konsep kombinasi fungsi gelombang yang telah kita pelajari

sebelumnya, kita tetap mengetahui bahwa elektron akan menghabiskan sebagian besar waktunya berada pada atom yang lain. Dengan demikian kita hanya dapat menyatakan bahwa sebuah molekul adalah sebagian kovalen dan sebagian ionik. Adapun presentasi ikatan ionik dan kovalen ini akan kita jelaskan sebagai berikut.

Sebuah dipol listrik (Gambar 8.20) memiliki dua muatan $+q$ dan $-q$ yang terpisah sejauh r . Besar momen dipol diberikan oleh

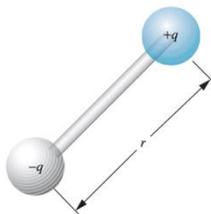
$$p = qr$$

pada sebuah molekul kovalen murni, tidak ada muatan pada atom atau molekul (molekul dan atom bersifat netral), sehingga momen dipolnya nol. Namun pada molekul ionik muatan netto dari molekul ini tidak nol, sehingga momen dipolnya juga tidak nol.

Jika NaCl adalah molekul ionik murni, maka besar momen dipolnya adalah :

$$p = qR_{eq} = (1,6 \times 10^{-19}C)(0,236 \times 10^{-9}m) = 3,78 \times 10^{-29}C \cdot m$$

Gambar 8. 20 Dipol Listrik



Besar momen dipol yang terukur dari NaCl adalah $3,00 \times 10^{-29} C \cdot m$, sekitar 79% dari perhitungan molekul ionik murni. Karena NaCl secara parsial adalah molekul ionik, maka momen dipol yang terukur hanya sebagian dari molekul ionik murninya. Dengan menggunakan rasio antara momen dipol yang terukur dengan nilai maksimum secara teoritis (murni) maka kita dapat menentukan fraksi karakter ionik dari sebuah ikatan molekul:

$$\text{fraksi karakter ionik} = \frac{p_{measured}}{qR_{eq}} \quad 8.3$$

Apakah ada property (besaran) dari atom yang menunjukkan bahwa atom ini akan cenderung membentuk ikatan kovalen atau ikatan ionik? Ada. Besaran ini adalah **elektronegativitas**, yang dapat didefinisikan sebagai tingkat kapasitas suatu atom untuk menarik elektron untuk membentuk

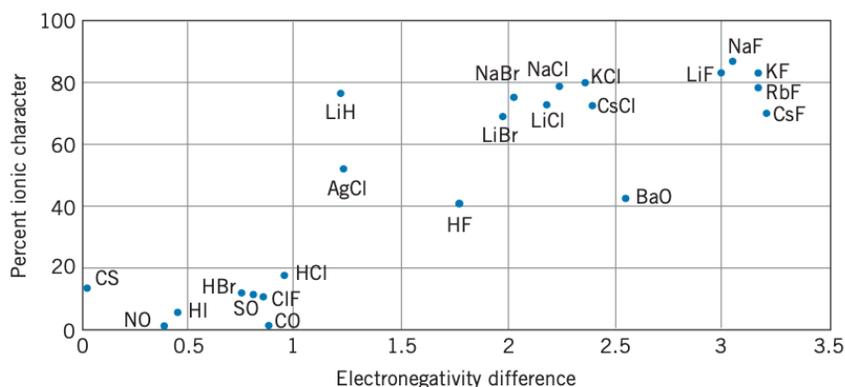
ikatan kimia. Keelektronegativitas dari suatu atom bisa kita hitung dari jumlah energi yang diperlukan untuk memisahkan sebuah elektron dari suatu atom (energi ionisasi) dan energi yang diperoleh dalam menambahkan sebuah elektron (afinitas elektron). Tabel 24 memberikan nilai elektronegativitas dari beberapa elemen.

Tabel 24 Elektronegativitas dari beberapa elemen

H	2.20						
Li	0.98	Be 1.57	C 2.55	N 3.04	O 3.44	F 3.98	
Na	0.93	Mg 1.31	Si 1.90	P 2.19	S 2.58	Cl 3.16	
K	0.82	Ca 1.00	Ge 2.01	As 2.18	Se 2.55	Br 2.96	
Rb	0.82	Sr 0.95	Sn 1.96	Sb 2.05	Te 2.10	I 2.66	
Cs	0.79	Ba 0.89					

Sumber: Krane 2013

Gambar 8. 21 Beda elektronegatif



Sumber: Krane, 2013

Jika dua atom memiliki elektronegativitas yang setara, maka akan timbul kecenderungan molekul yang dibentuk oleh keduanya adalah molekul akibat ikatan kovalen, dimana elektron dipakai secara bersama – sama. Namun jika dua atom memiliki nilai elektronegativitas yang berbeda, maka keduanya akan cenderung membentuk ikatan ionik, dimana satu elektron didominasi oleh atom tertentu. Beberapa molekul telah diidentifikasi besar

fraksi karakter ionik beserta selisih nilai elektronegativitas (Gambar 8.21). Walaupun data yang diperoleh tersebar, namun terlihat bahwa ada molekul dengan beda elektronegativitas kecil hanya memiliki sedikit esifat ionik dan akan cenderung membentuk ikatan kovalen. Sementara molekul dengan beda elektronegativitas besar cenderung membentuk ikatan ionik.

Rangkuman

1. Ikatan kovalen adalah ikatan yang melibatkan pemakaian bersama elektron oleh atom-atom atau overlapping fungsi gelombang elektron yang membentuk ikatan.
2. Ikatan kovalen pada pembahasan ini dijelaskan pada ikatan kovalen keadaan di sub kulit 1s, 2s, dan sub kulit 2p. overlapping fungsi gelombang elektron menghasilkan keadaan simetri (bonding) yang menghasilkan molekul lebih stabil dan keadaan anti simetri (antibonding state) yang mereduksi kestabilan molekul.
3. Beberapa sifat khusus pada ikatan kovalen diantaranya:
 - a. Disaat dua atom digabung menjadi satu, maka interaksi antar elektron, keadaan atomic dan tingkatan energi bertransformasi menjadi keadaan molekuler.
 - b. Tiap keadaan molekuler terjadi overlapping fungsi gelombang sebagai upaya untuk menemukan energi terendah dibandingkan energi pemisahan molekul. Upaya ini juga dilakukan agar molekul mencapai kestabilan.
 - c. keadaan molecular lainnya (*antibonding state*) memiliki energi yang meningkat relatif terhadap pemisahan antar atom dan tidak memberikan formasi molekul stabil.
 - d. larangan pauli diaplikasikan pada keadaan molekuler sama seperti pada keadaan atomic. Tiap keadaan molekuler memiliki okupansi maksimum sebanyak dua elektron yang berhubungan dengan dua orientasi spin berbeda.
4. Ikatan ionik adalah ikatan yang melibatkan gaya tarik menari elektrostatik dari ion yang berbeda jenis.
5. Fraksi karekter ionik adalah perbandingan momen dipol terukur dengan momen dipol dari molekul ionik murni

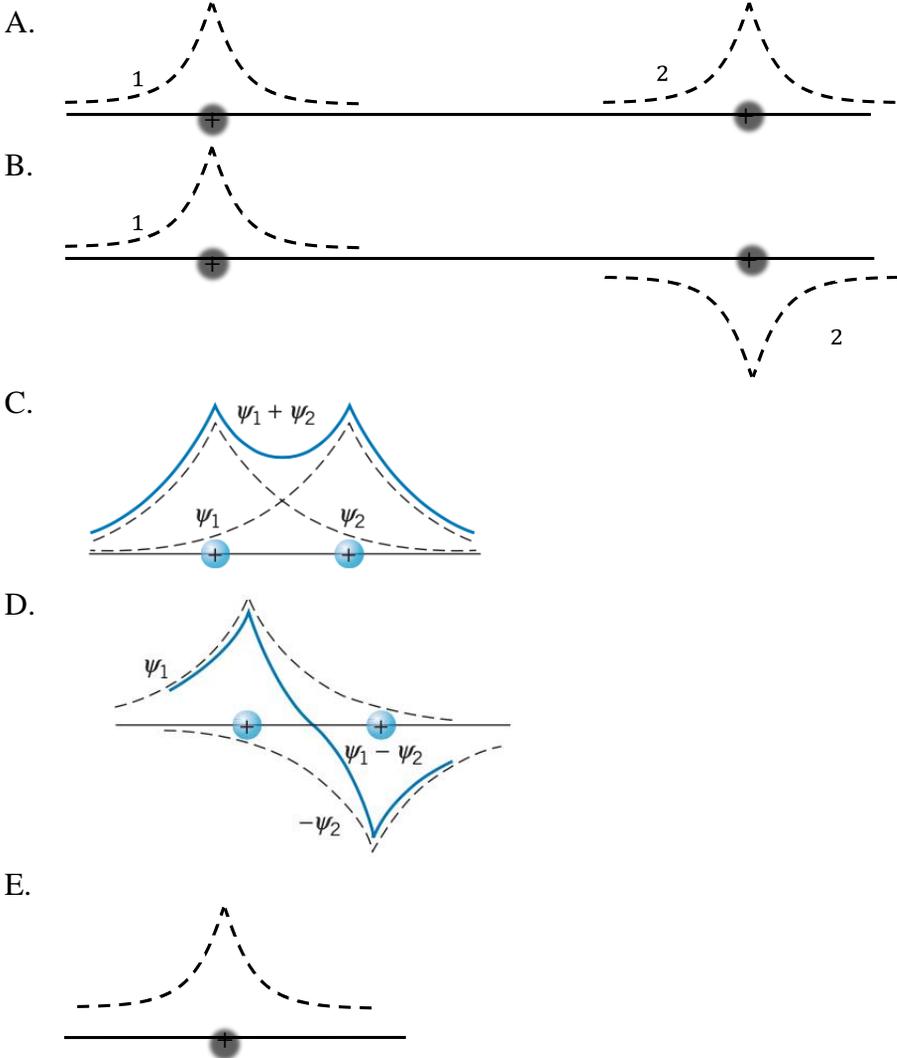
$$\text{fraksi karakter ionik} = \frac{p_{\text{measured}}}{qR_{eq}}$$

6. Sebuah molekul dapat ditentukan dominan merupakan ikatan kovalen atau ikatan ionik jika dilihat dari momen dipol yang terbentuk, fraksi karakter ionik dan beda elektronegativitas atom – atom penyusunnya.

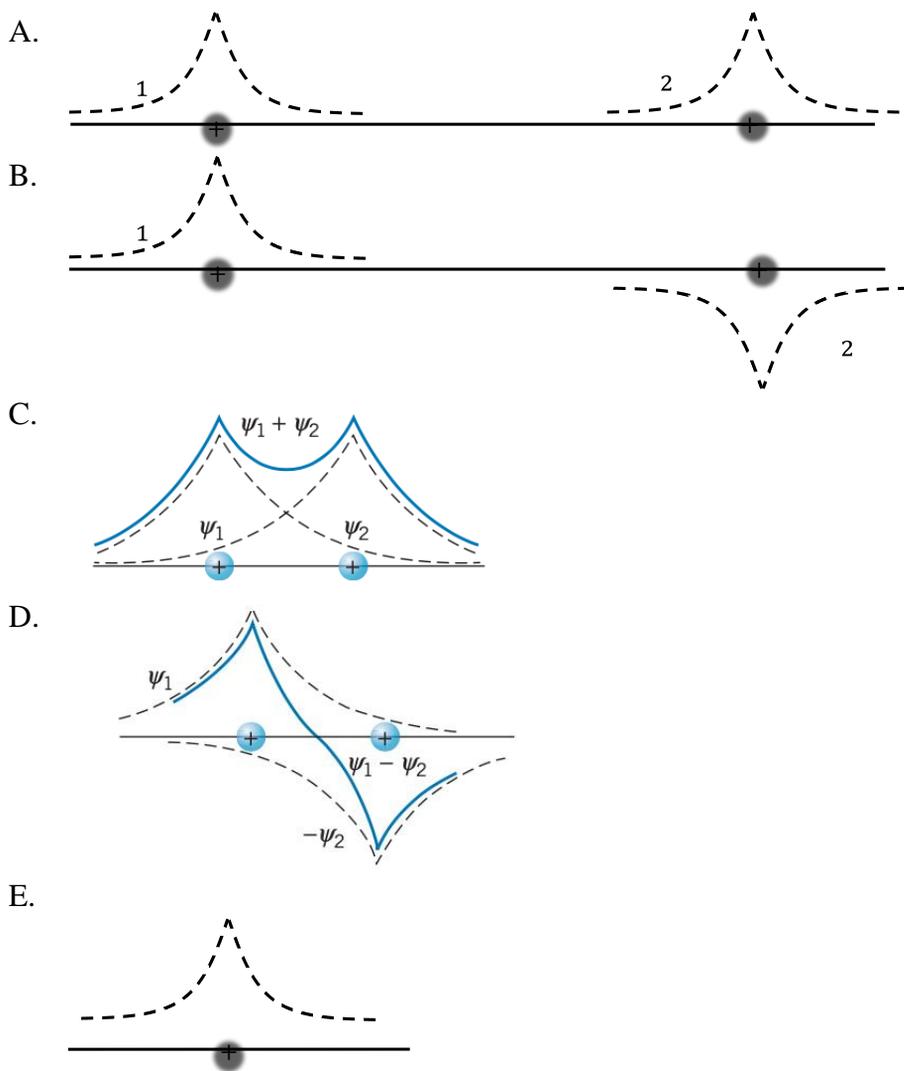
Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Diagram kombinasi fungsi gelombang yang menunjukkan terbentuknya molekul H_2^+ yang lebih stabil adalah ...



2. Diagram kombinasi fungsi gelombang yang menunjukkan antibonding state adalah ...



3. Perhatikan pernyataan berikut:

- (1) Energi ikat dari molekul H_2^+ adalah $2,7\text{eV}$
- (2) Energi ikat dari molekul H_2 lebih besar dari H_2^+
- (3) Densitas probabilitas elektron pada molekul H_2 lebih besar dari H_2^+
- (4) Energi ikat diperoleh dari selisih elektronegativitas dengan energi yang diperlukan untuk memisahkan H_2^+ menjadi atom H dan ion H^+

Penyataan yang benar adalah

- | | |
|--------------------|----------------|
| A. (1) (2) dan (3) | D. (4) saja |
| B. (1) dan (3) | E. Semua benar |
| C. (2) dan (4) | |

4. Perhatikan pernyataan berikut.

- (1) Disaat dua atom digabung menjadi satu, maka interaksi antar elektron pada keadaan atomic dan tingkatan energi bertransformasi menjadi keadaan molekuler.
- (2) Tiap keadaan molekuler terjadi overlapping fungsi gelombang sebagai upaya agar molekul mencapai kestabilan.
- (3) *Antibonding state*) memiliki energi yang meningkat relatif terhadap pemisahan antar atom dan tidak memberikan formasi molekul stabil.
- (4) larangan pauli tidak berlaku pada kombinasi fungsi gelombang

Pernyataan yang benar adalah

- | | |
|--------------------|----------------|
| A. (1) (2) dan (3) | D. (4) saja |
| B. (1) dan (3) | E. Semua benar |
| C. (2) dan (4) | |

5. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Fraksi karakteristik ionik
- (2) Selisih elektronegativitas
- (3) Momen dipol
- (4) Jarak pisah antara dua nukleus

Besaran yang dapat digunakan untuk membedakan ikatan ionik dan kovalen dari sebuah molekul adalah ...

- | | |
|--------------------|----------------|
| A. (1) (2) dan (3) | D. (4) saja |
| B. (1) dan (3) | E. Semua benar |
| C. (2) dan (4) | |

6. Molekul berikut yang lebih bersifat sebagai molekul kovalen adalah

- | | |
|--------------------|--------|
| A. NaCl | D. KCl |
| B. HF | E. LiH |
| C. CH ₄ | |

7. Molekul berikut yang lebih bersifat sebagai molekul ionik adalah

- | | |
|--------------------|--------------------------------|
| A. NaCl | D. H ₂ |
| B. Na ₂ | E. H ₂ ⁺ |
| C. CH ₄ | |

8. Urutan molekul berikut dari yang kurang stabil hingga stabil adalah
- A. $H_2^+ \rightarrow H_2 \rightarrow C_2H_2$ D. $F_2 \rightarrow O_2 \rightarrow N_2$
 B. $N_2 \rightarrow O_2 \rightarrow F_2$ E. $C_2H_2 \rightarrow H_2 \rightarrow H_2^+$
 C. $F_2 \rightarrow N_2 \rightarrow O_2$
9. Jumlah elektron pada antibonding state dari amoniak adalah ...
- A. 0 D. 6
 B. 2 E. 10
 C. 3
10. Molekul yang menunjukkan struktur cincin karbon pada ikatan kovalen sp^2 hibrida dengan sudut 120° antar keadaan hibrida adalah ...
- A. CH_2 D. C_2H_4
 B. CH_4 E. C_6H_6
 C. C_2H_2

Essay

1. Apa yang dimaksud dengan antibonding state dan bonding state?

Jawab:

2. Jelaskan apa yang dimaksud dengan : (berikan juga contoh molekulnya masing – masing 1)
- a. Ikatan kovalen pp

Jawab:

b. Ikatan kovalen sp

Jawab:

c. Ikatan kovalen sp hibrida

Jawab:

3. NaCl adalah molekul ionik (Tabel 20) dan juga molekul kovalen (Tabel 23). Bagaimana kamu menjelaskan jenis ikatan yang dimiliki oleh NaCl ini? Sifat manakah yang mendominasi?

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

- Kenneth Krane, *Modern Physics*, 3rd ed., John Willey & Son, 2011.
Kusminarto, *Esensi Fisika Modern*, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.
Beiser, A., *Concept of Modern Physics*, 6th ed., McGraw Hill, 2003.

Kegiatan Pembelajaran 2 SPEKTRUM MOLEKULAR

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa mampu menjelaskan spektrum elektronik pada molekul	a. Mahasiswa bisa menjelaskan vibrasi dan rotasi molekul b. Mahasiswa bisa menjelaskan spektrum energi pada molekul

Uraian Materi

Elektron memegang peranan penting pada kekuatan ikatan molecular dan geometri molekul. Molekul dapat menyerap dan melepas energi dengan mengubah konfigurasi elektron-elektronnya sebagaimana atom. Salah satu karakteristik dari molekul adalah bahwa molekul – molekul bervibrasi pada keadaan ekuilibrium (setimbang), seperti benda bermassa pada sebuah pegas. Atom -atom pada molekul juga berotasi terhadap pusat massa molekul. Energi vibrasi dan rotasi ini kemudian menjadi karakteristik atau identitas atau “sidik jari” bagi tiap molekul.

A. Energi Vibrasi

1. Vibrasi dalam Mekanika Kuantum

Sistem vibrasi secara klasi dijelaskan seperti sebuah benda bermassa yang diikatkan pada ujung pegas dengan konstanta gaya k dan frekuensi osilasinya diberikan :

$$\omega = \sqrt{\frac{k}{m}}$$

Energi potensial osilator adalah

$$U = \frac{1}{2}kx^2$$

Dengan amplitudo maksimum x_m , sehingga energi totalnya diberikan oleh

$$E = \frac{1}{2}kx_m^2$$

Untuk osilator klasiktidak diberikan batas total energi atau frekuensi osilator, diperbolehkan pada nilai berapa pun, dengan energi dan frekuensi saling independent.

Pada modul 5 kita telah mempelajari tentang sifat osilator kuantum , yang menyatakan hanya nilai – nilai tertentu yang diperbolehkan. Nilai – nilai enrgi yang diperbolehkan pada sebuah osilator dalam satu dimensi dinyatakan dengan :

$$E_n = \left(n + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega = \left(n + \frac{1}{2}\right) hf \text{ dengan } n = 0, 1, 2, 3, \dots \quad 8.4$$

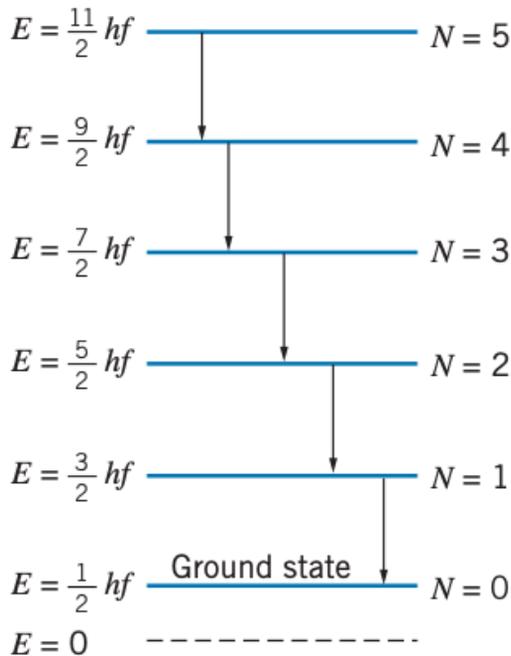
Dimana ω adalah frekuensi osilator klasik.

Energi dasar (ground state) diberikan oleh

$$E_{gs} = \frac{1}{2} \hbar\omega = \frac{1}{2} hf$$

Dan beda energi pada tiap keadaan eksitasi berikutnya setara dengan selisih $\hbar\omega = hf$ (Gambar 8.22).

Gambar 8. 22 Tingkatan energi pada osilator kuantum



Catat bahwa energi dasar (ground state) tidak nol ini merupakan konsekuensi dari prinsip ketidakpastian Heisenberg. Sebuah osilator dengan $E=0$ akan memiliki perpindahan yang tepat nol dan juga momentum tepat nol, yang tidak sesuai dengan prinsip ketidakpastian posisi dan momentum. Energi

minimum $\frac{1}{2} hf$ ini biasa juga disebut sebagai **zero point energy** atau energi titik nol yang memiliki konsekuensi yang dapat diobservasi.

Osilator dapat mengemisikan radiasi elektromagnetik saat melompat ke *state* yang lebih rendah atau juga dapat mengadsorb (menyerap) energi untuk melompat ke tingkat energi yang lebih tinggi. Meskipun demikian, lompatan ini tidak dapat tampak dalam langkah sembarang. **Transisi yang diperbolehkan adalah yang sesuai dengan n** . Batasan ini dikenal sebagai **aturan seleksi** dan diaplikasikan hanya untuk transisi yang tampak pada emisi atau absorbs radiasi elektromagnetik.

$$\text{Aturan seleksi vibrasi : } \Delta n = \pm 1 \qquad 8.5$$

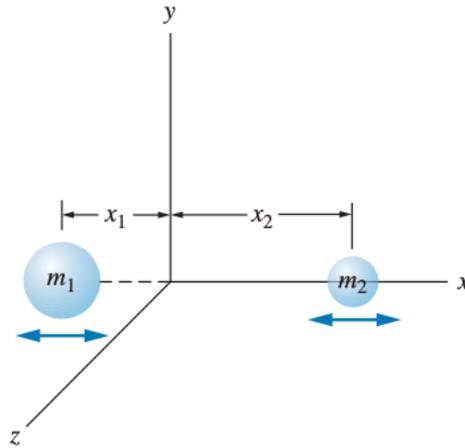
Fenomena selain lompatan, misalnya tumbukan tidak mengikuti aturan seleksi ini.

Meskipun osilator harmonik telah disederhanakan namun kita dapat menemukan perilaku khas dari sistem ini. Dalam sebuah molekul, tiap individu atom dapat bervibrasi relatif terhadap pusat massa. Sebuah nukleus atom biasanya dimodelkan seperti sebuah tetesan likuid yang bervibrasi. Kedua sistem ini memiliki property (sifat) yang umum sama dengan osilator kuantum, meski konstanta gaya efektif k tidak terlalu konstan dengan sistem ini, yang mana dapat kehilangan kekakuannya seiring dengan peningkatan energi eksitasi. Dalam zat padat, atom – atom biasanya berperilaku seperti osilator tiga dimensi, sistem yang memiliki perbedaan dengan osilator 1 dimensi.

2. Vibrasi Molekul Diatomik

Sebuah molekul yang terdiri lebih dari dua atom dapat bervibrasi dengan banyak cara jadi untuk menyederhanakan kajian, kita gunakan molekul diatomic saja (Gambar 8.23) dengan pusat massa tetap di titik orogin (0,0). Untuk menghitung frekuensi gelombang elektromagnetik yang diemisikan, maka kita perlu mengetahui massa m dan konstanta gaya efektif k . karena kedua atom dalam molekul sama -sama berpartisipasi dalam vibrasi, maka massa vibrasi ini bukan hanya massa atom, melainkan kombinasi dari kedua massa. Misalkan massa dari kedua atom adalah m_1 dan m_2 , keduanya melalui posisi setimbang (ekuilibrium), dan total energi dari sistem ini adalah energi kinetiknya, maka :

Gambar 8. 23 Molekul diatomik yang bervibrasi. Pusat massa dari molekul dianggap tetap pada titik origin (0,0) dari sistem koordinat



$$E_T = \frac{1}{2} m_1 v_1^2 + \frac{1}{2} m_2 v_2^2 = \frac{p_1^2}{2m_1} + \frac{p_2^2}{2m_2} \quad 8.6$$

Dalam kerangka acuan pada pusat massa dari molekul yang tetap, maka momentum totalnya adalah nol, sehingga $p_1 = p_2$ dan energi nya dapat dituliskan : $p = p_1 = p_2$

$$E_T = \frac{1}{2} p^2 \left(\frac{1}{m_1} + \frac{1}{m_2} \right) = \frac{1}{2} p^2 \left(\frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2} \right) = \frac{p^2}{2m} \quad 8.7$$

$$m = \frac{m_1 + m_2}{\frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}} \quad 8.8$$

Dengan demikian, energi dari sistem sama dengan jika hanya terdapat sebuah massa m yang bergerak dengan momentum p . m adalah massa efektif dari seluruh molekul dan kemudian disebut sebagai **massa reduksi**. Massa reduksi adalah massa yang perlu digunakan saat menghitung frekuensi vibrasi. Sebelumnya kita sudah menggunakan massa reduksi dari elektron dan proton saat menganalisis atom hidrogen.

Perhatikan bahwa $m = \frac{m_1}{2}$ ketika $m_1 = m_2$ pada molekul homonuklir, artinya massa efektif adalah setengah dari massa individu tiap atom. Ketika satu massa lebih besar dari lainnya, massa reduksi akan mendekati besar massa yang paling kecil. Hal ini sesuai dengan perkiraan kita, karena inersia massa yang lebih besar mereduksi kecenderungannya untuk bergerak dan kebanyakan gerak vibrasinya dilakukan oleh massa yang lebih ringan.

Perhitungan konstanta gaya efektif untuk gerak vibrasi diilustrasikan pada contoh kasus berikut:

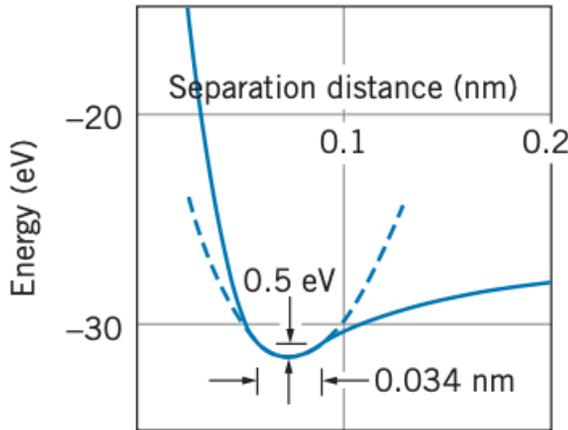
Contoh kasus

Tentukan frekuensi vibrasi dan energi foton dari H₂

Solusi

Untuk menemukan frekuensi, kita perlu tahu konstanta gaya k. Untuk menentukan nilai k, kita anggap molekul berperilaku seperti sebuah osilator harmonik sederhana dalam ruang vakum yang sedang berada dalam kesetimbangan terpisah sejauh R_{eq} kemudian kita fitting energi potensial osilatornya $U = \frac{1}{2}kx^2$ untuk daerah energi molecular.

Gambar 8. 24 Fitting parabola dengan energi minimum dari H₂



Sumber: Krane, 2013

Gambar 8.24 menunjukkan daerah energi minimum dan sebuah parabola yang mendekati kurva dekat minimum. Persamaan parabola diberikan oleh

$$E - E_{min} = \frac{1}{2}k(R - R_{eq})^2 \tag{8.9}$$

Konstanta k dapat ditentukan berdasarkan grafik dengan menentukan nilai dari $R - R_{eq}$ yang diperlukan untuk beberapa nilai tertentu dari $E - E_{min}$. Sebagaimana yang ditunjukkan oleh gambar,

Ketika:

$$E - E_{min} = 0,50eV$$

Maka nilai dari

$$R - R_{eq} = \frac{1}{2}(0,034 \text{ nm}) = 0,017 \text{ nm}$$

Kemudian kita selesaikan persamaan 8.9 untuk memperoleh nilai k sebesar

$$k = \frac{2(E - E_{min})}{R - R_{eq}} = \frac{2(0,50eV)}{(0,017 \text{ nm})^2} = 3,5 \times 10^3 \frac{eV}{nm^2} = 3,5 \times 10^{21} \frac{eV}{m^2}$$

Massa reduksi dari molekul hidrogen adalah setengah dari massa sebuah atom hidrogen. Kita kemudian bisa menghitung besar frekuensi vibrasi:

$$\begin{aligned} f &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{kc^2}{mc^2}} \\ &= \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{(3,5 \times 10^{21} \frac{eV}{m^2})(3 \times 10^8 m/s)^2}{(0,5)(1,008 u)(931,5 \times 10^6 eV/u)}} \\ &= 1,3 \times 10^{14} \text{ Hz} \end{aligned}$$

Energi fotonnya adalah sebesar

$$E = hf = (4,14 \times 10^{-15} eV \cdot s)(1,3 \times 10^{14} \text{ Hz}) = 0,54eV$$

Panjang gelombang yang diemisikan adalah $2,3 \mu\text{m}$, yang berada pada region inframerah. Vibrasi molekular secara khusus mengemisikan foton pada spektrum inframerah.

Catatan: kurva berbentuk parabola menunjukkan pendekatan energi actual hanya untuk energi diatas 1eV diatas energi minimum, yang menunjukkan eksitasi pertama ($n = 2$). Jika kita ingin mengeksitasi molekul H_2 pada energi yang lebih besar dari 1eV diatas ground state maka kita akan mengharapkan adanya penyimpangan yang dihasilkan dari osilator harmonik sederhana. Secara khusus, semua transisi tidak lagi akan memiliki energi yang sama dan mengalami perubahan selain $\Delta n = \pm 1$. pada molekul lain, pendekatan osilator harmonik sederhana dapat tetap valid untuk vibrasi yang lebih besar nomor kuantumnya.

Energi vibrasi seringkali dapat ditemukan dalam tabulasi property (sifat) molekul. Seringkali tabulasi ini memberikan energi dalam cm^{-1} . Untuk

mengkonversinya dalam eV, kalikan dengan factor konversi $hc = 1,24 \times 10^{-4} eV \cdot cm$. Sebagai rangkuman pada bagian ini, kita mempelajari vibrasi molekul untuk dapat mengetahui deskripsi gerak di dekat energi minimum dengan deret energi foton yang diserap atau diemisikan adalah kelipatan hf , sesuai dengan kelipatan bilangan kuantum. Energi yang diradiasikan atau diserap oleh vibrasi molekul adalah dalam spektrum inframerah.

Melihat energi vibrasi yang diperoleh dari contoh kasus dan mengetahui bahwa energi translasi rata – rata dari molekul hidrogen pada suhu ruang adalah hanya 0,025eV. Menunjukkan bahwa molekul hidrogen pada suhu ruang ini tidakmungkin mengalami vibrasi. Ini menjelaskan kenapa atom hidrogen “membeku” pada suhu ruang dan mengapa kapasitas panas molekul hidrogen di suhu ruang tidak memenuhi 7 derajat kebebasannya (lihat Modul 1).

Energi vibrasi dari F_2 adalah 0,11eV, sehingga walaupun dalam suhu ruangan kapasitas panas dari gas fluorin ini akan mulai meningkat diatas nilai yang menunjukkan karakteristik derajat kebebasan 5 (yang melibatkan gerak translasi dan rotasi). Pada suhu 1000K, dimana energi panas rata-rata sekitar 0,075eV, keadaan vibrasi F_2 menjadi sangat mudah tereksitasi dan kapasitas panas dari F_2 memenuhi derajat kebebasan 7.

Oksigen memiliki energi vibrasi yang lebih besar, yaitu 0,20eV; sulit untuk menambah energi sebesar ini di dalam gas yang rerata energinya hanya 0,025eV. Pada suhu ruang 300K kapasitas panas oksigen memenuhi 5 derajat kebebasan (translasi + rotasi); dan pada 1000K kapasitas panas meningkat tapi belum mencapai 7 derajat kebebasan. Nitrogen memiliki energi vibrasi yang paling besar, yaitu 0,29eV sehingga kapasitas panasnya lebih rendah dari F_2 dan O_2 pada 1000K.

B. Energi Rotasi

Cara lain dari molekul untuk menyerap dan mengemisikan energi adalah dengan berotasi pada sumbu pusat massanya. Keadaan rotasi pada molekul dijelaskan dengan momentum anguler. pada kajian ini kita akan secara khusus membahas bagaimana momentum anguler dalam mekanika kuantum dan keadaan rotasi yang dihasilkan dari molekul diatomic.

1. Rotasi dalam Mekanika Kuantum

Sebuah rotor rigid dengan momen inersia I memiliki energi kinetik rotasi sebesar:

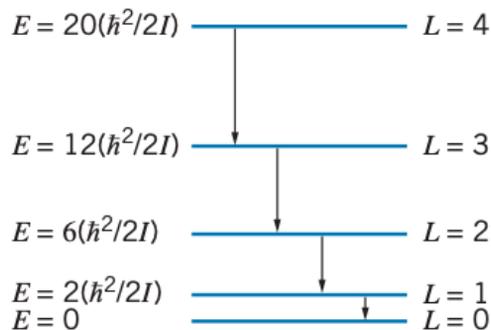
$$K = \frac{1}{2}I\omega^2 = \frac{1}{2} \frac{L^2}{I}$$

Dimana L adalah momentum anguler

$$L = I\omega$$

Karena tidak ada hasil umum untuk kuantisasi momentum linear atau energi kinetik translasi dalam mekanika kuantum, maka kita dapat membayangkan sebuah rotor ini menjadi sebuah partikel dengan massa m yang berotasi pada sebuah batang tak bermassa dengan panjang r . Meskipun yang perlu kita ingat adalah dalam mekanika kuantum tidak mungkin untuk berotasi dengan sumbu tetap. Tinjauan kuantum dari rotor rigid ini hanya cukup untuk menjelaskan sebagai partikel yang terikat untuk bergerak dalam 3 dimensi dalam bola dengan radius r jika dibandingkan dengan sebuah lingkaran berjari-jari r .

Gambar 8. 25 Tingkat energi rotasi pada molekul



Sumber: Krane(2013)

Penyelesaian matematis untuk fungsi gelombang rotor tiga dimensi agak menyulitkan dan tidak dibahas di buku ini, namun tingkat energinya secara khusus dapat kita nyatakan dengan cara yang sederhana, yaitu:

$$E_\ell = \frac{\ell(\ell+1)\hbar^2}{2I} \text{ dengan } \ell = 0, 1, 2, 3, \dots \quad 8.10$$

Dengan ℓ adalah bilangan kuantum momentum anguler. Tingkat rotasi dinyatakan dengan energi sebesar $0,2 (\hbar^2/2I)$, $6 (\hbar^2/2I)$, $12 (\hbar^2/2I)$, (Gambar 8.25). perhatikan bahwa jika kita membandingkan dengan tingkat

energi vibrasi, energi rotasi tidak memiliki jarak yang sama. Celah atau selisih energi ini mengalami peningkatan saat energi meningkat.

Persamaan 8.10 diperoleh dari energi kinetik rotasi dengan mengganti momentum angular klasik dengan momentum angular kuantum, sehingga diperoleh:

$$|\vec{L}| = \sqrt{L(L + 1)}\hbar$$

(disini kita menggunakan huruf L kapital untuk merepresentasikan bilangan kuantum momentum angular dari sebuah sistem molekul.

Molekul dan nukleus adalah analogi yang baik saat menggunakan rotor kuantum, karena antara molekul dengan nuclei tidak terdapat ikatan yang tetap. Saat momentum angular meningkat dan rotasi sistem dalam laju paling besar, maka katan molekul akan mengalami tarikan (stretch), yang meningkatkan momen inersia dan menurunkan jarak rotasi.

Keadaan kuantum dari rotor bisa diubah melalui radiasi elektromagnetik baik diemisikan ataupun diserap. Sama seperti energi vibrasi, energi rotasi juga memiliki *aturan seleksi* yang membatasi pada tingkat mana elektron dapat melompat ketika radiasi dipancarkan atau diserap. Aturan seleksi diberikan oleh:

$$\text{Aturan seleksi rotasi: } \Delta L = \pm 1 \qquad 8.11$$

Dari persamaan 8.11 kita peroleh lompatan rotasi yang diperbolehkan hanya yang melalui perubahan sebesar satu satuan dalam bilangan kuantum momentum angular. secara praktis kita menemukan bahwa aturan seleksi ini tidak absolut namun transisi elektromagnetik hanya mengalami perubahan terhadap bilangan kuantum momentum angular (Gamabr 8.25)

2. Rotasi Molekul Diatomik

Rotasi molekul diatomic (Gambar 8.26) yang berotasi terhadap titik pusat massa, sehingga memenuhi

$$x_1 m_1 = x_2 m_2$$

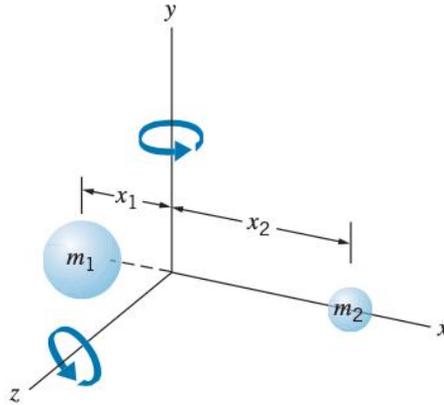
Momen inersia dari sistem rotasi molekul diatomic ini adalah

$$I = x_1 m_1^2 + x_2 m_2^2$$

Dengan massa reduksi diberikan oleh

$$m = \frac{m_1 + m_2}{m_1 m_2}$$

Gambar 8. 26 Rotasi dari molekul diatomik



Sumber: Krane(2013)

Dan jarak pisah ekuilibrium diberikan oleh

$$R_{eq} = x_1 + x_2$$

Maka

$$I = mR_{eq}^2$$

Dan energi pada keadaan rotasi adalah

$$E_L = \frac{L(L + 1)\hbar^2}{2mR_{eq}^2} = B(L + 1)$$

Dimana parameter B adalah parameter rotasi untuk molekul diatomic, yang dinyatakan dengan

$$B = \frac{\hbar^2}{2mR_{eq}^2} \tag{8.12}$$

Foton yang diemisikan dan diabsorpsi harus mengikuti aturan seleksi

$$\Delta L = \pm 1$$

Sehingga energi foton yang diemisikan adalah selisih energi antara dua tingkat terdekat yang dinyatakan dengan:

$$\Delta E = E_{L+1} - E_L = B(L + 1)(L + 2) - BL(L + 1) = 2B(L + 1) \tag{8.13}$$

Jika dibandingkan dengan eksitasi vibrasi yang memiliki selang energi yang sama, energi rotasi ini hanya bergantung pada L (Gambar 8.25). foton yang diemisikan dinyatakan dalam 2B, 4B , 6B ,... dan seterusnya.

Contoh Kasus

Hitung energi terendah dan panjang gelombangnya masing masing dari radiasi foton yang diemisikan oleh rotasi molekul H₂

Solusi

Energi foton setara dengan selisih energi antar tingkatan (Gambar 8.13). untuk mengevaluasi energi ini kita harus menentukan besar kuantitas rotasi B. untuk molekul H₂ masa reduksi adalah setengah dari massa satu atom hidrogen, sehingga:

$$\begin{aligned} B &= \frac{\hbar^2}{2mR_{eq}^2} = \frac{\hbar^2 c^2}{2mc^2 R_{eq}^2} \\ &= \frac{(197,3eV \cdot nm)^2}{2(0,5 \times 1,008u \times 931,5MeV/u)(0,074nm)^2} \\ &= 0,0076eV \end{aligned}$$

Persamaan 8.12 kini memnerikan besar energi dan besar panjang gelombang yang diberikan dari persamaan $\lambda hc/\Delta E$

L = 1 ke L = 0	$\Delta E = 2B = 0,0152eV$	$\lambda = 81,6\mu m$
L = 2 ke L = 1	$\Delta E = 4B = 0,0304eV$	$\lambda = 40,8\mu m$
L = 3 ke L = 2	$\Delta E = 6B = 0,0456eV$	$\lambda = 27,2\mu m$

Energi yang diemisikan oleh foton membentuk sebuah deret aritmatika dengan nilai relatif 1, 2, 3, ... dan mengemisikan panjang gelombang dengan baris kebalikan 1, 1/2, 1/3, ...

Emisi dari transisi rotasi berada pada region inframerah, namun panjang gelombangnya sekitar 1-2 kali lebih besar dibanding transisi vibrasi. Region dari spektrum ini berada pada radiasi inframerah hingga microwave (gelombang mikro).

Sebagai perbandingan dengan gerak vibrasi, yang memiliki energi terendah 0,54eV, energi terendah dari gerak rotasi hanya 0,015eV. Hidrogen pada temperatur ruang yang memiliki energi translasi 0,025 eV dapat dimungkinkan terjadi suatu tumbukan dari dua atom yang mengakibatkan salah satunya berotasi. Oleh sebab itu gerak rotasi pada molekul hidrogen telah muncul pada suhu ruang sehingga molekul H₂ saat suhu ruang telah mencapai 2 derajat kebebasan. Gas yang memiliki massa molekul lebih besar

dari H₂ memiliki energi rotasi yang lebih kecil dan keadaan rotasinya lebih mudah tereksitasi dalam tumbukan, sehingga untuk kebanyakan gas telah memiliki derajat kebebasan rotasi pada suhu ruang.

Contoh Kasus

Gambar 8.27 menunjukkan bagian dari spektrum absorpsi suatu molekul. Tentukan besar momen inersia rotasi dari molekul ini !

Solusi

Setiap puncak dari spektrum absorpsi menunjukkan molekul yang bergerak dari satu tingkat ke tingkat yang lebih tinggi (Gambar 8.25) dengan mengabsorpsi (menyerap) energi foton sebesar yang diperlukan atau sebesar frekuensi yang diperlukan. Besar frekuensi ini bisa dinyatakan sebagai :

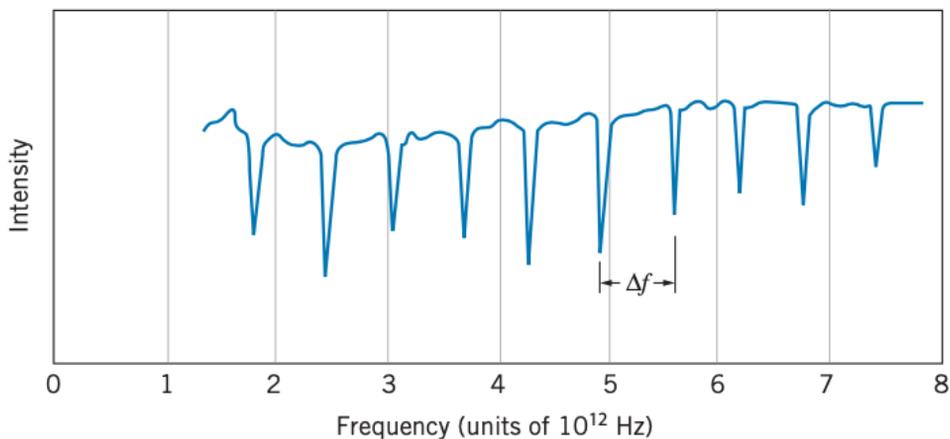
$$f = \frac{\Delta E}{h} = (L + 1) \frac{\hbar}{2\pi I}$$

Momen inersia I ini dinyatakan sebagai:

$$I = mR_{eq}^2$$

Frekuensi yang dimaksud adalah sesuai dengan frekuensi pada sumbu x dari

Gambar 8. 27 Spektrum Absorpsi molekular



Gambar 8.27. namun demikian kita belum bisa menentukan besar I karena kita tidak mengetahui besar L pada setiap puncak. Sehingga untuk

menghindari masalah inikita bisa menghitung perbedaan frekuensi Δf antara dua puncak berdekatan yaitu L dan $L+1$, yang dinyatakan dengan:

$$\Delta f = (L + 2) \frac{\hbar}{2\pi I} - (L + 1) \frac{\hbar}{2\pi I} = \frac{\hbar}{2\pi I}$$

Atau estimasikan selisih Δf antar dua puncak dari Gambar 8.27 adalah $6,2 \times 10^{11} \text{ Hz}$. Sehingga:

$$\begin{aligned} I &= \frac{\hbar}{2\pi\Delta f} = \frac{1,05 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{2\pi(6,2 \times 10^{11} \text{ Hz})} \\ &= 2,7 \times 10^{-47} \text{ kg.m}^2 = 0,016 \text{ u.nm}^2 \end{aligned}$$

Nilai energi ini menunjukkan sebuah molekul dengan massa reduksi 1 u (misalkan hidrogen yang dikombinasikan dengan atom yang lebih berat) dan terpisah sejauh 0,13 nm.

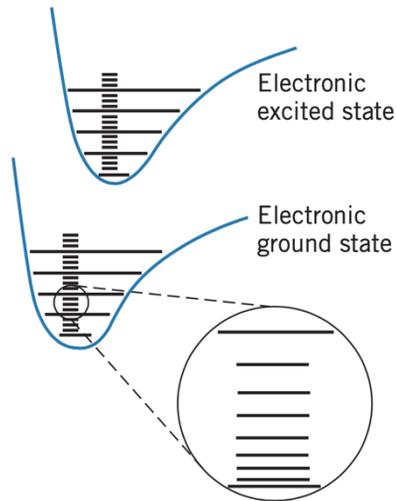
Sebagai rangkuman dari bagian ini, gerak rotasi dari molekul menghasilkan deret energi yang tidak memiliki selisih energi yang sama pada tiap jenjang energi. Tingkat energi rotasi terpisah sebesar 1 hingga 2 kali dari besar terdekat dibandingkan dengan tingkat energi vibrasi. Radiasi foton yang diemisikan dari deret yang lebih tinggi ada pada region inframerah hingga gelombang mikro. Radiasi dari rotasi ini dibatasi oleh aturan seleksi yang mengijinkan bilangan kuantum L berganti dari satu satuan ke satuan berikutnya.

C. Spektrum Molekuler

Sebuah molekul dapat mengemisikan atau mengabsorpsi energi dengan cara yang beragam, sebagaimana telah digambarkan diagram energi pada Gambar 8.28. Energi yang diemisikan dan diabsorpsi ini dapat mengubah keadaan elektron pada molekul. Energi yang diperlukan untuk membuat perubahan keadaan elektron dinyatakan dalam eV dan menunjukkan foton pada spektrum cahaya tampak. Telah dijelaskan sebelumnya, selain memiliki keadaan elektron, spektrum molekul juga terdiri dari keadaan rotasi dan vibrasi. Keadaan vibrasi memiliki celah energi sekitar 0,1 – 1 eV. Keadaan rotasi tidak memiliki celah energi yang sama, namun besar celah energinya ada pada kisaran yang lebih rendah dari vibrasi, yaitu sekitar 0,01 – 0,1 eV. Karena celah energi rotasi yang lebih kecil dari vibrasi ini maka dapat

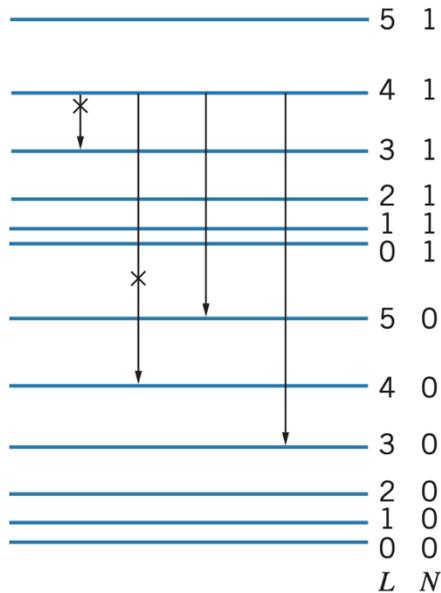
disebutkan bahwa tiap keadaan vibrasi terdiri dari basis deret keadaan rotasi (Gambar 8.29).

Gambar 8. 28 Skema tingkat energi elektron, vibrasi dan translasi pada molekul



Sumber: Krane, 2013

Gambar 8. 29 Kombinasi tingkat energi vibrasi dan rotasi pada sebuah molekul. Transisi ditandai dengan tanda x menunjukkan transisi yang tidak diperbolehkan menurut aturan seleksi



Gambar 8.20 menunjukkan secara detail bagaimana skema energi vibrasi (dengan bilangan kuantum N) dan rotasi (dengan bilangan kuantum L), bergantung pada sifatnya, ada molekul yang hanya menunjukkan struktur vibrasi dan ada juga yang hanya menunjukkan struktur rotasi. Pada banyak molekul transisi antar energi harus terjadi secara simultan memenuhi aturan seleksi dari vibrasi dan rotasi, yang dinyatakan dengan:

$$|\Delta N| = 1 \text{ dan } |\Delta L| = 1 \quad 8.14$$

Keadaan kuantum dengan bilangan kuantum $N = 1$ dan $L = 4$ diberikan oleh Gambar 8.29. Molekul tidak dapat bertransisi ke keadaan rotasi terendah berikutnya ($N = 1, L = 3$) karena akan bertentangan dengan aturan seleksi vibrasi $|\Delta N| = 1$. Seluruh transisi harus secara simultan memenuhi aturan seleksi. Oleh karena itu, molekul ini akan dapat melakukan transisi dengan $N = 0$ dan $L = 3$ atau pada keadaan dengan $N = 0$ dan $L = 5$. Transisi absorbs juga harus memenuhi aturan seleksi ini.

Sekarang mari kita rumuskan secara umum persamaan energi yang memenuhi kedua aturan seleksi ini. Energi pada keadaan bilangan kuantum N dan L dapat dinyatakan dalam bentuk sumasi vibrasi dan rotasi sebagai berikut:

$$E_{NL} = \left(N + \frac{1}{2} \right) hf + BL(L + 1) \quad 8.15$$

Dimana

$$N = 0, 1, 2, \dots$$

Dan

$$L = 0, 1, 2, \dots$$

Energi vibrasi umumnya lebih besar dibanding rotasi, sehingga panjang gelombang yang diemisikan pada spektrum biasanya menunjukkan

$$N \rightarrow N - 1$$

Dengan

$$L \rightarrow L \pm 1$$

Panjang gelombang absorbs akan memenuhi seperti ini untuk transisi dimana N mengalami peningkatan oleh satu unit.

Untuk absorbs yang berasal dari keadaan awal N, L ke keadaan akhir $N + 1, L \pm 1$, maka energi foton yang mungkin adalah

$$\Delta E = E_{N+1, L \pm 1} - E_{NL} \quad 8.16$$

$$= \left[\left(N + \frac{3}{2} \right) hf + B(L \pm 1)(L \pm 1 + 1) \right] - \left[\left(N + \frac{1}{2} \right) hf + B(L \pm 1)(L + 1) \right]$$

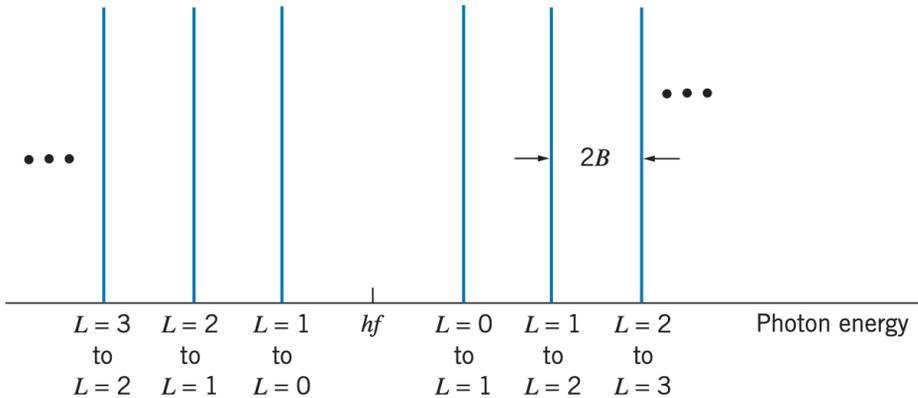
$$\Delta E = hf + 2B(L + 1) \quad \text{Untuk } L \rightarrow L + 1 \quad 8.17$$

$$\Delta E = hf - 2BL \quad \text{Untuk } L \rightarrow L - 1 \quad 8.18$$

Gambar 8.30 menunjukkan spektrum foton yang diabsorpsi. Dimulai dari tengah dan meningkat ke kanan adalah serangkaian foton yang energinya sesuai dengan persamaan 8.17

$$hf + 2B, hf + 4B, hf + 6B, \dots$$

Gambar 8. 30 Baris yang diharapkan dari transisi absorpsi antara keadaan rotasi dan vibrasi. tiap garis vertikal menampilkan absorpsi foton dengan energi



Sumber: Krane, 2013

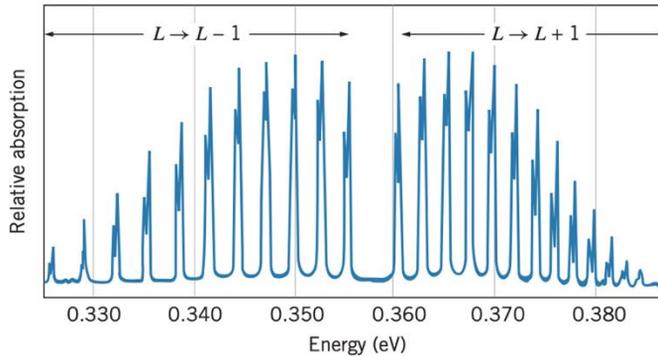
Catatan: energi foton sebesar hf menghilang pada pusat spektrum yang menunjukkan adanya transisi vibrasi murni.

Juga mulai dari tengah ke kiri adalah deret foton yang energinya mengikuti persamaan 8.18:

$$hf - 2B, hf - 4B, hf - 6B, \dots$$

Gambar 8.30 ini dapat kita bandingkan dengan Gambar 8.31 yang menunjukkan spektrum transisi absorpsi molekul HCl. Kedua gambar ini sama sama menunjukkan spektrum energi foton sebesar hf yang hilang pada bagian tengah spektrum. Hilangnya energi foton hf ini menunjukkan transisi vibrasi murni.

Gambar 8. 31 Spektrum Absorpsi Molekul HCl



Perbedaan dari kedua Gambar ini (Gambar 8.30 dan 8.31) menunjukkan adanya perbedaan struktur yang diharapkan dengan struktur energi HCl, yang dijelaskan sebagai berikut:

1. Celah energi pada transisi tidak memiliki besar yang sama.

Kita mengharapkan semua transisi spektrum memiliki besar celah energi yang sama yaitu $2B$, namun tidak pada HCl. Jarak antar garis terlihat menyempit dari tengah ke kanan, sementara dari tengah ke kiri jarak antar garis semakin melebar. Efek ini bisa dijelaskan dengan berasumsi bahwa molekul memiliki struktur yang rigid dengan momen inersia yang konstan. Saat kecepatan angular dan momentum angular meningkat, ikatan yang nonrigid akan mengalami tarikan hingga mulur secara perlahan, sehingga menaikkan nilai R_{eq} .

Persamaan 8.17 menunjukkan energi foton meningkat sedikit cepat jika R_{eq} meningkat, seperti yang ditunjukkan pada bagian $L \rightarrow L + 1$ (Gambar 8.31). Pada sisi lain, kenaikan nilai R_{eq} menyebabkan bagian $L \rightarrow L - 1$ (gambar 8.31) mengalami peningkatan energi lebih cepat (Persamaan 8.18) dan juga menunjukkan peningkatan jarak antar garis di sisi kiri gambar 8.31.

2. Tinggi puncak yang juga tidak sama

Tinggi dari puncak – puncak menunjukkan intensitas transisi dan intensitas dari transisi apapun yang sebanding dengan populasi tingkatan khusus saat energi meningkat, sesuai dengan distribusi Maxwell-Boltzmann dengan factor $e^{-E/kT}$. Populasi juga meningkat dengan kenaikan L sesuai dengan factor $2L +$

1, yang menunjukkan degenerasi momentum anguler pada setiap tingkatan; sebagai efeknya semakin banyak sub keadaan pada tiap level maka akan semakin banyak populasi.

3. Tiap puncak tampak seperti dua puncak yang berdekatan

Atom klorin memiliki dua tipe atom (isotop) yang bermassa 35 u dan 37 u. massa yang berbeda ini akan memberikan kenergi vibrasi dan rotasi yang berbeda untuk kedua isotop. Atom yang lebih berat akan memiliki energi yang lebih rendah, maka puncak atom Cl 37 u akan tampak lebih rendah dibandingkan atom Cl 35 u.

Contoh Kasus

(a) Dari spektrum absorbs HCl (Gambar 8.31), tentukanlah besar konstanta gaya vibrasinya! (b) Tentukan jarak antar energi rotasi tiap puncak dan bandingkan dengan nilai yang diharapkan untuk HCl!

Penyelesaian:

(a) frekuensi vibrasi dapat ditemukan dari energi yang hilang pada bagian tengah transisi (Gambar 8.31). energi ini bisa terbaca dari gambar, sekitar 0,358eV, sehingga:

$$f = \frac{\Delta E}{h} = \frac{0,358 eV}{414 \times 10^{-15} eV \cdot s} = 8,65 \times 10^{13} Hz$$

Massa reduksi dari HCl diperoleh $m = 0,98 u$. kemudian kita dapat menentukan konstanta gaya sebagai berikut:

$$\begin{aligned} k &= 4\pi^2 m f^2 = 4\pi^2 (0,98 u) (8,65 \times 10^{13} Hz)^2 \\ &= 2,89 \times 10^{29} u \cdot Hz^2 = 2,99 \times 10^{21} eV \cdot m^2 \end{aligned}$$

(b) Dari gambar 8.31, jarak antar energi dari setiap puncak diperkirakan sebesar 0,0026eV . Jarak yang diharapkan adalah 2B atau:

$$\begin{aligned} 2B &= \frac{\hbar^2}{mR_{eq}^2} = \frac{(hc)^2/4\pi^2}{(mc^2)R_{eq}^2} \\ &= \frac{(1240 eV \cdot nm)^2/4\pi^2}{(0,98u \times 931,5 MeV/u)(0,127 nm)^2} \\ &= 0,00265 u \end{aligned}$$

Perhitungan diatas sesuai dengan nilai yang diperkirakan dari spektrum.

Rangkuman

1. Spektrum molekuler terdiri dari keadaan elektron, rotasi dan vibrasi
2. Energi vibrasi dinyatakan dengan

$$E_N = \left(N + \frac{1}{2}\right) \hbar\omega = \left(N + \frac{1}{2}\right) hf$$
$$N = 0, 1, 2, 3, \dots$$

3. Aturan seleksi vibrasi dinyatakan dengan

$$\Delta N = \pm 1$$

4. Massa reduksi dinyatakan dengan

$$m = \frac{m_1 m_2}{m_1 + m_2}$$

5. Energi rotasi diberikan oleh:

$$E_L = \frac{L(L+1)\hbar^2}{2mR_{Eq}^2} = BL(L+1)$$
$$L = 0, 1, 2, 3, \dots$$

6. Aturan seleksi rotasi diberikan oleh:

$$\Delta L = \pm 1$$

7. Energi rotasi dan vibrasi molekuler dinyatakan dengan:

$$E_{NL} = \left(N + \frac{1}{2}\right) hf + BL(L+1)$$

Evaluasi Formatif

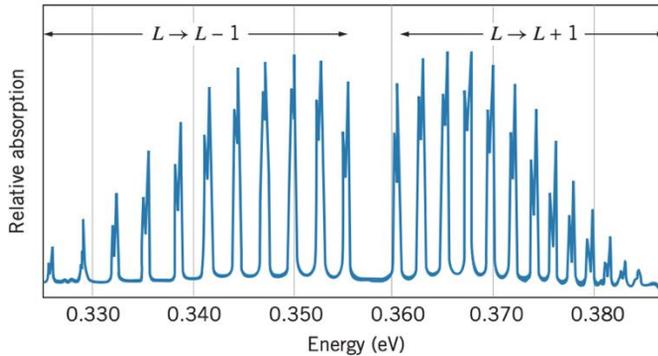
Pilihan Ganda

1. Spektrum molekuler dipengaruhi oleh
 - A. keadaan rotasi
 - B. keadaan elektron
 - C. Keadaan vibrasi
 - D. keadaan elektron, vibrasi dan rotasi
 - E. Keadaan elektron, vibrasi, rotasi dan translasi
2. Besar energi vibrasi molekuler dinyatakan dengan

A. $\left(N + \frac{1}{2}\right) hf$	D. hf
B. $BL(L+1)$	E. $\left(N + \frac{1}{2}\right) hf + BL(L+1)$
C. $\frac{1}{2} I\omega^2$	
3. Besar energi rotasi molekuler dinyatakan dengan

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

8. Spektrum absorpsi pada molekul HCl diberikan sebagai berikut:



Pernyataan yang sesuai adalah ...

- A. Jarak antar energi tidak seragam karena dipengaruhi oleh bilangan kuantum momentum angular (L), ketika momentum angular meningkat maka nilai jarak pisah ekuilibrium (R_{eq}) juga meningkat
- B. Tinggi puncak energi menyatakan intensitas, yang ditentukan oleh jumlah keadaan tiap tingkat energi
- C. Memiliki dua puncak yang berdekatan di setiap tingkat energi yang menunjukkan jumlah isotop Cl
- D. Ketiadaan energi foton di bagian tengah spektrum menunjukkan vibrasi murni
- E. Semua jawaban benar

9. Perhatikan pernyataan berikut

- (1) Molekul H_2 bervibrasi dengan frekuensi $1,3 \times 10^{14} Hz$
- (2) Energi foton yang diemisikan akibat vibrasi molekul H_2 adalah $0,54 eV$
- (3) Energi foton yang diemisikan akibat vibrasi molekul H_2 berada pada spektrum inframerah
- (4) Energi foton yang diemisikan akibat vibrasi molekul H_2 berada pada spektrum cahaya tampak

Pernyataan yang sesuai dengan frekuensi vibrasi dan energi foton dari H_2 adalah

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)
- D. (4) saja
- E. Semua benar

10. Faktor yang mempengaruhi pemuluran ikatan pada keadaan vibrasi molekul diatomic adalah ...

- A. konstanta gaya
- B. populasi atom
- C. populasi molekul
- D. temperatur
- E. medan magnet

Essay

1. Jelaskan bagaimana jarak pisah ekuilibrium bisa ditentukan dengan mengukur spektrum absorbs atau emisi dari keadaan rotasi!

Jawab:

2. Dengan langkah mengikuti contoh soal, tentukan tiga tingkat energi terendah beserta panjang gelombangnya dari transisi rotasi molekul NaCl! Pada region mana gelombang elektromagnetik yang diserap / dipancarkannya? (gunakan massa rata rata dari Cl adalah 35.5 dan dengan $R_{eq} = 0.236 \text{ nm}$)

Jawab:

3. (a) berapa besar masa reduksi dari molekul KCl? (b) dengan jarak pisah ekuilibrium sebesar 0,267 nm, tentukan jarak transisi dari kombinasi spektrum transisi dan rotasi pada KCl! (gunakan massa rata rata dari Cl adalah 35.5)
Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kenneth Krane, Modern Physics, 3rd ed., John Willey & Son, 2011.
Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.
Beiser, A., Concept of Modern Physics, 6th ed., McGraw Hill, 2003.

Penutup

Rangkuman

Struktur molekul menjelaskan tentang ikatan dan fungsi distribusi elektron pada molekul.

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & SOns, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, S. T. (University O. V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengange Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York

MODUL 9

MODEL INTI ATOM

Pendahuluan

Pada tahun 1896 adalah tahun yang menandai lahirnya fisika inti. Fisikawan Prancis Henri Becquerel menemukan keradioaktifan dalam senyawa uranium. Sejak itu para ilmuwan lainnya mengadakan penelitian untuk memahami fenomena alami terpancarnya radiasi oleh inti radioaktif. Dalam pembahasan mengenai masalah struktur atom, inti-inti atom dipandang sebagai massa titik dan muatan titik. Inti atom membawa semua muatan positif dan hampir seluruh massa atom, sehingga merupakan pusat gerak elektron serta sangat mempengaruhi susunan atom terutama lewat interaksi Coulomb dengan elektron-elektronnya.

Percobaan-percobaan hamburan partikel α oleh Rutherford menunjukkan bahwa pada jarak lebih besar dari $10^{-14}m$, inti-inti berinteraksi dengan muatan lain dengan gaya Coulomb. Namun, jika partikel α mendekati pusat inti sampai pada jarak kurang dari $10^{-14}m$, distribusi sudut arah partikel α terhambur tidak dapat dijelaskan menggunakan gaya Coulomb. Eksperimen telah menunjukkan hadirnya suatu gaya jangkauan pendek, yaitu gaya inti yang bekerja pada jarak kurang dari $10^{-14}m$. Inti atom ada yang bersifat stabil, ada pula yang bersifat radioaktif. Inti radioaktif memancarkan radiasi berupa partikel α, β , atau radiasi γ dalam proses keadaan stabil.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).

2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).

3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).

4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)

2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)

2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)

3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)

4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu mengaplikasikan model inti atom
Sikap	a. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan simulasi dan melaporkan hasil simulasinya.

3. Prasyarat Kompetensi

- a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.
- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang riset fisika murni,

5.. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Model inti atom dan gaya nuklir	A. penyusun inti B. muatan inti C. Massa inti D. Spin Inti E. Momen dwikutub magnet inti F. gaya – gaya antar nucleon G. Deuteron
Kestabilan inti	A. Inti Stabil B. jejari inti C. energi ikat inti stabil D. model – model inti

Kegiatan pembelajaran 1 MODEL INTI ATOM DAN GAYA NUKLIR

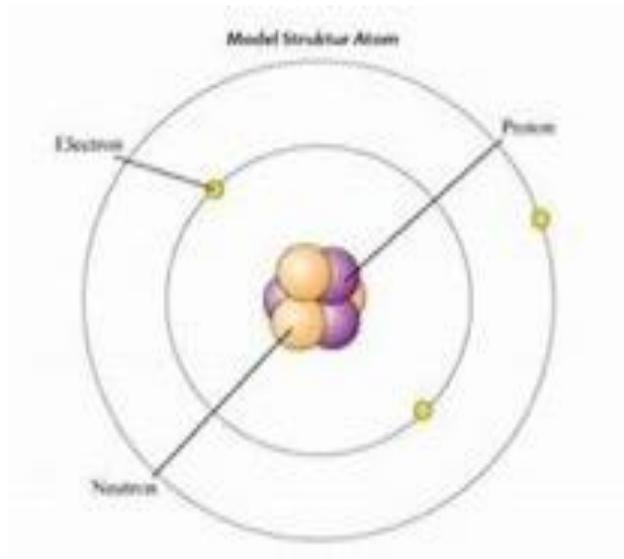
Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa dapat menjelaskan model inti atom dan gaya nuklir	<ol style="list-style-type: none">Mahasiswa dapat menjelaskan apa saja penyusun inti, muatan inti, gaya-gaya antarnukleon dalam inti serta model-model inti.Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana massa inti, spin inti, deuteron, jejari inti, dan energi ikat inti stabil dalam inti.Mahasiswa dapat menjelaskan mengapa dalam momen dwikutub magnet, momen magnetnya tidak sama dengan nol

Uraian Materi

A. Penyusun Inti

Inti-inti tersusun atas proton dan neutron, dasar inti yang tampak adalah muatan, massa, spin, dan momen dwikutub magnet inti. Suatu inti X secara simbolis dituliskan sebagai A_ZX dengan Z adalah nomor atom, yaitu sama dengan cacah dalam inti. Sementara A disebut nomor massa yang merupakan penjumlahan dari cacah proton Z dan cacah neutron N atau $Z+N=A$.

Gambar 9. 1 Struktur atom



Sumber :

<https://www.bing.com/images/search?q=gambar+atom&FORM=HDRSC3>

B. Muatan Inti

Proton adalah inti isotop hydrogen teringan 1_1H bermuatan positif yang besarnya sama dengan muatan electron. Neutron adalah partikel tak bermuatan listrik dengan massa \approx massa proton. Karena tak bermuatan listrik maka neutron tidak dapat menimbulkan efek ionisasi dan hanya dapat dideteksi dan diidentifikasi secara tidak langsung. Kehadiran neutron dihipotesiskan oleh Paulli dan baru teruji pada tahun 1932 oleh J.Chadwick yang mendemonstrasikan sifat-sifat dasarnya dalam beberapa eksperimen reaksi nuklir.

C. Massa Inti

Massa proton dan neutron dalam suatu massa atom u ($1u=1/12$ massa isotop ${}^{12}_6C$) adalah :

1. Massa proton $m_p = 1,007\ 276\ 63 \pm 0,000\ 000\ 08\ u$
2. Energi rehat proton ($m_p c^2$) = $938,256 \pm 0,005\ MeV$
3. Massa neutron $m_n = 1,008\ 665\ 4 \pm 0,000\ 000\ 4\ u$
4. Energi rehat neutron ($m_n c^2$) = $939,550 \pm 0,005\ MeV$

Dengan

$$1 \text{ u} = \text{satuan massa atom} = 931,5 \text{ MeV}/c^2$$

Proton dan neutron mempunyai massa yang hampir sama, selisihnya tidak lebih besar dari 1%, dan keduanya mempunyai energi rehat kurang lebih 939 MeV.

Massa inti

$$\begin{aligned} \frac{A}{Z}X &< (Zm_p + Nm_n) \\ &< [(Zm_p + (A - Z)m_p)] \end{aligned}$$

Sebagai penyusun inti, proton dan neutron yang berinteraksi dengan jangkauan pendek dan serupa dinamakan nukleon.

D. Spin Inti

Proton dan neutron mempunyai momentum sudut intrinsic yang disebut spin. Spin S berperilaku seperti momentum sudut, tetapi tidak tergantung pada gerak orbit partikel. Nilainya menentukan cacah fungsi gelombang yang diperlukan untuk menggambarkan keadaan kuantumnya secara lengkap

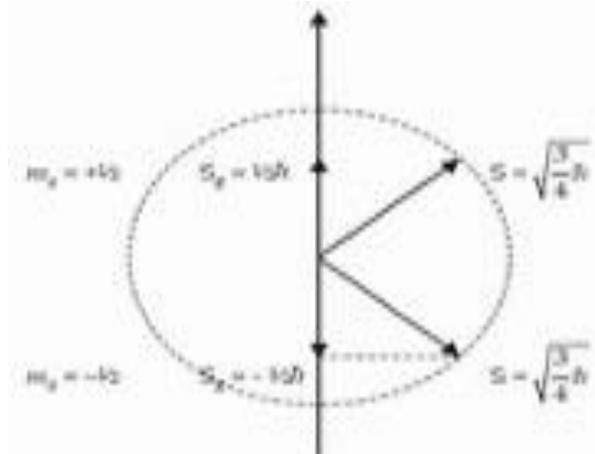
$$(N_s = 2s + 1).$$

Spin inti S_I berhubungan dengan bilangan kuantum spin inti I sebagai :

$$S_I = \hbar\sqrt{I(I + 1)}$$

Bilangan kuantum spin proton dan neutron masing-masing adalah $\frac{1}{2}$.

Gambar 9. 2 Spin Inti



Sumber :

<https://www.bing.com/images/search?q=gambar+spin+inti&FORM=HDRS>
C3

E. Momen Dwikutub Magnet Inti

Momen dwikutub magnet yang ditimbulkan oleh untaian tertutup adalah

$$\mu = iA \quad 9.1$$

Jika untaian arus tertutup berupa lintasan proton yang berbentuk lingkaran berjari-jari r dan laju v maka:

$$i = \frac{e}{2\pi r/v} = \frac{ev}{2\pi r} \quad 9.2$$

Karena luas $A = \pi r^2$, maka momen dwikutub magnetnya adalah

$$\mu = \left(\frac{ev}{2\pi r} \right) \pi r^2 = \frac{evr}{2} \quad 9.3$$

Karena momen sudut orbital proton $L = m_p vr$ maka

$$\mu_1 = \frac{e}{2m_p} L \quad 9.4$$

Komponen momen dwikutub magnet orbital ke suatu sumbu (sumbu Z) adalah

$$\mu_{1z} = \frac{e}{2m_p} L_z = \frac{e}{2m_p} m_l \hbar \quad 9.5$$

Dengan m_l : *bilangan kuantum magnetik orbital*

Kita definisikan besaran magneton inti (nuklir) μ_N sebagai :

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,050 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

Dengan $m_p = \text{massa proton, sehingga:}$

$$\mu_{1z} = \mu_N m_l$$

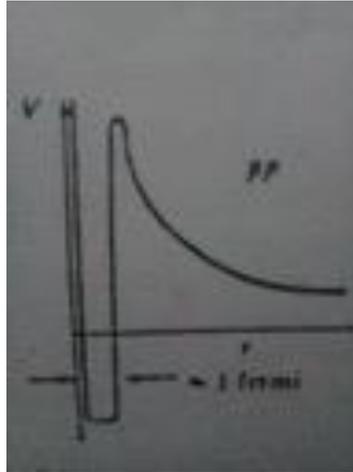
Meskipun muatan total neutron nol, terdapat distribusi muatan dalam neutron yang tidak merata. Oleh karena itu momen magnetnya tidak sama dengan nol.

F. Gaya-gaya Antarnukleon

Semua inti terdiri atas proton dan neutron (disebut nukleon) yang terikat membentuk sistem komposit. Kita sangat perlu mengetahui perilaku gaya-gaya antar penyusun inti. Gaya dilukiskan oleh potensial interaksi yang bentuknya dapat ditentukan berdasarkan hasil eksperimen hamburan partikel.

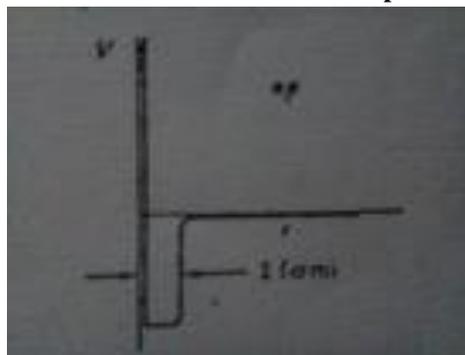
- a. Interaksi Proton-Proton, partikel proton tunggal yang dipercepat dengan mesin akselerator ditembakkan pada bahan yang banyak mengandung hydrogen H dan tentunya proton p.

Gambar 9. 3 Interaksi Proton-proton



- b. Interaksi Neutron-Proton, berkas neutron (dapat berasal dari reactor) dikenakan pada bahan yang mengandung banyak atom H. Potensialnya hampir sama seperti pada proton-proton, hanya diluar jangkauan gaya inti tidak ada gaya Coulomb karena neutron tidak bermuatan listrik

Gambar 9. 4 Interaksi Neutron-proton



- c. Interaksi Neutron-Neutron, secara eksperimen neutron-neutron tidak dapat ditampilkan karena tidak mungkin mendapatkan sasaran berupa neutron bebas. Namun, pada dasarnya gaya antarneutron serupa dengan gaya antara proton dengan neutron.

G. Deuteron

Inti paling sederhana yang terdiri lebih dari satu penyusun adalah deuteron, yaitu merupakan inti atom deuterium. Deuteron terdiri atas sebuah proton dan sebuah neutron yang terikat membentuk sistem stabil. Deuteron bermuatan positif satu (+e) dan massa rehatnya sebesar 2,013 533 u. Analogi dengan energi ikat atom hydrogen pada keadaan dasarnya, energi ionisasi atom (hydrogen) dapat ditentukan dari energi foton yang diserap pada efek fotolistrik untuk membebaskan electron dari ikatannya.

Energi ikat deuteron dapat ditentukan dengan cara yang sama. Gas deuterium diradiasikan dengan foton γ . Jika energi foton tepat sama dengan energi deuteron, sebuah proton bebas dan sebuah neutron bebas akan dilepaskan. Jika energi foton melebihi energi ikat deutron, proton dan neutron yang dibebaskan akan mempunyai energi kinetic. Reaksi intinya dituliskan sebagai berikut :



Kekekalan energi memberikan :

$$h\nu + m_d c^2 = m_p c^2 + m_n c^2 + k_p + k_n \quad 9.7$$

dengan ν adalah frekuensi foton, k_p adalah energi kinetic proton yang dihasilkan, dan k_n adalah energi kinetic neutron yang dihasilkan.

Rangkuman

Inti atom membawa semua muatan positif dan hampir seluruh massa atom, sehingga merupakan pusat gerak electron serta sangat mempengaruhi susunan atom terutama lewat interaksi Coulomb dengan electron-elektronnya.

Evaluasi Formatif

Pilihan Ganda

1. Property (sifat) yang dapat diobservasi dari sebuah inti atom diantaranya

...

- | | |
|-----------|---------------------------------------|
| A. muatan | D. Momen dipol magnet (magneton) inti |
| B. Massa | E. Semua benar |
| C. Spin | |

2. Komponen penyusun inti atom diantaranya...

- | | |
|-----------|------------------------|
| A. proton | D. proton dan elektron |
|-----------|------------------------|

- B. proton dan neutron
- C. neutron

E. elektron

3. Interaksi yang terbentuk di dalam inti atom yang ditandai dengan gaya tolak – menolak adalah ...

- A. proton-proton
- B. proton -neutron
- C. neutron-neutron

- D. proton-elektron
- E. semua benar

4. Perhatikan pernyataan berikut

(1) Massa proton $m_p = 1,007\ 276\ 63 \pm 0,000\ 000\ 08\ u$

(2) Energi rehat proton ($m_p c^2$) = $938,256 \pm 0,005\ MeV$

(3) Massa neutron $m_n = 1,008\ 665\ 4 \pm 0,000\ 000\ 4\ u$

(4) Energi rehat neutron ($m_n c^2$) = $939,550 \pm 0,005\ MeV$

Pernyataan yang sesuai dengan massa inti adalah ...

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)

- D. (4) saja
- E. Semua benar

5. Perhatikan pernyataan berikut:

(1) penyusun inti atom yang paling sederhana

(2) terdiri dari satu proton dan satu neutron

(3) bermuatan positif satu (+e) dan massa rehatnya sebesar 2,013 533 u.

(4) Reaksi intinya dinyatakan dengan $\gamma + d \rightarrow p + n$

Pernyataan yang sesuai dengan deutron adalah ...

- A. (1) (2) dan (3)
- B. (1) dan (3)
- C. (2) dan (4)

- D. (4) saja
- E. Semua benar

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum,

berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.

FISIKA_MODERN_materi_pelatihanPLPG.pdf

<https://ennyzaliavari.blogspot.com/2017/02/soal-dan-pembahasan-fisika-inti.html>

Kegiatan pembelajaran 2 KESTABILAN INTI

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa bisa menjelaskan kestabilan inti atom	a. Mahasiswa bisa menjelaskan kestabilan inti atom b. Mahasiswa bisa menjelaskan jejari inti atom c. Mahasiswa bisa menjelaskan energi ikat inti stabil d. Mahasiswa bisa menjelaskan model. Model inti

Uraian Materi

A. Inti Stabil

Cacah proton dalam inti direpresentasikan oleh nomor atom Z , cacah nucleon oleh nomor massa A , dan cacah neutron oleh $N=A-Z$. Inti-inti yang memiliki Z sama disebut isotop dan yang memiliki N sama disebut isoton, sedangkan yang memiliki A sama disebut isobar.

Gambar 9. 5 Contoh isotop, isoton, dan isobar

Contohnya:	${}^1_1\text{H}$, ${}^2_1\text{H}$	isotop	(Z sama)
	${}^2_1\text{H}$, ${}^3_2\text{He}$	isoton	(N sama)
	${}^{37}_{17}\text{Cl}$, ${}^{37}_{12}\text{Ar}$	isobar	(A sama)

Sumber : Buku Esensi Fisika Modern

B. Jejari Inti

Besar jejari inti dapat ditentukan secara pendekatan melalui eksperimen hamburan zarah α . Jejari inti didefinisikan sebagai jarak dari pusat inti sampai dimana gaya nuklir menjadi sangat penting dan dominan. Jejari inti sebagai fungsi nomor massa A adalah

$$R = r_0 A^{1/3}$$

Volume inti dapat dinyatakan dengan:

$$\frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

C. Energi Ikat Inti Stabil

Selisih kedua massa disebut energi ikat inti. Massa atom dapat diukur secara teliti menggunakan spektograf massa, sehingga energi ikat inti dapat dihitung dari atom netral. Massa atom netral sama dengan massa inti ditambah dengan massa electron dengan mengabaikan energi massa rehat atom. Satuan massa atom u didefinisikan dengan menggunakan standar massa atom ^{12}C yaitu 12 u sehingga kita peroleh nilai

$$1 \text{ u} = 931,5 \text{ MeV}/c^2.$$

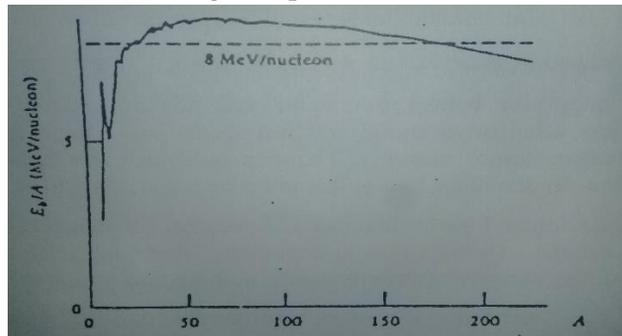
Energi ikat inti

$$E_b = [(Zm_p + Nm_n) - M_x]c^2$$

Energi ikat rerata per nucleon adalah

$$E_b = E_{b/A}$$

Gambar 9. 6 Energi Ikat per nukleon vs nomor massa A



Sumber : Buku Esensi Fisika Modern.

D. Model-model Inti

Tidak seperti pada atom, belum ada satu model inti yang dapat digunakan untuk menjelaskan semua sifat yang dimiliki oleh inti. Pada model-model yang ada, kesesuaiannya hanya terbatas pada gejala-gejala tertentu

1. Model tetes cairan

Model tetes cairan, sangat sesuai untuk menjelaskan energi ikat inti. Model ini diajukan oleh Bohr karena adanya kesamaan beberapa sifat inti dan tetes cairan, yaitu :

- a. Kerapatan yang konstan diseluruh volumenya dan tidak tergantung pada ukurannya

- b. Bahan penguapan pada tetes cairan ekuivalen dengan energi ikat per nucleon dalam inti
- c. Peristiwa penguapan tetes cairan ekuivalen dengan proses peluruhan inti
- d. Pengembunan atau pembentukan tetes cairan sesuai dengan peristiwa pembentukan inti gabungan. Energi ikat per nukleonnya :

$$\frac{B}{A} = 15.753 - 0,7103Z^2A^{-4/3} - 17,8A^{-1/3} - 94,77\frac{(Z-\frac{1}{2}A)^2}{A^2} + \delta/A$$

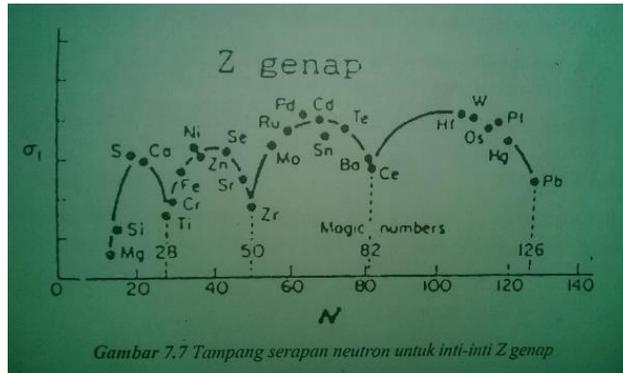
2. Model kelopak

Model kelopak, menjelaskan dengan baik adanya inti yang sangat stabil. Ada beberapa bukti bahwa inti dengan N atau Z tertentu mempunyai kestabilan yang lebih besar dibandingkan dengan inti didekatnya. Bukti-buktinya antara lain :

- a. Inti-inti ${}^4_2\text{He}$ ($Z = 2, N = 2$) dan ${}^{16}_8\text{O}$ ($Z = 8, N = 8$) adalah inti – inti sangat stabil.
- b. Kelompok isoton (inti-inti dengan N sama) yang anggotanya terbanyak, serta paling stabil adalah N=82. kelompok isoton berikutnya adalah N=50 dan 20. jadi, cacah neutron 20,50, dan 82 menunjukkan kestabilan tinggi
- c. Inti Sn_{50} mempunyai 10 isotop stabil dan lebih banyak dari inti lain. Inti Ca_{20} mempunyai isotop stabil sebanyak 6 buah hal ini menunjukkan bahwa Z=50 dan Z=20 memiliki kestabilan yang lebih.
- d. Tiga deret radioaktif alam yang ada meluruh menuju inti timbal Pb_{82} dan isotop ${}^{208}_{82}\text{Pb}$ paling stabil di antara isotop timbal yang ada. Dengan demikian, N=82 dan Z=126 adalah angka angka yang menunjukkan kestabilan inti
- e. Beberapa inti hasil peluruhan β merupakan pemancar neutron spontan. Hal ini menunjukkan bahwa inti tersebut memiliki energi ikat yang lemah terhadap neutron. Inti-inti tersebut adalah ${}^{17}_8\text{O}$, ${}^{87}_{36}\text{Kr}$, ${}^{137}_{54}\text{Xe}$ dengan N berturut-turut 9,51,53 yang dapat dituliskan sebagai 8+1, 50+1, dan 82+1.

Bukti lain yang mendukung model kelopak adalah pengukuran tampang serapan terhadap neutron (σ) seperti ditunjukkan pada gambar berikut

Gambar 9. 7 Tampang serapan neutron untuk inti-inti Z genap



Gambar 7.7 Tampang serapan neutron untuk inti-inti Z genap

Sumber : Kusminarto.2011

3. Model Kolektif

Model kolektif, menjelaskan tingkat-tingkat energi eksitasi inti. Model kolektif menggabungkan beberapa sifat model kelopak dan sifat tetes cairan. Model ini mengandaikan bahwa nucleon dalam subkelopak yang tidak penuh bergerak secara mandiri di dalam potensial teras yang berasal dari subkelopak yang terisi penuh. Potensial ini telah mengalami perubahan bentuk sebagai akibat gerakan nucleon di dalam teras. Sifat inti dapat dijelaskan dengan baik jika model kolektif yang digunakan adalah momen catur kutub listrik q . Nilai q menunjukkan besarnya penyimpangan distribusi muatan inti bentuk simetri bola

$$q = \int \rho [3z^2 - (x^2 + y^2 + z^2)] dv \quad 9.8$$

Rangkuman

Model inti atom dapat dijelaskan melalui model tetes cairan, model kelopak dan model kolektif

Evaluasi Formatif

Essay

1. Apa yang dimaksud dengan energi ikat inti? Dan bagaimana menghitungnya?

jawab

2. Apa saja factor yang mempengaruhi kestabilan inti?

jawab

3. Jelaskan model – model inti atom berikut:

a. Model tetes cairan

jawab

b. model kelopak

jawab

c. model kolektif
jawab

4. apa yang dimaksud dengan isotop, isoton dan isobar? Sebutkan contohnya masing – masing !
jawab

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa

butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.

FISIKA_MODEREN_materi_pelatihanPLPG.pdf

<https://ennyzaliavari.blogspot.com/2017/02/soal-dan-pembahasan-fisika-inti.html>

Penutup

Rangkuman

Model inti atom menjelaskan tentang struktur dan model inti atom.

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York

MODUL 10

RADIOAKTIVITAS

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Antonie Hendrie Becquerel tercatat sebagai penemu radioaktif. Lahir diparis tahun 1852. Pendidikannya baik, dapat gelar doctor tahun 1888. Tahun 1892 beliau menjadi guru besar fisika praktis di museum sejarah alam (Musee d' Histoire Naturelle) di paris. Semua keluarganya adalah ahli fisika, baik kakek dan ayahnya pun demikian. Di tahun 1895 Becquerel jadi guru besar di perguruan tinggi politeknik. (Ecole Polytechnique) di paris. Di sinilah pada tahun 1896 dia membuat penemuan besar yang membuat namanya terkenal.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).
- 3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).

4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)

2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)

2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)

3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)

4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu menjelaskan raddioaktivitas
Sikap	a. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan simulasi dan melaporkan hasil simulasinya.

3. Prasyarat Kompetensi

a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.

b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell

c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang riset fisika murni,

5.. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Radioaktivitas dan jenis-jenis radiasi nuklir	A. Hukum peluruhan B. Peluruhan berantai C. Penanggalan ^{12}C D. Peluruhan alfa, beta dan gamma
Eksperimen waktu paruh radioaktivitas (simulasi)	Eksperimen waktu paruh radioaktivitas (simulasi)
Reaksi nuklir	A. Skema reaksi nuklir B. energi ambang C. Penampang reaksi D. reaksi fisi E. reaksi fusi
Simulasi reaksi fisi	Simulasi reaksi fisi

Kegiatan Pembelajaran 1 RADIOAKTIVITAS DAN JENIS JENIS RADIASI NUKLIR

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa dapat menjelaskan radioaktivitas dan jenis jenis radiasi nuklir	a. Mahasiswa dapat menjelaskan peluruhan radioaktif b. Mahasiswa dapat menjelaskan bagaimana peluruhan inti atom

Uraian Materi

A. Hukum Peluruhan Radioaktif

Peluruhan radioaktif (disebut juga peluruhan nuklir atau radioaktivitas) adalah proses dimana sebuah inti atom yang tidak stabil kehilangan energi (berupa massa dalam diam) dengan memancarkan radiasi, seperti partikel alfa, partikel beta dengan neutrino, sinar gamma, atau elektron dalam kasus konversi internal.

Setiap inti tak stabil akan meluruh menjadi bagian-bagian lain (inti baru dan partikel) dengan memenuhi hukum-hukum kekekalan massa energy, momentum, muatan listrik, dan momentum sudut total. Artinya, besaran-besaran ini sebelum dan sesudah peluruhan haruslah sama. Pertanyaan yang selalu timbul dalam proses peluruhan adalah : seberapa lajukah proses peluruhan terjadi atau berapa banyakkah inti yang belum meluruh dari waktu ke waktu ? inti tak stabil keadaan mula-mula disebut inti induk, sedangkan inti hasil peluruhannya disebut inti turunan. Proses peluruhan merupakan proses statistik.

1. Kemungkinan suatu inti meluruh

Kemungkinan suatu inti untuk meluruh pada suatu waktu ke waktu adalah tertentu. Untuk sejumlah inti sejenis, kemungkinan meluruh adalah sama untuk masing-masing inti dan boleh dikatakan tidak tergantung pengaruh luar. Kemungkinan suatu inti meluruh dalam interval waktu dt adalah sebanding dengan intervalnya. Kemungkinan meluruh $\sim dt$ atau kemugkinan meluruh = λdt

Dengan

λ = tetapan peluruhan atau tetapan disintegrasi

$[s^{-1}]$ = kemungkinan terjadinya peluruhan per satuan waktu.

Besaran-besaran inti yang membedakan laju peluruhan suatu inti radioaktif dengan inti radioaktif dengan inti radioaktif lainnya.

Kemungkinan tak meluruh = $1 - \lambda dt$

Jika cacah inti radioaktif pada saat t adalah N maka cacah inti meluruh selama dt adalah

$$dN = -N \lambda dt$$

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

Jika persamaan ini diintegrasikan untuk interval waktu dari $t=0$ sampai $t=t$ dengan cacah inti tak stabil saat awal adalah $N(0) = N_0$ dan cacah inti tak stabil saat t adalah $N(t)$ maka

$$\int_{N_0}^{N(t)} \frac{dN}{N} = - \int_0^t \lambda dt$$

$$\ln \left(\frac{N(t)}{N_0} \right) = -\lambda t$$

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

(7-16)

2. Aktivitas radioaktif

Aktivitas radioaktif didefinisikan sebagai laju peluruhan, yaitu cacah inti radioaktif yang meluruh tiap satuan waktu.

$$\text{Aktivitas} = \frac{dN}{dt}$$

$$\text{Aktivitas} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \text{ Bq}$$

(7-17)

1 Bq = 1 becquerel = 1 disintegrasi per detik.

Untuk inti turunan yang bersifat stabil, cacah inti turunan yang dihasilkan adalah

$$N_{t \text{ turunan}} = N_0 - N(t)$$

$$N_{t \text{ turunan}} = N_0(1 - e^{-\lambda t})$$

(7-18)

N_{induk} dan N_{Turunan}

Karena tak semua inti mempunyai umur sama, maka kita hanya dapat mendefinisikan umur rata-rata sebesar

$$\tau = \frac{\int t |dN|}{\int |dN|}$$

Dengan $|dN|$ adalah cacah inti yang umurnya antara t dan $t + dt$, yaitu $dN = \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt$. Jadi, umur rata-rata adalah

$$\tau = \frac{\int_0^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt}{\int_0^{\infty} \lambda N_0 e^{-\lambda t} dt} = \frac{1}{\lambda}$$

Pengertian umur secara umum adalah periode waktu sesuatu tersebut masih dalam keadaan hidup. Namun, untuk inti radioaktif, umur seperti pengertian tersebut tidak dapat didefinisikan mengingat aktivitas radioaktif habis dalam waktu yang tidak dapat ditentukan secara pasti karena bersifat asimtonis. Oleh karena itu, kita gunakan besaran umur paro $T_{1/2}$ yaitu periode waktu di mana cacah inti radioaktif tinggal setengah dari cacah semula. Jadi, jika $t = T_{1/2}$ maka $N(t) = \frac{1}{2} N_0$.

Jika memasukkannya ke rumus peluruhan (7-16) maka akan kita peroleh :

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$\frac{1}{2} = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Atau

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$$

(7-18)

Pengertian $T_{1/2}$ secara skematik dapat digambarkan sebagai berikut

$$\begin{matrix} |N_0| & \rightarrow & |\frac{1}{2}N_0| & \rightarrow & |\frac{1}{4}N_0| & \rightarrow & |\frac{1}{8}N_0| \\ t=0 & & t=T_{1/2} & & t=2T_{1/2} & & t=3T_{1/2} \end{matrix}$$

Tabel 7.2 menunjukkan hubungan antara $N(t)$ dengan t sebagai $T_{1/2}$.

Tabel 25 hubungan antara cacah radioaktif $N(t)$ dengan waktu t kelipatan dari $T_{(1/2)}$.

t	$N(t)$
0	N_0
$T_{1/2}$	$\frac{1}{2} N_0$
$2T_{1/2}$	$\left(\frac{1}{2}\right)^2 N_0$

t	N(t)
$3T_{1/2}$	$\left(\frac{1}{2}\right)^3 N_0$
$nT_{1/2}$	$\left(\frac{1}{2}\right)^n N_0$

Secara umum, jika waktu sudah berjalan selama n kali $T_{1/2}$, cacah inti tak stabil tinggal:

$$N(t) = \left(\frac{1}{2}\right)^n N_0$$

dengan $n = \frac{t}{T_{1/2}}$

Contoh

1.0 mg sampel ^{238}U mengemisikan 738 partikel α tiap menit. Sampel ini menunjukkan aktivitas yang sama dalam waktu relatif lama. Berapakah umur paro ^{238}U ?

Jawab:

Umur paro ^{238}U sangat panjang sehingga aktivitasnya tidak banyak berubah setelah waktu yang cukup lama.

$T_{1/2}$ dapat dicari dari $T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda}$: jika λ diketahui :

$$\lambda = \frac{\text{aktivitas}}{N}$$

Aktivitas = 738 peluruhan/menit

$$= \frac{738}{60} \text{ peluruhan/s}$$

Setiap atom ^{238}U tersusun dari 238 nukleon. Jika massa tiap nukleon dianggap sama, yaitu $1,67 \times 10^{-24}$ g, maka dalam sampel 1,0 mg terdapat:

$$N = \frac{10^{-3} \text{ g}}{238 \times (1,6) \times 10^{-24} \text{ g}} = 2,52 \times 10^{16} \text{ atom.}$$

Besar tetapan peluruhannya adalah

$$\lambda = \frac{738/60}{2,52 \times 10^{16}} = 4,88 \times 10^{-18} \text{ s}^{-1}$$

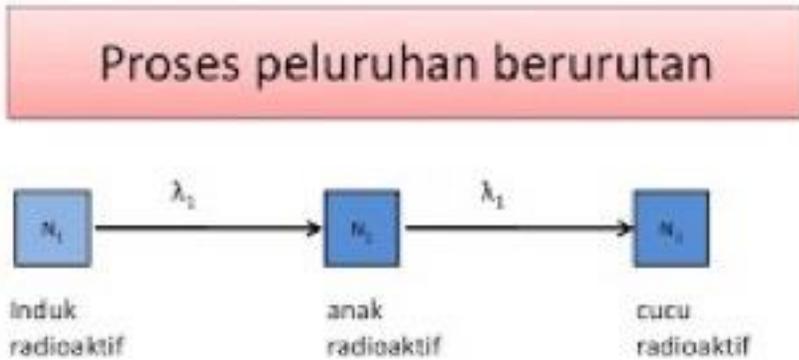
Dengan demikian, umur paronya adalah

$$T_{1/2} = \frac{0,693}{\lambda} = 1,42 \times 10^{17} \text{ s} = 4,5 \times 10^9 \text{ tahun}$$

B. Peluruhan Berantai

Peluruhan Berantai adalah peluruhan yang mengikuti suatu urutan tertentu. Inti radioaktif tidak selalu meluruh dan menghasilkan inti anak yang stabil. Setelah beberapa kali meluruh, akan terbentuk inti yang benar-benar stabil. Andaikan inti induk (inti 1) meluruh menjadi inti turunan (inti 2) yang radioaktif pula dan meluruh menjadi inti 3 yang stabil, λ_1 adalah tetapan peluruhan inti 1 dan λ_2 adalah tetapan peluruhan 2. pada saat awal peninjauan, $t = 0$, $N_1 = N_0$ sedangkan $N_2 = N_3 = 0$. pada inti 1 terjadi pengurangan: $dN_1 = -\lambda_1 N_1 dt$. Pada inti 2 terjadi penambahan: $dN_2 = \lambda_1 N_1 dt$ dan pengurangan: $dN_2 = -\lambda_2 N_2 dt$.

Gambar 10. 1 peluruhan radioaktif berantai



<https://images.app.goo.gl/HNQZf4t4jZfxWDPi6>

Perubahan cacah inti 2 adalah

$$dN_2 = \lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt \quad (7.20)$$

Kita coba suatu penyelesaian persamaan (7-20) berbentuk:

$$N_2 = Ae^{-\lambda_1 t} + Be^{-\lambda_2 t} \quad (7.21)$$

A dan B merupakan suatu tetapan yang harus dicari. Dengan mendiferensialkan persamaan ini, kita peroleh:

$$dN_2 = -A\lambda_1 e^{-\lambda_1 t} dt - B\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt \quad (7.22)$$

Persamaan (7-20) dan (7-22) adalah identik maka:

$$\lambda_1 N_1 dt - \lambda_2 N_2 dt = -A\lambda_1 e^{-\lambda t} dt - B\lambda_2 e^{-\lambda_2 t} dt$$

atau

$$\lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2 = -A\lambda_1 e^{-\lambda t} dt - B\lambda_2 e^{-\lambda_2 t}$$

Syarat awal $t = 0$, $N_1 = N_0$ dan $N_2 = 0$ dimasukkan ke persamaan di atas :

$$\lambda_1 N_0 - 0 = -A\lambda_1 - B\lambda_2$$

Syarat awal demikian dimasukkan ke persamaan yang dicobakan (persamaan 7-21) untuk mendapatkan :

$$0 = A + B \text{ atau } A = -B$$

Dengan demikian

$$\lambda_1 N_0 = B\lambda_1 - B\lambda_2 = B(\lambda_1 - \lambda_2)$$

$$B = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} N_0 = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} N_0$$

$$A = \frac{\lambda_1}{\lambda_1 \lambda_2} N_0$$

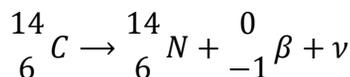
Jadi,

$$N_2 = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0 e^{-\lambda_1 t} - \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0 e^{-\lambda_2 t}$$

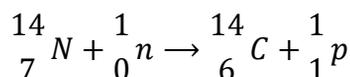
$$N_2(t) = \frac{\lambda_2}{\lambda_2 - \lambda_1} N_0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

C. Penanggalan ^{12}C

Penanggalan ^{12}C adalah suatu metode penentuan usia suatu objek yang mengandung materi organik dengan memanfaatkan sifat **radiokarbon**, suatu isotop radioaktif dari **karbon**. Atom karbon mempunyai tiga isotop, yaitu $^{12}_6C$, $^{13}_6C$ dan $^{14}_6C$. Isotop $^{14}_6C$ bersifat radioaktif dan meluruh menjadi $^{14}_9C$ dengan memancarkan sinar β .



dengan umur paro $T_{1/2} = 5730$ tahun dan energi beta maksimum $E_\beta = 0,158$ Mev. Di atmosfer $^{14}_6C$ terbentuk melalui interaksi $^{14}_7N$ dengan neutron sinar kosmis



Dari kedua persamaan kita dapat menyimpulkan bahwa terjadi siklus tertutup yang mengakibatkan jumlah $^{12}CO_2$ di atmosfer konstan. Dengan kata lain, pembentukan dan peluruhan ^{14}C berada dalam

keseimbangan. Karbondioksida yang diambil oleh makhluk hidup dari atmosfer mengandung ^{14}C yang konstan. Ketika makhluk hidup itu masih hidup, mulai meluruh dan setelah t tahun dari kematian tersebut aktivitasnya adalah.

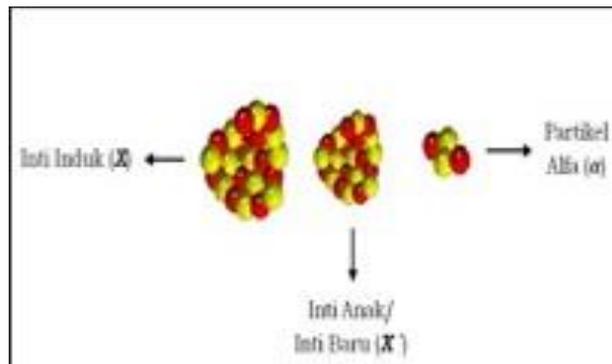
$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

Pada persamaan tersebut, N_0 adalah aktivitas pada saat mati dan N adalah aktivitas sekarang yang dapat diukur langsung dari sampel. Aktivitas pada saat mati N_0 sama dengan aktivitas ^{14}C yang terdapat pada makhluk hidup. Dengan demikian, umur sampel t dapat dihitung metode di atas berdasarkan anggapan bahwa konsentrasi ^{14}C konstan sepanjang waktu. Konsentrasi ^{14}C sangat dipengaruhi oleh konsentrasi neutron dalam sinar kosmis. Jika terjadi ledakan bintang. Percobaan nuklir (senjata), dan lain-lain maka konsentrasi neutron akan berubah, demikian pula konsentrasi ^{14}C yang dihasilkan. Jadi, hasil perhitungan penanggalan ^{14}C hanyalah merupakan suatu perkiraan umur.

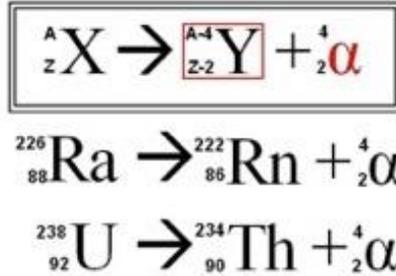
D. Peluruhan α

Suatu inti radioaktif tertentu (dengan $Z > 82$) secara spontan meluruh menjadi inti turunan dengan memancarkan inti helium ^4_2He atau partikel α . Berdasarkan kekekalan muatan dan nukleon, peluruhan α memenuhi reaksi yang dinyatakan oleh.

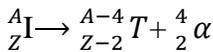
Gambar 10. 2 Peluruhan Radioaktif



Gambar 10. 3 prisma: peluruhan radioaktif

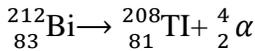


Sumber: <https://images.app.goo.gl/82DGzbZtfHdA>

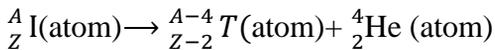
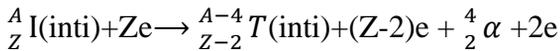


Dengan T adalah inti turunan dan I adalah inti induk.

Contohnya adalah



Persamaan reaksi peluruhan tersebut adalah untuk inti yang dapat dinyatakan dalam atom dengan menambah sejumlah elektron yang sesuai :



jika inti induk mula-mula dalam keadaan rehat (tak bergerak) hukum kekekalan energi memberikan

- $(\text{energi total})_{\text{sebelum}} = (\text{energi total})_{\text{sesudah}}$
- $(E_{\text{rehat}} + E_{\text{kinetik}})_{\text{sebelum}} = (E_{\text{Rehat}} + E_{\text{kinetik}})_{\text{sesudah}}$
- $m_1 c^2 + 0 = m_T c^2 + E_{\text{kin } T} + m_{\text{He}} c^2 + E_{\text{kin } \alpha}$
- $(m_1 - m_T - m_{\text{He}}) c^2 = E_{\text{kin } T} + E_{\text{kin } \alpha}$

Dengan

- m_I : Massa atom induk
- m_T : Massa atom Turunan
- m_{He} : Massa atom ${}^4_2\text{He}$
- $E_{\text{kin } T}$: Energi kinetic Turunan
- $E_{\text{kin } \alpha}$: energy kinetic α

Energi kinetic tidak pernah negatif, maka $(m_I - m_T - m_{\text{He}}) > 0$ sehingga :

$$m_I > (m_T + m_{\text{He}})$$

(7-24)

Keadaan dalam persamaan (7-24) merupakan syarat agar terjadi peluruhan α . Energi yang dilepaskan pada peluruhan, yaitu energi kinetic inti turunan dType equation here.an energy kinetic hasil peluruhan ($E_{kin T} + E_{kin \alpha}$) disebut energy disintegrasi dengan symbol Q.

$$Q = E_{kin T} + E_{kin \alpha} = (m_I - m_T - m_{He})C^2 \quad (7-25)$$

Hukum kekekalan momentum dalam peluruhan ini memberikan:

$$m_T V_T = m_\alpha V_\alpha$$

Jika persamaan dikuadratkan dan dikalikan dengan factor $\frac{1}{2}$ maka akan kita peroleh :

$$m_T \left(\frac{1}{2} m_T V_T^2 \right) = m_\alpha \left(\frac{1}{2} m_\alpha V_\alpha^2 \right)$$

$$m_T E_{kin T} = m_\alpha E_{kin \alpha}$$

$m_T \approx A - 4$ dan $m_\alpha = 4$ dalam satuan massa atom u, maka

$$(A - 4) E_{kin T} = 4 E_{kin \alpha}$$

$$E_{kin T} = \frac{4}{A-4} E_{kin \alpha}$$

Masukan ke persamaan (7-25) maka kita peroleh :

$$\begin{aligned} Q &= E_{kin} + \frac{4}{A-4} E_{kin \alpha} \\ &= \left(1 + \frac{4}{A-4} \right) E_{kin \alpha} \\ &= \frac{A}{A-4} E_{kin \alpha} \end{aligned}$$

Atau

$$E_{kin \alpha} = \frac{A-4}{A} Q \quad (7-26)$$

Inti atom yang meluruh dengan memancarkan α adalah inti-inti dengan nomor Z yang besar dan demikian pula, nomor massa A sehingga :

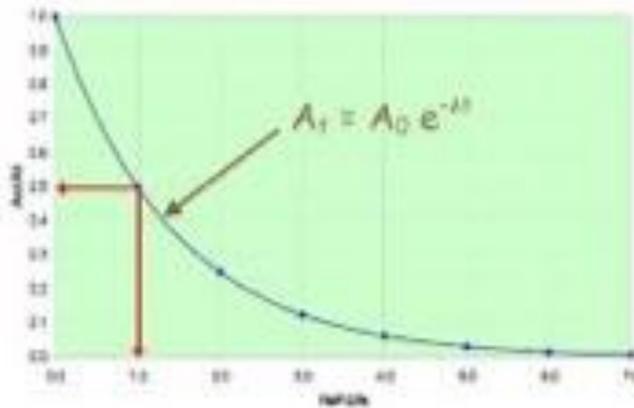
$$E_{kin \alpha} \approx Q \quad (\text{untuk } A \gg 4)$$

Dengan demikian, energi peluruhan hampir seluruhnya diberikan kepada partikel α sebagai energi kinetik, sedangkan energi kinetik turunan (energy pantalan) dapat dianggap sama dengan nol.

Energi disintegrasi Q sama dengan selisih energi keadaan awal dan energi keadaan akhir yang sifatnya diskret pula. Dalam peluruhan ini, inti radioaktif yang berada di tingkat tereksitasi meluruh dengan melepaskan energi menuju

ke tingkat energi yang lebih rendah melalui beberapa cara yang secara umum dapat digambarkan dengan skema peluruhan dalam gambar 7.11

Gambar 10. 4 skema peluruhan radioaktif



Sumber: <https://images.app.goo.gl/qcdxbDqhyqVUK>

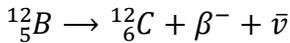
Dalam peluruhannya dari ${}^A_Z X$ menjadi ${}^{A-4}_{Z-2} Y$, inti tersebut dari tingkat energi awal E dapat langsung menuju ke tingkat dasar $E_0 = (Q = E - E_0)$ dengan memancarkan partikel α_3 . Lebih lanjut, inti dapat pula menuju ke tingkat energi E_1 terlebih dahulu dengan $Q = (E - E_1)$ yang diberikan berupa energi kinetik α_2 dan selanjutnya, inti turunan ${}^{A-4}_{Z-2} Y$ dari tingkat energi E_1 turun ke tingkat energi E_0 melalui pancaran foton gamma (dibicarakan dalam peluruhan gamma). Peluruhan α dapat pula terjadi melalui tingkat energi E_2 terlebih dahulu dengan energi diintegrasikan $Q = (E - E_2)$ yang merupakan energi kinetik α_1 . Selanjutnya, inti turunan yang masih berada di tingkat tereksitasi E_2 turun ke tingkat dasarnya melalui tingkat energi E_1 dahulu atau langsung ke tingkat dasar E_0 . Dalam perjalanan ke tingkat dasar E_0 energi dilepaskan dalam bentuk radiasi foton gamma.

E. Peluruhan β

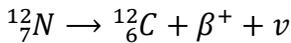
Peluruhan beta dapat didefinisikan sebagai proses peluruhan radioaktif dengan muatan inti berubah tanpa terjadi perubahan cacah nucleon. Contoh sederhana digambarkan pada peluruhan ${}^{12}_5 B$ menjadi ${}^{12}_6 C$ dan ${}^{12}_6 N$.

Ketiga inti memiliki cacah nucleon yang sama, tetapi cacah proton dan neutronnya berbeda. ${}^{12}_6 C$ adalah inti stabil dengan cacah proton dan neutron

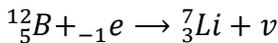
yang sama, masing-masing 6. Boron terlalu banyak neutronnya, sedangkan nitrogen terlalu banyak protonnya. Inti boron yang tak stabil meluruh dengan mengubah satu neutronnya menjadi proton untuk menjadi inti karbon. Agar muatan listriknya kekal, satu muatan negatif dibentuk (electron). Jika electron harus berada di dalam inti dengan ukuran diameter berorde besar 10^{-14} m maka menurut asas ketakpastian Heisenberg, electron harus memiliki momentum dengan lebar jangkau $\Delta p \sim \frac{h}{\Delta x} = 20 \text{ MeV}/c$. Eksperimen membuktikan bahwa energy partikel β dalam peluruhan umumnya kurang dari 1 MeV sehingga electron dengan energy 20 MeV tidak dapat berada di dalam inti dan diemisikan sebagai radiasi yang disebut sinar beta.



$\bar{\nu}$ disebut antineutrino, yaitu partikel netral yang tak bermassa seperti foton. Artinya, kelajuannya sama dengan c dan seluruh energinya bersifat kinetis. Analogi dengan ${}^{12}_5\text{B}$, ${}^{12}_7\text{N}$ terlalu banyak cacah proton dibandingkan dengan cacah neutronnya untuk stabil. Oleh karena itu, ${}^{12}_7\text{N}$ meluruh dengan mengubah sebuah proton menjadi neutron serta melepaskan sebuah muatan positif yang disebut positron.

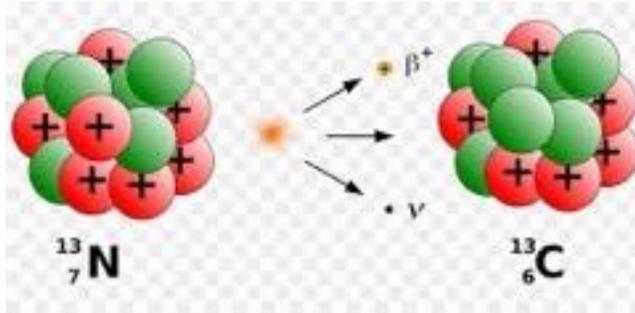


ν disebut neutrino, yaitu partikel sejenis antineutrino spin berlawanan terhadap spin neutrino. Selain peluruhan beta negatif dan beta positif, ada satu lagi peluruhan yang termasuk dalam peluruhan beta, yaitu tangkapan electron (*electron capture*). Dalam tangkapan electron, sebuah electron orbit ditangkap oleh proton dalam inti untuk berubah menjadi neutron. Di sini cacah nukleonnya tetap, tetapi sebuah protonnya berubah menjadi neutron seperti pada peluruhan beta positif. Electron dari kulit K memiliki kemungkinan terbesar untuk ditangkap oleh proton. Contoh tangkapan electron adalah pada ${}^7_4\text{B}$:



Kita tidak dapat mengamati langsung proses tangkapan electron, tetapi dapat melihatnya dari radiasi sinar X karakteristik yang di pancarkan karena electron kulit K yang telah di tangkap meninggalkan tempat kosong di kulit. Elektron-elektron di kulit yang lebih akan mengisinya dengan melepas energi berupa sinar X karakteristik inti turunan

Gambar 10. 5 peluruhan Beta

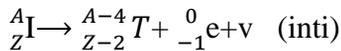


Sumber: <https://www.google.com/imgres?imgurl=https%3A%3A>

Berikut adalah penjelasan ketiga tipe peluruhan beta secara rinci

a) Peluruhan beta negatif (β^-)

peluruhan inti induk I menjadi turunan T dapat ditulis sebagai berikut :



Kekekalan energi menghasilkan persamaan :

$$(m_1 - Zm_c)c^2 = [m_T - (Z + 1)m_e]c^2 + E_{kin T} + E_{kin c} + E_{kin \nu}$$

$$m_1 - Zm_c = m_T - zm_c - m_c - m_c + m_c + Q/c^2.$$

Dengan $Q = E_{kin T} + E_{kin c} + E_{kin \nu}$ kita peroleh

$$m_1 = m_T + Q/c^2$$

(7-27)

Persamaan tersebut menunjukkan bahwa peluruhan β^- hanya mungkin jika $m_1 > m_T$. dari persamaan ini pula, nilai Q suatu peluruhan dapat dihitung langsung, yaitu :

$$Q = (m_I - m_T) C^2$$

(7-28)

Misalnya pada peluruhan ${}^{12}_5\text{B}$ menjadi ${}^{12}_6\text{C}$, energy peluruhan adalah

$$Q = (m_B - m_C) C^2$$

$$m_B = \text{massa atom } {}^{12}_5\text{B} = 12,014\,354\, \text{u}$$

$$m_C = \text{massa atom } {}^{12}_6\text{C} = 12,000\,000\, \text{u}$$

$$m_B - m_C = 0,014\,354\, \text{u}$$

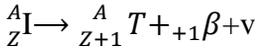
$$Q = 0,014\,354\, \text{u} \times C^2$$

$$= 0,014354 \times \frac{931,5}{c^2} \text{ MeV} \times c^2$$

$$Q = 13,37 \text{ MeV}$$

b) Peluruhan beta positif (β^+)

persamaan reaksi peluruhan



Seperti proses peluruhan beta negatif, kekekalan energi memberikan:

$$m_1 - Zm_c = [m_T - (Z - 1)m_c] + m_c + Q/c^2$$

Atau

$$m_1 = m_T + Q/c^2$$

Peluruhan beta positif hanya mungkin jika massa induk lebih besar paling tidak $2m_c$ terhadap massa turunan.

c) Tangkapan elektron

Persamaan reaksi peluruhan secara umum adalah

$$m_c + (m_1 - Zm_c) = [m_T - (Z - 1)m_c] + m_c + Q/c^2$$

Atau

$$m_1 = m_T + Q/c^2$$

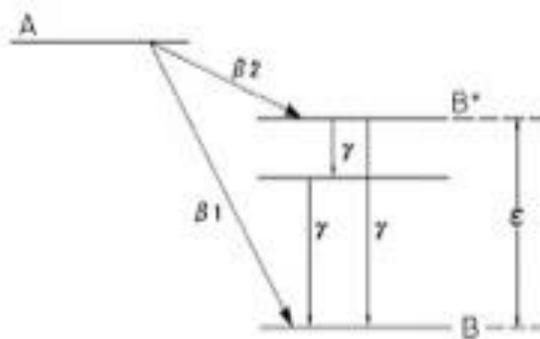
(7-29)

Skema peluruhan beta dapat digambarkan seperti gambar 7.13 seperti pada peluruhan α , peluruhan β dapat pula diikuti oleh radiasi gamma. Neutrino pada mulanya merupakan partikel yang didalikan oleh Pauli (1931) sebelum akhirnya terbukti dari pengamatan bahwa keduanya bertanggung jawab atas terjadinya kekekalan energi dan spin. Misalnya, pada proses peluruhan β^- dari neutron menjadi proton dan elektron, kalau tidak ada antineutrino maka hukum kekekalan momentum sudut akan dilanggar. Namun, dengan kehadiran antineutrino hal ini terhindari. Akibatnya, distribusi energi sinar beta mempunyai spectrum yang kontinu. Hal ini dapat dipahami karena energi sinar beta mempunyai spectrum yang kontinu. Hal ini dapat dipahami karena energi peluruhan Q tidak hanya diberikan pada beta, tetapi juga kepada neutrino / antineutrino.

$$Q = E_{kin c} + E_{kin \nu}$$

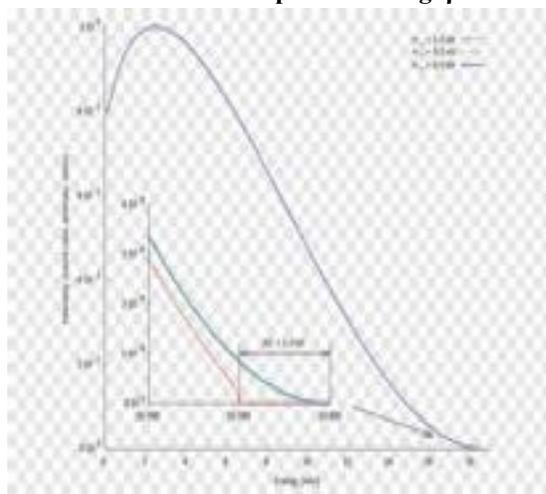
(7-30)

Gambar 10. 6 skema peluruhan beta 12_B dan 12_N



Sumber: <https://images.app.goo.gl/cB7ND9exVoKseTb87>

Gambar 10. 7 spektrum energi β



Sumber: <http://images.app.goo.gl/jz23htAgzBSpuJeEa>

Energi maksimum sinar beta sama dengan energy disintegrasi

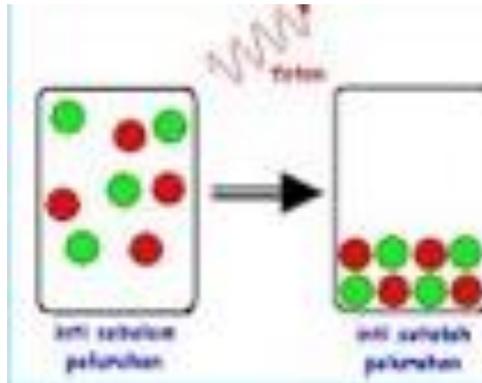
$$E_{\beta \text{ maks}} = Q$$

F. Peluruhan γ

Peluruhan Gamma adalah merupakan radiasi gelombang elektromagnetik dengan energi sangat tinggi sehingga memiliki daya tembus yang sangat kuat. Sinar **gamma** dihasilkan oleh transisi energi inti atom dari suatu keadaan

eksitasi ke keadaan dasar. Suatu inti dapat berada ditingkat tereksitasinya misalnya sebagai akibat peluruhan α , peluruhan β atau tumbukan dengan neutron, dan sebagainya. Saat menuju tingkat dasarnya, inti tersebut melepas energi dalam radiasi gamm

Gambar 10. 8 Peluruhan Gamma



Sumber: <https://images.app.goo.gl/AaXneTBQu4Wc5Rp36>

Energi sinar gamma yang di pancarkan sama dengan selisih antara tingkat-tingkat energi di mana inti melakukan transisi (gambar 7.15)

$$E_{\gamma 1} = E_1 - E_0$$

$$E_{\gamma 2} = E_2 - E_1$$

$$E_{\gamma 3} = E_2 - E_0$$

secara umum $E_{\gamma} = \Delta E$. Perhitungan yang lebih teliti harus melibatkan adanya pentalan inti. Jadi, energi yang dilepaskan dalam transisi diberikan kepada gamma serta sebagai energi kinetik inti yang terpental.

$$\Delta E = E_{\gamma} + E_{\text{pentalan}}$$

$$E_{\text{pentalan}} = \frac{p_1^2}{2m}$$

p_1 = momentum inti yang terpental = momentum Gamma (dari kekekalan momentum).

$$p_i = p_{\text{gamma}} = \frac{E_{\gamma}}{c}$$

Sehingga:

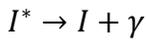
$$E_{\text{pentalan}} = \frac{E_{\gamma}^2}{2mc^2}$$

Maka:

$$\Delta E = E_\gamma + \frac{E_\gamma^2}{2mc^2}$$

$$\Delta E = E_\gamma \left[1 + \frac{E_\gamma}{2mc^2} \right] \quad (7-31)$$

Reaksinya dapat ditulis sebagai :



Rangkuman

Radioaktif adalah kesimpulan beragam proses dimana sebuah inti atom yang tidak stabil memancarkan partikel subatomik (partikel radiasi). Peluruhan terjadi pada sebuah nucleus induk dan menghasilkan nukleus anak. Ini adalah sebuah proses acak sehingga sulit untuk memprediksikan peluruhan sebuah atom. Satuan internasional (SI) untuk pengukuran peluruhan radioaktif adalah Becquerel (Bq). Zat radioaktif dan radioisotop berperan besar dalam ilmu kedokteran yaitu untuk mendekteksi sebagai penyakit, diagnose penyakit yang penting antara lain tumor ganas. Kemajuan teknologi dengan ditemukannya zat radioaktif dan radioisotop memudahkan aktifitas manusia dalam berbagai bidang kehidupan.

Evaluasi Formatif

Essay

1. Tuliskan 3 contoh pasangan isotop yang memancarkan sinar β !

Jawab:

2. Nilai Q untuk peluruhan α inti Po^{23} menjadi Pb^{209} adalah 8,25 MeV. Hitung energi partikel alfa dalam transisi, jika sebagian partikel alfa dipancarkan dengan energi 7,6 MeV. Tentukan juga energi tereksitasi yang berkaitan dalam Pb! (Jawab: 8.36 MeV dan 0,77 MeV)

Jawab:

3. Inti P^{32} meluruh menjadi inti S^{32} melalui peluruhan β^- . Jika energi kinetik maksimum partikel beta adalah 1,7 MeV, hitung massa P^{32} . Jika diketahui massa atom S^{32} adalah 31,972072 u. (jawab: 31,9739 u)

Jawab:

4. Inti ${}^7\text{Be}$ meluruh dengan menangkap elektron menjadi ${}^7\text{Li}$. Hitung energi dan momentum pantulan inti. Massa atom Be = 7,016930 u dan massa atom Li = 7,016004 u. (Jawaban: $5,5 \times 10^{-2}$ MeV ; $4,6 \times 10^{-2}$ kg m/s).

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.

Kegiatan pembelajaran 2 EKSPERIMEN WAKTU PARUH RADIOAKTIVITAS (SIMULASI)

Kemampuan Akhir yang Diharapkan

1. Mahasiswa mampu melakukan eksperimen simulasi waktu paruh radioaktivitas secara virtual berbasis web.
2. Mahasiswa mampu melakukan analisis data dengan metode statistik ataupun grafik data hasil percobaan.
3. Mahasiswa mampu menyusun laporan waktu paruh radioaktivitas dalam bentuk jurnal.

Tujuan Eksperimen

1. Menentukan waktu paruh suatu unsur
2. Menentukan konstanta peluruhan suatu unsur

Alat dan Bahan

1. Laptop atau PC
2. Stopwatch

Uraian Materi

Peluruhan Inti Radioaktif

Peluruhan inti radioaktif adalah fenomena peluruhan secara kontinu yang terjadi pada inti atom tak stabil, hasil dari fenomena ini adalah inti baru dan/atau partikel baru. Peluruhan inti radioaktif memenuhi 4 (empat) hukum kekekalan fisis, yaitu: (1) massa-energi; (2) momentum; (3) momentum sudut total; dan (4) muatan. Berdasarkan hukum kekekalan massa-energi, maka total massa unsur sebelum dan setelah peluruhan haruslah sama. Namun dari fenomena ini, perlu diketahui berapa banyak inti yang masih tersisa dari waktu ke waktu. Besar perubahan jumlah inti tersisa sebagai fungsi waktu disebut dengan laju peluruhan, yang secara matematis dituliskan sebagai berikut:

$$\frac{dN}{dt} = -N\lambda \quad 1$$

Dengan $\frac{dN}{dt}$ menunjukkan laju peluruhan inti radioaktif, N adalah jumlah inti radioaktif pada saat t , dan λ adalah konstanta peluruhan dengan satuan s^{-1} .

Persamaan 1 menunjukkan bahwa melalui metode diferensial, laju peluruhan inti radioaktif dapat memprediksi jumlah inti yang tersisa selama

periode waktu tertentu secara rata-rata, inti yang tersisa inilah yang akan meluruh pada waktu berikutnya. Adapun jumlah inti yang tersisa pada saat t atau $N(t) = N_t$ dapat juga dituliskan dalam bentuk desimal atau persentase dari jumlah inti pada keadaan awal atau $N(0) = N_0$. Apabila persamaan 1 diintegrasikan untuk interval waktu dari $t_{awal} = 0$ hingga $t_{akhir} = t$ maka jumlah inti tak stabil pada waktu t dapat dimodelkan secara eksponensial sebagai berikut:

$$N_t = N_0 \cdot e^{-\lambda t} \quad 2$$

Dengan N_t adalah jumlah inti tak stabil yang tersisa pada waktu ($t_{akhir} = t$), N_0 adalah jumlah inti tak stabil pada keadaan awal, λ adalah konstanta peluruhan, dan t adalah selisih waktu dari keadaan awal ($t_{awal} = 0$).

Persamaan 1 juga menunjukkan sebuah besaran fisis baru, yaitu aktivitas radioaktif. Aktivitas radioaktif merupakan istilah lain dari besar laju peluruhan. Aktivitas radioaktif menunjukkan besar perubahan jumlah inti tak stabil yang meluruh terhadap elemen waktu. Secara matematis dari penurunan persamaan 1 dan 2, aktivitas radioaktif dinyatakan dengan:

$$Aktivitas = -\frac{dN}{dt} = \lambda N_0 e^{-\lambda t} \quad 3$$

Adapun *aktivitas* memiliki satuan becquerel (Bq), dengan $1 Bq$ menunjukkan terjadinya 1 (satu) peluruhan inti atom tak stabil dalam periode 1 (satu) detik.

Inti tak stabil pada keadaan awal disebut juga dengan inti induk. Seiring pertambahan waktu, jumlah inti induk akan terus menurun hingga tidak ada lagi inti induk yang tersisa ($N \sim 0$), walaupun pada waktu tak hingga. Keadaan ini membuat inti induk seakan-akan memiliki umur, yaitu lama waktu suatu inti tak stabil untuk beraktivitas sebelum habis meluruh. Namun, umur inti induk bersifat asimtotis, yaitu tidak dapat ditentukan secara pasti. Oleh sebab itu, digunakanlah waktu paruh sebagai besaran fisika untuk menunjukkan umur dari suatu inti tak stabil. Waktu paruh ($T_{\frac{1}{2}}$) dari sampel radioaktif adalah waktu yang dibutuhkan untuk setengah dari inti yang ada untuk meluruh.

$$T_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \quad 4$$

Secara umum, jika waktu sudah berjalan selama n kali $T_{\frac{1}{2}}$, maka jumlah inti tak stabil yang tersisa pada waktu t dinyatakan dengan:

$$N_t = N_0 \cdot \left(\frac{1}{2}\right)^n \quad 5$$

dengan

$$n = t \cdot T_{\frac{1}{2}} \quad 6$$

Dari persamaan 5 dan 6 dapat terlihat bahwa pada periode pertama waktu paruh (T), probabilitas inti induk berjumlah 50%. Pada periode kedua ($2 T$) inti bertahan hanya dengan probabilitas 25% (setengah dari 50%). Pada periode tiga ($3 T$) hanya dengan 12,5% (setengah dari 25%) dan begitu seterusnya. Perhitungan ini menunjukkan bahwa kita tidak dapat secara eksak menentukan waktu saat inti atom akan habis meluruh. Sebagai contoh, bahkan jika probabilitas peluruhan dalam detik berikutnya adalah 99%, tetap saja mungkin bahwa selanjutnya inti atom akan habis meluruh setelah jutaan tahun.

Simulator Peluruhan Inti Radioaktif Berbasis Web

Salah satu simulator peluruhan inti radioaktif berbasis web adalah simulator yang dapat diakses melalui *link* berikut: https://www.walter-fendt.de/html5/phen/lawdecay_en.htm. Simulator berbasis web ini (Gambar 1) dapat digunakan dengan mudah dan tak berbayar. Secara umum, simulator terbagi atas dua bagian, yaitu pengaturan (hijau) dan *display* (kuning).

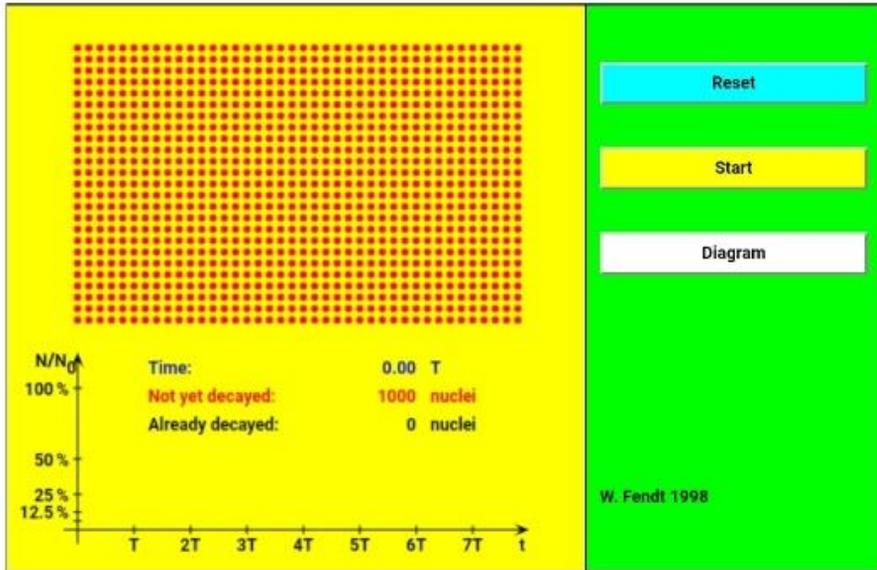
Bagian pengaturan terdiri atas 3 (tiga) menu, berikut dijelaskan beserta kegunaannya,:

1. *Start* : memulai simulasi. Saat peluruhan terjadi, maka menu ini akan berubah menjadi “*pause*”, yang berguna untuk menghentikan dan melanjutkan simulasi.
2. *Reset* : mengembalikan keadaan awal dimana peluruhan belum terjadi.
3. *Diagram* : melihat kurva yang dibentuk oleh aktivitas dengan jumlah partikel induk dinyatakan dalam persentase.

Sementara bagian *display* , terbagi atas dua bagian yaitu:

1. *Simulasi Peluruhan* : merepresentasikan inti induk dalam bentuk titik-titik sebelum meluruh (merah) dan setelah meluruh (hitam).
2. *Diagram Aktivitas* : menunjukkan hubungan jumlah inti induk terhadap waktu dalam bentuk cacah (atas) dan diagram (bawah).

Gambar 10. 9 Simulator Waktu Paruh Berbasis Web dari Aplikasi Fisika Walter Fendt



Sumber: https://www.walter-fendt.de/html5/phen/lawdecay_en.htm

Prosedur Eksperimen

1. Akses simulator dengan mengklik link berikut pada laman browser anda.
2. Setelah mengakses simulator, buat Tabel 1 di buku catatan laboratorium Anda untuk mencatat waktu yang telah berlalu dan jumlah inti untuk sampel yang meluruh.
3. Mulailah simulasi dengan mengklik START dari menu simulator. Klik juga tombol START pada stopwatch untuk mengukur waktu.
4. Gunakan PAUSE untuk menjeda simulasi sementara, bersamaan dengan PAUSE pada stopwatch
5. Catat jumlah inti induk yang tersisa yang tertera pada display diagram dan waktu yang tertera pada stopwatch pada Tabel 1.
6. Ulangi langkah 1 sampai dengan 5 hingga diperoleh 50 data hingga diperoleh waktu paruh dari sampel.

Tabel 26 Data Pengamatan Eksperimen Waktu Paruh

Percobaan ke-	N_t	$t(s)$
1		

2		
...		
50		

Grafik.

1. Buat grafik dari data Anda untuk jumlah inti vs waktu yang berlalu (N_t vs t)
2. Observasi pada simulasi untuk menentukan waktu paruh $T_{\frac{1}{2}}$.
3. Hitung dan catat konstanta peluruhan λ dengan menggunakan rumus yang diberikan di bagian pengantar.
4. Buat grafik jumlah partikel tersisa (N_t) terhadap waktu t

Pertanyaan

1. Sebutkan tujuan eksperimen laboratorium waktu paruh
2. Sebutkan alat dan bahan yang terdapat pada eksperimen simulasi waktu paruh
3. Berdasarkan grafik jumlah partikel tersisa (N) terhadap waktu, berilah penjelasan dari pertanyaan berikut:
 - a. Bagaimana bentuk kurva yang terjadi pada peluruhan pada sampel Anda?
 - b. Bagaimana penjelasan fisis tentang keadaan jumlah partikel pada terhadap lamanya waktu peluruhan sampel tersebut?
 - c. Berapa lama waktu yang diperlukan agar sampel tersisa hingga separuhnya ?
 - d. Disebut dengan apakah waktu yang diperlukan oleh sebuah sampel radioaktif yang meluruh tersisa separuh dari jumlah partikel semula ?
 - e. Berapa besar konstanta peluruhan dari sampel ini ?
 - f. Apa yang dimaksud dengan konstanta peluruhan ?
4. Apakah waktu paroh yang diperoleh dari eksperimen ini sudah eksak atau merupakan prediksi rata-rata? Mengapa?
5. Buatlah analisis dan kesimpulan dari eksperimen Simulasi laboratorium waktu paruh yang telah anda lakukan !

Penugasan Kelas

Bentuklah kelompok (beranggotakan dua sampai tiga orang) kemudian lakukanlah **Eksperimen Waktu Paruh Radioaktivitas** sesuai prosedur eksperimen yang telah dijelaskan dalam modul ini.

- Selamat Mengerjakan-

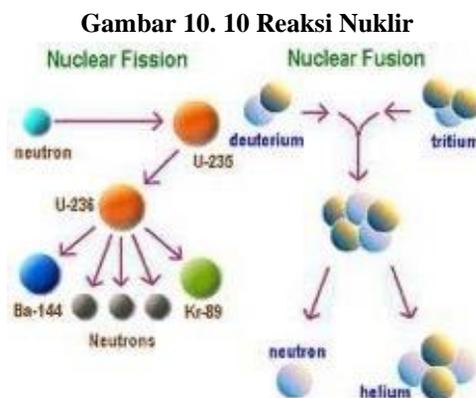
Kegiatan Pembelajaran 3 REAKSI NUKLIR

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa dapat menjelaskan reaksi nuklir	a. Mahasiswa dapat menjelaskan skema reaksi nuklir b. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang energi ambang c. Mahasiswa dapat menjelaskan tentang penampang reaksi d. Mahasiswa dapat menjelaskan reaksi fusi e. Mahasiswa dapat menjelaskan reaksi fisi.

Uraian Materi

A. Skema Reaksi Nuklir

Reaksi nuklir adalah sebuah proses di mana dua nuklei atau partikel nuklir bertubrukan, untuk memproduksi hasil yang berbeda dari produk awal. Contoh reaksi fusi nuklir adalah reaksi yang terjadi di hampir semua inti bintang di alam semesta. Pada peluruhan inti radioaktif, perubahan inti terjadi dengan sendirinya tanpa adanya pengaruh luar. P

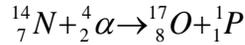


Sumber: <https://www.google.com/imgres?imgurl=http%3A%2F%2F>

erubahan inti dapat pula dilakukan dengan menembak inti menggunakan partikel- partikel berenergi. Perubahan yang terjadi disebut reaksi nuklir.

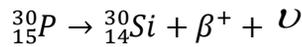
Partikel penembak yang di gunakan umumnya partikel ringan seperti, α, γ, β proton, deuteron, neutron, atau sistem .

Sebagai contoh ${}^{14}_7N$ di tembak dengan partikel α .

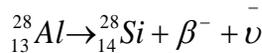
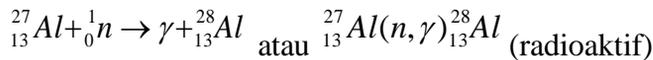


Reaksi demikian disebut pula transmudasi terinduksi, sedangkan pada peluruhan α dan β disebut transmudasi spontan. Reaksi di atas dalam

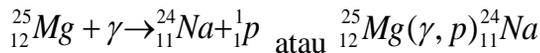
penulisannya dapat di singkat menjadi ${}^{14}_7N (\alpha, p) {}^{17}_8O$. Contoh lain adalah ${}^7_3Li (p, \alpha) {}^4_2He$. Adakalanya, inti hasil reaksi berupa inti radioaktif dan disebut radioaktif buatan. Sebagai contoh, reaksi ${}^{27}_{13}Al (\alpha, n) {}^{30}_{15}P$. Di sini ${}^{30}_{15}P$ akan meluruh melalui reaksi :



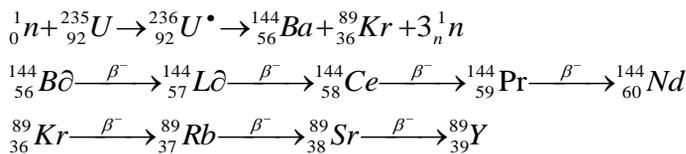
Suatu reaksi inti dengan penangkapan neutron disertai emisi foto gamma disebut tangkapan radiatif neutron. Sebagai contoh :



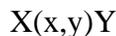
Fotodisintegrasi adalah reaksi saat penyerapan foton gamma menyebabkan terjadinya disintegrasi inti penyerap.



Reaksi fisi (pembelahan) terjadi pada inti berat yang dalam reaksi ini pecah menjadi inti-inti yang lebih ringan. Contoh pada reaksi :



Secara umum reaksi inti dapat dituliskan sebagai:



Inti target X diandaikan dalam keadaan rehat. Nilai Q dalam reaksi inti didefinisikan sebagai energi total yang keluar dalam reaksi, yaitu sama dengan selisih energi kinetik sebelum reaksi dan energi kinetik sesudah reaksi.

$$Q = (k_y + k_Y) - k_x$$

$$K_x = \text{energi kinetik inti sasaran} = 0$$

K_x = energi kinetik partikel penembak

K_Y = energi kinetik inti hasil reaksi

K_y = energi kinetik partikel yang dipancarkan sesudah reaksi

Kekekalan energi pada reaksi demikian memberikan:

$$(m_x c^2 + K_x) + m_x c^2 = (m_y c^2 + K_y) + (m_y c^2 + K_y)$$
$$(m_x + m_x) c^2 - (m_y + m_y) c^2 = (K_y + K_y) - K_x = Q$$

Jika $Q > 0$ energi dilepaskan dalam reaksi, reaksinya disebut reaksi eksotermik atau eksoergik. Untuk $Q < 0$, energi diperlukan dalam reaksi dan reaksinya disebut reaksi endotermik atau endoergik.

Pada reaksi ${}^7_3\text{Li}(p, \alpha){}^4_2\text{He}$, $y = Y$

$${}^1_1\text{H} = 1,007825u$$

$${}^4_2\text{He} = 4,002603u$$

$$\underline{{}^7_3\text{Li} = 7,016004u}$$

$$\underline{{}^4_2\text{He} = 4,002603u}$$

Massa $m_x + m_x = 8,023829u$ massa $m_y + m_Y = 8,005206u$

$$\frac{Q}{c^2} = (8,023829 - 8,005206)u$$
$$= 0,018623u$$

B. Energi Ambang (Threshold Energy)

Agar reaksi inti dapat terjadi, partikel penembak paling tidak harus memiliki energi tertentu yang disebut energi ambang. Cara menghitungnya akan memanfaatkan system acuan laboratorium dan system acuanpusat massa

Dari pembahasan relativistik, terdapat persamaan :

$$E_0^2 = E^2 - (pc)^2 \rightarrow \text{sistem}$$

$$E_0^2 = E_{lab}^2 - (p_{lab}c)^2$$

$$E_0^2 = E_{pm}^2 - (p_{pm}c)^2$$

jika kita tinjau keadaan sebelum reaksi dalam sistem laboratorium:

$$p_{Lab} = p_x$$

(inti sasaran tak bergerak)

$$E_{Lab} = E_x + E_X$$

$$= (E_{ox} + E_{ih}) + (E_{ox} + 0)$$

Dalam sistem pusat massa (peninjau selalu berada di p.m)

$$P_{pm} = 0$$

$$E_{pm} = E_{oy} + E_{oY}$$

$$E_0^2 = [(E_{ox} + E_{th}) + E_{oX}]^2 - (P_x c)^2$$

$$E_0^2 = [(E_{oy} + E_{oY})]^2 - (0.c)^2$$

$$(E_{oy} + E_{oY})^2 = [(E_{ox} + E_{th}) + E_{oX}]^2 - (P_x c)^2$$

Untuk partikel x dalam sistem laboratorium, berlaku :

$$E_{ox}^2 = E_x^2 - (P_x c)^2$$

$$E_{ox}^2 = (E_{ox} + E_{th})^2 - (P_x c)^2$$

atau

$$(P_x c)^2 = (E_{ox} E_{th})^2 - E_{ox}^2$$

$$(E_{oy} + E_{oY})^2 = (E_{ox} + E_{th} + E_{oX})^2 + E_{ox}^2 - (E_{ox} + E_{th})^2$$

$$E_{th} = \frac{(E_{oy} + E_{oY})^2 - (E_{ox} + E_{oX})^2}{2E_{oX}}$$

$$E_{th} = \frac{[(E_{oy} + E_{oY}) - (E_{ox} + E_{oX})][(E_{oy} + E_{oY}) + (E_{ox} + E_{oX})]}{2E_{oX}}$$

Dengan menggunakan hubungan

$$\frac{Q}{c^2} = (m_x + m_X) - (m_y + m_Y)$$

kita peroleh:

$$E_{th} = \frac{Q(m_x + m_X + m_y + m_Y)}{2m_X}$$

$$= - \frac{Q X (\text{massa rehat semua partikel sebelum dan sesudah reaksi})}{2 X (\text{massa rehat partikel sasaran})}$$

C. Penampang Reaksi (Cross Section Reaction)

Pada proses peluruhan radioaktif, λ adalah ukuran kemungkinan proses peluruhan akan terjadi. Sementara pada reaksi inti σ adalah ukuran kemungkinan dalam ruang bahwa reaksi akan terjadi. Besaran demikian

dinamakan tampang reaksi. Hukum kekekalan momentum dan energi menunjukkan jika suatu reaksi dapat terjadi, sedangkan tampang reaksi σ menunjukkan besarnya kemungkinan terjadinya reaksi. Andaikan partikel x ditumbukkan ke sasaran X. Masing-masing inti X berhubungan dengan suatu luasan σ dimana reaksi hanya akan terjadi jika x jatuh dalam luasan σ . Tebal sasaran t dibuat sangat kecil (tipis) sehingga tidak ada inti yang sembunyi di balik inti lain.

Jika n_i : cacah partikel datang = n_x

n : cacah partikel yang bereaksi berarti pula cacah Y yang terbentuk

N : cacah inti sasaran per satuan volume

Cacah inti sasaran total = NAt . Karena masing-masing inti mempunyai luasan atau tampang reaksi σ maka luas seluruhnya yang menyebabkan reaksi adalah σNAt .

Perbandingan

$$\frac{\text{partikel datang}}{\text{partikel bereaksi}} = \frac{\text{luasan sasaran}}{\text{luasan reaksi total}}$$

$$\frac{n_i}{n} = \frac{A}{\sigma NAt}$$

$$\frac{n}{n_i} = \text{kemungkinan terjadinya reaksi} = \sigma Nt$$

Satuan tampang reaksi σ adalah m^2 yang umumnya bernilai sangat kecil maka dipakai satuan barn, yaitu $1 \text{ barn} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$.

Contoh :

Tangkapan radiatif neutron 500keV dalam ${}_{13}^{27}\text{Al}(n, \gamma){}_{13}^{28}\text{Al}$

$\sigma = 2 \text{ mbarn} = 2 \times 10^{-31} \text{ m}^2, \rho = 2,7 \text{ g/cm}^3$

$\phi_n = 1,0 \times 10^{10} \text{ neutron/cm}^2$

$t = 0,20 \text{ mm} = 2 \times 10^{-2} \text{ cm}$

Berapakah cacah neutron tertangkap per detik dalam luasan target 1 cm^2 ?

Penyelesaian :

Rapat inti :

$$N = \frac{\rho}{B.A} \times N_A$$

$$= \frac{2,7 \text{ g/cm}^3}{27 \text{ g/gramol}} \times 6 \times 10^{23} \text{ atom/gramol}$$

$$= 6 \times 10^{22} \text{ inti/cm}^3$$

$$n = n_i \sigma N t$$

$$\Phi = \Phi_n \sigma N t = (1,0 \times 10^{10} \text{ n/cm}^2)(2 \times 10^{-27} \text{ cm}^2) \times (6 \times 10^{22} \text{ inti/cm}^3)(2 \times 10^{-2} \text{ cm})$$

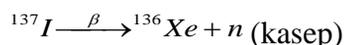
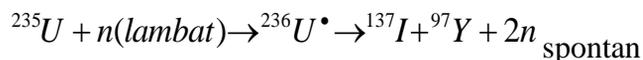
$$\Phi = 2,4 \times 10^4 \text{ neutron/cm}^2 \cdot \text{s}$$

D. Reaksi Fisi (Pembelahan)

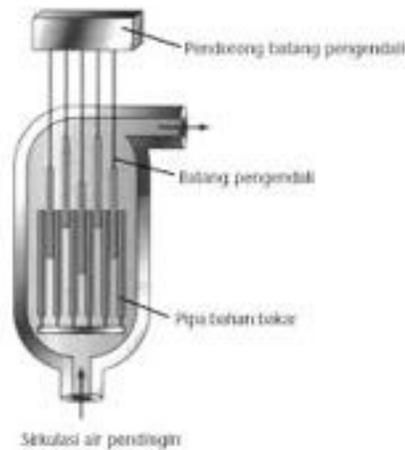
Inti-inti berat cenderung untuk pecah menjadi dua inti yang hampir sama. Ini disebabkan energi ikat per nukleon untuk inti berat lebih kecil dari energi ikat per nukleon untuk inti ringan hasil belahannya. Sebagai contoh, inti dengan $A = 230$ mempunyai energi ikat per nukleon sekitar 7,6 MeV, sedangkan inti dengan $A = 15$ energi ikat per nukleonya adalah 8,5 MeV. Pembelahan ini melalui proses bahwa sebelum memisahkan diri, inti-inti hasil belahan harus menembus tanggul potensial coulomb. Hal terjadi dalam waktu cukup lama sebelum pembelahan betul-betul terjadi rata-rata sekitar 10^{16} tahun untuk ^{238}U .

Pembelahan inti dapat diimbas dengan menembakkan neutron pada inti tersebut. Sebagai contoh adalah reaksi tangkapan neutron lambat oleh inti ^{235}U untuk membentuk inti gabungan ^{236}U yang tereksitasi dan segera meluruh melalui pembelahan. Pembelahan demikian umumnya menghasilkan inti-inti dengan nomor massa sekitar 95 dan 140. Karena inti-inti berat memiliki kelebihan neutron maka proses pembelahan disertai pula pelepasan beberapa neutron yang disebut neutron spontan (prompt neutron) kadang-kadang inti hasil belah menghasilkan pula neutron dalam proses peluruhnya. Neutron dalam hal ini dinamakan neutron kasep (delayed neutron).

Contoh reaksi pembelahan sebagai berikut:



Gambar 10. 11 Reaktor Fisi



Sumber: Chemistry: The Central Science, 2000.

Sumber: <https://images.app.goo.gl/aJt1dseTEKL32EkJA>

a. Neutron

Neutron adalah pembelahan sendiri menghasilkan neutron yang dapat mengimbas reaksi pembelahan berikutnya. Proses pembelahan dapat mempertahankan terjadinya pembelahan sendiri dan terjadilah reaksi berantai yang dapat tumbuh semakin banyak. Inilah dasar kerja reaktor nuklir fisi. Proses penting dalam reaktor adalah pembelahan inti yang diikuti dengan pelepasan beberapa neutron dan sejumlah tenaga. Inti yang dapat membelah tersebut merupakan bahan bakar yang tersedia di alam ataupun diproduksi khusus untuk itu. ^{235}U merupakan bahan bakar alam yang hanya 0,7 % dari uranium yang ada. ^{235}U merupakan inti yang dapat membelah melalui tangkapan neutron lambat dengan menghasilkan inti hasil belah rata-rata 2,5 neutron tiap pembelahan.

Neutron yang dihasilkan dalam pembelahan merupakan neutron cepat sehingga perlu diperlambat agar dapat bereaksi dengan inti ^{235}U yang dijumpainya. Untuk keperluan itu dipasang bahan pemperlambat neutron dalam reaktor yang disebut moderator. Agar proses perlambatan efektif kita pilih bahan moderator yang mengandung inti bermassa seimbang dengan massa neutron. Bahan-bahan yang sering digunakan adalah air (H_2O), air berat (D_2O), grafit (C), dan berilium (Be).

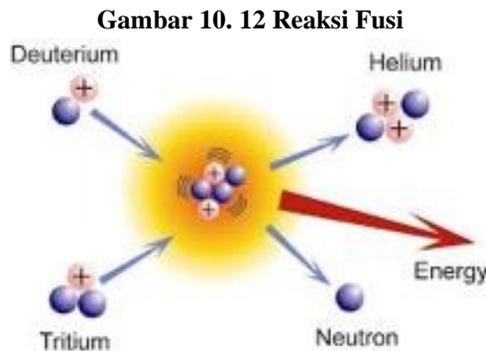
Pada reaktor daya, energi panasnya dimanfaatkan untuk menguap air dan selanjutnya akan menggerakkan turbin yang digandeng dengan dinamo pembangkit listrik.

E. Reaksi Fusi (Peleburan)

Reaksi Fusi (reaksi termonuklir) adalah sebuah reaksi di mana dua inti atom bergabung membentuk satu atau lebih inti atom yang lebih besar dan partikel subatom (neutron atau proton). Perbedaan dalam massa antara reaktan dan produk dimanifestasikan sebagai pelepasan energi dalam jumlah besar. Peleburan inti deuterium menghasilkan energi 4,0 MeV. Agar reaksi peleburan dapat terjadi, inti-inti ringan harus menembus suatu tanggul potensial Coulomb. Inti-inti harus memiliki energi kira-kira sebesar:

$$E \approx \frac{z_1 z_2 e^2}{4\pi\epsilon_0 (r_1 + r_2)}$$

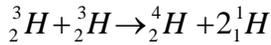
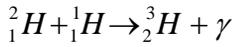
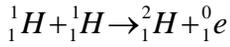
Untuk $z_1 = z_2 = 1$ dan $r_1 + r_2$ berorde fm, besar energi adalah 0,7 MeV, sehingga masing-masing inti berenergi 0,35 MeV. Inti dapat memiliki energi sebesar ini jika memiliki suhu diatas 2×10^9 K. Namun demikian, reaksi peleburan dapat pula terjadi pada suhu yang lebih rendah, yaitu sekitar 10^7 K karena energi termal inti terdistribusi menurut agihan melakukan agihan Maxwell-Boltzman sehingga ada sebagian inti memiliki energi yang cukup untuk melakukan peleburan. Kemudian, inti dapat pula menembus dinding tanggul potensial. Agar reaksi peleburan dapat dikendalikan, kita memerlukan suatu ruangan antara $10^7 - 10^8$ K. Pada suhu ini atom-atom terionisasi dan membentuk keadaan yang disebut plasma.



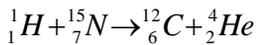
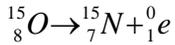
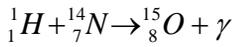
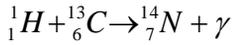
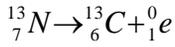
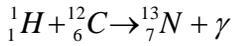
Sumber: <https://images.app.goo.gl/JWLV23ZXb7hZ3reH8>

Reaksi pembelahan merupakan sumber energi di matahari dan bintang-bintang. Energi dihasilkan melalui dua macam reaksi:

Daur proton-proton menghasilkan energi sekitar 25 MeV melalui langkah-langkah sebagai berikut.:



Cara kedua melalui daur Carbon yang dominan pada suhu tinggi :



Didalam daur ini empat buah inti hidrogen melebur menjadi sebuah inti helium dan ${}^{12}_6\text{C}$ hanya bekerja sebagai katalisator.

Rangkuman

Reaksi nuklir adalah sebuah proses di mana dua nuklei atau partikel nuklir bertubrukan, untuk memproduksi hasil yang berbeda dari produk awal. Contoh reaksi fusi nuklir adalah reaksi yang terjadi di hampir semua inti bintang di alam semesta.

Evaluasi Formatif

Kerjakan uji kompetensi Buku Marthen Kanginan , Fisika SMA Halaman 456 hingga 477.

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan

menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.

Kegiatan Pembelajaran 4 SIMULASI REAKSI FISI

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa mampu melakukan simulasi reaksi Fisi melalui simulasi PhET dan dapat menganalisis hasil simulasinya	<ol style="list-style-type: none">1. Mahasiswa mampu melakukan eksperimen reaksi fisi melalui simulasi berbasis web.2. Mahasiswa mampu menganalisis data dengan metode statistik ataupun grafik.3. Mahasiswa mampu menyusun laporan eksperimen simulasi reaksi fisi dalam bentuk jurnal.

Uraian Materi

A. Simulasi Reaksi Fisi

1. Tujuan Eksperimen

- a. Menjelaskan proses reaksi fisi pada U^{235} dan U^{238} .
- b. Melakukan simulasi reaksi fisi pada bom atom.

2. Landasan Teori

a. Reaksi Fisi

Energi ikat per nukleon pada inti-inti berat lebih kecil daripada inti-inti ringan. Hal ini menyebabkan inti-inti berat cenderung untuk pecah secara alamiah menjadi dua inti yang hampir sama. Pembelahan inti terjadi jika inti-inti hasil belahan telah menembus tanggul potensial Coulomb. Waktu yang diperlukan untuk menembus tanggul ini bervariasi pada inti atom, misalnya untuk inti atom U^{238} dapat terjadi selama 10^{16} tahun. Maka untuk mempercepat proses pembelahan ini, dilakukan penembakan neutron pada inti tersebut.

Pembelahan inti terhadap inti atom U^{235} akan membentuk inti gabungan U^{236} yang tereksitasi dan segera meluruh melalui pembelahan. Pembelahan ini biasanya menghasilkan inti-inti dengan nomor massa sekitar 95 dan 140, neutron dan sejumlah tenaga. Karena inti-inti berat memiliki kelebihan neutron, maka proses pembelahan (reaksi fisi) akan disertai juga dengan pelepasan beberapa neutron yang disebut dengan neutron spontan

(*prompt neutron*). Apabila inti turunan juga akan menghasilkan neutron dalam proses peluruhannya, neutron ini disebut sebagai neutron kasep (*delayed neutron*). Baik neutron spontan maupun neutron kasep akan kembali menembak inti atom U^{235} , dan mengimbas reaksi fisi berikutnya. Dengan demikian, proses pembelahan pada reaksi fisi dapat mempertahankan terjadinya pembelahannya sendiri dan terjadilah reaksi berantai yang dapat tumbuh dengan banyak. Inilah yang menjadi dasar kerja reaktor nuklir fisi.

b. Reaksi Fisi pada Platform PhET

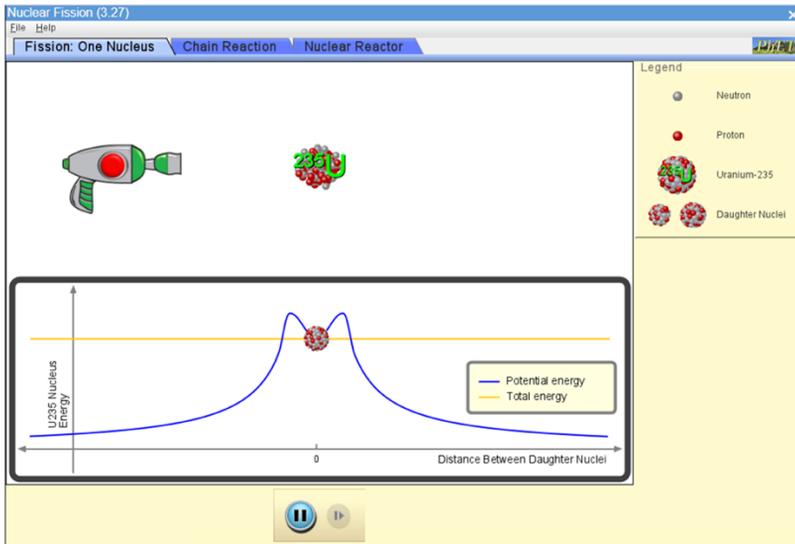
Bagian 1 – Reaksi Fisi Nukleus Tunggal

Tab FISSION-ONE NUCLEUS (Gambar 1) menggambarkan reaksi fisi yang terjadi pada sebuah inti atom tunggal dari U^{235} . Penggambaran reaksi fisi ditampilkan melalui ilustrasi yang terjadi antara neutron dengan inti atom U^{235} . Saat neutron ditembakkan dengan inti atom U^{235} terjadi peningkatan energi inti pada inti atom U^{235} , yang diperlihatkan oleh naiknya garis mendatar berwarna kuning dan naiknya inti atom ke dua puncak kurva. Hasil dari reaksi fisi ini berupa dua inti turunan (DAUGHTER NUCLEI) dan tiga buah neutron.

Tab FISSION-ONE ATOM terdiri dari dua bagian, yaitu pengaturan (kanan) dan display (kiri). Adapun bagian-bagian tab ini secara lengkap beserta kegunaannya adalah:

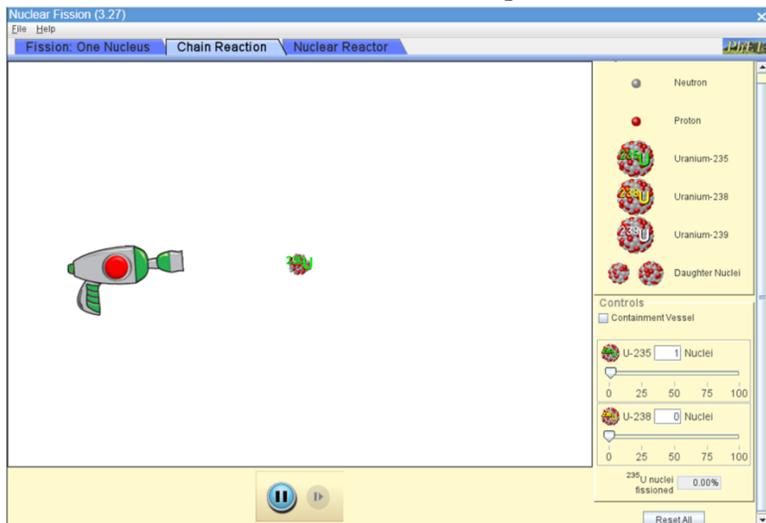
1. PLAY : memulai simulasi
2. PAUSE: menjeda simulasi
3. LEGEND: menampilkan keterangan dari display
4. DISPLAY
 - a.. Akselarator/*Neutron Gun* : menembakkan neutron ke arah inti atom
 - b. Inti Atom U^{235} : mengilustrasikan reaksi fisi yang terjadi pada inti atom tunggal.
5. DIAGRAM : menunjukkan hubungan energi inti U^{235} terhadap jarak antara dua inti turunan pada keadaan sebelum dan sesudah reaksi fisi.

Gambar 10. 13 Tab FISSION-ONE ATOM pada Simulasi Reaksi Fisi Platform PhET



Sumber: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpi/nuclear-physics/latest/nuclear-physics.html?simulation=nuclear-fission>

Gambar 10. 14 Reaksi Rantai Simulator Fisi Nuklir pada Platform PhET



Sumber: <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpi/nuclear-physics/latest/nuclear-physics.html?simulation=nuclear-fission>

Bagian 2 – Reaksi Rantai

Jendela (tab) CHAIN REACTION (Gambar 2) dapat digunakan untuk mensimulasikan reaksi fisi U^{235} dan U^{238} dengan melakukan variasi pada

jumlah nukleus. Reaksi fisi yang terjadi pada tab ini melibatkan inti atom tak stabil jamak yang jumlahnya dapat diatur. Reaksi fisi pada inti atom jamak memperlihatkan terjadinya reaksi berantai pada reaksi fisi ini. Tab ini juga berhasil mensimulasikan terjadinya reaksi fisi pada bom atom.

Tab CHAIN REACTION terbagi atas dua bagian, yaitu display (kiri) dan pengaturan (kanan). Bagian-bagian simulator CHAIN REACTION beserta fungsinya masing-masing dapat dijelaskan sebagai berikut:

- a. PLAY/PAUSE: Tombol PLAY digunakan untuk memulai simulasi. Tombol PAUSE akan muncul saat simulasi telah berjalan, dimana fungsi tombol ini adalah untuk menjeda simulasi.
- b. LEGEND: mengilustrasikan persamaan kimia pada reaksi fisi yang terjadi.
- c. CONTROL: terdiri atas CONTAINMENT VESSEL, jumlah nukleus U^{235} dan jumlah nukleus U^{238} , U^{235} NUCLEI FISSIONED, serta RESET.
 - 1) CONTAINMENT VESSEL : mewadahi reaksi fisi yang terjadi.
 - 2) Jumlah nukleus U^{235} : mengatur jumlah nukleus U^{235} dengan menggerakkan tombol cursor ke kiri atau kanan.
 - 3) Jumlah nukleus U^{238} : mengatur jumlah nukleus U^{238} dengan menggerakkan tombol cursor ke kiri atau kanan.
 - 4) U^{235} NUCLEI FISSIONED : menampilkan persentase nukleus U^{235} yang berhasil berfisi.
 - 5) RESET : mengembalikan simulasi pada keadaan awal.
- d. DISPLAY
 - 1) Neutron Gun : menembakkan neutron kearah nukleus
 - 2) Nukleus: menampilkan jumlah nukleus dan mengilustrasikan reaksi fisi yang terjadi.

3. Alat dan Bahan

1. Laptop/PC/Smartphone
2. Simulator Reaksi Fisi pada platform PhET

4. Prosedur Eksperimen

Simulasi reaksi fisi pada platform PhET dapat diakses melalui link berikut <https://phet.colorado.edu/sims/cheerpj/nuclear-physics/latest/nuclear-physics.html?simulation=nuclear-fission>.

Bagian 1 – Reaksi Fisi Nukleus Tunggal

1. Pilih SINGLE ATOM pada tab atas sebelah kiri
2. Klik PLAY, kemudian tekan tombol akselerator untuk menembakkan neutron ke arah inti atom U^{235} .
3. Amati reaksi yang terjadi pada bagian DISPLAY

Bagian 2 – Reaksi Rantai dan Reaksi pada Bom Atom

1. Pilih CHAIN REACTION pada tab atas.
2. Atur jumlah nukleus pada U^{235} dan U^{238} menggunakan cursor pada bagian CONTROLS, sesuai dengan Tabel 1
3. Arahkan akselerator untuk menembakkan neutron tepat ke arah inti atom
4. Catat persentase inti atom U^{235} yang berhasil berfisi pada tembakan pertama
4. Kemudian kembali arahkan akselerator untuk menembakkan neutron ke arah inti atom yang tersisa.
5. Teruskan menembak hingga seluruh inti atom telah habis tertembak, hitung berapa kali jumlah tembakan hingga seluruh atom U^{235} berhasil berfisi. Catat kedalam Tabel 1.
6. Amati apakah terjadi reaksi bom atom? Jika iya, pada komposisi manakah?
7. Setelah selesai, centang CONTAINMENT VESSEL, dan ulangi langkah 1 hingga 6 namun hasilnya dicatat pada Tabel 2.

Tabel 1

Tabel 27 Reaksi Fisi Tanpa Containment Vessel

Percobaan ke-	Komposisi (nukleus)		Jumlah U^{235} berfisi (%)	Jumlah tembakan
	U^{235}	U^{238}		
1	0	100		
	25	75		
	50	50		
	75	25		
20	100	0		

Tabel 2

Tabel 28 Reaksi Fisi dengan Containment Vessel

	Komposisi (nukleus)		

Percobaan ke-	U^{235}	U^{238}	Jumlah U^{235} berfisi (%)	Jumlah tembakan
1	0	100		
	25	75		
	50	50		
	75	25		
20	100	0		

5. Penugasan Kelas

Bentuklah kelompok (beranggotakan 2 -3 orang) kemudian lakukanlah **Simulasi Reaksi Fisi** sesuai dengan prosedur eksperimen yang telah dijelaskan dalam modul ini.

Rangkuman

Energi ikat per nukleon pada inti-inti berat lebih kecil daripada inti-inti ringan. Hal ini menyebabkan inti-inti berat cenderung untuk pecah secara alamiah menjadi dua inti yang hampir sama. Pembelahan inti terjadi jika inti-inti hasil belahan telah menembus tanggul potensial Coulomb.

Evaluasi Formatif

Essay

Bagian 1 – Reaksi Fisi Nukleus Tunggal

1. Jelaskan mengapa U^{235} menjadi salah satu bahan yang palong sering digunakan pada reaktor nuklir fisi!

Jawab:

2. Tuliskan persamaan kimia pada reaksi fisi pada U^{235} dan U^{238} .

Jawab:

3. Gambar ulang kurva yang dibentuk pada diagram dan jelaskan bagaimana bentuk kurva pada diagram! Mengapa terjadi kurva dengan bentuk tersebut?

Jawab:

4. Buatlah analisis dan kesimpulan dari eksperimen simulasi reaksi inti yang telah anda lakukan!

Jawab:

Bagian 2 – Reaksi Rantai dan Reaksi pada Bom Atom

1. Mengapa reaksi fisi pada U^{235} disebut sebagai reaksi rantai?

Jawab:

2. Bandingkan proses reaksi fisi yang terjadi pada U^{235} dan U^{238} .
a. sebutkan persamaan dan perbedaannya.

Jawab:

b. Jelaskan mengapa terdapat perbedaan reaksi pada U^{235} dan U^{238}

Jawab:

3. Apa yang dimaksud dengan *containment vessel* ? Dapatkah bom atom terjadi pada reaksi fisi tanpa *Containment vessel*? Mengapa ? Jelaskan!

Jawab:

4. Pada perbandingan komposisi U^{235} dan U^{238} berapakan yang mulai menghasilkan bom atom dengan daya ledak paling tinggi ? Mengapa? Jelaskan alasanmu.

Jawab:

5. Jelaskan fungsi dan bahan penyusun dari:

a. Containment vessel

Jawab:

b. Moderator

Jawab:

c. Batang pengendali

Jawab:

6. Buatlah analisis dan kesimpulan dari eksperimen simulasi reaksi inti yang telah anda lakukan!

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.

Penutup

Rangkuman

Radioaktivitas menjelaskan tentang fenomena radioaktivitas dan aplikasinya.

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York

MODUL 11

PARTIKEL ELEMENTER

Pendahuluan

Hai Physics Learners! Selamat datang di Partikel elementer.

1. Capaian Pembelajaran Lulusan (CPL)

Setiap lulusan Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Pendidikan Universitas Kristen Indonesia, wajib memiliki sikap sebagai berikut:

a. Unsur Sikap (S)

- 1) Bekerja sama dan memiliki kepekaan sosial serta kepedulian terhadap masyarakat dan lingkungan (S-6).
- 2) Menginternalisasi nilai, norma, dan etika akademik (S-8).
- 3) Menunjukkan sikap bertanggungjawab atas pekerjaan di bidang keahliannya secara mandiri (S-9).

b. Unsur Keterampilan Umum (KU)

- 1) Mampu melakukan proses evaluasi diri terhadap kelompok kerja yang berada di bawah tanggung jawabnya, dan mampu mengelola pembelajaran secara mandiri (KU-8).
- 2) Mampu mendokumentasikan, menyimpan, mengamankan, dan menemukan kembali data untuk menjamin kesahihan dan mencegah plagiasi (KU-9).
- 3) Mampu mengungkapkan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber ke dalam karya ilmiah untuk menunjang dan mengembangkan kegiatan belajar dan pembelajaran Fisika (KU-10).
- 4) Mampu menerapkan teknologi informasi dan komunikasi sebagai media atau sumber pembelajaran, mendukung proses dan pengembangan pembelajaran Fisika (KU-11).

c. Unsur Keterampilan Khusus (KK)

- 1) Mampu mengaplikasikan keilmuan fisika dalam melaksanakan pembelajaran inovatif (KK-2)
- 2) Mampu memecahkan solusi persamaan fisika (KK 7)

d. Unsur Pengetahuan (PG)

- 1) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip keilmuan fisika (PG-3)

- 2) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip terapan fisika (PG-4)
- 3) Mampu menguasai konsep perkembangan fisika secara mikroskopik (PG-6)
- 4) Mengetahui dan memahami konsep dan prinsip fisika berbasis IPTEKS (PG-7)

2. Kemampuan Akhir (KA)

RANAH	KEMAMPUAN AKHIR
Pengetahuan	Mahasiswa mampu menjelaskan tentang partikel elementer
Sikap	<ol style="list-style-type: none"> a. Mahasiswa mampu mendiskusikan ide, opini, dan simpulan yang diperoleh dari berbagai sumber selama perkuliahan secara aktif. b. Mahasiswa mampu menaati nilai, norma, dan etika akademik dengan baik. c. Mahasiswa mampu bekerja sama dalam kelompoknya dengan baik.
Psikomotor	Mahasiswa mampu melakukan simulasi dan melaporkan hasil simulasinya.

3. Prasyarat Kompetensi

- a) Mahasiswa mampu menganalisis besaran gerak berdasarkan hukum-hukum Newton tentang gerak.
- b) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran- besaran elektromagnet berdasarkan hukum Maxwell
- c) Mahasiswa mampu menjelaskan hubungan besaran-besaran panas dan suhu berdasarkan hukum-hukum termodinamika

4. Kegunaan Modul

Modul pengantar fisika modern ini bermanfaat dalam memperkuat dasar pengetahuan calon pendidik dalam bidang riset fisika murni,

5. Materi Pokok dan Sub Materi Pokok

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
Partikel elementer	A. Perkembangan penemuan partikel elementer

MATERI POKOK	SUB MATERI POKOK
	B. Lepton C. Barion D. Meson E. Interaksi antar partuikel elementer F. quark
Akselarator dan detector	A. Detektor isian gas B. Detektor kelipan C. Detektor semikonduktor D. Detektor jejak E. Detektor Cerenkov F. Akselarator G. Siklotron H. Sinkosiklotron I. Betatron J. Sinkrotron
Kunjungan ilmiah ke Batan	Kunjungan ilmiah ke Batam

Kegiatan Pembelajaran 1 PARTIKEL ELEMENTER

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa dapat menjelaskan partikel elementer	a. mahasiswa dapat menjelaskan perkembangan penemuan partikel elementer b. mahasiswa dapat menjelaskan lepton, barion dan meson c. mahasiswa dapat menjelaskan tentang interaksi antar partikel elementer d. mahasiswa dapat menjelaskan tentang quark

Uraian Materi

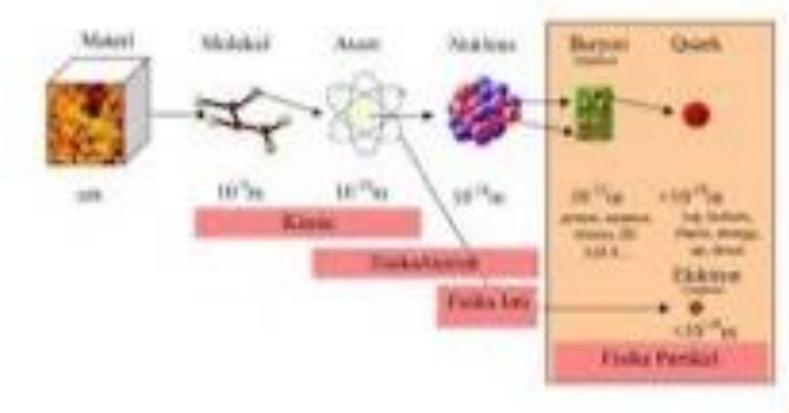
A. Perkembangan penemuan partikel elementer

Untuk menemukan partikel elementer para fisikawan telah melakukan eksperimen menggunakan partikel berenergi tinggi untuk membelah proton. Namun, hasilnya adalah lahirnya partikel-partikel baru yang tidak lebih elementer dari pada proton. Partikel-partikel tersebut adalah meson, pion, kaon, dan hiperon, lamda, delta dan sebagainya.

Di akselerator linear Stanford, elektron bertenaga sangat tinggi ditembakkan pada sasaran proton. Hasil-hasil eksperimen menunjukkan bahwa sebagian elektron dihamburkan dengan sudut hamburan yang besar, seolah-olah telah membentur sesuatu yang “keras” di dalam proton tepat seperti eksperimen hamburan partikel α Rutherford yang membuktikan adanya inti dalam atom. Dengan demikian, **proton** dan **barion** lainnya diyakini merupakan partikel gabungan bagian-bagian penyusunnya yang kecil. Sebaliknya, **elektron** dan **lepton** yang lain tidak menunjukkan adanya struktur internal.

Elektron berlaku seperti titik yang tak terbagi lagi dan merupakan partikel elementer sejati. Atom terdiri atas elektron-elektron yang mengorbit sekitar inti, dan selanjutnya ditemukan pula bahwa inti atom bukanlah partikel elementer karena ternyata tersusun atas proton dan neutron yang dikenal sebagai barion.

Gambar 11. 1 partikel Elementer



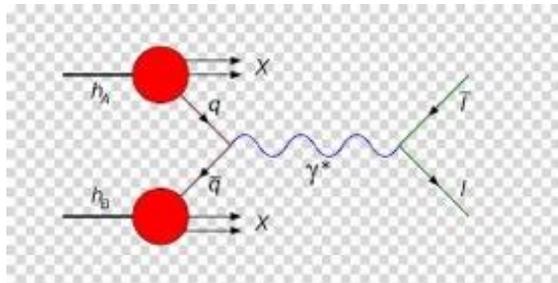
Sumber: <https://images.app.goo.gl/4Fcki2gBhBgCQKDB9>

Partikel-partikel yang telah dikenal dikelompokkan ke dalam tiga group, yaitu lepton, barion, dan meson.

B. Lepton

Lepton adalah sebuah kelompok partikel dasar, bersama-sama dengan kuark dan gauge boson. Seperti kuark, **lepton** merupakan fermion (partikel spin $\frac{1}{2}$) dan dipengaruhi oleh gaya elektromagnetik, gaya gravitasi, dan gaya lemah, namun berbeda dengan kuark, **lepton** tidak ikut serta dalam interaksi kuat atau sebuah kelompok partikel dasar, bersama-sama dengan kuark dan gauge boson.

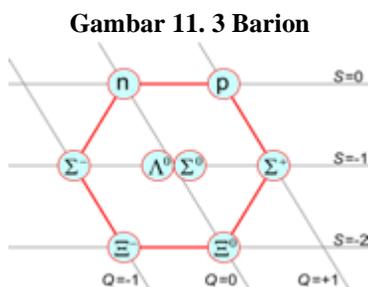
Gambar 11. 2 proses Quark hadron lepton



Sumber: <https://images.app.goo.gl/Ngh4BsqiWtDNwSxJ6>

C. Barion

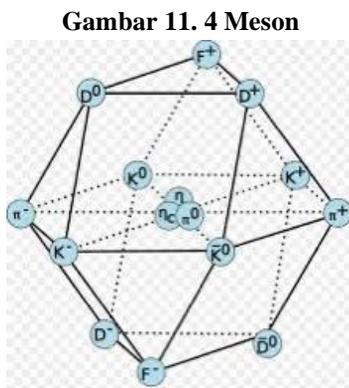
Barion adalah partikel subatom komposit yang terdiri dari tiga quark (yang berbeda dari meson, yang terdiri dari satu quark dan satu antiquark). **Barion** dan meson termasuk dalam keluarga partikel hadron, yang merupakan partikel berbasis quark partikel subatom komposit yang terdiri dari tiga quark.



Sumber: <https://images.app.goo.gl/ohVTLpFBkNGpg>

D. Meson

Meson adalah partikel subatom yang terdiri dari satu quark dan antiquark yang terikat oleh gaya nuklir kuat. Meson bermuatan dapat meluruh (kadang-kadang melalui partikel perantara) dan membentuk elektron dan neutrino. Meson tak bermuatan bisa meluruh menjadi foton. Lepton beranggotakan enam macam partikel, yaitu elektron (e), muon (μ) yang merupakan partikel serupa elektron dengan massa sekitar 200 kalinya, tauon (τ), dan tiga macam neutrino (ν_e, ν_μ, ν_τ)



Sumber: <https://images.app.goo.gl/eCLPivRFksWYrVmv6>

Tabel 29 Partikel Elementer

Partikel	Massa (MeV)	Muatan listrik	Spin
E	0,511	-1	$\frac{1}{2}$
μ	105,7	-1	$\frac{1}{2}$
τ	1784	-1	$\frac{1}{2}$
ν_e	0	0	$\frac{1}{2}$
ν_μ	0	0	$\frac{1}{2}$
ν_τ	0	0	$\frac{1}{2}$

Muon dan neutrino bukan merupakan penyusun atom biasa, tetapi terdapat banyak di alam. Muon banyak dihasilkan di bagian atas atmosfer bumi akibat adanya radiasi sinar kosmis. Muon merupakan sinar kosmis sekunder yang menembus atmosfer sampai ke permukaan bumi. Neutrino banyak dihasilkan dalam reaksi nuklir yang berlangsung di matahari dan dipancarkan ke segala penjuru dan sampai di permukaan bumi.

Masing-masing partikel anggota lepton di atas memiliki antipartikelnya, yaitu antielektron, antimuon, antitauon, dan tiga jenis antineutrino.

Barion merupakan grup partikel dengan anggota paling banyak, diantaranya adalah proton dan neutron. Pada tabel 7.4 barion yang memiliki kesamaan massa diberi satu nama. Keduanya dibedakan oleh muatan listriknya (1 dan 0).

Tabel 30 Barion

Partikel (massa)	q	Spin	Partikel (massa)	Q	Spin
N(939)	0,1	$\frac{1}{2}$	Λ (1690)	0	$\frac{1}{2}$
N(1440)	0,1	$\frac{1}{2}$	Λ (1800)	0	$\frac{1}{2}$
N(1520)	0,1	$\frac{1}{2}$	Λ (1810)	0	$\frac{1}{2}$

N(1535)	0,1	$\frac{1}{2}$	\wedge (1820)	0	$\frac{1}{2}$
N(1650)	0,1	$\frac{1}{2}$	\wedge (1830)	0	$\frac{1}{2}$
N(1675)	0,1	$\frac{1}{2}$	\wedge (1890)	0	$\frac{1}{2}$
N(1680)	0,1	$\frac{1}{2}$	\wedge (2100)	0	$\frac{1}{2}$
N(1700)	0,1	$\frac{1}{2}$	\wedge (2110)	0	$\frac{1}{2}$
N(1710)	0,1	$\frac{1}{2}$	\wedge (2350)	0	$\frac{1}{2}$
N(1720)	0,1	$\frac{1}{2}$	Σ (1193)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
N(2190)	0,1	$\frac{1}{2}$	Σ (1385)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
N(2220)	0,1	$\frac{1}{2}$	Σ (1660)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
N(2250)	0,1	$\frac{1}{2}$	Σ (1670)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
N(2600)	0,1	$\frac{11}{2}$	Σ (1750)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1232)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Σ (1775)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1620)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Σ (1915)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1700)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Σ (1940)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1900)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Σ (2030)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1905)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Σ (2250)	1, 0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1910)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Ξ (1318)	0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1920)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Ξ (1530)	0, -1	$\frac{1}{2}$
Δ (1930)	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	Ξ (1690)	0, -1	$\frac{1}{2}$

$\Delta(1950)$	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	$\Xi(1820)$	0, -1	$\frac{1}{2}$
$\Delta(2420)$	2, 1, 0, -1	$\frac{1}{2}$	$\Xi(1950)$	0, -1	$\frac{1}{2}$
$\Lambda(1116)$	0	$\frac{1}{2}$	$\Xi(2030)$	0, -10	$\frac{1}{2}$
$\Lambda(1405)$	0	$\frac{1}{2}$	$\Omega^-(1672)$	-1	$\frac{1}{2}$
$\Lambda(1520)$	0	$\frac{1}{2}$	$\Lambda_e^+(2285)$	0	$\frac{1}{2}$
$\Lambda(1600)$	0	$\frac{1}{2}$	$\Sigma_e(2455)$	2, 1, 0	$\frac{1}{2}$
$\Lambda(1670)$	0	$\frac{11}{2}$	$\Xi_e^+(2460)$	1	$\frac{1}{2}$

Meson diberi nama dengan cara yang sama dengan barion. Misalnya, $\pi(140)$ termasuk didalamnya adalah pion positif (π^+), pion negatif (π^-), dan pion netral (π^0). Tidak seperti barion, meson memiliki spin bilangan bulat. Masing-masing meson memiliki antimesonnya

Tabel 31 Meson

Partikel (massa)	Q	Spin	Partikel (massa)	q	Spin
$\pi(140)$	1, 0, -1	0		0	1
$\eta(549)$	0	0		0	1
$\rho(770)$	1, 0, -1	1		0	1
$\omega(783)$	0	1		0	1
$\eta'(958)$	0	0		0	1
$a_0(980)$	0	0		0	?
$\phi(1020)$	1, 0, -1	0		0	?
$h_1(1170)$	0	1		0	?
$b_1(1235)$	0	1		0	?
$\eta(1280)$	1, 0, -1	1		0	?
$f_1(1285)$	1, 0, -1	1		0	?
$a_2(1320)$	0	2		0	?
$f_0(1400)$	0	0		0	1

Partikel (massa)	Q	Spin	Partikel (massa)	q	Spin
$f_1(1420)$	0	1		0	1
$\eta(1430)$	1, 0, -1	2		0	1
$f_2(1285)$	0	0		0	1
$a_2(1320)$	0	1		1, -1	0
$f_0(1400)$	0	0		0, 0	0
$\eta(1430)$	0	2		1, 0, -1	1
$f_1(1590)$	0	1		1, 0, -1	1
$f_0(1590)$	0	0		1, 0, -1	1
$\omega_1(1670)$	0	3	$K_0^e(1430)$	1, 0, -1	0
$\pi_2(1670)$	1, 0, -1	2	$K^e(1415)$	1, 0, -1	1
$\Phi(1680)$	0	1	$K_2^e(1430)$	1, 0, -1	2
$\rho(1690)$	1, 0, -1	3	Ko(498)	1, 0, -1	1
$\rho(1700)$	1, 0, -1	1	K2(1770)	1, 0, -1	2
$f_2(1720)$	0	2	$K_3^e(1780)$	1, 0, -1	3
$f_2(2010)$	0	2	$K_4^e(2075)$	1, 0, -1	1
$f_4(2050)$	0	4	Do(1869)	0, 0	0
$f_2(2300)$	0	2	$D_{\pm}(1869)$	1, -1	0
$f_2(2340)$	0	2	$De_{\pm}(2010)$	1, -1	1
$\eta_c(2980)$	0	0	$De_{\pm}(2010)$	0, 0	1
$J/\psi(3097)$	0	1	$Ds_{\pm}(1969)$	1, -1	0
$Z_0(3415)$	0	0	$D_s^e \pm(2113)$	1, -1	0
$Z_1(3510)$	0	1	DJ(2420)	1, -1	?
$Z_2(3555)$	0	2	$B_{\pm}(5278)$	1, -1	0
$\psi(3686)$	0	1	Be(5279)	0	0

E. Interaksi antar partikel elementer

Reaksi yang terjadi diantara partikel-partikel dalam benturan energy tinggi melibatkan empat macam gaya mendasar, yaitu gaya kuat, gaya elektromagnetik, gaya lemah, dan gaya gravitasi. Tabel 7.6 menunjukkan perbandingan sifat-sifat keempat gaya.

1. Gaya fundamental antar partikel elementer

Tabel 7.6

Tabel 32 Empat macam gaya fundamental

Jenis gaya	Bekerja pada	Kekuatan relatif	Jangkauan
Kuat	Barion dan meson (hadron)	1	$10^{-15}m$
Elektromagnetik	Partikel bermuatan	10^{-2}	∞
Lemah	Lapton, barion, meson	10^{-6}	$10^{-18}m$
Gravitasi	Semua bentuk materi	10^{-38}	∞

Gaya kuat hanya bekerja pada barion dan meson. Keduanya disebut hadron. Gaya elektromagnetik pada dasarnya bekerja pada partikel bermuatan, tetapi dapat pula bekerja pada partikel netral seperti neutron karena memiliki distribusi muatan internal. Gaya lemah pada lepton, barion, maupun meson. Namun, efek yang ditimbulkannya pada barion dan meon sering tergelam oleh efek akibat gaya yang jauh lebih besar, yaitu gaya kuat maupun gaya elektromagnetik. Gaya gravitasi bekerja pada semua bentuk partikel, tetapi tidak menjadi perhatian dalam bidang fisika partikel karena kekuatannya yang dapat diabaikan terhadap gaya-gaya lainnya.

2. Syarat terjadinya interaksi

Semua gaya tadi dan reaksi yang dihasilkannya memenuhi hukum kekekalan yang lazim, yaitu kekekalan energi, momentum sudut, dan muatan listrik. Kemudian, gaya dan reaksi tadi memenuhi pula kekekalan nomor barion, nomor lepton, nomor keasingan (strangeness), sertaparitas.

a. Kekekalan nomor barion

Nomor barion untuk barion adalah +1 dan antibarion adalah -1, sedangkan untuk partikel lain yang bukan barion adalah 0. Hukum kekekalan nomor barion menyatakan bahwa nomor barion dalam suatu reaksi adalah tetap.

b. Kekekalan nomor lepton

Nomor barion untuk barion, sedangkan nomor lepton untuk lepton dengan nilai +1, -1, dan 0 berturut-turut untuk lepton, antilepton, dan bukan lepton.

c. Nomor keasingan

Nomor keasingan adalah untuk hadron. Sebagai contoh, proton mempunyai nomor keasingan 0, kaon +1, lambda -1, dan pion 0.

d. Paritas

Paritas mencirikan sifat fungsi gelombang partikel jika dikenai pembalikan tanda koordinat x, y, dan z. Partikel berparitas positif jika $\psi(x, y, z) = \psi(-x, -y, -z)$ dan berparitas negatif jika $\psi(x, y, z) = -\psi(-x, -y, -z)$. Kekekalan paritas berarti bahwa paritas total, yaitu hasil kali paritas semua partikel dalam reaksi, adalah tetap.

F. Quark

Sejalan dengan ekperimen, bidang teori yang telah mengembangkan suatu model menerangkan adanya partikel paling elementer penyusun materi. Teori ini dikemukakan oleh M. Gell-Maron dan G.Zweig yang dinamakan model quark. Ada tiga macam quark yang diberi label “up” (u). “down” (d), dan “strange” (s). Ketiganya memiliki spin $\frac{1}{2}$ dan muatan listrik berturut-turut $\frac{2}{3}, \frac{1}{3}, dan \frac{1}{3}$ untuk quark u, quark d dan quark s. Seperti partikel lainnya, tentu quark memiliki antiquark dengan muatan listrik berlawanan.

Tabel 7.7

Tabel 33 Perbandingan sifat quark

Quark	Massa (MeV)	Muatan listrik	Spin
U	5	$\frac{2}{3}$	$\frac{1}{2}$
D	9	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$
S	180	$-\frac{1}{3}$	$\frac{1}{2}$

Model tiga quark di awalmemiliki beberapa kelemahan, diantaranya adalah sering terdapatnya bebrapa quark identik dalam keadaan kuantum yang

sama. Keadaan ini merupakan penyimpangan terhadap eklusi paulli. Untuk menghindarinya, adalah dalil bahwa quark yang tampak identik sebenarnya memiliki paritas berbeda. Paritas tersebut di cirikan oleh sifat baru yang di sebut “warna”. Ada tiga macam warna quark, yaitu merah, hijau, dan biru. Warna quark memiliki sifat seperti muatan listrik, yaitu partikel tak berwarna jika memiliki ketiga warna dalam jumlah yang sama atau memiliki warna dan antiwarna dalam jumlah yang sama. Dengan quark bersama antiquark serta tiga paritas warna maka ada 36 macam quark.

Rangkuman

Untuk menemukan partikel elementer para fisikawan telah melakukan eksperimen menggunkan partikel berenergi tinggi untuk membelah proton. Namun, hasilnya adalah lahirnya partikel-partikel baru yang tidak lebih elementer dari pada proton. Partikel-partikel tersebut adalah meson, pion, kaon, dan hiperan, lamda, delta dan sebagainya.

Evaluasi Formatif

Essay

Jealskan masing masing, apa sifat dari partikel elementer berikut:

a. lepton

Jawab:

b. barion

Jawab:

c. meson

Jawab:

d. quark

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan

menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.

Kegiatan Pembelajaran 2 DETECTOR DAN AKSELARATOR

Kemampuan Dasar	Sub Kemampuan Dasar
Mahasiswa dapat menjelaskan detector dan akselerator	<ul style="list-style-type: none"> a. Mahasiswa dapat memahami Bagaimana memahami prinsip detektor b. Mahasiswa dapat menjelaskan apa saja jenis detektor c. Mahasiswa dapat menjelaskan defenisi dari akselerator d. Mahasiswa dapat menjelaskan jenis akselerator e. Mahasiswa dapat memahami Apa manfaat akselerator f. Mahasiswa dapat memahami bagaimana partikel dipercepat a. Mahasiswa dapat memahami engerti prinsip utama sinkrontron b. Mahasiswa dapat memahami engetahui prinsip dan bentuk detektor c. Mahasiswa dapat memahami engetahui macam-macam detektor

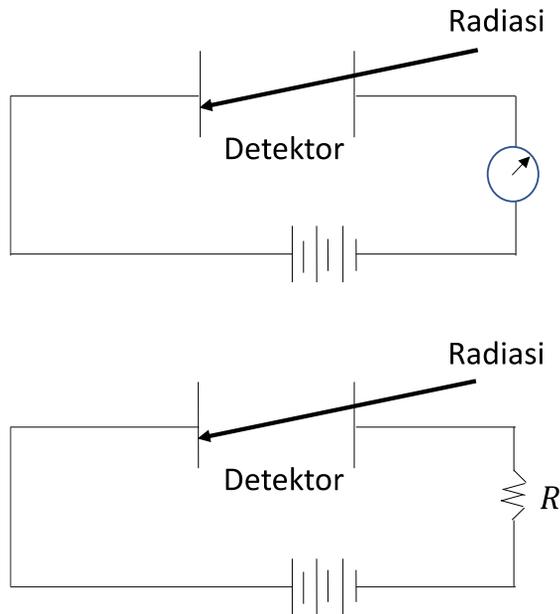
Uraian Materi

Peluruhan radioaktif adalah kemampuan inti atom yang tidak stabil untuk memancarkan radiasi agar menjadi inti atom yang stabil. Radiasi yang dipancarkan berupa partikel alfa, gamma, beta. Radiasi ini dapat diketahui dengan mengukur besarnya radiasi yang dipancarkan oleh sumber radiasi. Sehingga dibutuhkan suatu alat pendeteksi adanya radiasi untuk mengetahui keberadaan radiasi disekitar kita. Partikel dipercepat melalui interaksi elektromagnetiknya, sehingga hanya partikel bermuatan dan stabil terhadap peluruhan yang dapat dipercepat. Partikel yang memenuhi 2 persyaratan tadi adalah elektron, proton dan inti stabil/ion berat beserta anti partikelnya. Akselerator mempercepat partikel bermuatan dengan medan listrik yang tinggi dimana medan listrik ini menarik atau menolak partikel. Medan listrik ini bergerak dan mendorong partikel untuk bergerak dan dipercepat.

A. Detektor Isian Gas

Detektor isian gas merupakan detektor yang paling sering digunakan untuk mengukur radiasi. Prinsip kerja detektor isian gas didasarkan pada pengaruh yang ditimbulkan ketika radiasi melalui gas. Mode utama interaksi melibatkan ionisasi dan eksitasi molekul-molekul gas sepanjang jejak radiasi. Ada beberapa jenis detektor yang termasuk dalam kelompok detektor isian gas yaitu: kamar ionisasi, proportional counter dan tabung Geiger.

Gambar 11. 5 Skema Detektor isian gas



Detektor isian gas berkerja dengan memanfaatkan ionisasi yang dihasilkan oleh radiasi jika melalui gas. Jika suatu radiasi pengion mengenai gas, sebagian atau seluruh energinya akan digunakan untuk mengionisasi atom-atom gas sehingga terbentuk pasangan elektron-ion positif. Elektron-elektron dan ion-ion ini bergerak menuju elektroda dan memberikan sinyal arus ataupun tegangan listrik. Energi yang diperlukan untuk mengionisasi atom gas sekitar 30 eV. Jika MeV partikel α dan β memberikan seluruh energinya maka akan menghasilkan $\frac{3 \times 10^6}{30} = 10^5$ pasangan elektron-ion.

Demikian seluruh ion yang terbentuk dikumpulkan di elektroda, daerah operasi ini disebut daerah rekombinasi.

1. Kamar Ionisasi

Detektor jenis ini dapat berbentuk keeping paralel, silinder, atau bola. Andaikata kapasitor C dan dengan tahanan R membentuk untai RC. Andaikata pula bahwa sebuah pasangan electron-ion terbentuk di titik x_0 dari elektroda pengumpul. Jika muatan telah bergeser sejauh dx^+ untuk ion positif dan dx^- untuk elektron maka berdasarkan kekekalan energi sebagai berikut:

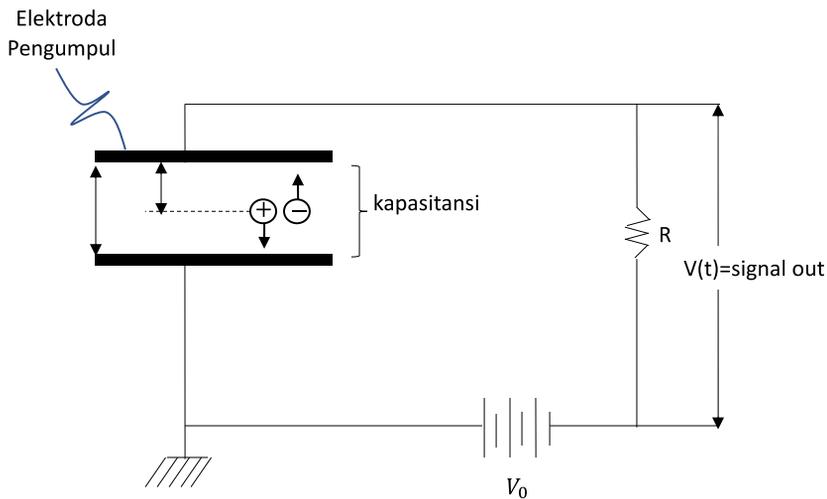
$$eE(dx^+ - dx^-) = d\left(\frac{Q}{2C}\right) = \frac{Q}{C}dQ \approx V_0(dQ^- - dQ^+) \quad 11.1$$

Dengan $E = \frac{V_0}{c}$ kuat medan listrik

Q : muatan dalam keeping paralel

dQ^+, dQ^- : perubahan muatan positif dan negative

Gambar 11. 6 Skema Untai Elektronik Detektor Kamar Ionisasi



Jika andaikata bahwa perubahan muatan dQ sangat kecil, maka tengangan V_0 tidak berubah besarnya. Tegangan keluaran $V(t)$ adalah

$$V(t) = \frac{1}{c} \int_0^1 (dQ^+ - dQ^-) \quad 11.2$$

Menjadi,

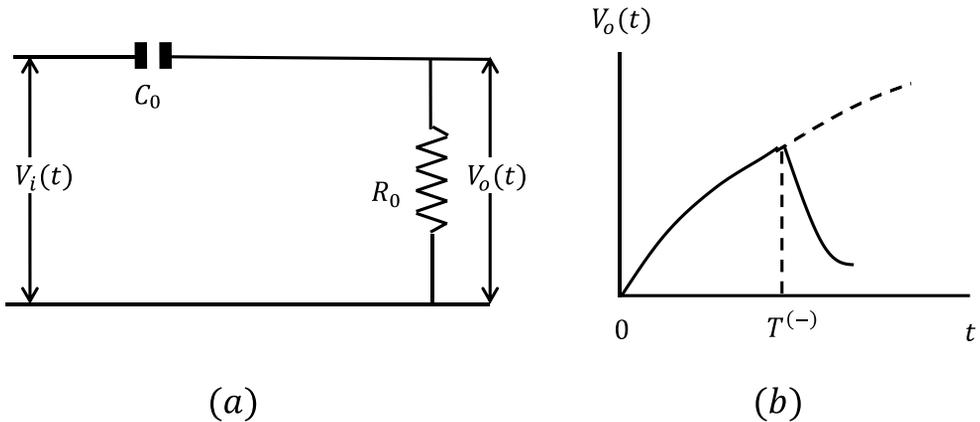
$$V(t) = \int \frac{e}{V_0} E [dx^+(t) - dx^-(t)], V(t)$$

$$\begin{aligned}
 &= \frac{e}{cd} \int_0^1 (w^+ - w^-) dt \\
 &= (w^+ t - w^- t)
 \end{aligned}$$

Dengan w^- dan w^+ berturut-turut adalah laju pergeseran elektron dan laju pergeseran ion positif. Pada kenyataannya, ionisasi tidak hanya terjadi di titik x_0 , tetapi di sepanjang jejak yang dilewati oleh radiasi pengion sehingga tegangan keluaran merupakan superposisi pulsa dengan berbagai nilai $t = T^{(-)}$, yaitu waktu yang diperlukan untuk mengumpulkan elektron hasil ionisasi. Jika keluaran kemudian dimasukkan ke untai $R_0 C_0$ maka keluarannya berbentuk:

$$V_o(t) = k \frac{C_0 R_0}{T^{(-)}} (1 - e^{-t/R_0 C_0}) \text{ untuk } 0 < t \leq T^{(-)} \quad 11.2$$

Gambar 11. 7 (a) Untai RoCo (b) Bentuk Keluarannya



2. Detektor Proporsional

Detektor proporsional umumnya berbentuk silinder dengan dinding dan sumbu silinder sebagai elektrodanya. Kuat medan listrik di dalam detector dinyatakan oleh:

$$E(r) = \frac{V_0}{\ln\left(\frac{b}{a}\right)} \frac{1}{r} \quad 11.3$$

Dengan

b : jejari silinder luar dan a : jejari elektroda poros silinder.

Muatan total yang dihasilkan detector adalah

$$Q = M \frac{\Delta E}{W} e$$

Dengan

ΔE : energi radiasi yang dilepaskan didalam detector

W : energi yang diperlukan untuk menghasilkan pasangan elektron-ion

M : factor pelipatan gas

Tegangan keluaran sebagai fungsi waktu yang diberikan oleh :

$$V(t) = \frac{Q}{2C \ln\left(\frac{b}{a}\right)} \ln\left(1 - \frac{b^2}{a^2} \frac{t}{t_{ion}}\right) \quad 11.4$$

Dengan Q seperti persamaan diatas dan C adalah kapasitor detector, t_{ion} adalah waktu yang diperlukan ion untuk mencapai katoda yang dinyatakan oleh:

$$t_{ton} = \frac{p \ln\left(\frac{b}{a}\right)}{2 V_0 \mu_{ion}} (b^2 - a^2) \quad 11.5$$

Dengan P adalah tekanan gas, μ_{ion} adalah mobilitas ion, dan r adalah titik tempat ionisasi terjadi.

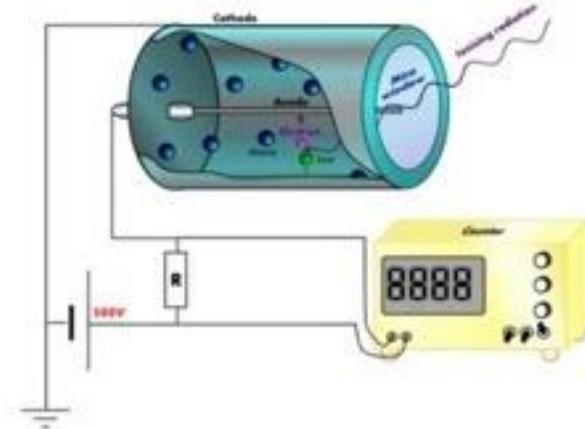
3. Detektor Geiger Muller

Bentuk dan cara kerja detector Muller serupa dengan detector proporsional dengan faktor pelipatan gas M yang sangat besar sehingga mencapai keadaan jenuh. Karena cacah ionisasi total sangat besar dan gerakan ion positif sangat lamban dibandingkan dengan gerakan elektron, ion-ion positif akhirnya berlaku sebagai tameng dan menghalangi terjadinya ionisasi lebih lanjut. Namun, sesampainya di dekat katoda, ion-ion positif menarik elektron-elektron katoda. Pada masa itu pula, medan listrik di dalam detector telah pulih kembali. Dalam proses netralisasi ion-ion positif dengan elektron katoda sering di lepaskan adanya kelebihan energi yang dapat menimbulkan ionisasi baru. Elektron yang baru dilepaskan dapat menyebabkan terjadinya *avalanche* lain yang tidak dikehendaki sehingga harus dihentikan agar *GM* siap mendeteksi radiasi berikutnya.

Ada dua acara menghentikan ionisasi dan pelipatannya yang tidak dikehendaki, yaitu dengan untai elektronik yang akan menurunkan tegangan operasi detector saat ion-ion positif mencapai katode. Dengan demikian, elektron-elektron baru yang dilepaskan tidak mempunyai cukup energi untuk melakukan ionisasi berikutnya. Cara lain adalah mencampur gas isian utama dengan gas halogen atau gas organik berat atom banyak. Energi yang dibebaskan dalam proses netralisasi atom gas utama akan digunakan untuk disosiasi molekul gas campuran. Kerugian cara kedua adalah terbatasnya

umur detector karena berkurangnya atom atau molekul gas campuran akibat disosiasi yang terjadi. Detektor Geiger Muller hanya mendeteksi partikel bermuatan, karena foton tidak bermuatan dan karena tidak menghasilkan ion di dalam gas, maka tidak dideteksi. Efisiensi detektor Geiger sebesar 99% untuk elektron (beta), tetapi kurang dari 1% untuk sinar X atau sinar gamma.

Gambar 11. 8 Detektor pencacah Geiger Muller



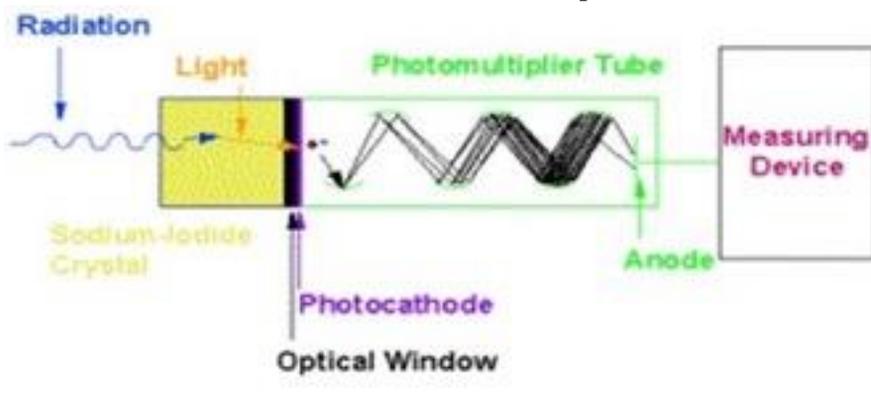
Sumber: maygalovendasampaouw.blogspot.com

B. Detektor Kelipan (sintilasi)

Sintilasi adalah bahan yang menghasilkan kelipan cahaya jika radiasi pengion mengenainya. Cahaya kelipatan yang dihasilkan oleh sintilator diamati dengan mikroskop, yaitu suatu cara yang tidak efisien dan tidak teliti. Cahaya kelipan diubah menjadi sinyal listrik dengan menggunakan tabung pengganda foton (*photomultiplier tube/PMT*) yang berupa tabung kaca hampa dan dilengkapi dengan fotokatoda di bagian masukan dan beberapa dinoda didalamnya. Foton atau cahaya kelipan mengenai fotokatoda dan membebaskan elektron-elektron melalui efek fotolistrik. Elektron yang dibebaskan oleh fotokatoda dipercepat menuju dinoda pertama karena adanya beda potensial yang dipasang. Dinoda yang menabrak elektron melepaskan elektron sekunder yang selanjutnya dipercepat ke dinoda kedua dan seterusnya. Elektron diperbanyak setiap kali mengenai dinoda. Akhirnya seluruh elektron yang telah dihasilkan dikumpulkan di anoda dan memebrikan pulsa listrik.

Pada kristal bahan sintilator terdapat pita valensi dan pita konduksi yang dipisahkan pada tingkat energi tertentu. Pada ground state, elektron berada pada pita valensi. Ketika radiasi memasuki kristal, energinya akan terserap oleh beberapa elektron di pita valensi sehingga elektron tersebut meloncat ke pita konduksi kemudian elektron-elektron tersebut akan kembali ke keadaan semula melalui pita energi bahan aktivator sambil memancarkan percikan cahaya. Banyaknya percikan cahaya yang dihasilkan akan sebanding dengan energi radiasi yang diserap (semakin banyak energi radiasi, semakin banyak percikan cahaya) dan juga dipengaruhi oleh bahan sintilator yang digunakan. Percikan cahaya ini yang kemudian akan ditangkap oleh photomultiplier.

Gambar 11. 9 Detektor Kelipatan



Sumber: Slideplayer.info

1. Sintilator Anorganik (kristal)

Sintilator anorganik yang biasa digunakan adalah NaI(Tl), CsI(Tl), ZnS(Ag), CaI(Na), dan LiI(Eu). Elemen dalam kurung merupakan atom pengotor kristal, tetapi bertanggung jawab atas terjadinya kelipatan. Hasil-hasil eksperimen menunjukkan bahwa pancaran cahaya kelipatan mengikuti rumus

$$N(t) = N_0 e^{-t/T} \tag{11.6}$$

Dengan $N(t)$ adalah cacah foton yang diemisikan pada saat t dan T adalah waktu rerata peluruhan sintilator. Arus yang dihasilkan oleh PMT mempunyai seperti persamaan diatas dan jika dimasukkan kedalam untai RC menghasilkan tegangan:

$$V(t) = V_{\infty} (e^{-t/RC} - e^{-t/T})$$

dengan memilih nilai RC yang jauh lebih besar daripada T , berlaku:

$$V(t) = V_{\infty} (1 - e^{-t/RC})$$

2. Sintilator Organik

Toluene dan anthracene merupakan bagian sintilator yang efisien. Proses kelipan cahaya merupakan proses transisi molekul bahan sintilator. Keadaan standar molekul sebagai fungsi jarak momentum jika berada di titik A_0 dengan energi potensial minimum. Interaksi dengan radiasi menyebabkan molekul melakukan transisi ke arah tereksitasi A_1 bukan merupakan keadaan dengan energi potensial minimum di arah tersebut.

Molekul melakukan transisi ke bawah (B_0) dengan melepas energinya dalam pancaran foton cahaya berenergi ($E_{B1} - E_{B0}$) yang lebih kecil dari energi eksitasinya ($E_{A1} - E_{A0}$). Perbedaan paling pokok dengan sintilator anorganik adalah waktu tanggapnya yang jauh lebih kecil, yaitu kurang dari 10 ns ($1\mu s$ untuk sintilator anorganik). Sintilator plastic merupakan sintilator organik yang memiliki sifat mirip sintilator cair dengan kelebihan tanpa memerlukan wadah, sehingga dapat dibuat dalam bentuk dan ukuran bebas. Nama-nama komersial (dagang) yang biasa digunakan pilot B, pilot B, NE102, dan NE110.

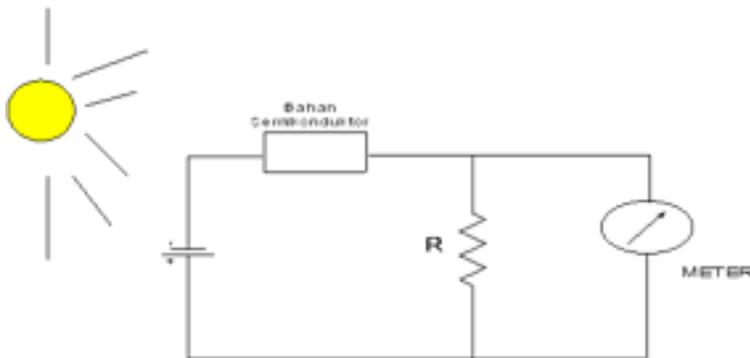
C. Detektor Semikonduktor

Detektor semikonduktor merupakan perangkat material zat padat yang digunakan sebagai detektor radiasi dengan prinsip kerja serupa dengan detektor isian gas. Di dalam detektor semikonduktor, pembawa muatan listriknya bukan elektron dan ion melainkan elektron dan lowong positif. Bahan yang berhasil dimanfaatkan sampai saat ini Si, Ge, Cd, Te, dan HgI_2 . sifat yang sangat penting dan merupakan kelebihan yang tidak dimiliki detektor jenis lain adalah resolusi energinya sangat tinggi. Sifat-sifat lain yang menguntungkan adalah linearitas yang tinggi antara tinggi pulsa keluruhan dengan energi radiasi untyuk dijangkau energi yang cukup lebar, dan tidak dipengaruhi oleh medan magnet.

Pada detektor ini, energi radiasi diubah menjadi energi listrik. Sambungan semikonduktor dibuat dengan menyambungkan semikonduktor tipe N dengan tipe P (PN junction). Kutub positif dari tegangan listrik eksternal dihubungkan ke tipe N sedangkan kutub negatifnya ke tipe P. Dengan adanya

lapisan kosong muatan ini maka akan terbentuk ion-ion baru, elektron dan hole, yang akan bergerak ke kutub-kutub positif dan negatif. Tambahannya elektron dan hole inilah yang akan menyebabkan terbentuknya arus listrik.

Gambar 11. 10 Detektor Semikonduktor



Sumber: slideplayer.info

1. Detektor Sambungan p-n

Sambungan p-n dapat dibuat dengan mengoksidasi bahan semikonduktor tipe-n pada satu sisi permukaannya sehingga dibentuk lapisan tipis tipe-n pada satu sisi permukaannya sehingga dibentuk lapisan tipis-p. Detektor jenis ini biasa disebut detektor sawar-muka (*surface barrier detector*). Cara lain untuk membuat sambungan p-n adalah dengan difusi. Bahan fosfor akan mendifusi ke dalam bahan semikonduktor dan berlaku sebagai donor, lalu terbentuklah lapisan tipe-n dibagian muka. Detektor ini dinamakan detektor sambungan p-n terdifusi. Karena ukuran yang sangat tipis, detektor jenis ini hanya efisien untuk mendeteksi radiasi partikel bermuatan.

2. Detektor Si(Li) dan Ge(Li)

Bagian relatif yang terbentuk lewat difusi ataupun oksidasi sangat terbatas, yaitu hanya sampai setebal $2000 \mu\text{m}$. Keterbatasannya tentunya membatasi pula energi partikel yang dapat dideteksi. Difusi ion Li ke dalam Si atau Ge dan dilanjutkan dengan penyusutan Li melalui berbagai metode (antara lain metode elektrostatik) dapat dicapai ketebalan sampai 5 mm untuk Si dan 12 mm untuk Ge. Untuk menjaga keadaan yang dicapai, detektor Si(Li) dan Ge(Li) harus selalu disimpan dan dioperasikan

pada suhu rendah (umumnya digunakan nitrogen cair dalam *cryostat*). pada suhu tinggi, mobilitas atom Li pun tinggi dan dapat merusak struktur yang telah.

3. Detektor Semikonduktor Kemurnian Tinggi

Pembuatan bahan Ge dengan kemurnian tinggi (high purity Germanium atau HPGe) dapat dilakukan dengan konsentrasi pengotor sebesar 10^{16} atom/ m^3 . Detektor dengan ketebalan 20 mm dan diameter 60 mm telah dapat dibuat. Penyimpanan tidak perlu suhu rendah. Untuk meniadakan pembentukan elektron-lowong karena efek termal, detektor harus tetap dioperasikan pada suhu rendah.

4. Detektor CdTe dan HgI₂

Pengoperasian detektor Ge(Li), dan HpGe pada suhu rendah menyebabkan ukuran seluruh system menjadi sangat besar karena memerlukan *cryostat*. Untuk tujuan khusus, kita memerlukan detektor berukuran kecil, misalnya pada alat *medical imaging*, ruang angkasa, dan sebagainya. Detektor CdTe dan HgI₂ telah dapat dibuat (pada 1978), dengan ketebalan 0,7 mm dan luas permukaan sampai 100 mm^2 . dengan ukuran kecil, efisiensinya cukup besar karena memiliki nomor atom bahan besar. Energi yang diperlukan untuk membentuk pasangan elektron-lowong lebih besar dibandingkan dengan Ge atau Si. Akibatnya, resolusi energinya lebih kecil.

D. Detektor Jejak

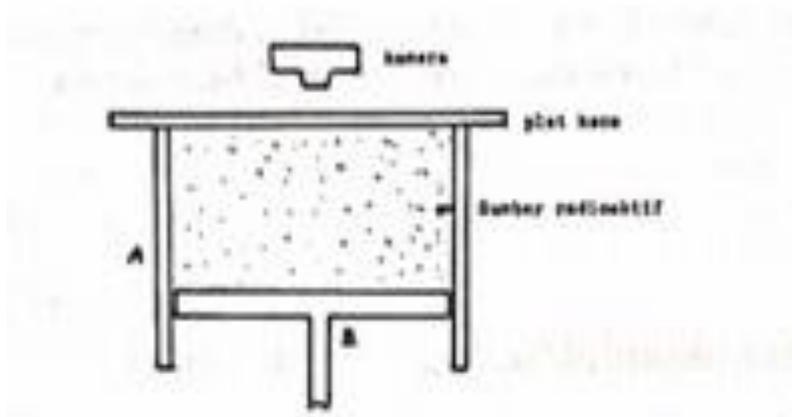
Detektor radiasi nuklir yang telah dibahas sebelumnya pada dasarnya merupakan transduser listrik, yaitu alat pengubah besaran fisika (intensitas dan energi radiasi) menjadi sinyal-sinyal listrik. Pada awal perkembangan fisika nuklir, detektor jejak mempunyai peranan sangat besar. Untuk pengukuran partikel energi tinggi, detektor jejak masih merupakan pilihan utama. Detektor ini selain untuk mendeteksi partikel juga dapat untuk mengukur besaran-besaran muatan, kecepatan, momentum dan energi. Bagaimana cara mengukur besaran-besaran tersebut? Salah satu komponen terpenting dari detektor adalah magnet yang menimbulkan medan magnet yang besar terutama pada alat pelacaknya (tracker). Untuk mengetahui tanda muatan partikel (+ atau -) dapat diidentifikasi dari arah lintasan partikelnya, karena

partikel bermuatan dipengaruhi oleh medan magnet. Partikel neutral tidak dipengaruhi oleh medan magnet. Itulah sebabnya pada pelacak (tracker) tidak teridentifikasi partikel neutral.

1. Kamar Kabut

Wilson menciptakan detektor kamar kabut diawal abad 20. Skema detektor terlihat pada Gambar. Kamarnya terdiri atas silinder A yang berisi udara atau nitrogen dan uap air jenuh. Piston B digerakkan kebawah secara cepat. Jika secara mendadak piston B ditarik, maka gas dalam tabung mengembang secara cepat (adiabatas) sehingga terjadi penurunan suhu dan uap air dalam tabung menjadi kelewat jenuh. Radiasi pengion yang menembus kamar kabut mengionisasi gas dalamnya sepanjang lintasan yang dilaluinya. Ion-ion demikian berlaku sebagai inti pengembunan, sehingga akan terlihat bintik-bintik air sepanjang jejaknya.

Gambar 11. 11 Skema Kamar Kabut Wilson



Sumber: Kusminarto, 2011

Tebal serta panjang jejak sangat bergantung pada energi radiasi pengion. Dengan memasang medan magnet tegak lurus pada arah kecepatan partikel, kita dapat pula menentukan jenis partikel pengion yang diselidiki. Kamar kabut suhu tinggi telah dikembangkan pulapula dan dipergunakan secara luas. Atau pada saat partikel-partikel mengenai kamar-kamar kabut, ion-ion yang terbentuk akibat proses ionisasi sepanjang lintasan partikel tersebut akan berfungsi sebagai inti pengembunan hingga pada lintasan

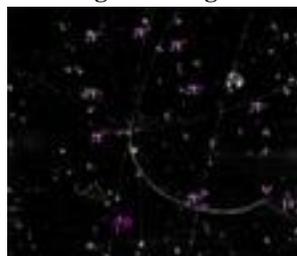
partikel tersebut terbentuk tetesan air dari uap super jenuh, jejak partikel ini dapat diamati dengan cara mengamati kabut itu dari samping.

Kamar kabut Wilson adalah alat untuk melihat dan memotret lintasan partikel alfa yang melalui gas. Alat itu terdiri atas silinder tertutup dengan piston berisi udara bercampur uap air jenuh atau nitrogen. Pada dinding bagian dalam diletakkan unsur radiokatif (R). Partikel alfa yang dipancarkan oleh unsur itu akan mengionkan molekul-molekul gas didalam silinder. Sementara itu, piston P ditarik keluar sehingga uap jenuh tadi akan mendingin secara tiba-tiba sehingga butir-butir uap air didalam silinder menjadi jenuh. Ion-ion yang terbentuk sepanjang lintasan partikel alfa menarik butir-butir uap air, dan dapat dilihat atau dipercepat jika gas didalam silinder disorot dengan cahaya lampu

2. Kamar Gelembung

Karena kerapatan gas yang relatif rendah, panjang jejak yang dapat diamati dengan kamar kabut Wilson sangat dibatasi oleh ukuran detektor yang relatif kecil. Pada detektor kamar gelembung, medium gas diganti dengan cairan. Cairan dalam tabung ditekan dan dipanaskan sampai suhu tepat dibawah titik didihnya. Jika secara mendadak tekanan dikurangi, maka cairan berada dalam keadaan kelewat mendidih(super heated) tetapi tidak mendidih.

Gambar 11. 12 Hasil pendeteksian partikel dan anti partikel dari detektor kamar gelembung



sumber : file upi edu

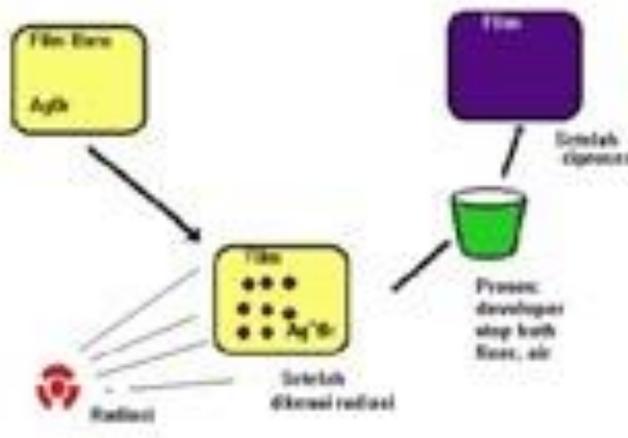
Radiasi pengion yang melewati cairan menghasilkan ion-ion yang dapat berlaku secara pusat gelembung sebagai akibat keadaan mendidih. Dengan demikian, gelembung-gelembung akan terbentuk sepanjang jejak radiasi yang mengenyainya. Detektor ini biasa menggunakan hidrogen cair (27

K), tetapi dapat pula menggunakan propane dan freon untuk dioperasikan pada suhu kamar.

3. Detektor Film

Detektor jenis ini digunakan dibanyak bidang, terutama bidang yang banyak berhubungan dengan radiografi sinar-X dan sinar gamma, kristalografi, dosimetri, bahkan neutron radiografi. Detektor film terdiri atas lapisan emulsi tebal antara $10\ \mu\text{m}$ sampai $25\ \mu\text{m}$ yang dilapiskan diatas lembaran plastik transparan secara alas. Elemen aktif dalam film berupa butiran kristal perak bromida. Butiran kristal berukuran diameter $0,3\ \mu\text{m}$ untuk film kurang sensitif sampai diameter $2\ \mu\text{m}$ untuk film yang sensitif.

Gambar 11. 13 Skema Detektor Film



sumber : file upi edu

Detektor film sensitif terhadap cahaya kasat mata, sinar-X, sinar gamma, beta, dan partikel bermuatan lainnya, tetapi tidak sensitif terhadap neutron. Untuk keperluan deteksi neutron, boron dicampurkan dalam emulsi atau menggunakan konverter neutron berupa lembaran tipis bahan penyerap neutron karena interaksinya dengan neutron menghasilkan radiasi sejunder yang dapat menghitamkan film.

E. Detektor Cerenkov

Suatu gejala pertama kali diamati oleh Cerenkov pada tahun 1934 dan merupakan alternatif lain dalam pengukuran partikel energi tinggi. Ia

mengamati bahwa partikel β yang melewati medium dielektrik transparan menghasilkan radiasi optis jika laju partikel lebih besar dari laju cahaya dalam medium (laju cahaya dalam kaca kira-kira 2×10^8 m/s. Radiasi cahaya tampak ini kemudian dideteksi dengan PMT seperti pada sintiltor.

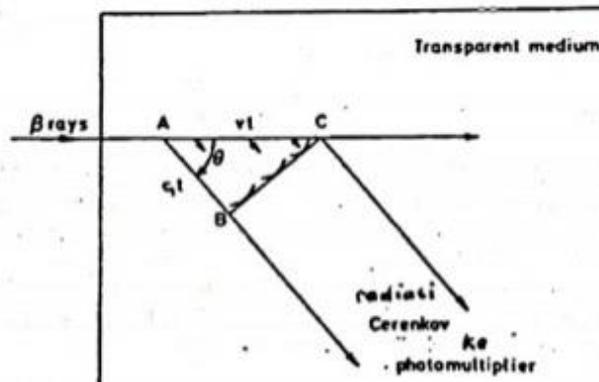
Teori menunjukkan bahwa cahaya terhambur dari arah datangnya partikel radiasi memenuhi :

$$\cos \theta = \frac{c_0}{nv} \tag{11.7}$$

Dengan c_0 adalah laju cahaya dalam ruang hampa, v adalah laju partikel β dalam medium, dan n adalah indeks bias medium.

Penjelasan radiasi Cerenkov dapat digambarkan dalam Gambar 8.10. partikel β memasuki medium dan diperlambat dalam lintasan dengan memancarkan radiasi gelombang elektromagnet kesegala arah. Jika BC merupakan muka gelombang maka berlaku bahwa $t_{AB} = t_{AC} = t$. $AB = c_1 t$ dan $AC = vt$ dengan c_1 adalah laju cahaya dalam medium. Dengan demikian, kita memperoleh hubungan $\cos \theta = \frac{AB}{AC} = \frac{c_1}{v} = \frac{c_0}{nv}$ adalah $v > c_u$.

Gambar 11. 14 Radiasi Cerenkov



Sumber: Kusminarto, 2011

F. Akselerator

Akselerator adalah mesin pemercepat partikel sehingga diperoleh energi yang cukup tinggi sesuai dengan keperluan eksperimen fisika inti. Bahkan sekarang akselerator banyak digunakan pula dalam penelitian dibidang fisika material. Akselerator juga merupakan alat yang dipakai untuk mempercepat gerak partikel bermuatan seperti elektron, proton, dan inti atom lainnya.

Mempercepat gerak partikel bertujuan agar partikel tersebut bergerak dengan cepat sehingga memiliki energi kinetik yang sangat tinggi. Pada mulanya, akselerator partikel dipakai untuk penelitian fisika energi tinggi dengan menabrakan partikel berkecepatan sangat tinggi. Namun, ada beberapa jenis akselerator partikel yang dirancang untuk memproduksi radiasi berenergi tinggi untuk keperluan radioterapi.

Akselerator partikel adalah alat utama untuk mempelajari struktur dasar materi. Dalam eksperimen fisika energi tinggi, partikel seperti proton atau elektron dipercepat hingga puluhan dan ratusan GeV dan bertabrakan satu sama lain atau ke target tetap. Partikel baru diciptakan dari tabrakan energi tinggi, dan interaksi dan sifat mereka yang diteliti menggunakan detektor canggih.

Fungsi utama dari akselerator partikel adalah untuk memasok energi untuk partikel bermuatan, dan energi ini disediakan dalam sebagian besar kasus, kecuali akselerator saat ini dan induksi langsung, dengan cara rongga resonan. Ini mempercepat rongga atau mempercepat dimana struktur dasarnya terdiri dari satu atau lebih mempercepat sel dimana medan elektromagnetik dapat mengirimkan energi untuk partikel bermuatan.

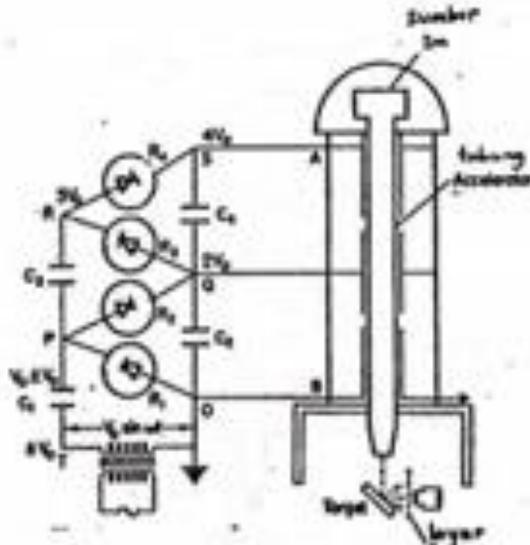
1. Akselerator Cockroft-Walton

Ciri pokok akselerator Cockroft-Walton adalah pada penyedia sumber tegangan tingginya. Sumber tegangan bolak-balik (AC) dimasukkan ke untai pengarah bertingkat (Gambar 8.11). Tegangan tinggi yang diperoleh secara teori tidak terbatas, tetapi dalam praktik dibatasi oleh kemampuan dioda dan kapasitor dalam menahan tegangan tinggi (ada arus bocor).

2. Akselerator Van de Graaff

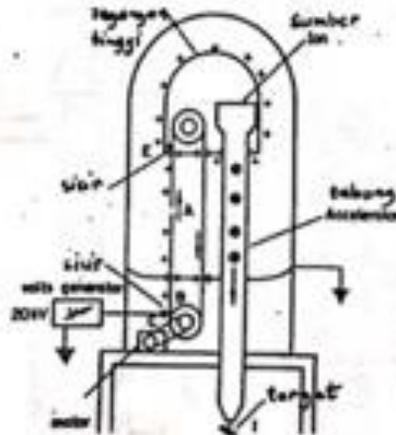
Perbedaan pokok dengan akselerator Cockroft-Walton pada dasarnya di penyedia tegangan tinggi. Pada jenis ini, penyedia tegangan tinggi masih diperoleh secara elektrostatik. Suatu sabuk A terbuat dari bahan isolator (Gambar 8.12) diberi muatan listrik melalui sisir C yang dihubungkan kesuatu sumber tegangan. Akselerator Van de Graaff dapat dipakai untuk mempercepat partikel bermuatan positif maupun negatif dengan memilih jenis muatan yang ditimbulk melalui pemilihan tegangan pemuat yang sesuai.

Gambar 11. 15 Diagram Akselerator Cockroft-Walton



Sumber: Kusminarto, 2011

Gambar 11. 16 Akselerator Van de Graaff

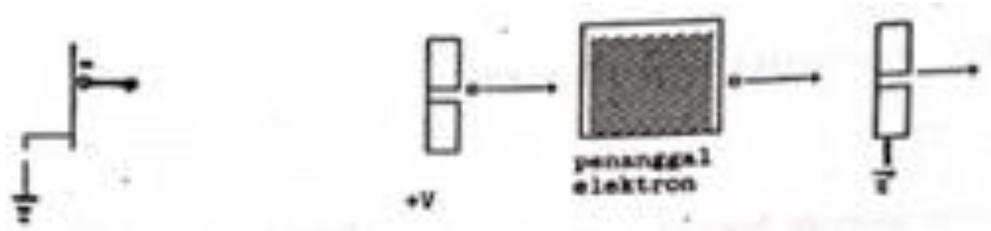


Sumber: Kusminarto, 2011

Dengan akselerator Van de Graaff, sampai saat ini kita telah dapat mempercepat partikel sampai energi lebih dari 12 MeV. Banyak juga penggunaan akselerator tandem, yaitu mesin pemercepat yang memanfaatkan tegangan tinggi positif yang sama dua kali. Kali pertama untuk mempercepat partikel bermuatan negatif dan selanjutnya, ion negatif yang telah dipercepat tersebut dilewatkan pada bahan penanggal elektron

(electron stripper). Maka muatan partikel berubah menjadi positif dan dipercepat lagi melalui beda potensial yang sama dengan arah kuat medan berlawanan (Gambar 8.13)

Gambar 11. 17 Skema Akselerator Tandem



Sumber: Kusminarto, 2011

Van de Graff merupakan akselerator paling umum jenis self-excited. Generator self-excited mengacu pada apa yang terjadi ketika dua materi yang berbeda tergabung dan kemudian ditarik terpisah. Generator terdiri dari berpengetahuan luas terminal tegangan tinggi terisolasi dari potensi tanah pada kolom isolasi dan biaya sistem menyampaikan terdiri dari satu atau lebih sabuk tak berujung datar bahan berjalan antara terminal dan tanah isolasi.

Muatan listrik diangkat oleh belt kedalam ruang terminal, dimana ia akan dihapus. Tegangan maksimum yang dapat dipertahankan pada terminal hanya bergantung pada geometri dan dielektrik dari medium isolasi sekitarnya. Generator van de Graff asli telah dipatenkan oleh Van de Graff. Peltatron merupakan akselerator van de Graff paling modern dikembangkan pada pertengahan 1960-an sebagai perbaikan atas sabuk pengisian tua. Sabuk ini menderita sejumlah operasional, termasuk ketidakstabilan tegangan terminal dan kerentanan yang memicu kerusakan.

3. Akselerator Linear

Didalam akselerator Cokroft-Walton dan Van de Graaff, partikel bermuatan dipercepat melalui beda potensial listrik sangat tinggi yang diperoleh secara elektrostatik. Akselerator linear mempercepat partikel secara bertahap melalui beda potensial yang relatif rendah diantara berberapa tabung deretan pemercepat. Gambar 8.14 merupakan skema akselerator linear. Waktu yang diperlukan untuk menempuh tiap tabung harus sama dengan setengah periode sumber tegangan pemercepat. Panjang tabung pemercepat ke n harus memenuhi hubungan :

$$L_n = V_n T / 2 \quad 11.8$$

Setiap kali melewati celah, energi partikel bertambah sebesar qV_0 , dengan q adalah muatan partikel dan V_0 adalah besar tegangan pemercepat. Setelah melewati n buah celah, energi kinetik partikel (tak-relativistik) adalah

$$\frac{1}{2} m V_n^2 = n q V_0$$

$$V_n = \left(\frac{2 n q V_0}{m} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 11.9$$

Masukkan kepersamaan (8-13) hingga kita peroleh :

$$L_n = \left(\frac{n q V_0}{2 m} \right)^{\frac{1}{2}} T \quad 11.10$$

Jadi, tabung pemercepat berangsur-angsur semakin ke arah keluaran semakin panjang. Dipusat akselerator linear Stanford Amerika, elektron dipercepat sampai energi 22 GeV melalui akselerator sepanjang mendekati 3 km.

G. Siklotron

Siklotron adalah jenis akselerator partikel yang ditemukan oleh Ernest O. Lawrence pada tahun 1929-1930 di Universitas California, Berkeley, dan dipatenkan pada tahun 1932. Siklotron mempercepat partikel bermuatan keluar dari pusat sepanjang jalur spiral. Partikel-partikel dipegang ke lintasan spiral oleh medan magnet statis dan dipercepat oleh medan listrik (frekuensi radio) yang berubah dengan cepat. Ernest O. Lawrence dianugerahi hadiah Nobel 1939 dalam fisika. Siklotron adalah teknologi akselerator partikel yang paling kuat sampai tahun 1950 ketika mereka digantikan oleh sinkrotron, dan masih digunakan untuk memproduksi berkas partikel dalam fisika dan kedokteran nuklir.

Pada gambar 8.15 menunjukkan diagram “D” yang berongga. Ion yang dilepaskan oleh S dipercepat oleh beda potensial periodik yang dipasang antara kedua D. Suatu medan magnet homogen yang dipasang tegak lurus pada permukaan D akan membelokkan arah lintasan ion sehingga berbentuk lingkaran. Jejar lintasan ion bermuatan q yang bergerak dengan kecepatan V tegak lurus medan magnet B adalah

$$r = \frac{mV}{qB} \quad 11.11$$

Semakin besar kecepatan ion, semakin besar pula jejari lintasannya. Setiap kali memasuki celah antara kedua D, polaritas beda potensial disesuaikan sedemikian rupa sehingga ion mengalami percepatan. Oleh karena itu, waktu

yang diperlukan ion melintasi setiap D dengan setengah periode tegangan T. Jadi, berlaku

$$\frac{T}{2} = \frac{2\pi r/2}{v} \quad 11.12$$

$$T = \frac{2\pi r}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad 11.13$$

Atau frekuensi siklotron adalah

$$f = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \quad 11.14$$

Energi maksimum yang dapat dicapai dibatas oleh ukuran D yang digunakan. Jika jejari D adalah R maka dari persamaan (8-16) laju partikel maksimum adalah

$$v_{maksimum} = \frac{qBR}{m}$$

Sehingga energi partikel maksimum adalah

$$E_{maksimum} = \frac{1}{2}mV^2 = \frac{q^2B^2R^2}{2m} \quad (\text{non-relativistik}) \quad 11.15$$

$$E_{maksimum} = \sqrt{p_{maks}^2c^2 + m^2c^4} \quad (\text{relativistik}) \quad 11.16$$

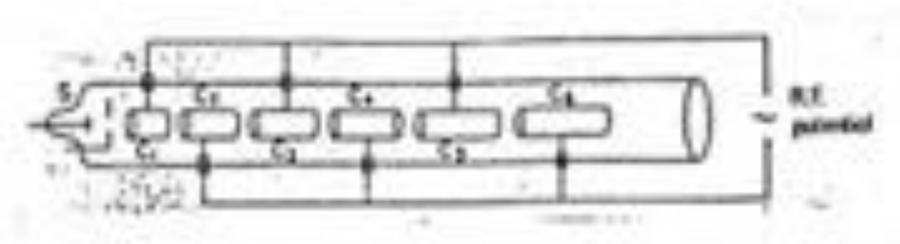
Dengan

$$p_{maksimum} = qBR$$

Selain dibatasi oleh ukuran R, energi partikel tidak dapat mencapai energi relativistik. Jika besar kecepatan v sudah tidak dapat diabaikan lagi terhadap laju cahaya c, maka γ tak lagi ≈ 1 sehingga menurut persamaan (8-17), T menjadi tidak sama dengan periode tegangan pemercepat

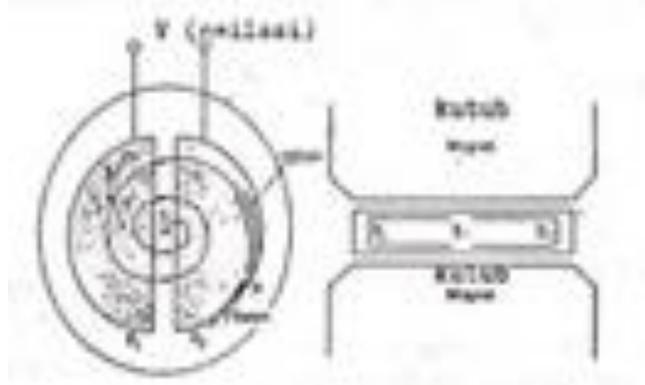
$$T_{(v,0)} \approx \frac{2\pi m}{qB} \quad (\text{tidak sefase lagi})$$

Gambar 11. 18 Skema Akselerator Linear



Sumber: Kusminarto, 2011

Gambar 11. 19 Skema Siklotron



Sumber: Kusminarto, 2011

Sinklotron merupakan perangkat yang digunakan untuk percepatan partikel energi reaksi nuklir. Sinkrotron pertama kali digunakan untuk keperluan medis yang digunakan di Washington University pada tahun 1941 untuk memproduksi isotop fosfor, zat besi, arsen, dan belerang. Pada pertengahan tahun 1950-an dirumah sakit Hammesmith, London mengoperasikan sinklotron untuk produksi radionuklida. Pada bidang kedokteran telah berkembang akselerator sinklotron ion positif dan negatif untuk keperluan produksi radionuklida juga. Inovasi dari sinklotron sendiri terdiri beberapa jenis yaitu sinklotron superkonduktor, tandem akselerator kaskade dan linacs energi rendah.

H. Sinkrosiklotron

Kesulitan yang ditemui pada siklotron dapat diatasi dengan mengatur periode T atau frekuensi siklotron f sesuai dengan kenaikan m yang disebabkan semakin besarnya v . Persamaan (8-17) secara relativistik menjadi :

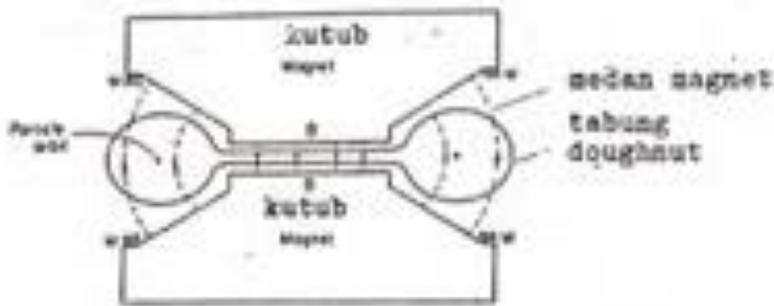
$$T = \frac{2\pi m}{qB \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad 11.17$$

Dengan kata lain, frekuensi siklotron harus disinkronkan dengan penambahan kecepatan atau energi partikel. Oleh karena itu, mesin pemercepat ini disebut sinkrosiklotron.

I. Betatron

Betatron dirancang khusus untuk mempercepat elektron. Elektron-elektron dikungkung dalam wadah berupa tabung berbentuk lingkaran menyerupai kue doughnut lalu diletakkan diantara kutub-kutub elektromagnet B berbentuk khusus (gambar 8.16). Medan magnet dihasilkan dengan mengalirkan arus bolak-balik melalui kumparan W. Selama arus listrik serta medan magnet yang dihasilkannya naik menuju maksimum, suatu tegangan listrik diinduksikan didalam donat dan mempercepat elektron dalam lintasan lingkaran. Arus listrik dan medan magnet dihentikan saat mencapai maksimum.

Gambar 11. 20 Diagram Irisan Betatron



Sumber: Kusminarto, 2011

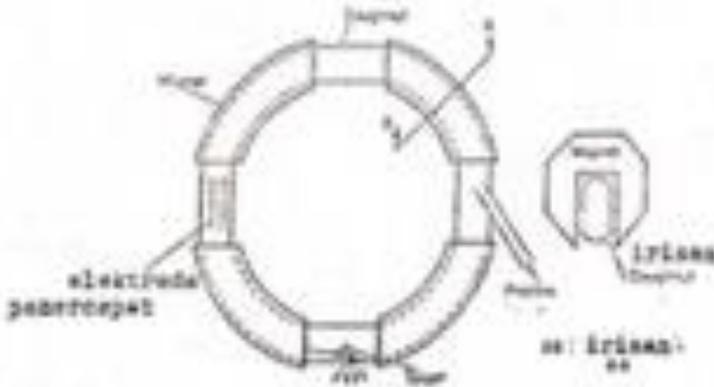
Betatron ini dikembangkan pada tahun 1940 oleh D.W Kerst sebagai akselerator elektron siklik untuk penelitian fisika dasar. Namun, potensi untuk digunakan dalam radioterapi baru disadari setelahnya. Mesin terdiri dari magnet yang diberikan tenaga oleh arus bolak-balik pada frekuensi antara 50-200 Hz. Elektron yang dihasilkan beredar ditoroidal (berbentuk donat) ruang vakum yang ditempatkan pada celah diantara dua kutub magnet. Pada tahun 1950 betatron memainkan peranan penting dalam megavoltage radioterapi. Namun, pengembangan linac mendorong betatron terlupakan karena lebih banyak kelebihan yang ditawarkan oleh linac atas betatron.

J. Sinkrotron

Energi partikel yang dapat diperoleh dengan siklotron bergantung pada jejari siklotron. Kesulitan yang timbul adalah dalam memperoleh medan magnet homogen di daerah yang luas. Sinkrotron mempercepat partikel

dengan mempertahankan jari lintasan yang tetap, sehingga medan magnet yang diperlukan hanya di sepanjang lintasannya(gambar 8.17). untuk menjaga lintasan yang tetap, maka menurut persamaan (8-20) besar medan magnet harus disesuaikan dengan kenaikan energi atau kecepatan elektron. Demikian pula, frekuensi sinkrotron hanya berubah mengikuti perubahan medan magnet.

Gambar 11. 21 Diagram Sinkrotron



Untuk keadaan relativistik, persamaan (8-20) dapat diubah menjadi bentuk :

$$f = \frac{qBc^2}{2\pi E} = \frac{qBC^2}{2\pi\sqrt{(qBrc)^2 + E_0^2}} \quad 11.18$$

Dengan menggunakan persamaan (8-20) untuk $p=qBr$, persamaan diatas menjadi :

$$f = \frac{qBC^2}{2\pi\sqrt{(qBrc)^2 + E_0^2}} \quad 11.19$$

Dengan E_0 adalah energi rehat partikel.

Sinkrotron elektron pertama kali dibangun oleh Edwin McMillan pada tahun 1945, meskipun Vladimir Veksler sudah menerbitkannya pada jurnal Soviet tahun 1944. Proton sinkrotron dirancang pertama kali oleh Sir Marcus Oliphant dan dibangun tahun 1952. Sinkrotron merupakan turunan dari sinkrotron yaitu jenis akselerator siklik dimana medan magnet membentuk partikel dengan lintasan tertutup bergantung waktu yang ditergrasikan dengan energi kinetik partikel.

Rangkuman

1. Pada eksperimen fisika inti sering diperlukan penembak berenergi tinggi. Akselerator adalah mesin mempercepat partikel sehingga diperoleh energi yang cukup tinggi sesuai dengan keperluan-keperluan eksperimen fisika inti bahkan sekarang banyak digunakan juga dalam penelitian di bidang fisika material.
2. Partikel dipercepat melalui interaksi elektromagnetiknya, sehingga hanya partikel bermuatan dan stabil terhadap peluruhan (waktu hidup yang lama) yang dapat dipercepat. Partikel yang memenuhi 2 persyaratan tadi adalah elektron, proton dan inti stabil/ion berat beserta anti partikelnya
3. Akselerator mempercepat partikel bermuatan dengan medan listrik yang tinggi dimana medan listrik ini menarik atau menolak partikel. Medan listrik ini bergerak dan mendorong partikel untuk bergerak dan dipercepat.
4. Bahan yang berhasil dimanfaatkan sampai saat ini Si, Ge, Cd, Te, dan HgI_2 . sifat yang sangat penting dan merupakan kelebihan yang tidak dimiliki detektor jenis lain adalah resolusi energinya sangat tinggi.
5. detektor isian gas berkerja dengan memanfaatkan ionisasi yang dihasilkan oleh radiasi jika melalui gas.
6. Detektor kelipan (sinitilasi) dimana bahan yang dapat menghasilkan kelipan cahaya jika radiasinya mengenai bahan.
7. Detektor semikonduktor yang prinsip kerjanya hamper sama dengan detektor isian gas hanya pada detektor semikonduktor ini ionisasi yang dihasilkan jika melalui bahan semikonduktor.

Evaluasi Formatif

Essay

1. Hitung jejari sinkrotron yang dapat mempercepat proton sampai energi 500 GeV dalam medan magnet 2T! (jawab: sekitar 1 km)

Jawab:

2. Sebuah siklotron dirancang untuk mempercepat proton, deuteron dan partikel alfa energi rendah. Frekuensi siklotron tetap, tidak dapat bervariasi, sedangkan medan magnetnya dapat diatur. Siklotron pertama- tama diatur untuk mempercepat partikel alfa sampai energi 4,0 MeV. Tunjukkan bahwa dengan frekuensi dan medan magnet yang tidak berubah, siklotron dapat mempercepat deuteron sampai energi 2,0 MeV. Dengan factor berapa medan magnet harus dikurangi untuk mempercepat proton? (jawab : $\frac{1}{2}$) Hitung energi proton maksimum yang dihasilkan (Jawab 2 MeV)

Jawab:

4. suatu betatron mempunyai medan maksimum 0,4T beroperasi di frekuensi 50Hz dan diameter orbit 1,5m. hitung energi yang diperoleh tiap edaran elektron dan hitung pula energi akhirnya. (jawab: 294eV dan 91 MeV)

Jawab:

5. suatu akselerator linear mempercepat elektron mencapai energi 30 GeV. Hitung kecepatan elektron pada energi tersebut. Berapa energi proton yang bergerak dengan kecepatan itu?

Jawab:

Umpan Balik

Setelah mengerjakan seluruh soal pada evaluasi formatif, periksalah jawabanmu dengan kunci jawaban yang telah disediakan dan hitung berapa butir soal yang kamu bisa jawab benar. Jika kamu dapat menjawab 80% jawaban dengan benar, maka kamu dianggap telah memenuhi ketuntasan dan menguasai materi dalam kegiatan pembelajaran ini. Namun jika belum, berarti kamu perlu mengulang mempelajari kegiatan pembelajaran ini dengan lebih baik.

Referensi

Azam, M. dkk. 2007. Penentuan Efisiensi Beta Terhadap Gamma Pada Detektor Geifer Muller. Jurusan Fisika FMIPA Universitas Diponegoro. Diakes dari <https://ejournal.undip.ac.id>
Beiser, A., Concept of Modern Physics, 6th ed., McGraw Hill, 2003.

- Fisika.uin-malang. 2016. Detektor isian gas praktikum fisika modern. Diakses dari <https://mipa.ub.ac.id/wp-content/uploads/2018/08/S1-Jurusan-Fisika.pdf>
- j. kenneth shultis, e.f, richard.2008 fundamental of nuclear science and engineering, crc press. Diakses dari Jurnal <https://Batn.co.id>
- Kenneth Krane, Modern Physics, 3rd ed., John Willey & Son, 2011.
- Kusminarto, Esensi Fisika Modern, 1st ed., Penerbit ANDI, 2011.
- Nurhayati, Nanik Dwi. 2011. Dektor Radiasi. Universitas Negeri Semarang. Diakes dari <https://docplayer.info/32578112-Interaksi-radiasi-dengan-materi-nanik-dwi-nurhayati-s-si-m-si.html>
- [http://file.upi.edu/Direktori/FPMIPA/JUR. PEND. FISIKA/197411081999032-SELLY_FERANIE/perangkat%20pembelajaran/Fisika%20Partikel/Bab_7_akselerator_n_detektor.pdf](http://file.upi.edu/Direktori/FPMIPA/JUR._PEND._FISIKA/197411081999032-SELLY_FERANIE/perangkat%20pembelajaran/Fisika%20Partikel/Bab_7_akselerator_n_detektor.pdf)
- <http://ss-radiology.blogspot.com/2008/08/dasar-dasar-linear-accelerator.html#:~:text=Akselerator%20adalah%20alat%20yang%20dipakai,ringan%2C%20dan%20inti%20atom%20lainnya.&text=Akselereator%20gerak%20pertama%20kali%20dikembangkan,Cavendish%2C%20Universitas%20Cambrige%20pada%201929.https://mimirbook.com/id/079b5f18eff>
- dodi indrafi : mudah dan aktif belajar fisika pt grafindo media pratama
- medicine physics, Viena, Austria:IAEA.
- Barrera,D.C.(2010).C-Band LINAC for a Race track Mikrotron. Universidad
- Bailey,D.L.,Humm,J.L., Pokropek,A.T.,Aswegen A.V(2014).nuclear Complutense de Madrid
- Bryan P.J.A.Brief History and Review of accelerator.CERN Journal. Darsono (2008) peran teknologi akselerator dalam mendukung industri

Kegiatan Pembelajaran 3 KUNJUNGAN ILMIAH KE BATAN

STRUKTUR :

COVER

DAFTAR ISI

DAFTAR GAMBAR

DAFTAR TABEL

BAB IPENDAHULUAN

A. Latar BelakaNG

B. Tujuan Kuliah Lapangan

1.

C. Manfaat

Manfaat Bagi mahasiswa:

1.

2.

Manfaat bagi program studi

1.

2.

BAB II PROFIL DAN DESKRIPSI (NAMA LEMBAGA)

A. Badan Teknologi Nuklir Nasional

1. Deskripsi Singkat Lembaga

2. Alamat Lembaga

3. Layanan yang Ditawarkan

BAB III HASIL KUNJUNGAN DAN OBSERVASI KULIAH LAPANGAN

A. Layanan ...

B. Layanana

(tampilkan juga foto – foto kegiatan beserta uraiannya)

BAB IV

PENUTUP

A. Kesimpulan

B. Kesan Selama Mengikuti Kuliah Lapangan

C. Kritik dan Saran

FORMAT COVER:

laporan KULIAH LAPANGAN

KUNJUNGAN KE

.....

Dalam memenuhi Mata Kuliah ...

LOGO UKI

Disusun Oleh :

Nama : ...

NIM : ...

Dosen Pengampu Mata Kuliah :

Program Studi ...

Fakultas ...

Universitas KRISTEN INDONESIA

JAKARTA, 20..

Penutup

Rangkuman

Partikel elementer menjelaskan tentang partikel elementer dari atom selain proton, neutron dan elektron dan fungsi akselerator dan detector.

Daftar Istilah

- Teori relativitas : Teori yang didasarkan pada Postulat I dan II Einstein khusus
- Teori Kuantum : Teori tentang bentuk energi radiasi adalah diskrit atau dalam bentuk paket-paket.
- Fisika Modern : Fisika yang didasari oleh teori relativitas Einstein dan teori kuantum Planck

Referensi:

- Haliday, Walker, Resnick. (2013). *Fundamental of Physics* Edisi Sepuluh. Amerika: Penerbit: Erlangga.
- Kenneth, K. S. (Department of P. O. S. U. (2012). *Modern Physics Third Edition* (third). Corvallis: John Wiley & Sons, Inc.
- Kusminarto. (2011). *Esensi Fisika Modern*. Edisi pertama. Yogyakarta: Penerbit Andi
- Sutjahja, Inge M. (2018). *Fisika Modern Teori dan Contoh Aplikasi Fenomena Tunneling* Edisi 2 Cetakan 1. Bandung: ITBPress
- Thornton, S. T. (University of V., & Rex, A. (University of P. S. (2013). *Modern Physics for Scientist and Engineers Fourth Edition* (Third). Boston: Cengage Learning.
- Thornton, Stephen T dan Rex, Andrew. (2012). *Modern Physics For Science and Engineering*. America: Cengage Learning.
- Tipler, Paul A dan Liewellyn, Ralph A. (2008). *Modern Physics*. America: W.H Freeman Company 41 Madison Avenue New York

TENTANG PENULIS



Ngia Masta, dilahirkan di Pontianak (1990), adalah Dosen di Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Kristen Indonesia. Menulis dan mengajar adalah passion-nya. Penulis memperoleh gelar Sarjana Pendidikan di Program Studi Pendidikan Fisika Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan Universitas Tanjungpura (2015) dan Magister Sains di bidang Fisika Murni dan terapan peminatan Condensed Matter Physics di Universitas Indonesia (2018). Penulis saat ini juga mengajar mata kuliah Fisika Modern dan Fisika Terapan Material. Saat ini menjabat sebagai Tim Penjamin Mutu Program Studi Pendidikan Fisika. Buku ajar Metode Scanning Electron Microscopy (2020) adalah buku pertama yang ia tulis.