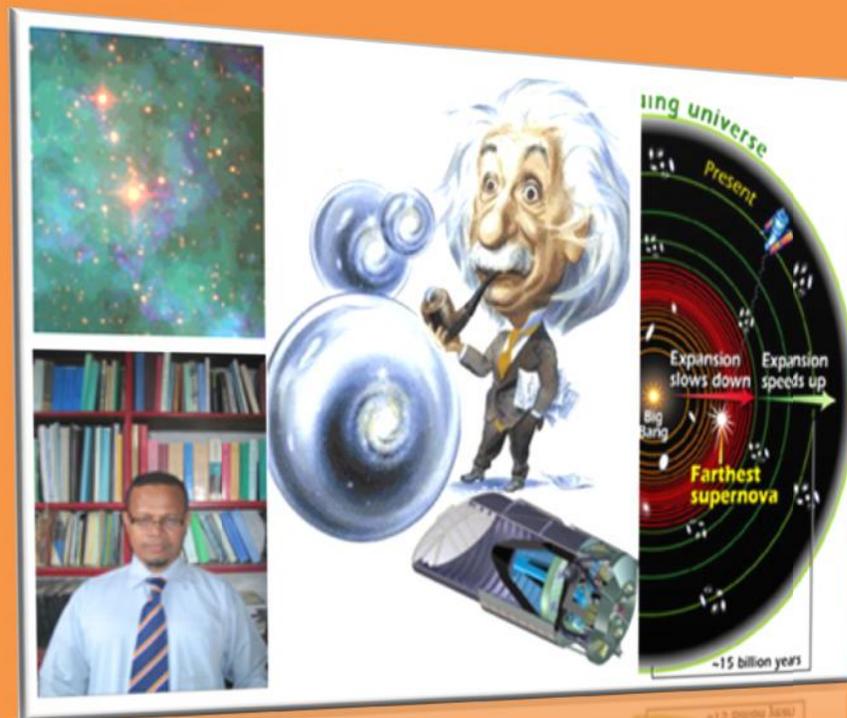


FISIKA MODERN I

(Pendekatan Konseptual)

Dr. A.Halim, M.Si



FISIKA MODERN I

(Pendekatan Konseptual)

Dr. A. HALIM, M.Si
Fakultas Keguruan dan Ilmu Pendidikan
Universitas Syiah Kuala

Penerbit: Syiah Kuala University Press

FISIKA MODERN I
(Pendekatan Konseptual)

Penulis
Dr.A.Halim, M.Si

Desain Cover
Khalil

Tata Letak / Layout
Khalil

Dicetak
CV Odaiba

Cetakan Pertama, Juni 2013
Halaman: 226+xi

ISBN: 978-979-8278-84-6

Penerbit
Syiah Kuala University Press
Darussalam-Banda Aceh

Daftar Isi

	Halaman
Daftar Isi	iii
Daftar Tabel	vi
Daftar Gambar	vii
Prakata	x
Kata Pengantar	xii
BAB I PENDAHULUAN	1
1.1. Pengantar	2
1.2. Besaran dan sistem Pengukuran	5
1.3. Ketidakpastian Pengukuran dan Angka Signifikansi	6
1.4. Sistem Satuan Internasional	7
1.4.1 Standar Panjang	8
1.4.2 Standar Massa	9
1.4.3 Standar waktu	10
1.5. Dimensi	11
1.6. Dimensi dan Satu dalam Fisika Modern	14
1.6.1 Energi	14
1.6.2 Massa	15
1.6.3 Momentum	16
1.6.4 Panjang	16
1.7. Ruang Lingkup Fisika Modern	16
1.8. Konsep Fisika Modern	17
1.9. Penerapan Konsep Fisika Modern	19
Rangkuman	25
Latihan	26
Glossarium	27
Daftar Pustaka	28
BAB II. RELATIVITAS	29
2.1. Pengantar	30
2.2. Pengaruh Kerangka Acuan	31
2.3. Kerangka Acuan Universal	33
2.4. Transformasi Galileo	35
2.5. Percobaan Michelson-Morley	39
2.6. Prinsip Relativitas Khusus Einstein	47
2.7. Transformasi Lorentz	50
2.8. Transformasi Kecepatan	57
2.9. Konstraksi Lorentz	66

2.10. Dilatasi waktu	70
2.10.1 Perhitungan dengan metode klasik	76
2.10.2 Pengamat dalam Moun (kontraksi panjang)	78
2.10.3 Pengamat di Bumi (efek pemuluran waktu)	79
2.11. Massa Relativitas	80
2.12. Momentum dan Energi Relativistik	84
2.13. Indikasi Baru dalam Relativitas	90
2.13.1 Kaitan Energi dan Laju	91
2.13.2 Tachyons	93
2.13.3 Konsep Simetri Alamiah	97
2.14. Contoh Soal dan Latihan Rumah	100
Rangkuman	107
Latihan	109
Glossarium	111
Daftar Pustaka	113
BAB III. FENOMENA KUANTUM	114
3.1. Pengantar	115
3.2. Kegagalan Teori gelombang Cahaya	115
3.3. Radiasi Benda Hitam	121
3.3.1 Radiasi Thermal	121
3.3.2 Radiasi Benda Hitam Sempurna	123
3.4. Definisi Cahaya	145
3.5. Sifat-Sifat Cahaya	146
3.6. Contoh Fenomena Cahaya dalam kehidupan	148
3.6.1 Sel Fotolistrik dan Panel Surya	148
3.6.2 Pelangi	152
3.6.3 Bayangan Matahari pada Permukaan Air	153
3.6.4 Tulisan AMBULANCE	154
3.6.5 Warna Objek	155
3.7. Kesalahan Konsep Cahaya	156
Rangkuman	166
Latihan	171
Glossarium	174
Daftar Pustaka	176
BAB IV. STRUKTUR ATOM	177
4.1. Pengantar	178
4.2. Pengertian Bentuk dan Model Atom	178
4.3. Model-Model Atom	179

4.3.1 Model Atom Dalton	180
4.3.2 Model Atom J.J Thomson	181
4.3.3 Model Atom Rutherford	182
4.3.4 Model Atom Bohr	185
4.3.5 Model Atom Sommerfeld	194
4.3.6 Model atom Teori Kuantum	195
4.4. Struktur Atom	197
4.4.1 Elektron	197
4.4.2 Atom Hidrogen	199
4.5. Penggambaran distribusi elektron atom hidrogen	202
4.6. Kesalahan konsep elektron dan model atom	203
Rangkuman	215
Latihan	218
Glossarium	221
Daftar Pustaka	222
Indeks	224

Daftar Tabel

No. Tabel		Halaman
1.1	Orde Panjang hingga Terpendek	8
1.2	Orde Massa hingga Terberat	9
1.3	Orde Waktu hingga Terlama	10
1.4	Bersaran Dasar dan Satuan Internasional	11
1.5	Faktor, Awalan, dan Lambang Ukuran	12
3.1	Perpaduan warna sesuai dengan <i>filter</i>	156

Daftar Gambar

No. Gambar		Halaman
1.4	Materi yang dibahas dalam Fisika Modern	18
1.5	Perkembangan teknologi komunikasi	20
1.6	Perkembangan Mikroskop berdasarkan Resolusinya	21
1.7	Karikatur Penerapan Ilmu Fisika	23
2.1	Lintasan lemparan bola	32
2.1a	Kerangka Acuan Transformasi Galileo	35
2.2	Ilustrasi Gerak Perenang	40
2.3	Diagram percobaan Michelson-Morley	43
2.4	Eather memenuhi ruang sistem tata surya	46
2.5	Ilustrasi Pembentukan pola Interferensi	47
2.6	Diagram Postulat Einstein	49
2.7	Diagram Postulat Relativitas Khusus	53
2.7a	Karakteristik nilai k	55
2.8	Kecepatan relatif benda B menurut pengamat	58
2.9	Perbandingan hasil perhitungan antara	61
2.10	Perbandingan hasil pengamat dalam	62
2.11	Dua pengamat saling bergerak relatif	67
2.12	Efek kontraksi hanya sepanjang gerak	69
2.13	Kerdipan cahaya diamati oleh dua pengamat	71
2.14	Ilustrasi Eksperimen Friseh dan Smith	75
2.15	Diagram peluruhan Muon	76
2.16	Ilustrasi efek relativitas massa	81
2.17	Perbandingan energi kinetik klasik dan relatif	89
2.18	Kecepatan benda terhadap penambahan energi	92
2.19	Karakteristik masa partikel normal dan muon	95
2.20	Karakteristik Momentum normal dan muon	96
2.21	Konsep simetris dalam relativitas	97
2.22	Konsep alam semesta tiga ruang	99
3.1	Illutراسi percobaan tetesan minyak A Millikan	119
3.2	Perbandingan jumlah ion pada perc. Millikan	120
3.3	Model intensitas cahaya kuat dan lemah	121
3.4	Daya emisi monokromatik untuk benda hitam	122
3.5	Hasil eksperimen Lummer dan Prinsher	124
3.6	Pola amplitudo gelombang berdiri	125
3.7	Ilustrasi kulit bola	127
3.7a	Bidang simpul gelombang dalam 3D	134
3.7b	Ilustrasi rapat titik kisi dalam unit sel jari-jari r	137
3.8	Perbandingan pola spektrum antara teori dan	139
3.9	Spektrum radiasi benda hitam	144
3.10	Susunan Percobaan celah ganda Thomas Young	147
3.11	Ilustrasi Fenomena efek fotolistrik	147
3.12	Salah satu contoh panel surya	149
3.13	Panel-panel surya yang dipasang pada atap rumah	149
3.14	Contoh panel atau sel surya	150

3.15	Aplikasi cahaya untuk transportasi	150
3.16	Aplikasi cahaya untuk lampu jalan	151
3.17	Fenomena difraksi cahaya pada pelangi	152
3.18	Bayangan matahari pada permukaan air	153
3.19	Dasar pembentukan bayangan matahari	154
3.20	Perpaduan berbagai jenis warna	155
3.21	Fenomena pembiasan cahaya	158
3.22	Fenomena pincil dalam air	159
3.23	Diagram percobaan efek Compton	160
3.24	Grafik percobaan efek Compton	162
4.1	Model Atom Thomson	181
4.2	Perkiraan hasil Percobaan Rutherford dengan	182
4.3.	Perkiraan hasil Percobaan hamburan alpha	183
4.4	Model atom hasil percobaan hamburan Rutherford	184
4.5	Bentuk kegagalan Model atom Rutherford	185
4.6	Model atom Bohr	186
4.6a	Model Kulit atom Bohr	188
4.6b	Proses eksitasi dalam model Bohr untuk atom H	191
4.6c	Tingkat energi Hidrogen model Bohr	192
4.7	Model atom Sommerfeld	194
4.8	Kedudukan elektron dalam ruang tiga dimensi	196
4.9	Model atom teori kuantum	196
4.9a	Bentuk atom yang sebenarnya hasil STM	199
4.10	Persamaan dan Penggambaran Kerapatan	199
4.11	Deret Spektrum atom Hidrogen	200
4.12	Model Kuantum atom Hidrogen	200
4.13	Distribusi Kerapatan Kemungkinan Elektron	202
4.14	Model atom Hidrogen versi Bohr	207
4.15	Rapat probabilitas elektron	209
4.15a	Bentuk atom yang sebenarnya hasil STM	210
4.16	Manifestasi gelombang de Broglie pada elektron	211
4.17	Model atom yang mewakili simbol energi	212

Prakata

Alhamdulillah dengan taufik dan hidayah dari Allah swt telah selesai penyusunan buku Fisika Modern edisi pertama pada tahun 2012. Salah satu tujuan penyusunan buku ini adalah untuk mengatasi kekurangan buku teks Fisika Modern berbahasa Indonesia. Tujuan lain agar mahasiswa yang mengikuti mata kuliah Fisika Modern memiliki pengetahuan dan pemahaman yang sama tentang konsep-konsep Fisika Modern. Dengan gaya pembahasan yang mendalam dan sistematis, diharapkan mahasiswa dengan mudah dapat mengikuti uraian konsep-konsep Fisika Modern yang dipaparkan dalam buku ini.

Buku ini merupakan bagian keseluruhan Fisika Modern yang diberi nama dengan *Fisika Modern I*. Bagian yang kedua diberi nama *Fisika Modern II*, yang akan diterbitkan pada masa yang akan datang. Fisika Modern I berisi materi konsep relativitas sampai dengan struktur atom. Sedangkan Fisika Modern II berisi materi dualisme partikel gelombang sampai dengan Pengantar Zat Padat. Buku yang ada ditangan anda sekarang ini (*Fisika Modern I*) struktur isinya mencakup; Konsep satuan dalam Fisika Modern, Relativitas, Fenomena Kuantum, dan Struktur Atom. Buku ini diharapkan menjadi buku wajib mahasiswa Jurusan Fisika dan atau Progran Studi Pendidikan Fisika semester V dan mahasiswa yang sedang mengikuti kuliah Fisika Modern atau Fisika Kuantum. Untuk mahasiswa jurusan elektron, buku ini menjadi dasar pemahaman tentang struktur atom dan perilaku elektron dalam bahan.

Metode penggunaan buku ini secara garis besar sama seperti buku-buku teks lainnya, namun ada beberapa tambahan guna untuk memudahkan mahasiswa memahami isinya. Setiap bab dilengkapi dengan Tujuan Umum Pembelajaran dan Tujuan Khusus Pembelajaran yang seharusnya dipahami dan menjadi sasaran bagi mahasiswa agar berhasil memahami isi buku. Diakhir setiap bab disediakan latihan sebagai salah satu cara agar mahasiswa lebih akrab dan dapat menyelesaikan masalah-masalah yang terkait dengan isi dalam bab tersebut. Untuk mengetahui kebenaran jawaban, dibagian akhir buku disediakan kunci jawaban untuk latihan setiap bab. Secara khusus pada Bab III dan Bab IV penulis uraikan topik-topik konsep Cahaya dan Elektron yang sering salah dipahami oleh mahasiswa dan bahkan oleh staf pengajar fisika. Kepada mahasiswa diharapkan isi bab tersebut diteliti dengan baik, karena setiap dikemukakan konsep yang salah dipahami, juga disertai dengan konsep yang benar atau konsep yang sama seperti pemahaman pakar fisika.

Saran dan ide dari teman sejawat, staf lainnya, dan juga ide dari mahasiswa telah mewarnai isi buku ini. Kepada pengguna atau pembaca, khususnya mahasiswa sebagai konsumen utama buku ini, penulis mengharapkan dapat memberikan kritikan yang bersifat membangun demi untuk kesempurnaan buku ini dimasa yang datang. Harapan penulis buku ini bermanfaat kepada pembaca.

Darussalam, awal Maret 2012.

Penulis,

A.Halim

BAB I

PENDAHULUAN

Tujuan Umum Pembelajaran

Setelah mahasiswa membaca Bab Pendahuluan ini diharapkan mampu menguraikan batasan dan ruang lingkup fisika modern, sistem satuan, konsep dan penerapan fisika modern.

Tujuan Khusus Pembelajaran

Setelah mahasiswa membaca Bab Pendahuluan ini secara khusus diharapkan dapat

- (1) Menjelaskan secara ringkas batasan antara fisika klasik dan modern
- (2) Menjelaskan ruang lingkup yang menjadi pembahasan dalam fisika modern
- (3) Menurunkan sistem satuan dan dimensi besaran-besaran fisika modern
- (4) Melakukan konversi beberapa satuan besaran dalam fisika moderen.
- (5) Menjelaskan bidang-bidang yang menjadi sasaran penerapan fisika moderen.

1.1. Pengantar

Fisika merupakan salah satu cabang dari ilmu pengetahuan alam eksakta (Natural Sciences). Adalah Aristoteles (384-322 sebelum Masehi) yang diduga pertama kali memperkenalkan istilah ini melalui karyanya *Physika* (Ilmu Alam). Berbeda dengan awal masa sejarah dan masa pertengahan, kajian fisika pada masa kini bertumpu pada metoda ilmiah (scientific method) dan tidak lagi sekedar berdasar pada filsafat murni, yakni misalnya dengan pertanyaan dari mana, untuk apa, mengapa begini dan bukan begitu dan seterusnya. Hingga pada abad ke 18 ilmu fisika meliputi ilmu alam yang wilayah cakupannya lebih luas daripada apa yang ada sekarang; yakni meliputi bidang astronomi, astrologi, biologi, kesehatan, meteorologi dan bidang lainnya. Sedangkan kini bidang kajian fisika semakin menyempit, seperti misalnya bidang mekanika, balistik dan optika geometri yang telah mulai dipelajari secara intensif dalam bidang matematika.

Fisika meneliti dan mengkaji fenomena alam tidak hidup. Bidang ini membatasi dirinya pada proses yang dapat diamati dan dapat dihasilkan ulang, serta menganalisisnya melalui sekumpulan istilah. Istilah-istilah ini seperti misalnya panjang, waktu, massa, muatan listrik dan medan magnet didefinisikan secara jelas dan tegas serta dituliskan secara kuantitatif melalui angka dan satuan. Ilmu fisika melakukan formulasi hukum dengan bantuan istilah tersebut serta mencari bentuk matematisnya. Secara mekanisme, prosesnya bermula dengan uji eksperimen, untuk membuktikan apakah hukum tersebut dapat dibuktikan. Hukum yang diperoleh dan telah dibuktikan tersebut, kemudian memungkinkan orang untuk melakukan prediksi atau perkiraan kuantitatif suatu proses fisika.

Pada beberapa bidang dalam ilmu fisika dapat diamati adanya batas yang tidak jelas dengan bidang ilmu lain. Karakter transisi lalu muncul dan tampak pada nama yang diberikan pada bidang tersebut. Contohnya adalah biofisika, kimia fisika, fisika molekuler, astrofisika

dan fisika ekstraterestial. Hingga kini terdapat beberapa penemuan mengagumkan telah diperoleh dalam bidang transisi ini. Menurut sejarah perkembangan dan penemuannya ada dua bagian dalam ilmu fisika yaitu fisika klasik dan fisika modern.

Dalam fisika klasik, fenomena alam dilukiskan secara konkrit melalui logika "naif" dan "rasio akal sehat". Bidang ini mencakup mekanika Newton, teori elektronmagnetik Maxwell, optika geometri, optika gelombang dan sebagian termodinamika. Dalam fisika klasik, kecepatan partikel yang diteliti dianggap sangat kecil dibanding kecepatan cahaya, dan selain itu besaran aksi dan energinya sangat besar dibanding bilangan kuantum Planck. Awal sejarah fisika modern secara umum ditandai pada tahun 1900 saat Max Planck mempublikasikan teori kuantumnya. Teori kuantum ini tidak dilukiskan secara konkrit. Interpretasi naif dari ruang dan waktu tidak lagi berlaku. Wilayah kajian fisika modern meliputi mekanika kuantum, teori relativitas, fisika atom, fisika inti dan fisika partikel elementer serta optika elektron.

Batas pemisah kedua bagian fisika ini tidak cukup tajam, misalnya karena dalam wilayah fisika klasik terdapat masalah yang hanya dapat diselesaikan dengan metode fisika modern. Di lain pihak beberapa gejala dalam fisika modern dapat dimengerti secara klasik. Sehingga berlaku bahwa fisika klasik adalah kasus khusus dari fisika modern. Contohnya adalah prinsip relativitas Einstein yang modern melingkupi mekanika klasik. Prinsip relativitas klasik adalah kasus khusus untuk kecepatan yang nilainya sangat kecil dibandingkan kecepatan cahaya.

Fisika modern merupakan salah satu bagian dari ilmu Fisika yang mempelajari perilaku materi dan energi pada skala atomik dan partikel-partikel subatomik atau gelombang. Pada prinsipnya sama seperti dalam fisika klasik, namun materi yang dibahas dalam fisika modern adalah skala atomik atau subatomik dan partikel bergerak dalam kecepatan tinggi. Untuk partikel yang bergerak dengan kecepatan mendekati atau sama dengan kecepatan cahaya, perilakunya

dibahas secara terpisah dalam teori relativitas khusus. Ilmu Fisika Modern dikembangkan pada awal abad 20, di mana perumusan-perumusan dalam Fisika Klasik tidak lagi mampu menjelaskan fenomenafenomena yang terjadi pada materi yang sangat kecil. Fisika Modern diawali oleh hipotesa Planck yang menyatakan bahwa besaran energi suatu benda yang beresonansi (osilator) tidak lagi bersifat kontinu, namun bersifat diskrit (kuanta), sehingga muncullah istilah Fisika Kuantum dan ditemukannya konsep dualisme partikel-gelombang. Konsep dualisme dan besaran kuantum ini merupakan dasar dari Fisika Modern.

Peningkatan kuantitas pengetahuan fisika selama 20 tahun terakhir telah mengakibatkan pertambahan jumlah bidang dalam fisika. Meski hukum Newton terdapat pada seluruh bidang fisika dan membuat formulasi dalam beberapa bidang, hal itu tidak mungkin lagi dilakukan kini. Spesialisasi dalam bidang berlangsung pesat, sehingga seorang fisikawan atom hampir tidak punya lagi titik kesamaan dengan seorang ahli termodinamika misalnya. Juga didalam bidang tertentu, berlangsung spesialisasi bidang dengan pesat dan seiring dengan hal itu jumlah publikasi meningkat pesat. Contohnya adalah jurnal INIS indeks atom yang mempublikasi rangkuman singkat dan indeks dari karya orijinal pada bidang fisika atom inti dan radiasi. Dibanding pada tahun 1976 jumlah publikasi majalah ini adalah 26.000 setahun, maka pada tahun 1994 jumlahnya diatas 90.000.

Saat ini dipublikasikan oleh lebih dari 10.000 jurnal dan majalah hasil penelitian dari beberapa ribu laboratorium dan institut. Pertumbuhan publikasi rata-rata sekitar 4-6% setahun. Tanpa komputer adalah tidak mungkin untuk dapat menemukan publikasi ilmiah dari masalah fisika tertentu di tengah "banjir publikasi". Ada dua fisikawan yang berperan penting dalam pengembangan pilar utama fisika yaitu Galileo Galilei (1564-1642) sebagai pendiri fisika eksperimental modern dan Isaac Newton (1643-1727) yang mengembangkan pemodelan dalam fisika dengan bantuan matematika

1.2. Besaran dan Sistem Pengukuran

Besaran (*quantity*) merupakan hal penting dalam fisika. Hal ini berhubungan dengan keberadaan fisika sebagai ilmu kuantitatif. Besaran didefinisikan sebagai sesuatu yang secara konsep memiliki harga/nilai. Sebagai contoh kita menyebut umur si A 25 tahun, atau tinggi badan si B 1,70 m. Umur dan tinggi merupakan dua contoh besaran.

Besaran dibedakan atas besaran pokok (dasar) dan besaran turunan. Dalam fisika, terdapat 7 besaran pokok dan 2 besaran tambahan. Panjang, massa, waktu, temperatur, arus listrik, kuat cahaya, dan jumlah zat merupakan besaran pokok, sedangkan sudut datar dan sudut ruang merupakan besaran tambahan. Besaran-besaran selain dari besaran ini merupakan besaran turunan (*derived quantities*), misalnya kecepatan, percepatan, gaya, dll.

Untuk dapat mengetahui harga dari suatu besaran dilakukan pengukuran. Pengukuran merupakan aspek penting karena suatu hukum baru dapat diberlakukan apabila telah terbukti secara eksperimental, dan eksperimen tidak dapat dipisahkan dari pengukuran. Setiap pengukuran memiliki satuan. Contohnya, untuk mengetahui panjang suatu benda kita menggunakan alat pengukur panjang, misalnya meteran; untuk mengetahui waktu tempuh pelari *sprint*, kita menggunakan *stopwatch*. Pengukuran dapat dilakukan baik terhadap besaran pokok, maupun terhadap besaran turunan. Secara umum, kita tidak harus mengukur masing-masing besaran untuk mengetahui harganya sebab terdapat besaran yang harganya dapat diketahui melalui perhitungan, yakni dengan mengetahui lebih dahulu ketergantungannya dan hubungannya dengan besaran lain.

Seiring dengan perkembangan ilmu pengetahuan yang sangat pesat dan kebutuhan dalam mengkomunikasikan ilmu pengetahuan antar negara, maka sejak awal Abad XIX dipikirkan suatu sistem standar, yang kini dikenal sebagai satuan-satuan Sistem Internasional (Systeme International d'Unites), disingkat sistem SI.

1.3. Ketidakpastian Pengukuran dan Angka Signifikan

Hubungan antar besaran yang dinyatakan dalam hukum-hukum fisika baru dapat diyakini kebenarannya apabila didukung oleh eksperimen yang didasari oleh pengukuran yang baik. Karena itu, ketepatan pengukuran merupakan bagian penting dari fisika. Akan tetapi, tidak ada pengukuran yang secara mutlak tepat; selalu terdapat ketidakpastian dalam setiap pengukuran.

Hasil dari suatu pengukuran yang kita lakukan mungkin lebih besar atau kecil daripada yang kita catat. Oleh karena itu, pemberian hasil dari suatu pengukuran harus disertai dengan estimasi ketidakpastian (estimated uncertainty). Misalkan lebar papan tulis ditulis 5.2 ± 0.1 cm. Angka 0.1 cm menyatakan estimasi ketidakpastian dalam pengukuran. Pada umumnya estimasi ketidakpastian berhubungan dengan nilai skala terkecil alat ukur, dalam hal ini papan diukur menggunakan mistar). Lebar aktual papan berada antara 5.1 dan 5.3 cm. Prosentase ketidakpastian adalah rasio ketidakpastian terhadap harga terukur dikalikan dengan 100%. Misalkan kalau pengukuran adalah 5.2 cm dan ketidakpastian 0.1 cm, maka prosentase ketidakpastian adalah: $(0.1/5.2) \times 100\% = 2\%$.

Angka-angka di dalam suatu bilangan yang turut mempengaruhi hasil-hasil perhitungan dikenal sebagai **angka signifikan**. Sebagai contoh, terdapat empat angka signifikan pada bilangan 23.21; dan dua angka signifikan pada pengukuran 0.062 cm. Perlu diperhatikan bahwa angka signifikan tidak bisa dipisahkan dari angka pengukuran (skala terkecil alat ukur). Untuk alat ukur dengan 0.001 cm atau 0.002 cm sebagai skala terkecil, maka angka 6 (enam) dan 2 (dua) dalam 0.062 cm merupakan angka signifikan.

Bilangan 36.900 memiliki jumlah angka signifikan yang tidak jelas, mungkin tiga, empat, atau lima angka signifikan. Kenapa demikian? Karena skala terkecil pengukuran dapat saja 100, 50, 20, 10, 5, 2, atau 1. Akan tetapi, kalau angka tersebut ditulis sebagai 3.69×10^4 , kita dapat pastikan bahwa terdapat tiga angka signifikan.

Dengan analogi yang sama berarti 3.690×10^4 memiliki empat angka signifikan, atau kalau terdapat bilangan 36.901, kita pastikan terdapat lima angka signifikan.

Hasil perkalian, pembagian, pengurangan, dan penjumlahan dua bilangan atau lebih hendaknya ditulis dalam jumlah angka yang signifikan terkecil dari bilangan induk. Bilangan induk hendaknya dalam keadaannya yang semula (tidak mengurangi angka signifikan) pada saat mengalami operasi matematik (Sutrisno 2003).

Contoh 1.1

Hasil pengukuran panjang, lebar dan tinggi sebuah balok secara berurutan adalah 20,21 cm, 10,2 cm, dan 8,72 cm. Berapakah volume balok tersebut?

Jawab

Volume = Panjang x Lebar x Tinggi = $20,21 \times 10,2 \times 8,72 = 1797,55824 \text{ cm}^3$ Perhatikan bahwa panjang kotak mengandung 4 angka signifikan, lebar mengandung 3 angka signifikan dan tinggi mengandung 3 angka signifikan. Maka volume kotak harus mengandung 3 angka signifikan = $1,80 \times 10^4 \text{ cm}^3$.

1.4. Sistem Satuan Internasional

Pada mulanya satuan-satuan pengukuran hanya dinyatakan dengan perasaan atau organ tubuh manusia, misalnya depah atau langkah kaki untuk alat atau satuan pengukuran panjang. Sebenarnya metode pengukuran ini masih sering digunakan di daerah pedalaman di seluruh dunia. Akan tetapi, dalam ranah ilmiah di hampir semua negara, Sistem Satuan Internasional (SI) telah umum digunakan. Sistem ini didasarkan pada sistem MKS (meter, kilogram, second) yang menggantikan sistem CGS (centimeter, gram, second). Terdapat 3 komponen dalam SI, yakni satuan dasar dan satuan pelengkap (Lihat Tabel 1.1) serta satuan turunan. Sebagai konsekuensi dari terdapat 7

besaran pokok, maka ada 7 satuan pokok. Berikut akan diuraikan konvensi yang digunakan untuk standar panjang, standar massa dan standar waktu.

1.4.1 Standar Panjang

Sampai 200 tahun yang lalu, satuan-satuan pengukuran panjang tidak distandarkan, sehingga berbeda-beda untuk setiap tempat/negara. Barulah dalam dalam Tahun 1790 Akademi Ilmu Pengetahuan Prancis menetapkan meter (disingkat m) sebagai Satuan Internasional (SI) panjang. Mula-mula standar 1 m dinyatakan sebagai sepersepuluh juta dari jarak khatulistiwa ke kutub utara melalui Dunkirk. Selanjutnya, dibuat balok platinum yang menunjukkan panjang ini.

Tabel 1.1 Orde Panjang dari Terpendek sehingga Terpanjang

Parameter	Panjang (m)	Parameter	Panjang (m)
Proton	10^{-15}	Jarak Bumi-Bulan	10^9
Atom Hidrogen	10^{-10}	Jarak Bumi-Matahari	10^{11}
Virus Flu	10^{-7}	Diameter tata surya	10^{13}
Tetes air	10^{-3}	Jarak bintang terdekat	10^{17}
Tinggi orang	10^0	Diameter galaksi luar	10^{21}
Satu mil	10^3	Jarak galaksi terdekat	10^{22}
Diameter Bumi	10^7	Jarak batas luar jagat raya	10^{26}

(Sumber: Fishbane 1996;5)

Pada tahun 1960 satu meter didefinisikan sebagai 1.650.763,73 kali panjang gelombang cahaya dalam ruang hampa yang terpancar akibat transisi antara tingkat energi $2p_{10}$ dan $5d_5$ oleh atom kripton 86. Pada tahun 1983 satu meter telah didefinisikan

kembali sebagai panjang lintasan cahaya dalam ruang vakum selama interval waktu dari $1/299.792.458$ dari satu detik.

1.4.2. Standar Massa

Standar SI untuk massa adalah sebuah silinder platinum-iridium yang disimpan di kota Sevres, Prancis, tepatnya di International Bureau of Weight and Measures, dan berdasarkan perjanjian internasional disebut sebagai massa sebesar satu kilogram. Standar sekunder dikirim ke laboratorium standar di berbagai negara dan massa dari benda-benda lain dapat ditentukan dengan menggunakan teknik neraca berlengan sama.

Tabel 1.2 Orde Masa dari Ter-ringan sehingga Terberat

Parameter	Masa (kg)	Parameter	Masa (kg)
Elektron	10^{-30}	Kapal perang	10^8
Atom Hidrogen	10^{-27}	Bulan	10^{23}
Atom Uranium	10^{-24}	Bumi	10^{25}
Partikel debu	10^{-13}	Matahari	10^{30}
Tetes air	10^{-6}	Galaksi luar (Milky)	10^{41}
Selembat kertas	10^{-2}	Alam semesta yang dapat diamati	10^{52}
Manusia	10^2		

(Sumber: Fishbane 1996;6)

Standar massa kedua adalah dalam skala atomik, bukan satuan SI, yaitu massa dari atom C^{12} yang berdasarkan perjanjian internasional diberikan harga sebesar 12 satuan massa atom terpadu (disingkat μ ; $1\mu = 1,660 \times 10^{-27}$ kg). Massa atom lain dapat ditentukan secara teliti dengan menggunakan spektrometer massa. Standar waktu adalah

second (s). Mula-mula satu detik didefinisikan sebagai $1/86.400$ dari rata-rata dalam satu hari, waktu yang didasarkan atas rotasi bumi. Kemudian pada tahun 1955 digunakan jam atomik jenis tertentu yang didasarkan atas frekuensi karakteristik isotop Cs^{133} di Laboratorium Boulder di Lembaga Standar Nasional Inggris.

Tabel 1.3 Orde Waktu dari Tersingkat sehingga Terlama

Parameter	Waktu (s)	Parameter	Waktu (s)
Waktu cahaya melintasi proton	10^{-23}	Kelas kuliah	10^3
Waktu cahaya melintasi atom	10^{-19}	Satu hari Bumi	10^5
Periode cahaya tampak	10^{-15}	Satu tahun Bumi	10^7
Partikel debu	10^{-10}	Umur anti masa	10^{11}
Tetesan air	10^{-6}	Umur Bumi	10^{17}
Selemba kertas	10^{-4}	Umur Galaksi	10^{18}
Periode detak jantung manusia	10^0		

(Sumber: Fishbane 1996;7)

1.4.3. Standar Waktu

Pada tahun 1967, detik yang didasarkan atas jam cesium diterima sebagai SI oleh Konferensi Umum mengenai Berat dan Ukuran ke-13. Satu detik didefinisikan sebagai 9.192.631.770 kali periode transisi Cs^{133} tertentu. Hasil ini meningkatkan ketelitian pengukuran waktu menjadi 1 bagian dalam 10^{12} , lebih baik sekitar 10^3 kali dari pada ketelitian dengan metode astronomis. Tabel 1.3 menunjukkan periode waktu dan umur benda-benda yang terdapat di alam semesta ini. Waktu yang paling singkat adalah waktu yang diperlukan cahaya

untuk melintasi proton, yaitu sekitar 10^{-13} detik dan waktu yang paling lama ialah umur alam semester yaitu 10^{18} detik = 3.171×10^{10} tahun.

1.5. Dimensi

Dimensi dari satuan besaran fisis adalah cara menyatakan suatu besaran fisis yang tersusun dari besaran dasar (besaran pokok). Persamaan matematis yang menghubungkan besaran-besaran fisis harus memenuhi prinsip kehomogenan dimensi. Sedangkan besaran dasar adalah besaran yang dimensinya ditentukan secara definisi seperti pada tabel 1.4

Definisi besaran-besaran sewaktu-waktu diperbaiki sesuai dengan perkembangan metode pengukuran. Setiap definisi diusahakan agar hanya bergantung pada satu (atau beberapa) sifat alam fundamental yang tidak berubah keadaan dengan waktu, tempat, dan lain-lain.

Tabel 1.4 Besaran Dasar dan Satuan Internasional (SI)

No	Besaran Dasar	Satuan	Lambang	Simbol Dimensi
1	Parjang	meter	m	[L]
2	Massa	kilogram	kg	[M]
3	Waktu	sekon	s	[T]
4	Arus Listrik	ampere	A	[I]
5	Suhu	kelvin	K	[θ]
6	Jumlah Zat	mole	mol	[N]
7	Int. Cahaya	kandela	cd	[J]
B. Tambahan				
8	Sudut Datar	radian	rad	
9	Sudut Ruang	steradian	sr	

(Sumber: Fishbane 1996;10)

Seringkali jika kita harus menyatakan besaran-besaran fisis, kita menjumpai bilangan-bilangan yang sangat besar atau sangat kecil.

Konvensi umum mengenai berat dan ukuran ke-14 menganjurkan penggunaan awalan berupa sepuluh berpangkat bilangan bulat, atau khususnya kelipatan 10^{3n} , dengan n bilangan bulat. Sistem ini ditunjukkan dalam tabel 1.5

Tabel 1.5. Faktor, Awalan, dan Lambang Ukuran

Faktor	Awalan	Lambang	Faktor	awalan	Lambang
10^{18}	eksa	E	10^{-3}	milli	m
10^{15}	peta	P	10^{-6}	mikro	μ
10^{12}	tera	T	10^{-9}	nano	n
10^9	giga	G	10^{-12}	piko	p
10^6	mega	M	10^{-15}	femto	f
10^3	kilo	K	10^{-18}	atto	a

(Sumber: Fishbane 1996;11)

Uji Kompetensi

Contoh 1.2

Tuliskan dalam satuan fundamental SI, besaran fluks magnetik.

Jawab.

$$\Phi = V \cdot s = \left(\frac{P}{I} \right) s = \left(\frac{J \cdot s^{-1}}{A} \right) s = \frac{Nm}{A} = (kg \cdot m \cdot s^{-2}) \frac{m}{A}$$

Contoh 1.3

Tunjukkanlah melalui analisis dimensi bahwa rumus fisika berikut ini benar;

$$I = \frac{V}{R} (1 - e^{-t/RL})$$

dengan R adalah hambatan listrik, L = induktansi, t adalah waktu.

Jawab

Dari hukum Ohm, $I=(V/R)$ sudah benar, selanjutnya perlu ditunjukkan bahwa (t/RL) tidak berdimensi. Dari hubungan energi listrik pada hambatan R;

$$W=I^2Rt, \text{ maka } R = \text{kg m}^2 \text{ s}^{-3} \text{ A}^{-1} \text{ dan } R=[M][L]^2[T]^{-3}[I]^{-2}.$$

Dari hubungan energi listrik pada hambatan induktor

$$L; W=(1/2)LI^2, \text{ maka } L=\text{kg m}^2 \text{ s}^{-2} \text{ A}^{-2} \text{ dan } L=[M][L]^2[T]^{-2}[I]^{-2}$$

$$\text{Maka } [t/RL] = [M]^{-2}[L]^{-4}[T]^6[I]^4$$

yang seharusnya tanpa dimensi. Jadi rumus tersebut diatas adalah salah dan yang benar adalah:

$$I = \frac{V}{R} (1 - e^{-Rt/L})$$

Contoh 1.4

Tentukan dimensi dari energi persatuan luas!

Jawab

Energi persatuan luas mempunyai satuan (SI) Joule/meter².

$$\frac{\text{Joule}}{\text{meter}^2} = \frac{(\text{kg} \cdot \text{m}^2 / \text{s}^2)}{\text{m}^2} = \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2 \cdot \text{m}^2} = \frac{\text{kg}}{\text{s}^2}$$

maka dimensinya: $[M][T]^{-2}$

1.6. Dimensi dan Satuan dalam Fisika Modern

Sistem Satuan Internasional (SI) sangat tepat digunakan untuk benda-benda berukuran makroskopik seperti bola, kelereng, kendaraan, dan lain-lain. Untuk benda-benda berukuran mikroskopik seperti atom, elektron dan lain-lain perlu dikembangkan satuan lain yang lebih kompetitif. Terdapat lima besaran dasar yang sering digunakan dalam fisika modern, yaitu energy, masa, momentum, panjang, dan penampang.

1.6.1 Energi

Dalam fisika klasik energy selalu dinyatakan dengan Joule atau (Newton.detik). Satuan ini memiliki ekivalensi yang sesuai dalam fisika modern, yaitu dari Joule dapat dirobah menjadi elektron Volt (eV). Di mana;

$$1 \text{ eV} = 10^6 \text{ x e/C x } 1 \text{ J} = 1.602 \text{ x } 10^{-19} \text{ J.}$$

Definisi energi dalam satuan MeV adalah energi kinetik yang diperoleh oleh elektron yang dipercepat dengan tegangan sebesar 1 MV. Atau **elektronvolt** (simbol **eV**) adalah sebuah satuan energi merupakan jumlah yang energi kinetik yang didapatkan oleh sebuah

elektron tunggal yang tak terikat ketika elektron tersebut melalui sebuah potensi perbedaan elektrostatik satu volt, dalam vakum. Satuan elektronvolt diterima (tetapi tidak dianjurkan) untuk digunakan dalam SI. Satuan ini banyak digunakan dalam fisika benda-padat, atomik, nuklir, dan partikel, seringkali dengan awalan SI, K, M, atau G.

1.6.2 Massa

Satuan dan dimensi massa dalam fisika modern dapat diturunkan dari satuan dan dimensi energi dengan menggunakan persamaan ekivalensi masa dan energi Einstein

$$E = mc^2$$

Di mana untuk menentukan satuan masa persamaan tersebut dapat ditulis dalam bentuk;

$$m = E/c^2 = \text{MeV}/c^2$$

$$1 \text{ MeV}/c^2 = 10^6 \times e/[C] /c^2 \times 1 \text{ kg} = 1.783 \times 10^{-30} \text{ kg}$$

Satuan masa juga bisa digunakan satuan khusus yang digunakan dalam fisika modern, yaitu Satuan Masa Atom (SMA atau u). Definisi SMA adalah masa atom Karbon (C)-12, sehingga dapat dikatakan:

$$1 \text{ masa atom C-12} = 12 \text{ u dan}$$

$$1 \text{ u} = 1.661 \times 10^{-27} \text{ kg} = 0.93 \text{ GeV}/c^2.$$

1.6.3 Momentum

Berdasarkan definisi klasik, momentum dinyatakan dengan perkalian masa (kg) dan kecepatan (m/detik). Dalam fisika modern satuan momentum diturunkan dari satuan masa (MeV/c^2) dan energi (MeV), yaitu:

$$\text{Momentum} = \text{masa} \times \text{kecepatan} = 1 \text{ MeV}/c^2 \times c =$$

$$1 \text{ MeV}/c = 10^6 \times e/[C] / c \times \text{kg}$$

1.6.4 Panjang

Satuan panjang secara klasik (satuan SI) didefinisikan sebagai panjang satu meter batang platina yang terdiri dari 100 garisan berjarak 1 cm.

- Length: fermi $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$
- Cross sections: barn = as big as a barn door (to a particle physicists)

$$1 \text{ barn} = 10^{-28} \text{ m}^2 = 100 \text{ fm}^2$$

1.7. Ruang Lingkup Fisika Modern

Fisika modern adalah ilmu yang membahas tentang perilaku materi dan energi pada skala atomik dan partikel-partikel sub-atomik atau gelombang. Fisika modern berbeda dengan fisika klasik karena dalam fisika modern ukuran benda sangat kecil dan kecepatan benda mendekati kecepatan cahaya (relativitas). Teori-teori dalam fisika klasik tidak dapat lagi digunakan untuk benda yang berukuran sangat

kecil dan kecepatan gerak benda yang sangat besar karena teori-teori klasik menjadi tidak invarian.

Fisika Modern meliputi teori relativitas, teori kuantum lama, model atom dan teori kuantum modern. Teori relativitas khusus dibangun atas dasar postulat Einstein yang menyatakan hukum-hukum fisika dinyatakan dengan bentuk yang sama pada kerangka acuan inersial dan cepat rambat cahaya dalam ruang hampa adalah sama untuk semua pengamat dan tidak bergantung pada keadaan gerak pengamat.

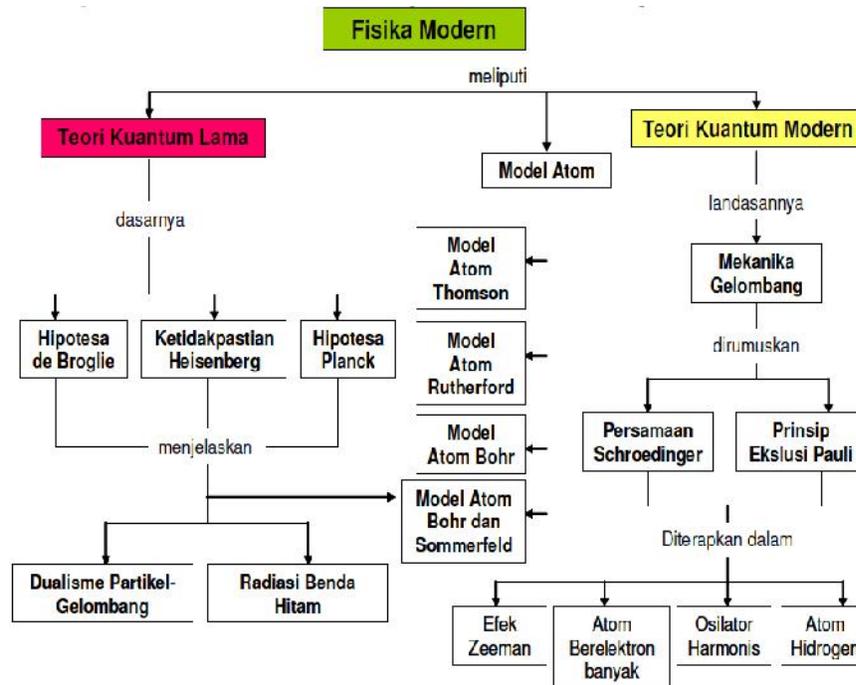
Teori kuantum lama dibangun berdasarkan hipotesa Planck, hipotesa de Broglie, dan ketidakpastian Heisenberg. Hipotesa Planck menyatakan energi yang dipancarkan oleh benda hitam bersifat diskrit. Hipotesa de Broglie menyatakan semua benda, bukan hanya cahaya memiliki sifat alami sebagai gelombang. Teori kuantum tersebut dapat menjelaskan dualisme gelombang-partikel dan radiasi benda hitam.

Model atom yang juga dikenal sebagai fisika atom berkembang dari model atom Thomson, yang kemudian berkembang menjadi model atom Rutherford, model atom Bohr dan model atom Bohr dan Sommerfeld. Model atom tersebut dapat dijelaskan dengan menggunakan teori kuantum lama. Selanjutnya teori kuantum berkembang menjadi teori kuantum modern yang berlandaskan mekanika gelombang. Dalam teori kuantum modern dirumuskan persamaan Schrodinger dan Prinsip Eksklusi Pauli yang diterapkan pada atom hidrogen, osilator harmonis, atom berelektron jamak dan efek Zeeman.

1.8. Konsep Fisika Modern

Fisika Modern secara umum dibagi menjadi dua bagian pembahasan yaitu Teori kuantum lama dan Teori Kuantum Modern. Bahasan Fisika modern digambarkan dalam diagram seperti ditunjukkan pada

Gambar 1. Teori Kuantum lama memperkenalkan besaran-besaran fisika, seperti energi merupakan besaran diskrit bukan besaran kontinum seperti halnya dibahas dalam mekanika klasik. Teori kuantum lama diawali oleh hipotesa Planck yang menyatakan bahwa energi yang dipancarkan oleh sumber (berupa osilator) bersifat kuantum/diskrit karena hanya bergantung pada frekuensinya bukan pada amplitudo seperti dalam mekanika klasik dimana besaran amplitudo tidak terbatas (kontinu).



Gambar 1.4. Materi yang dibahas dalam Fisika Modern
(Sumber: : Ayi Bactiar 2007;4)

Pada tahun 1900 Max-Planck merumuskan besaran energi yang bersifat diskrit dalam merumuskan energi yang dipancarkan oleh benda hitam yaitu :

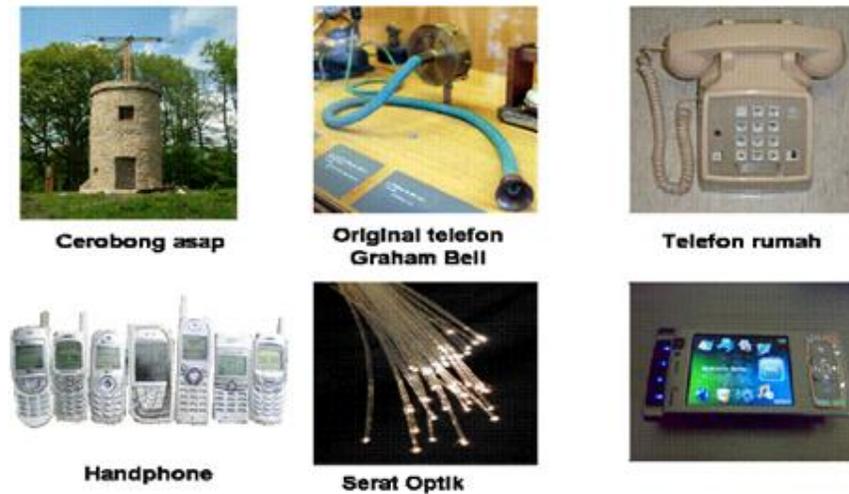
$$E = nhf$$

dimana $n = 1, 2, 3, \dots$ dan $h = 6,626 \times 10^{-34}$ Joule/detik (konstanta Planck). Albert Einstein pada tahun 1905 menggunakan konstanta Planck dalam merumuskan energy yang dipancarkan oleh berkas cahaya/foton (penemuan efek fotolistrik).

Pembahasan konsep dalam fisika modern meliputi ruanglingkup seperti yang ditunjukkan dalam gambar 1.4, berikut. Konsep yang paling mendasar dalam fisika modern adalah konsep dualisme partikel dan gelombang, dimana partikel berperilaku sebagai gelombang dan gelombang berperilaku sebagai partikel. Konsep ini sangat penting karena perilaku partikel dan gelombang semuanya sudah dipelajari dan diamati di fisika klasik. Konsep dualisme partikel-gelombang ini diamati oleh 2(dua) eksperimen yaitu efek fotolistrik oleh Albert Einstein dan eksperimen difraksi partikel/elektron oleh G.P. Thomson dan Davison Germer.

1.9. Penerapan Konsep Fisika Modern

Penerapan fisika modern telah banyak kita nikmati saat ini, yang mencakup bidang telekomunikasi, kedokteran, dunia industri, militer dan masih banyak lagi. Dalam dunia telekomunikasi, pengiriman informasi pada awalnya digunakan asap, kemudian telepon, handphone (HP), komputer, serat optik dan saat ini banyak digunakan teknologi VoIP (*Voice over Internet Protocol*), seperti ditunjukkan pada Gambar 1.2 Perkembangan ini merupakan jasa dari pengembangan fisika moden.

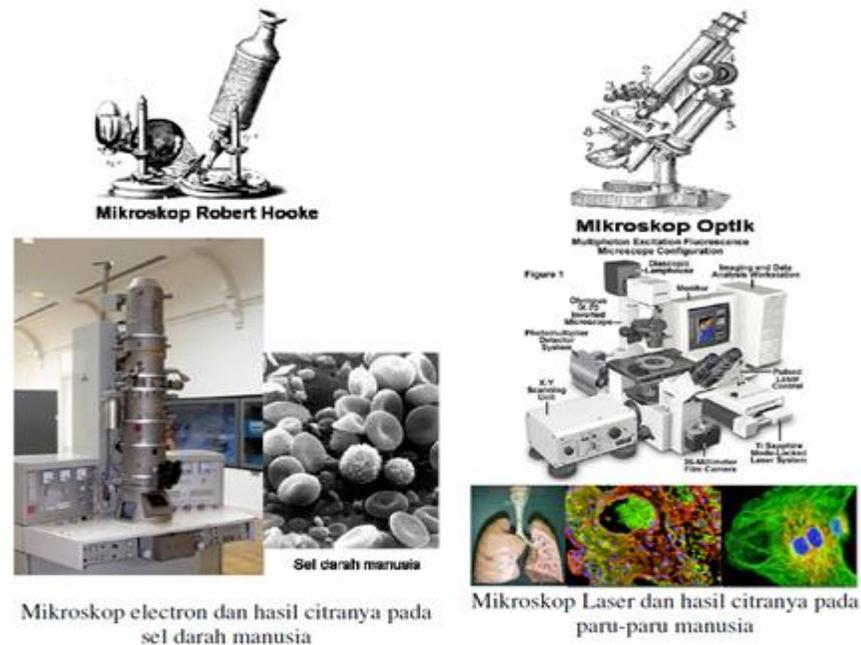


Gambar 1.5. Perkembangan teknologi komunikasi
(Sumber: Ayi Bactiar 2007;45)

Revolusi penerapan Fisika Modern diawali sejak ditemukannya LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) yang banyak digunakan sebagai barcode di supermarket, display, hiburan, telekomunikasi sebagai pembawa informasi, holografi dalam pembuatan penyimpan data maupun dalam dunia militer/senjata. Dalam dunia kedokteran atau biologi kebutuhan akan citra objek yang lebih kecil membuat pranan fisika modern sangat besar terutama sejak dibuatnya mikroskop elektron dan mikroskop laser. Dengan kedua jenis mikroskop ini, objek kecil seperti sel darah manusia, sel-sel dalam organ tubuh manusia atau hewan dapat dilihat dengan jelas, sehingga sangat membantu dalam diagnosa penyakit. Perkembangan teknologi mikroskop berdasarkan sumber cahaya dan resolusi citra yang diperolehnya ditunjukkan pada gambar 1.5.

Fisika modern merupakan cabang ilmu yang penting dalam peradaban manusia. Banyak aplikasi yang merupakan penerapan dari konsep fisika modern telah terealisasi dan membantu kenyamanan hidup manusia. Salah satu cara untuk memahami konsep fisika modern adalah mempelajari penerapan dari fisika modern tersebut.

Pada bagian berikut ini diuraikan beberapa penerapan dari fisika modern.



Gambar 1.6. Perkembangan Mikroskop berdasarkan resolusinya
(Sumber: Ayi Bactiar 2007;44)

Salah satu contoh aplikasi penting dari penerapan fisika modern adalah penemuan Laser (*light amplification by stimulated emission of radiation*). Laser adalah aplikasi dari Teori Bohr yang memodelkan lintasan diskrit dari elektron. Cahaya laser terbentuk melalui emisi radiasi elektromagnetik saat elektron berpindah dari suatu tingkat energi ke tingkat energi lain. Laser dipakai dalam berbagai bidang seperti kesehatan, industri, militer, telekomunikasi, hiburan, dan lainnya. LASIK merupakan salah satu aplikasi laser yang banyak dipakai dalam dunia kesehatan untuk mengkoreksi lensa mata manusia. Dalam dunia komersial, laser juga telah mempercepat

antrian pembayaran di kasir-kasir supermarket karena dapat dipakai untuk membaca kode barang (*barcode*).

Dalam industri, energi besar dari laser dipakai untuk memotong baja dan kepentingan lainnya. Dalam telekomunikasi, laser dipakai sebagai pembawa data melalui serat optik. Kapasitas dan kecepatan transmisi data dengan menggunakan serat optik menjadi sangat besar karena medium pembawa data berupa cahaya yang memiliki kecepatan sangat besar. Kemajuan ini telah membuat kenyamanan pada manusia karena biaya komunikasi menjadi lebih murah dan kualitasnya menjadi lebih baik.

Laser juga dipakai sebagai sumber cahaya pada mikroskop yang dikenal sebagai mikroskop laser. Daya resolusi mikroskop laser sangat tinggi sehingga mampu mengamati benda yang sangat kecil. Contoh lain aplikasi laser adalah dalam displai dan holografi. Sifat dualisme partikel gelombang memungkinkan penggunaan elektron sebagai pengganti cahaya dalam mikroskop elektron. Penggunaan elektron sebagai sumber tersebut telah meningkatkan daya resolusi mikroskop dari orde mikron menjadi angstrom.

Peningkatan kemampuan mikroskop yang drastis tersebut memungkinkan kita untuk mengamati benda-benda dalam ukuran nanometer seperti sel darah merah, protein dan lainlainnya. Penemuan tersebut secara tidak langsung telah mendukung perkembangan dunia kesehatan, khususnya ilmu kedokteran. Penyimpanan data secara optik (*optical storage*) dengan menggunakan laserdisc, CD dan DVD juga merupakan penerapan dari laser. Kemampuan 'writing' dari laser yang sangat presisi memungkinkan peningkatan kapasitas dari MegaBits (MB) menjadi GigaBits (GB), bahkan TeraBits (TB). Contoh aplikasi lain dari kajian fisika modern adalah penerapan teori relativitas, khususnya dinamika relativitas khusus yang memperlihatkan kesetaraan antara massa dan energi. Konsep kesetaraan antara massa dan energi ini diterapkan dalam teknologi nuklir.

diskrit (kuanta) sehingga sering disebut dengan fisika kuantum. Fisika modern secara umum dibagi menjadi dua yaitu teori kuantum klasik/lama dan teori kuantum modern. Teori kuantum lama didasari oleh konsep dualisme partikel sebagai gelombang dan gelombang sebagai partikel sedangkan teori kuantum lama dilandasi oleh persamaan Schroedinger untuk menentukan energi partikel atau elektron. Penerapan fisika modern banyak yang kita manfaatkan saat ini seperti teknologi laser, telekomunikasi kecepatan tinggi, kedokteran dan masih banyak lagi.

Rangkuman

Sistem satuan yang digunakan dalam Fisika Modern sebahagian besar sama dengan penggunaan dalam Fisika Dasar. Namun terdapat beberapa besaran yang hanya ditemui dalam Fisika Modern, diantaranya konstanta Planck (h), bilangan kuantum (n), Cross section (penampang) (σ), dan fungsi gelombang (Ψ). Walaupun demikian besaran-besaran ini tetap menggunakan satuan dasar yang biasa digunakan dalam Fisika Klasik.

Konsep-konsep Fisika Modern banyak digunakan untuk pengembangan pelatan elektronik seperti dalam bidang optik, kedokteran, elektronik, komunikasi, dan lain-lain. Walaupun partikel-partikel yang sangat berperan dalam Fisika Modern tidak dapat diamati langsung dengan mata telanjang, namun fenomena dan prilakunya telah banyak digunakan pengembangan instrumen-instrumen elektronik.

Latihan

- (1). Turunkan satuan h berdasarkan persamaan $E = nhf$.
- (2). Robah ukuran panjang 50 m kedalam satuan fermi, femto, dan nano.
- (3). Robah satuan energi 25 Joule kedalam satuan MeV
- (4). Robah satuan luas penampang 50 barn ke dalam fm^2 .

Glossarium

Efek rumah kaca (*green house effect*) merupakan proses pemantulan kembali cahaya matahari dipermukaan Bumi yang menyebabkan kenaikan temperatur permukaan Bumi. Efek rumah kaca juga berakibat gejala pemanasan global yang mendasari penerapan teori radiasi benda hitam sebagai suatu feno

Energi nuklir menawarkan alternatif yang menarik sebagai pengganti bahan bakar konvensional seperti batubara dan minyak bumi. Efisiensi energi nuklir jauh lebih besar dibandingkan dengan efisiensi batubara dan minyak bumi.

LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) adalah pancaran radiasi yang diperkuat berbentuk cahaya dan memiliki frekwensi yang homogen. Laser banyak digunakan sebagai barcode di supermarket, display, hiburan, telekomunikasi sebagai pembawa informasi, holografi dalam pembuatan penyimpan data maupun dalam dunia militer/senjata.

Standar massa adalah satuan dalam skala atomik, bukan satuan SI, yaitu massa dari atom C^{12} yang berdasarkan perjanjian internasional diberikan harga sebesar 12 satuan massa atom terpadu (disingkat μ ; $1\mu = 1,660 \times 10^{-27}$ kg). Ini merupakan satuan titik masa terkecil yang terdapat dalam suatu atom.

Teknologi nuklir adalah satu bentuk teknologi yang dapat menghasilkan energi nuklir melalui reaksi fusi dan reaksi fisi. Apabila teknologi dapat dikuasai dan dikembangkan, energi nuklir memberikan banyak keuntungan bagi manusia.

Daftar Pustaka

- Ayi Bactiar. 2007. *Konsep Fisika Moderen*. Jakarta: Penerbit UI
- Fishbane. 1996. *Modern Physics*. New York: McGraw-Hill.
- Sutrisno. 2003. *Fisika Dasar: Fisika Modern*. Bandung: Penerbit ITB.

BAB II

RELATIVITAS

Tujuan Umum Pembelajaran

Setelah mahasiswa membaca Bab Relativitas ini diharapkan mampu menguraikan batasan dan ruang lingkup konsep relativitas, bentuk-bentuk besaran dasar dalam konteks relativitas, dan bukti-bukti eksperimen yang mendukung teori relativitas.

Tujuan Khusus Pembelajaran

Setelah mahasiswa membaca Bab Relativitas ini secara khusus diharapkan dapat

- (6) Menjelaskan secara ringkas batasan antara mekanika klasik dan mekanika relativitas
- (7) Menurunkan persamaan besaran massa, panjang dan waktu dalam konteks relativitas.
- (8) Menurunkan persamaan energi dalam konteks konsep relativitas,
- (9) Menjelaskan kebenaran konsep dilatasi waktu melalui bukti peluruhan partikel Muon.

2.1. Pengantar

Teori relativitas Albert Einstein adalah sebutan untuk kumpulan dua teori fisika: relativitas umum dan relativitas khusus. Kedua teori ini diciptakan untuk menjelaskan bahwa gelombang elektromagnetik tidak sesuai dengan teori gerakan Newton. Gelombang elektromagnetik dibuktikan bergerak pada kecepatan yang konstan, tanpa dipengaruhi gerakan sang pengamat. Inti pemikiran dari kedua teori ini adalah bahwa dua pengamat yang bergerak relatif terhadap masing-masing akan mendapatkan waktu dan interval ruang yang berbeda untuk kejadian yang sama, namun isi hukum fisika akan terlihat sama oleh keduanya.

Tulisan Einstein tahun 1905, "Tentang Elektrodinamika Benda Bergerak", memperkenalkan teori **relativitas khusus**. Relativitas khusus menunjukkan bahwa jika dua pengamat berada dalam kerangka acuan lembam dan bergerak dengan kecepatan sama relatif terhadap pengamat lain, maka kedua pengamat tersebut tidak dapat melakukan percobaan untuk menentukan apakah mereka bergerak atau diam. Bayangkan ini seperti saat Anda berada di dalam sebuah kapal selam yang bergerak dengan kecepatan tetap. Anda tidak akan dapat mengatakan apakah kapal selam tengah bergerak atau diam. Teori relativitas khusus disandarkan pada postulat bahwa kecepatan cahaya akan sama terhadap semua pengamat yang berada dalam kerangka acuan lembam. Postulat lain yang mendasari teori relativitas khusus adalah bahwa hukum fisika memiliki bentuk matematis yang sama dalam kerangka acuan lembam manapun. Dalam teori relativitas umum, postulat ini diperluas untuk mencakup tidak hanya kerangka acuan lembam, namun menjadi semua kerangka acuan.

Relativitas umum diterbitkan oleh Einstein pada 1916 (disampaikan sebagai satu seri pengajaran di hadapan "Prussian Academy of Science" 25 November 1915). Akan tetapi, matematikawan Jerman David Hilbert menulis dan menyebarkan persamaan sejenis sebelum Einstein. Ini tidak menyebabkan tuduhan

pemalsuan oleh Einstein, tetapi kemungkinan mereka merupakan para pencipta relativitas umum.

Teori relativitas umum menggantikan hukum gravitasi Newton. Teori ini menggunakan matematika geometri diferensial dan **tensor** untuk menjelaskan gravitasi. Teori ini memiliki bentuk yang sama bagi seluruh pengamat, baik bagi pengamat yang bergerak dalam kerangka acuan lembam ataupun bagi pengamat yang bergerak dalam kerangka acuan yang dipercepat. Dalam relativitas umum, gravitasi bukan lagi sebuah gaya (seperti dalam Hukum gravitasi Newton) tetapi merupakan konsekuensi dari kelengkungan (*curvature*) ruang-waktu. Relativitas umum menunjukkan bahwa kelengkungan ruang-waktu ini terjadi akibat kehadiran massa.

Hukum **relativitas khusus** yang menjadi dasar fisika modern adalah (i). Hukum-hukum Fisika memiliki bentuk yang sama pada semua kerangka acuan inersia. Semua gerak adalah relatif. Postulat pertama diungkapkan karena tidak adanya kerangka acuan universal sebagai acuan mutlak dan merupakan perluasan relativitas Newton untuk memasukkan tidak hanya hukum-hukum mekanika tetapi juga hukum fisika lainnya termasuk listrik dan magnet. (ii) Kelajuan cahaya di ruang hampa adalah sama untuk semua pengamat, tidak tergantung pada gerak cahaya atau pun pengamat. Postulat kedua memiliki implikasi yang sangat luas dimana kecepatan, panjang, waktu, dan massa benda semuanya bersifat relatif sehingga relativitas Newton dan Galileo tidak dapat digunakan.

2.2 Pengaruh Kerangka Acuan

Permasalahan utama dalam relativitas adalah konsep kerangka acuan tempat pengamat melakukan pengamatan. Pengamat yang sedang bergerak akan melihat fenomena yang sama seperti yang diamati oleh pengamat diam dengan hasil yang berbeda. Untuk mudah dipahami bayangkan anda sedang berada dalam kendaraan dalam keadaan diam.

Kemudian anda melempar bola lurus keatas, tidak berapa lama bola tersebut kembali ke tangan anda. Anda melihat bola tersebut bergerak lurus ke atas dan kembali juga dalam keadaan lurus ke bawah. Pengamat lain yang berdiri dipinggir jalan juga sedang mengamati gerak bola yang anda lempar. Dia juga melihat bola tersebut bergerak ke atas dan kembali ke bawah dalam lintasan lurus. Pernah anda bayangkan bagaimana keadaannya jika anda melempar bola tersebut dalam keadaan anda sedang bergerak lurus dengan kecepatan tertentu. Kemana jatuh bola tersebut, ke tangan anda atau ke belakang? Apakah sama lintasan gerak bolak-balik bola antara hasil kamu amati dengan pengamat yang berdiri dipinggir jalan? Untuk menjawab pertanyaan ini perhatikan gambar 2.1 berikut



(a)



(b)

Gambar 2.1. (a) dan (b) merupakan lintasan bola yang diamati oleh pengamat diluar kendaraan (diam)
(Sumber: Paul Fleisher, 2004; 11)

Fenomena dalam gambar 2.1 (a) dan (b) merupakan kejadian riil yang sering diamati dalam kehidupan sehari-hari. Ternyata jika kamu sedang bergerak dan melemparkan bola lurus keatas, bola tersebut tetap akan jatuh ke tangan kamu, walaupun mungkin ada diantara kita yang berfikir bahwa bola tersebut akan jatuh kebelakang pelempar. Pikiran seperti itu belum sesuai dengan pemahaman pakar fisika. Kenapa bola jatuh ketangan kamu, sementara kamu sedang bergerak maju ke depan? Jawaban sederhana saja, karena bola tersebut memiliki kecepatan awal, yaitu kecepatan kendaraan. Pengamat diluar kendaraan akan mengamati bahwa lintasan bola tersebut membentuk lintasan parabola, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.1(b).

2.3. Kerangka Acuan Universal

Konsep-konsep relativitas perlu diperkenalkan pada tahap awal mengingat, ilmu-ilmu fisika lanjutan (seperti fisika partikel, kuantum, dan medan elektromagnetik) menyangkut dengan sistem yang bergerak mendekati kecepatan cahaya. Dalam pembahasan relativitas khusus diharapkan mahasiswa dapat memindahkan pemahaman lama (mekanika Newton) ke pemahaman relativitas. Dalam pemahaman lama selalu didapatkan adanya kerangka acuan umum (diam), sedangkan dalam pandangan teori relativitas tidak didapati adanya kerangka acuan universal (di mana semua kerangka acuan bergerak relatif). Sebagai contoh coba kita bayangkan siapakah (apa benda) yang benar-benar diam di bumi ini. Anda saat sekarang ini sedang membaca buku, apakah sekarang anda sedang diam atau bergerak? Mungkin anda diam terhadap buku (atau terhadap sesuatu di sekeliling anda), tetapi pada saat yang sama anda sedang bergerak bersama bumi mengelilingi matahari. Matahari dan seperangkat planet-planet (tata surya) pada saat yang sama juga sedang bergerak mengelilingi pusat galaksi. Pada saat yang sama galaksi bima sakti juga sedang bergerak

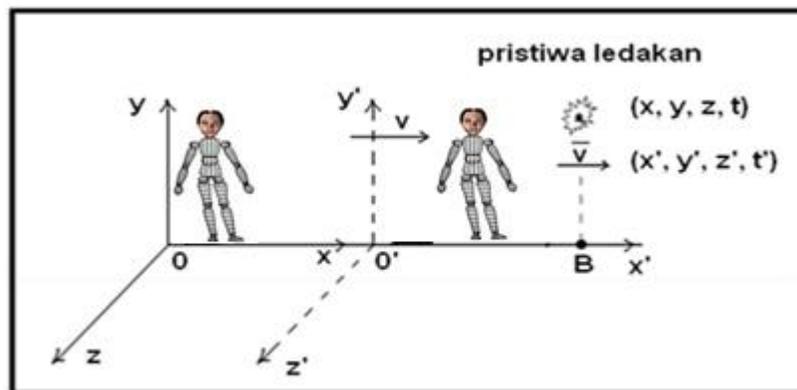
mengelilingi pusat jagat raya, begitulah seterusnya tidak ada yang diam secara sempurna di alam ini. Dengan kata lain semua benda di alam ini sedang bergerak relatif terhadap satu dengan yang lain, sehingga tidak satu tempat pengamatan yang diam atau tidak ada kerangka acuan universal (kerangka pengamatan yang diam sempurna).

Dalam pandangan klasik tidak pernah dipersoalkan apakah pengamat yang mengamati sebuah objek dalam keadaan diam atau bergerak. Hal ini disebabkan hasil pengamatan yang diperoleh tetap sama (pengamat diam atau bergerak). Sebagai contoh sering dalam fisika dasar ditulis soal: *sebuah benda bergerak dengan kecepatan sekian-sekian pada waktu sekian-sekian, maka tentukanlah.....* Dalam soal seperti itu tidak pernah dipersoalkan bagaimana keadaan orang yang mengamati (pengamat) gerakan benda tersebut, apakah pengamat dalam keadaan diam atau bergerak. Sebaliknya dalam pandangan konsep relativitas hasil pengamatan terhadap sebuah objek sangat tergantung pada keadaan pengamat, apakah pengamat dalam diam atau bergerak. Bila pengamat bergerak relatif terhadap objek hasil pengamatan akan berbeda dengan hasil yang diamati oleh pengamat yang bergerak relatif terhadap objek.

Sebagai contoh satu kejadian kebakaran kendaraan di jalan raya, polisi ingin mengetahui di mana dan pada jam berapa terjadi kebakaran itu. Saksi (Pengamat) yang sedang melintasi kejadian itu akan memberi informasi yang berbeda dengan saksi yang sedang diam di pinggir jalan dan menyaksikan peristiwa tersebut. Persoalannya yang mana hasil pengamatan yang paling tepat?? Jawabannya tidak ada hasil pengamatan yang paling tepat, yang ada hanya hasil pengamatan sesuai dengan keadaan pengamat masing-masing. Hasil yang diamati oleh pengamat bergerak tidak sama dengan hasil yang diamati oleh pengamat yang diam terhadap peristiwa. Wa Allahu A'lam.

2.4. Transformasi Galileo

Untuk memahami konsep relativitas secara matematik, kita kaji prinsip relativitas Galileo. Dalam relativitas (transformasi) Galileo, kita kenal dua kerangka acuan. Salah satu terhadap yang lain tergantung secara relatif. Misal masing-masing kerangka acuan dinyatakan dengan S dan S' , di mana S' adalah bergerak dengan kecepatan v terhadap S dalam arah tertentu. Ilustrasinya dalam gambar 2.1a



Gambar 2.1a Kerangka Acuan Transformasi Galileo
(Sumber: Halim, 2008)

Kedua pengamat dalam masing-masing kerangka (S dan S') memiliki pengukuran panjang dan pengukuran waktu (jam). Kedua alat ukur tersebut telah disinkronkan saat titik O dan O' berimpit atau tepat saat S' melewati S . Setelah kerangka S' melewati S dalam waktu t' (menurut S'), maka terjadi suatu peristiwa ledakan pada titik B . Kecepatan pengamatan S' pada saat kejadian tersebut relatif terhadap pengamat S adalah:

$$v_x' = v_x - v$$

$$\begin{aligned}v_y' &= v_y \\v_z' &= v_z\end{aligned}\tag{2.1}$$

Ini merupakan seperangkat kecepatan benda yang diukur oleh pengamat dalam kerangka S' . Karena kerangka hanya bergerak dalam arah x , maka kecepatan relatif yang terjadi hanya dalam komponen x . Sementara jarak (posisi kejadian) terhadap koordinat S' didapat melalui integrasi persamaan (2.1), yaitu:

$$\begin{aligned}V_x' &= \frac{dx'}{dt} \\V_x &= \frac{dx}{dt} \\V &= \frac{dx}{dt}\end{aligned}$$

atau dalam bentuk integral

$$\int_0^{x'} dx' = \int_0^x dx - \int_0^t V dt$$

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

Sedangkan untuk percepatan dapat diperoleh melalui diferensial dari persamaan (2.1), yaitu:

$$a_x' = \frac{dVx'}{dt}$$

$$a_x = \frac{dV_x}{dt}$$

$$a = \frac{dV}{dt}$$

Karena $V = V(t)$, maka $a = 0$, sehingga

$$\begin{aligned} a'_x &= a_x \\ a'_y &= a_y \\ a'_z &= a_z \end{aligned} \tag{2.1b}$$

Berdasarkan persamaan (2.1b) dapat dilihat bahwa hukum-hukum Newton tetap berlaku untuk kedua kerangka acuan, selama kondisi V tetap dipertahankan. Kita dapat juga mengukur kecepatan benda yang diukur oleh pengamat dalam kerangka acuan S , yaitu dengan menggantikan $V \rightarrow (-V)$, sehingga.

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

dengan cara mendapatkan persamaan sebelumnya, kita dapat tentukan:

$$\begin{aligned} x' &= x + vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t &= t' \end{aligned} \tag{2.2a}$$

dan

$$\begin{aligned} a_x &= a'_x \\ a_y &= a'_y \end{aligned} \tag{2.2b}$$

$$a_z = a'_z$$

Berdasarkan persamaan (2.1) dan (2.2) dapat dikatakan bahwa kecepatan suatu benda yang diamati oleh dua pengamat didalam kerangka acuan yang berbeda akan tergantung pada kecepatan relatif antara keduanya. Untuk kemudahan memahami konsep transformasi Galileo kita pelajari contoh berikut.

Contoh 2.1

Sebuah kereta api bergerak dengan kelajuan 70 km/jam. Seorang penumpang melemparkan benda dengan kelajuan 15 km/jam. Tentukan kelajuan benda terhadap orang yang diam di tepi rel kereta, jika arah lemparan:

- searah gerak kereta
- berlawanan dengan arah gerak

Jawaban.

Orang yang diam di tepi rel kereta kita pilih sebagai kerangka acuan S dan kereta api sebagai kerangka acuan S' yang bergerak dengan kelajuan $v=70$ km/jam relatif terhadap S.

- Gerak benda searah gerak kereta api

$$u_x' = 15 \text{ km/jam}$$

kelajuan benda relatif terhadap orang yang diam di tepi rel kereta:

$$\begin{aligned} u_x &= u_x' + v \\ &= 15 + 70 = 85 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

- Gerak berlawanan arah dengan gerak kereta api

$$u_x' = -15 \text{ km/jam}$$

kelajuan benda relatif terhadap orang yang diam di tepi rel kereta:

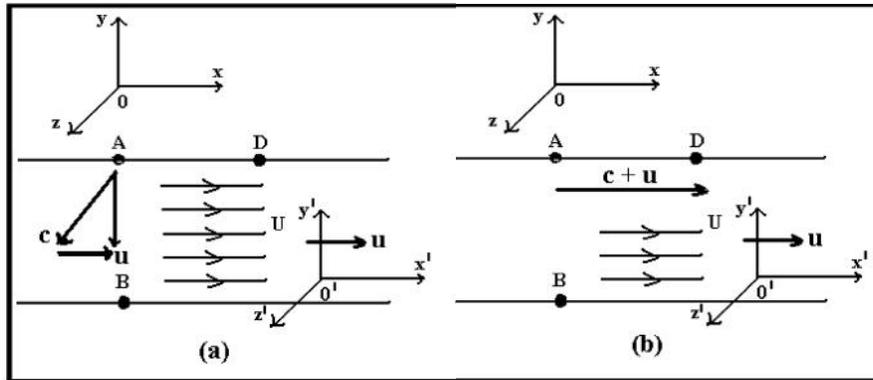
$$\begin{aligned} u_x &= u_x' + v \\ &= -15 + 70 = 55 \text{ km/jam} \end{aligned}$$

Berdasarkan contoh kita dapat memahi bahwa kecepatan benda SANGAT tergantung pada keadaan pengamat. Jika gerak benda dan pengamat searah, maka hasil pengamatan lebih besar dari hasil pengamatan untuk arah gerak relatif pengamat saling berlawanan. Hal yang menarik dalam contoh (2.1) diatas adalah bagaimana hasilnya jika gerakan benda tersebut kita ganti dengan kerdipan cahaya, apakah hasil perhitungan tetap sama atau berbeda. Penjelasan ini akan ditemukan pada bagian transformasi Lorentz dan transformasi kecepatan.

2.5. Percobaan Michelson-Morley

Untuk mudah memahami proses percobaan Michelson-Morley, mari kitan analisis contoh berikut: Misalnya seorang perenang yang diamati oleh dua pengamat pada kerangka acuan yang berbeda. Dimana \mathbf{u} = kecepatan aliran arus = kecepatan pengamat dalam kerangka O' . \mathbf{c} = kecepatan perenang dengan arahnya berubah-ubah. Pertama kita analisa gerakan perenang seperti dalam gambar 2.2 (b), dimana perenang bergerak sepanjang arus. Berdasarkan persamaan (2.1), bila perenang bergerak dari A ke D, maka menurut pengamat dikerangka O' kecepatan perenang tersebut adalah

$$\begin{aligned} v' &= c && \text{dari A ke D (searah dengan arus)} \\ v' &= -c && \text{dari D ke A (melawan arus)} \end{aligned} \quad (2.3)$$



Gambar 2.2. Ilustrasi gerak perenang pada percobaan Michelson-
(Sumber: Halim, 2008)

sedangkan menurut pengamat di kerangka O, kecepatan perenang adalah:

$$\begin{aligned}
 v &= u + c && \text{dari A ke D (searah dengan arus)} \\
 v &= u - c && \text{dari D ke A (melawan arus) atau} \\
 |v| &= c - u && \text{karena } u < c \text{ dan } v = -
 \end{aligned}
 \tag{2.3a}$$

Bila panjang lisan dari A ke D dinyatakan dengan l , maka waktu gerak perenang dari A ke D menurut pengamat dikerangka O (diam ditepi sungai) adalah:

$$t_1 = \frac{l}{u + c}
 \tag{2.3b}$$

Sedangkan waktu untuk gerak dari D ke A adalah:

$$t_2 = \frac{l}{u - c}
 \tag{2.3b}$$

Sehingga waktu total untuk gerak perenang bolak-balik dari A ke D dan dari D ke A atau waktu untuk perjalanan gerakan dari A-D-A adalah:

$$t_i = t_1 + t_2$$

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

(2.3c)

Buktikan persamaan (2.3c) !!!!.

Dalam perhitungan di atas diambil $(c - u)$ sebagai ganti dari $(u - c)$, hal ini disebabkan $u \ll c$ dan hasil pengurangan $u - c = -$. Untuk menghindari hal tersebut kita ambil nilai mutlaknya, yaitu: $|v| = c - u$.

Selanjutnya kita analisa gerak perenang melintasi (menyeberang) sungai seperti dalam gambar 2.2 (a) yang bergerak dari A ke B. Perenang menyeberangi sungai sedikit mengarah keatas (menentang arus) agar perenang sampai pada titik B. Menurut pengamat yang diam ditepi sungai (pengamat O) adalah:

$$v_y^2 = c^2 - u^2 \quad \text{kecepatan dari A ke B dan dari B ke A.} \quad (2.3d)$$

Jika jarak yang ditempuh dari A ke B dan kembali lagi adalah l , maka waktu seluruhnya

$$t_s = 2t_{\text{silang}}$$

$$t_s = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}}$$

(2.4)

Buktikan persamaan (2.4) !!!!

Catatan: indeks l dalam persamaan (2.3c) menyatakan waktu total untuk gerak sepanjang lintasan (sejajar) dengan arah arus, sedangkan indeks s dalam persamaan (2.4) menyatakan waktu untuk perenang yang bergerak silang/melintasi sungai.

Selisih antara waktu gerak sepanjang aliran air sungai dengan gerak melintasi sungai adalah:

$$\Delta t = t_l - t_s$$

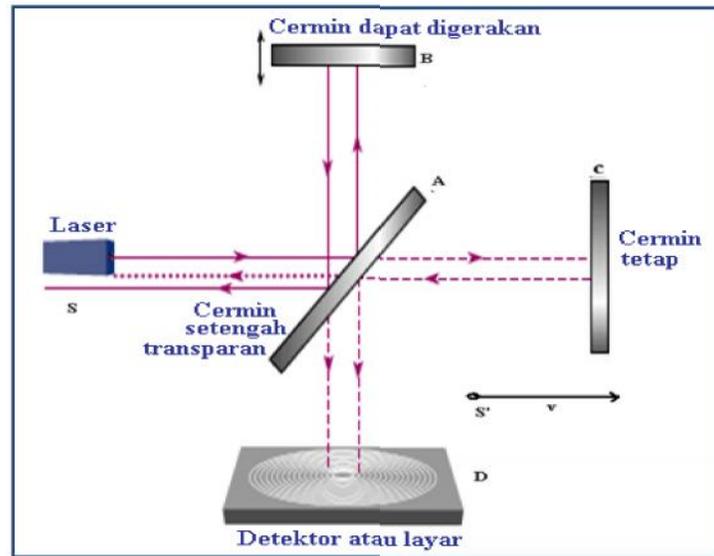
$$\Delta t = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}} \left[\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}} - 1 \right] \quad (2.5)$$

Buktikan Persamaan (2.5) !!!!

Persamaan (2.5) merupakan bentuk analogi yang digunakan untuk menjelaskan bentuk percobaan yang sebenarnya. Percobaan yang sebenarnya adalah rambatan cahaya dalam alam semesta. Rambatan cahaya dianalogikan dengan gerak perenang, sedangkan gerak eter dianalogikan dengan aliran air sungai. Percobaan ini dilakukan oleh Michelson-Morley pada tahun 1887, tujuannya untuk membuktikan bahwa : *“kecepatan cahaya tidak dipengaruhi oleh kecepatan gerak kerangka acuan pengamat”*.

Percobaan yang kita analisis sama seperti kasus gerak perenang dalam contoh diatas. Sekarang perenang diganti dengan sumber cahaya (S). Sedangkan pengamat yang bergerak searah dengan aliran air sungai diganti dengan pengamat yang bergerak sesuai dengan perputaran Bumi (pengamat S'). Dalam hal ini Bumi bergerak relatif

terhadap pengamat S dengan kecepatan v . Ilustrasinya dalam gambar 2.3



Gambar 2.3 Diagram percobaan Michelson-Morley
(Sumber: Taylor et al., 2004)

Arah A-C sama dengan perenang yang bergerak searah dengan aliran arus dan arah AB sama dengan arah perenang melintasi arus sungai (menyeberang) sungai dalam contoh di atas. Jadi kecepatan cahaya menurut pengamat di Bumi (kerangka S') saat melintasi dari A ke C adalah $c - v$, sementara saat dipantulkan oleh cermin di c dan kembali ke A kecepatan cahaya adalah $c + v$. Bila panjang lintasan antara A dan C adalah l , maka waktu yang diperlukan adalah:

$$t_l = 2t_{AC}$$

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

(2.6)

Buktikan persamaan (2.6) !!!!

Sebagian cahaya bergerak tegak lurus terhadap arah perputaran Bumi, yaitu arah dari A ke B dan kembali ke A. Sehingga menurut pengamat di Bumi kecepatan cahaya dalam arah tersebut adalah

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

dan waktu yang diperlukan oleh cahaya selama bergerak dari A ke B dan kembali ke A adalah:

$$t_s = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}}$$

(2.6a)

Buktikan persamaan (2.6a) !!!!

Persamaan (2.6) merupakan waktu tempuh cahaya sepanjang perputaran Bumi atau sepanjang arah gerak “eter” (dianggap eter bergerak mengikuti Bumi). Sedangkan persamaan (2.6a) adalah waktu tempuh cahaya dalam arah melintang (menyeberang) arah perputaran Bumi atau dianggap menyemberangi arus eter. Selisih antara kedua waktu tersebut sama bentuknya dengan persamaan (2.5), yaitu:

$$\Delta t = \frac{2l}{c} \frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}} \left[\frac{1}{\sqrt{\left(1 - \frac{u^2}{c^2}\right)}} - 1 \right]$$

(2.6b)

Buktikan persamaan (2.6b) !!!!

Dengan menganggap bahwa nilai $c \gg v$ (kecepatan cahaya, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ dan perputaran Bumi, $v = 3 \times 10^4 \text{ m/s}$). Suku dalam kurung petak pada persamaan (2.6b) dalam diuraikan dalam bentuk deret, sehingga dengan menggunakan asumsi diatas ($c \gg v$), didapat persamaan seperti berikut:

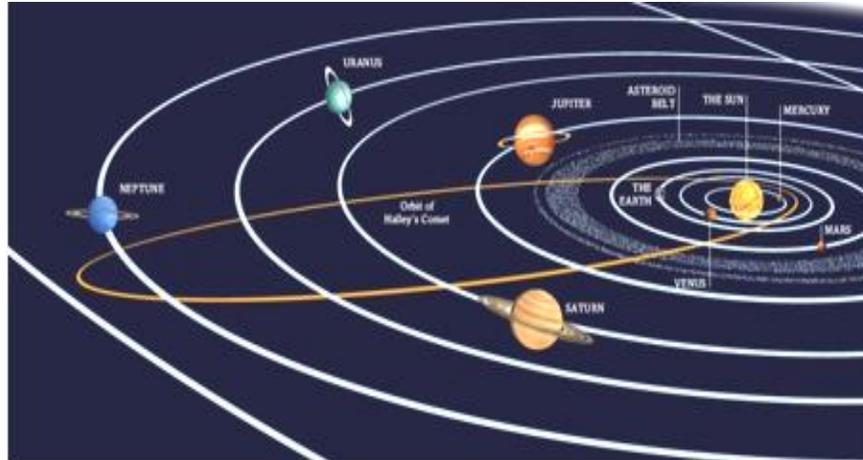
$$\Delta t = \frac{l}{c} \left(\frac{u^2}{c^2} \right)$$

(2.7)

Buktikan persamaan (2.7) !!!!

Ini merupakan selisih perbedaan waktu tempuh cahaya yang bergerak secara sejajar dengan perputaran Bumi dan tegak lurus dengan perputaran Bumi. Dalam eksperimen Michelson-Morley, mereka menggunakan $l = 11 \text{ m}$ dan $v/c = 10^{-4}$ detik. Dengan demikian dari persamaan (2.7) diharapkan dapat diamati terjadi perbedaan waktu sekitar 2.7×10^{-16} detik. Dari perhitungan ini jelas $t_1 > t_s$ atau $t_1 - t_s = 2.7 \times 10^{-16}$ detik. Bila dianggap eter diam terhadap matahari, maka terhadap Bumi akan terjadi gerak relative, hal ini disebabkan Bumi bergerak mengelilingi matahari.

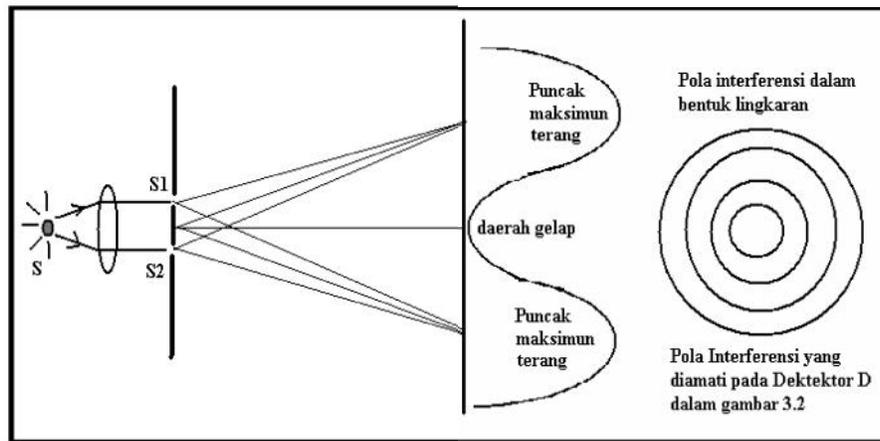
Cahaya yang sampai ke cermin c (dalam gambar 2.3) sama dengan cahaya yang diarahkan sesuai dengan arah gerak Bumi mengelilingi matahari. Ini berarti gerak cahaya menentang gerak eter dan searah dengan gerak eter saat cahaya dipantulkan. Sedangkan cahaya yang diarahkan ke cermin B sama dengan cahaya yang melintasi arus eter. Berdasarkan hasil perhitungan diatas jelas waktu tempuh cahaya yang searah dengan dengan gerak Bumi (menentang gerak eter) lebih lama dibandingkan dengan waktu tempuh cahaya yang melintasi arus eter.



Gambab 2.4 Eather memenuhi ruang sistem tata surya
(Sumber: http://www.astronomia.go.ro/sistemul_solar.html)

Berdasarkan gambar 2.3 cahaya yang sampai ke dektor D seolah-olah berasal dari dua sumber dengan beda fase tetap. Karena kedua sumber cahaya tersebut beda waktu tempoh, maka keduanya akan terjadi beda fase. Ilustrasi kaitan antara beda lintasan (waktu tempoh) dengan pebentukan pola interferensi ditunjukkan dalam gambar 2.5 di bawah.

Puncak terang maksimum dan daerah gelap maksimum dapat dipertukarkan melalui pergeseran sumber S ke atas atau ke bawah. Pergeseran sumber S akan menyebabkan akan terjadi beda lintasan antara S1 dan S2. Pergeseran antara garis terang dengan garis gelap dalam gambar 2.4 dapat diperoleh melalui perputaran alat dalam gambar 2.2. sebesar 90° . Dengan demikian posisi cermin B dan C saling tertukar, sehingga diharapkan pola interferensi terang maksimum akan tertukar dengan pola interferensi gelap maksimum.



Gambar 2.5 Ilustrasi Pembentukan pola interferensi oleh dua celah
(Sumber: Halim, 2008)

Di dalam percobaan Michelson-Morley telah dilakukan perputaran seperti itu dan dilakukan berulang kali, namun pergeseran pola interferensi yang diharapkan sebelumnya tidak pernah teramati. Hal ini membuktikan bahwa ramalan ada eter di antara bumi dan matahari tidak dapat dipertahankan. Lebih jauh hasil ini juga menunjukkan bahwa gerak cahaya dalam alam semesta tidak mengikuti kaedah relatif, seperti diungkapkan dalam transformasi Galileo. Hal ini mendorong Einstein untuk mengemukakan konsep baru dalam teorema relativitas.

2.6. Prinsip Relativitas Khusus Einstein

Berdasarkan percobaan yang telah dilakukan oleh Michelson-Morley kita dapatkan sesuatu yang menarik. Karena tidak teramatinya pergeseran pola interferensi saat interferometer diputar 90^0 , maka dapat dipahami secara matematis (dari persamaan 2.7) bahwa:

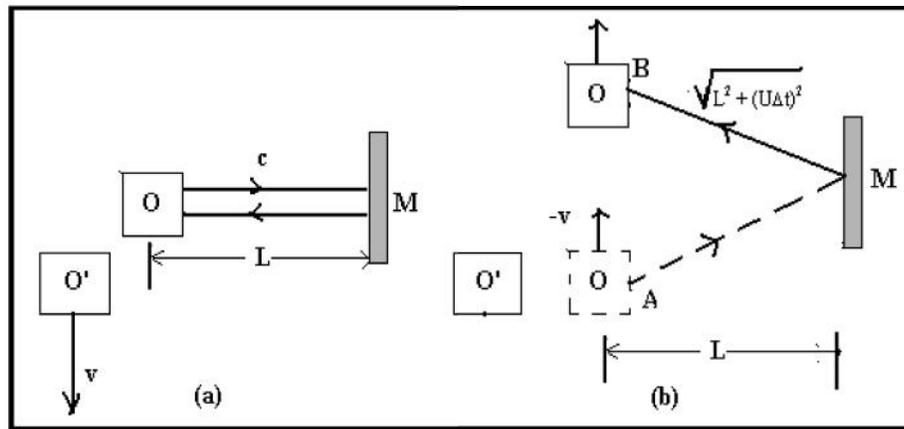
$$\Delta t = t_l - t_s = 0 \quad (2.8)$$

Artinya laju cahaya dalam alam semesta tak tergantung pada arah yang dituju atau dikatakan laju cahaya dalam kerangka acuan bumi bersifat Isotropik. Konsekuensi lain dari hasil percobaan tersebut, bahwa cahaya tetap merambat tanpa medium.

Atas konsekuensi percobaan Michelson-Morley, Einstein pada tahun 1905 telah mengusulkan suatu pendekatan sederhana melalui dua postulat:

- (i) Hukum-hukum fisika dapat dinyatakan dengan persamaan yang berbentuk sama untuk (dalam) kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan tetap atau kerangka diam terhadap yang lain.
- (ii) Kelajuan cahaya dalam ruang hampa sama besar untuk semua kerangka acuan, atau tidak tergantung pada kerangka acuan pengamat.

Untuk memahami pengertian postulat (ii) di atas kita analisa diagram berikut. Terdapat dua pengamat di kerangka O dan O' . Kerangka O' bergerak tegak lurus terhadap pengamat di kerangka acuan O .



Gambar 2.6 Diagram Postulat Einstein
(Sumber: Halim, 2008)

Menurut pengamat O titik pancaran sinar dan titik pengembaliannya adalah tetap, dan O^1 bergerak menjauhinya dalam arah tegak lurus. Waktu yang diperlukan oleh cahaya, yang kecepatannya C, adalah $2\Delta t$, dengan demikian panjang lintasannya:

$$L = C\Delta t,$$

atau bolak-balik:

$$2L = 2C\Delta t \quad \text{menurut pengamat di O} \quad (2.8a)$$

Menurut pengamat O^1 , pengamat O sedang bergerak dengan kecepatan $-v$ dan cahaya dipancarkan pada titik A serta diterima pada titik B. Waktu yang diperlukan cahaya dari $A \rightarrow M \rightarrow B$ adalah $2\Delta t^1$, dengan demikian jarak AB : $U \times 2\Delta t^1$ dan panjang lintasan yang ditempuh cahaya adalah:

$$\text{Jarak AMB} = 2 \sqrt{L^2 + (U\Delta t)^2} \quad (2.8b)$$

Bila anggapan transformasi Galileo benar, maka dapat ditulis:

$$\Delta t = \Delta t^1 \quad (\text{transformasi Galileo}) \quad (2.8c)$$

Kombinasi persamaan (1.8a), (1.8b), dan (1.8c) didapat

$$\text{Jarak ABM} = 2\Delta t \sqrt{C^2 + U^2} \quad (2.8d)$$

Parameter $\sqrt{C^2 + U^2} > C$, sesuatu yang lebih besar dari kecepatan cahaya, dan ini merupakan kecepatan cahaya yang diamati oleh pengamat dalam kerangka acuan O^1 . Bila kita bertolak dari percobaan Michelson-Morley, maka kecepatan cahaya tidak akan

terpengaruh oleh gerak pengamat. Kenyataan ini memaksa kita untuk menambah asumsi yang diungkapkan oleh Galileo bahwa $\Delta t = \Delta t^1$. Sebaliknya menurut Einstein mengungkapkan bahwa waktu yang diukur oleh pengamat O akan berbeda dengan yang diukur oleh O¹. Atau;

$$\Delta t \neq \Delta t^1 \quad (\text{transformasi Einstein}) \quad (2.8e)$$

Hal ini didasarkan pada postulat kedua ($c = c'$) atau dikatakan waktu adalah “besaran relatif”.

2.7. Transformasi Lorentz

Untuk memudahkan pemahaman pengertian Transformasi Lorentz, kita tulis kembali persamaan-persamaan yang mendasari pembahasan relativitas Galileo, yaitu persamaan (2.1) sehingga (2.1a).

$$\begin{aligned} v_x' &= v_x - v \\ v_y' &= v_y \\ v_z' &= v_z \end{aligned} \quad (2.1)$$

$$\begin{aligned} x' &= x - vt \\ y' &= y \\ z' &= z \\ t &= t' \end{aligned} \quad (2.1a)$$

Jika benda yang diamati oleh pengamat S dan S', kita ganti dengan kerdipan cahaya, maka berdasarkan persamaan (2.1) dapat ditulis,

$$\begin{aligned} c_x' &= c_x - v \\ c_y' &= c_y \end{aligned}$$

$$c_z' = c_z \quad (2.9)$$

menurut percobaan Michelson-Morley dan postulat Einstein ke-2 persamaan (2.9) tidak dapat dibenarkan, karena gerakan cahaya tidak tergantung pada keadaan pengamat. Sedangkan persamaan (2.1a) tidak benar jika dibandingkan dengan persamaan (2.8e), karena menurut Einstein waktu adalah besaran relatif, dimana kedua pengamat akan mencatat waktu yang berbeda. Untuk mengatasi masalah tersebut dikemukakan transformasi baru yang dikenal dengan "Transformasi Lorentz".

Lorentz memandang bahwa transformasi Galileo tidak cukup mampu menjelaskan apa yang terjadi pada dunia elektromagnetis dan Lorentz mengusulkan revisinya. Ia berpegang pada asumsi bahwa tiap pengamat memiliki "waktu tersendiri". Didasarkan pada gambar 2.6 di atas, waktu bagi pengamat O adalah t sementara waktu bagi pengamat O' adalah t' , dimana t tidak sama dengan t' . Oleh karena itu Lorentz menulis kembali persamaan transformasi Galileo (2.1a) dengan memasukkan faktor k , yaitu menjadi :

$$x' = k(x - vt) \quad (2.10)$$

dengan k sebuah konstanta yang tidak dipengaruhi oleh waktu. Persamaan tersebut dikenal dengan "transformasi Lorentz". Persamaan (2.10) yang ditulis oleh Lorentz hanya didasarkan pada instin (tekaan ilmiah) untuk memasukkan faktor yang tidak terpengaruh pada waktu. Pemilihan persamaan secara tekaan tersebut didasarkan pada beberapa pertimbangan ilmiah:

- (i). Persamaan (2.10) berbentuk linear antara x dan x' , sehingga suatu kejadian dalam kerangka S bersesuaian dengan kejadian dalam kerangka S' .
- (ii). Persamaan (2.10) dapat direduksi menjadi persamaan klasik (transformasi Galileo) dengan memilih harga k bersesuaian dengan 1 ($k = 1$).

Agar persamaan (2.10) bersesuaian dengan persamaan yang diamati dalam koordinat S, maka kita cukup mengganti v dengan $-v$, yaitu:

$$x = k(x' + vt') \quad (2.10a)$$

Faktor k dalam persamaan (2.10) dan (2.10a) harus memiliki harga yang sama. Untuk kerangka acuan S dan S' yang membedakan antara keduanya adalah tanda dari kecepatan v (v dan $-v$). Sementara untuk koordinat yang tegak lurus terhadap arah rambat cahaya tetap digunakan prinsip Transformasi Galileo, yaitu:

$$\begin{aligned} y' &= y \\ z' &= z \end{aligned} \quad (2.10b)$$

Sementara untuk dimensi waktu kita anggap berbeda dan termasuk dalam parameter relativitas, sehingga antara nilai t dan t' memiliki nilai yang berbeda. Untuk mencari perbedaan nilai t yang diukur oleh pengamat dalam kerangka S dan nilai t' yang diukur oleh pengamat dalam kerangka S' dapat dilakukan melalui kombinasi persamaan (2.10) dan (2.10a), yaitu:

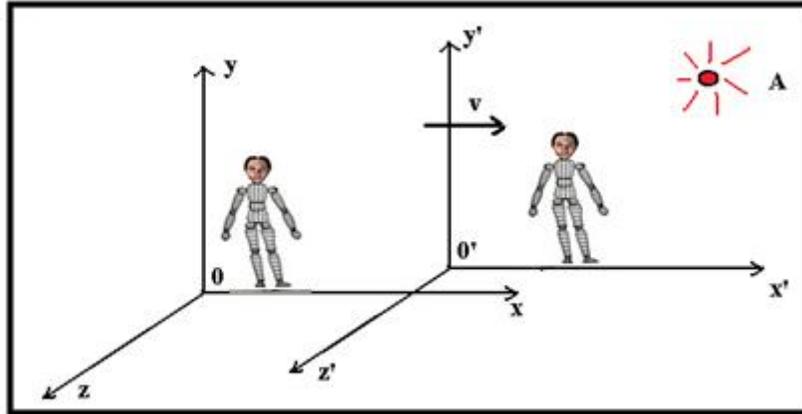
$$\begin{aligned} x &= k[k(x - vt) + vt'] \\ x &= k^2(x - vt) + kv t' \end{aligned}$$

sehingga didapat

$$t' = kt + x(1-k^2)/kv \quad (2.10c)$$

Buktikan Persamaan (2.10c) !!!

Persamaan (2.10), (3,10a) dan (2.10c) merupakan transformasi koordinat yang memenuhi prinsip relativitas khusus. Selanjutnya kita akan tentukan besaran k . Untuk mendapatkan nilai k , kita pelajari kembali prinsip relativitas khusus secara mendetail, yaitu dengan mengacu pada gambar 2.7



Gambar 2.7 Diagram Potlats Relativitas Khusus
(Sumber: Halim, 2008)

Kondisi awal kedua kerangka berada pada titik yang sama atau $t = t' = 0$. Setelah selang waktu tertentu masing-masing pengamat berada pada kerangka S dan S' dengan mengukur laju cahaya yang sama.

$$\begin{aligned} x &= ct && \text{(menurut pengamat pada kerangka acuan S)} \\ x' &= ct' && \text{(menurut pengamat pada kerangka acuan S')}. \end{aligned} \quad (2.10d)$$

Setelah persamaan (2.10c) dikalikan dengan c dan kemudian disamakan dengan persamaan (2.10) dan juga persamaan (2.10d), maka kita dapatkan:

$$ct' = x' = ckt + \left(\frac{1-k^2}{kv}\right)cx = k(x-vt)$$

atau kalau diselesaikan didapat:

$$x = ct \left[\frac{1 + v/c}{1 - \left(\frac{1}{k^2} - 1\right)\frac{v}{c}} \right] \quad (2.10e)$$

Buktikan persamaan (2.10e) !!!

Rumusan persamaan (2.10e) akan sama dengan $x = ct$ seperti yang telah dirumuskan dalam persamaan (2.10d), jika parameter dalam kurung petak berharga sama dengan 1 atau,

$$\left[\frac{1 + v/c}{1 - \left(\frac{1}{k^2} - 1\right)\frac{v}{c}} \right] = 1$$

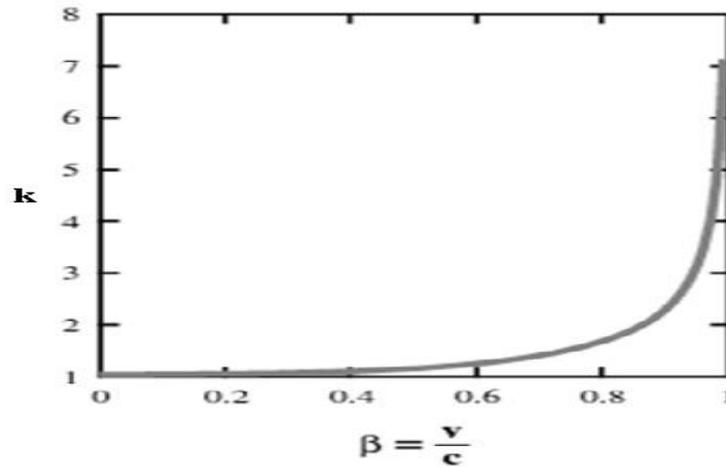
atau didapat

$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.11)$$

Buktikan Persamaan (2.11) !!!

Persamaan (2.11) merupakan bentuk rumusan kontanta Transformasi Lorentz k , dimana pola perubahan nilainya terhadap kecepatan benda ditunjukkan dalam gambar 2.7a. Nilai k terkecil adalah 1 dan terus bertambah sesuai dengan penambahan kecepatan benda atau partikel yang dikaji. Dengan kata lain nilai k selalu lebih

besar dari satu atau dapat dinyatakan dengan $k > 1$. Ini merupakan bentuk perumusan untuk parameter k dalam persamaan (2.10a) dan (2.10c). Perhatikan variabel k hanya tergantung pada kecepatan gerak relatif pengamat (v). Jika kedua pengamat diam ($v = 0$), maka nilai k sama dengan 1 ($k = 1$).



Gambar 2.7a Karakteristik nilai k terhadap kecepatan benda
(Sumber: Halim, 2008)

Bila persamaan (2.11) disubsitusikan ke persamaan (2.10a) dan (2.10c), maka didapat:

$$x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.11a)$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = \frac{t - vt/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.11b)$$

Buktikan persamaan (2.11b) !!!

Persamaan (2.11a) dan (2.11b) merupakan bentuk “Transformasi Lorentz” yang dirumuskan pertama sekali oleh Fisikawan Belanda H.A. Lorentz. Sesuatu yang menarik dari transformasi Lorentz adalah persamaan tersebut dapat direduksi kembali menjadi Transformasi Galileo jika kelajuan relatif antara pengamat sangat kecil dibandingkan dengan kelajuan cahaya ($v \ll c$). Nilai parameter untuk pengamat dalam kerangka acuan S dapat diperoleh melalui “Transformasi Lorentz Balik”, yaitu dengan menggantikan v dengan $-v$, sehingga bila syarat ini dimasukkan dalam persamaan (2.11a) dan (2.11b) maka didapat:

$$x' = \frac{x + vt}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.11c)$$

Dan

$$t' = \frac{t + vt/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.11d)$$

Buktikan persamaan (2.11d) !!!

Persamaan (2.11b) dan (2.11d) merupakan selisih waktu kerdipan cahaya dari sumber A (gambar 2.7) yang diamati oleh pengamat bergerak dengan kecepatan relatif v terhadap pengamat yang lain. Sebagai tugas rumah anda diminta untuk menuliskan semua

pembuktian rumus yang telah dikemukakan dalam Bab ini.

2.8. Transformasi kecepatan

Dalam bahagian sebelumnya kita telah dapat posisi dan waktu yang dirumuskan sesuai transformasi Galileo dan Lorentz. Untuk kecepatan relatif antara pengamat dan juga kecepatan beda jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya, penjelasannya dapat digunakan transformasi Galileo (lihat kembali contoh 2.1). Bagaimana halnya jika kecepatan relatif antara pengamat mendekati kecepatan cahaya, apakah masih berlaku persamaan transformasi Galileo (2.1 dan 2.2) atau tidak?.

Percobaan Michelson-Morley telah membuktikan bahwa gerakan cahaya tidak tergantung pada kondisi pengamat apakah pengamat dalam keadaan diam atau bergerak mendekati c , sesuai dengan postulat khusus Einstein. Dimana kesalahannya kalau diterapkan konsep transformasi Galileo untuk kasus seperti itu. Coba kita terapkan konsep penjumlahan kecepatan Galileo untuk contoh 2.2 berikut.

Contoh 2.2

Sebuah roket bergerak dengan kelajuan $0,8c$ menuju bumi. Kemudian roket mengirimkan sinyal elektromagnetik ke arah bumi dan menjauhi Bumi. Tentukan dengan konsep Galileo kelajuan sinyal tersebut bagi orang di bumi.

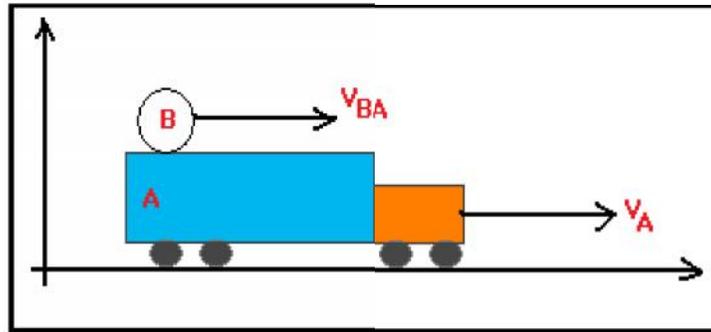
Jawaban

$$v = v' + c = 0.8c + c = 1.8c. \text{ untuk sinyal } \mathbf{MENUJU} \text{ Bumi}$$

$$v = v' - c = 0.8c - c = -0.2c. \text{ untuk sinyal } \mathbf{MENJAUHI} \text{ Bumi}$$

Jawaban pertama menunjukkan kecepatan sinyal menuju Bumi bisa melebihi kecepatan cahaya ($1.8c$). Hal ini sesuatu yang tidak dapat diterima menurut konsep postulat khusus Einstein dan konsep

transformasi Lorentz. Hasil percobaan Michelson-Morley juga menunjukkan bahwa kecepatan cahaya TIDAK tergantung pada keadaan pengamat (diam atau bergerak). Semua pengamat akan mencatat bahwa kecepatan cahaya $c = 3 \times 10^8$ m/s dan ini merupakan sifat isotropik dari kecepatan cahaya. Bagaimana cara mengatasi agar penjumlahan kecepatan cahaya tidak melebihi kecepatan cahaya??. Kita perhatikan dan analisis gambar 2.8 berikut.



Gambar 2.8. Kecepatan relatif benda B menurut pengamat di Bumi.
(Sumber: Halim, 2008)

Pada gambar 2.8 kendaraan bergerak dengan kecepatan v_A , kecepatan benda diatas kendaraan menurut pengamat dalam kendaraan adalah v_{BA} , dan menurut pengamat di tepi jalan (bergerak terhadap kendaraan) akan mencatat kecepatan benda B sebesar v_B , sesuai dengan persamaan (2.12)

$$v_B = \frac{v_{BA} \pm v_A}{1 + \frac{v_{BA}v_A}{c^2}} \quad (2.12)$$

Tanda (+) dalam persamaan (2.12) menggambarkan arah gerak benda B searah dengan gerak kendaraan A, sedangkan untuk tanda (-) arah gerak benda B dan kendaraan saling berlawanan. Fenomena ini dalam transformasi Galileo dengan mudah dapat dipahami, bahwa kecepatan benda B menurut pengamat di tepi jalan akan lebih besar kecepatannya jika gerakkan searah dengan arah gerak kendaraan dan akan bertambah kecil kecepatannya jika gerakkan berlawanan dengan arah gerak kendaraan A.

Persoalannya bagaimana kalau benda B tersebut diganti dengan kerdipan cahaya dari lampu senter dan kendaraan A diganti dengan pesawat luar angkasa yang memiliki kecepatan mendekati kecepatan cahaya ($0.3c$ atau $0.6c$ dan seterusnya). Apakah pengamat di tepi jalan akan mencatat kecepatan kerdipan cahaya tersebut sama seperti kasus gerakan benda B atau berbeda? Dengan merujuk pada postulat Einstein "kecepatan cahaya adalah sesuatu yang mutlak dan tidak tergantung pada kondisi pengamat" dapat dipahami bahwa kecepatan tertinggi adalah c (3×10^8 m/s) dan hasil penjumlahan kecepatan kerdipan cahaya dengan kecepatan pesawat luar angkasa tidak boleh melebihi kecepatan cahaya c . So nilai penjumlahan kecepatan yang harus dicatat oleh pengamat ditepi jalan ($1.8c$ dan $-0.2c$) dalam contoh 2.2 diatas tidak tepat. Lalu berapa hasilnya? Perhitungan sekarang kita coba gunakan persamaan (2.12).

$$v_B = \frac{v_{BA} + v}{1 + \frac{v_{BA} v_A}{c^2}} = \frac{c + 0.8c}{1 + \frac{(0.8c)c}{c^2}} = \frac{1.8c}{1.8c} = c$$

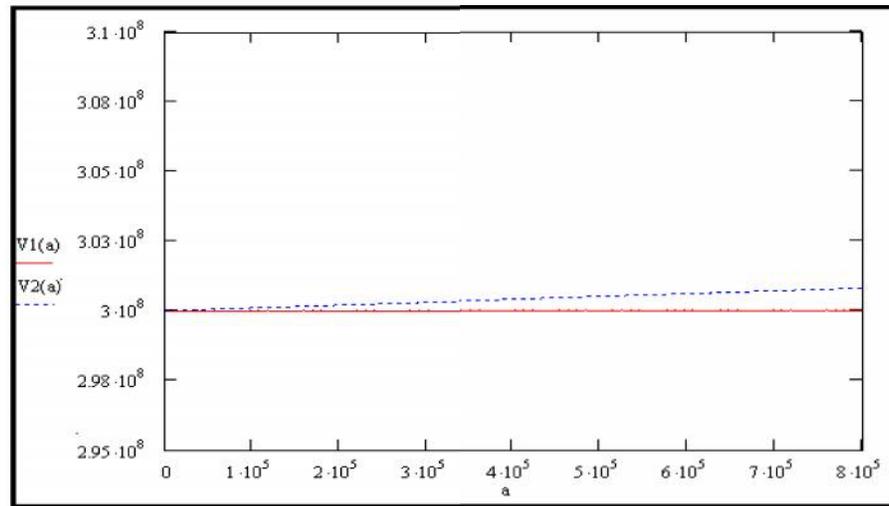
Kecepatan sinyal MENUJU Bumi yang diukur oleh pengamat yang diam di Bumi dan bergerak terhadap roket. Sedangkan kecepatan sinyal MENJAUHI Bumi yang diukur oleh pengamat yang sama didapat:

$$v_B = \frac{v_{BA} + v}{1 + \frac{v v_A}{c^2}} = \frac{c - 0.8c}{1 + \frac{(c)(-0.8c)}{c^2}} = \frac{0.2c}{0.2c} = c$$

Tenyata dengan menggunakan persamaan (2.12) kita dapatkan hasil pengukuran kecepatan sinyal menuju atau menjauhi Bumi yang diukur oleh pengamat di Bumi tetap sama dengan c , hal ini berbeda dengan perhitungan sebelumnya (yaitu $1.8c$ dan $0.2c$). Ini merupakan suatu hasil perhitungan yang didasarkan pada persamaan penjumlahan Einstein (2.12). Penggunaan persamaan (2.12) lebih luas batasannya dibandingkan dengan penjumlahan kecepatan relatif persamaan (2.1) dan persamaan (2.2) yang dirumuskan dalam transformasi Galileo. Untuk kecepatan benda B jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya, persamaan (2.12) tetap memberi hasil perhitungan yang sama dibandingkan kita gunakan persamaan (2.1) dan (2.2) Galileo. Maknanya gerak benda pada kecepatan rendah dan atau pada kecepatan mendekati kecepatan cahaya tetap dapat digunakan persamaan 2.12.

Sekarang kita bayangkan lampu senter dipercepat dengan pesawat berkecepatan tinggi dari keadaan diam ($a = 0$) sampai dengan kecepatan mendekati c atau $a = 8 \times 10^5$ m/s. Keadaan awal pesawat tersebut diam, kecepatan kerdipan cahaya senter menurut pengamat di Bumi adalah c , hasil ini akan sesuai apakah perhitungan menggunakan persamaan 2.12 atau persamaan 2.1. Dalam gambar 2.9 ditunjukkan nilai tersebut dalam bentuk menyatu kedua garis (garis putus-putus dan garis solid) disekitar $a = 0$ dan kedua garis semakin terpisah sesuai dengan kenaikan kecepatan gerak pesawat. Perhitungan dengan menggunakan persamaan 2.1 ada kemungkinan kecepatan kerdipan cahaya melebihi kecepatan cahaya (ditunjukkan oleh garis putus-putus), hal ini tentunya tidak sesuai dengan postulat Einstein. Sebaliknya perhitungan dengan menggunakan persamaan (2.12)

kecepatan kerdipan tetap sama dengan kecepatan cahaya (ditunjukkan oleh garis solid).



Gambar 2.9 Perbandingan hasil perhitungan antara persamaan (2.12) dan (2.1)
(Sumber: Halim, 2008)

Contoh 2.3

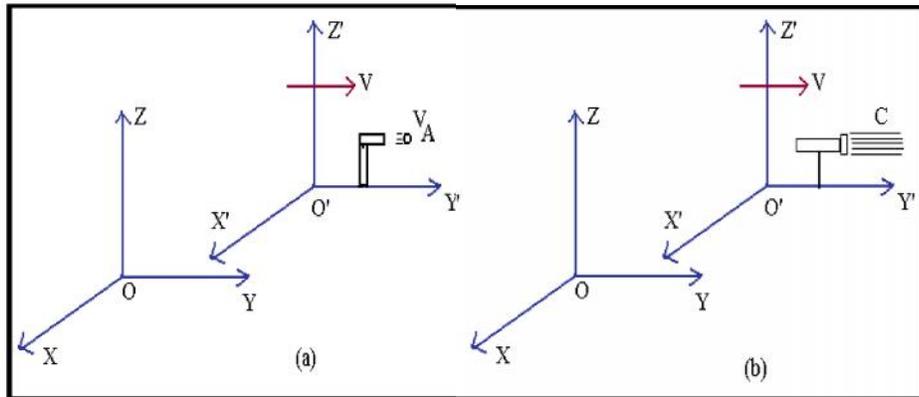
Sebuah kereta bergerak dengan kelajuan 18 m/s sementara di dalam kereta seorang kondektur berjalan dengan kelajuan 1 m/s. Kecapatan Apakah rumus penjumlahan kecepatan relativistic berlaku untuk persoalan ini? Jelaskan jawaban anda.

Contoh 2.4

Sebuah roket bergerak dengan kelajuan $0,8c$ menjubumi. Kemudian roket mengirimkan sinyal elektromagnetik ke arah bumi. Tunjukkan melalui rumus penjumlahan relativistic

bahwa kelajuan sinyal tersebut bagi orang di bumi adalah c juga.

Sekarang kita akan rumuskan kecepatan secara relativitas dan memenuhi postulat relativitas khusus. Untuk itu kita analisa diagram berikut :



Gambar 2.10 Perbandingan hasil pengamatan dalam kerangka bergerak dengan (a) kecepatan $v_A \ll c$ dan (b) kecepatan $v_A = c$ (Sumber: Halim, 2008)

Dalam gambar 2.10 (a) kerangka O diam, sementara kerangka O^1 bergerak dengan kecepatan tetap sebesar v . Sebuah benda A, yang berasal dari kerangka acuan O^1 , dalam arah x dengan kecepatan jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya atau $v_A \ll c$. Pengamat di kerangka O akan mengamati kecepatan benda A, sebesar :

$$v_x = v_A + v \quad (2.12a)$$

Sementara oleh pengamat O^1 akan mengaamati kecepatan benda A adalah :

$$v_x^1 = v_A - v \quad (2.12b)$$

Dalam gambar (b), benda A diganti dengan kerdipan cahaya, maka seharusnya menurut pengamat O akan mengamati kecepatan kerdipan cahaya sebesar :

$$v_x = c + v \quad (2.12c)$$

Dan oleh pengamat di O^1 akan mencatat :

$$v_x^1 = c - v \quad (2.12d)$$

Persamaan (2.12a) dan (2.12b) masih dibenarkan karena kecepatan benda $v_A \ll c$. Sementara persamaan (2.12c) dan (2.12d), jika dibenarkan akan bertentangan dengan hasil percobaan Michelson-Morley dan postulat kedua relativitas khusus. Hal ini disebabkan $v_A = c$. Menurut postulat tersebut kecepatan kerdipan cahaya akan sama nilainya, baik diamati oleh kerangka diam (O^1) atau pengamat dalam kerangka sedang bergerak relatif (O), yaitu :

$$v_x = v_x^1 = c \quad (2.12e)$$

Untuk dapat merumuskan kecepatan secara relativitas khusus, kita harus memanfaatkan posisi dan waktu relativitas yang telah dirumuskan sebelumnya. Oleh karena itu menurut pengamat di O dalam waktu dt akan mencatat benda A bertambah jarak sebesar dx , sehingga kecepatannya.

$$v_x = dx/dt$$

$$v_y = dy/dt$$

$$v_z = dz/dt \quad (2.13)$$

Sedangkan kecepatan yang diamati oleh pengamat dalam kerangka O^1

$$\begin{aligned} v_x' &= dx'/dt' \\ v_y' &= dy'/dt' \\ v_z' &= dz'/dt' \end{aligned} \quad (2.14)$$

Parameter dx dan dt dapat dihitung dari persamaan (2.11c) dan (2.11d) atau persamaan (2.11a) dan (2.11b), yaitu:

$$\begin{aligned} x &= k(x' + vt') \quad \text{atau turunannya} & dx &= k(dx' + vdt') \\ t &= k(t' + vx'/c') \quad \text{atau turunannya} & dt &= k(dt' + v/c^2 dx') \end{aligned}$$

atau

$$v_x = \frac{dx}{dt} = \frac{k(dx' + vdt')}{k(dt' + v/c^2 dx')}$$

atau jika suku atas-bawah sebelah kanan dibagikan dengan dt' , didapat

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

(2.13b)

Persamaan (2.13b) sama dengan persamaan (2.12) yang diturunkan dari gambar 2.8. Perumusan persamaan (2.13b) didasarkan pada konsep Transformasi Lorentz. Persamaan (2.13b) berlaku untuk benda berkecepatan rendah ($v \ll c$) dan juga untuk benda yang bergerak dengan kecepatan mendekati atau sama dengan c .

Dalam bentuk yang sedikit berbeda, kecepatan benda A juga dapat dinyatakan dalam komponen y dan z. Sepanjang arah y dan z hanya variabel t yang terpengaruh secara relativitas, sehingga:

$$v_y = \frac{dy}{dt} = \frac{dy}{k(dt + v/c^2 dx)}$$

Dengan menggantikan nilai k dalam persamaan (2.11) didapat:

$$v_y = \frac{v_y' \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}{1 + \frac{v_y' v}{c^2}}$$

dan (2.13c)

$$v_z = \frac{v_z' \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}{1 + \frac{v_z' v}{c^2}}$$

(2.13d)

Dimana V_x adalah kecepatan benda A yang diamati oleh pengamat yang ada dalam kerangka O, sedangkan V_x' adalah kecepatan benda A yang diamati oleh pengamat dalam kerangka O', dan V adalah kecepatan relatif pengamat dalam kerangka O' terhadap kerangka O. Selanjutnya untuk pengamat dalam kerangka O' akan mencatat kecepatan benda A sepanjang sumbu x sebesar:

$$v_x' = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v_x v}{c^2}}$$

(2.13e)

dalam arah y dan z sebesar

$$v_y = \frac{v_y \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}{1 + \frac{v_y v}{c^2}}$$

dan (2.13f)

$$v_z = \frac{v_z \left(\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)}{1 + \frac{v_z v}{c^2}}$$

(2.13g)

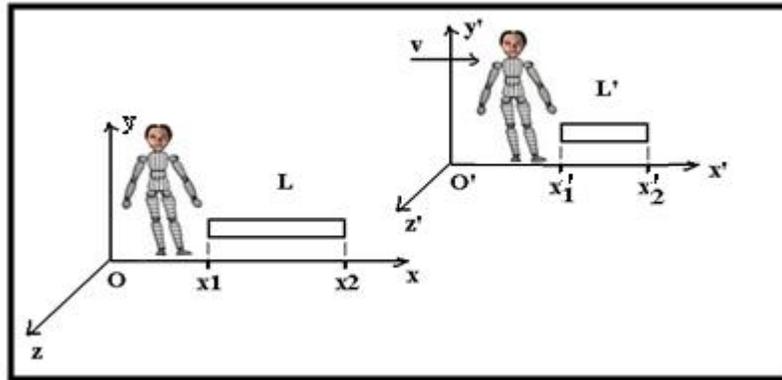
Sebagai tugas rumah (PR) buktikan bahwa persamaan kecepatan benda A yang diukur oleh pengamat dalam kerangka O' akan didapat seperti ditunjukkan dalam persamaan (2.13e), (2.13f) dan (2.13g).

2.9. Konstraksi Lorentz

Berdasarkan pembahasan Transformasi Lorentz telah dipahami bahwa besaran waktu dan posisi terpengaruh dengan gerak relatif antara dua pengamat, sehingga hasil pengukuran sangat tergantung pada keadaan pengamat. Perbedaan posisi benda antara dua pengamat yang bergerak relatif antara satu dengan yang lain, menyebabkan terjadi perbedaan pula pada besaran-besaran yang lain seperti kecepatan, panjang, momentum, energi kinetik, masa, dan lain-lain.

Panjang merupakan besaran dasar fisis yang sangat tergantung pada posisi atau kedudukan. Sekarang kita misalkan benda A ada pada kerangka O dengan posisi masing-masing ujungnya di x_1 dan x_2 (dalam gambar 2.11). Menurut pengamat yang diam terhadap benda (berada dalam kerangka O) akan mencatat panjang benda yang sebenarnya atau disebut *property length* (**L**), yaitu:

$$L = x_2 - x_1 \quad (2.14)$$



Gambar 2.11 Dua pengamat saling bergerak relatif mengamati panjang benda yang sama
(Sumber: Halim, 2008)

Sedangkan posisi benda menurut pengamat yang bergerak relatif terhadap benda (berada dalam kerangka O') berada pada titik x_2' dan x_1' . Dengan demikian panjang benda tersebut menurut pengamat yang bergerak adalah

$$L' = x_2' - x_1' \quad (2.14a)$$

Didasarkan pada persamaan (2.11) yang lalu kita telah dapatkan bahwa

$$x' = k(x - vt)$$

sehingga persamaan (2.14a) dapat ditulis menjadi,

$$\begin{aligned} L' &= k(x_2 - vt_2) - k(x_1 - vt_1) \text{ atau} \\ L' &= k[x_2 - x_1] - kv[t_2 - t_1] \end{aligned} \quad (2.14b)$$

Parameter $[t_2 - t_1]$ merupakan selisih waktu pengukuran yang diukur oleh pengamat dalam kerangka diam terhadap benda. Sehingga dengan bantuan persamaan (2.11b) kita dapat tuliskan

$$c\Delta t' = c(t_1' - t_2') = c [k(t_1 - v/c^2 x_1)] - c [k(t_2 - v/c^2 x_2)]$$

Karena pengukuran panjang benda (dua ujung posisi benda, x_1 dan x_2) yang dilakukan oleh pengamat dalam kerangka bergerak pada waktu serentak (bersamaan), maka $\Delta t' = 0$. Dengan demikian persamaan diatas setelah disusun kembali dapat ditulis menjadi,

$$(t_2 - t_1) = v/c^2 (x_2 - x_1) = v/c^2 L \quad (2.14c)$$

Substitusi persamaan (2.14c) ke persamaan (2.14b) didapat

$$L' = kL - kv (v/c^2) L \quad \text{atau}$$

$$L = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

(2.15)

Untuk memahami arti fisis persamaan (2.15) kita perlu mengetahui harga dari konstanta k . Berdasarkan definisi perumusan konstanta k dalam persamaan (2.11),

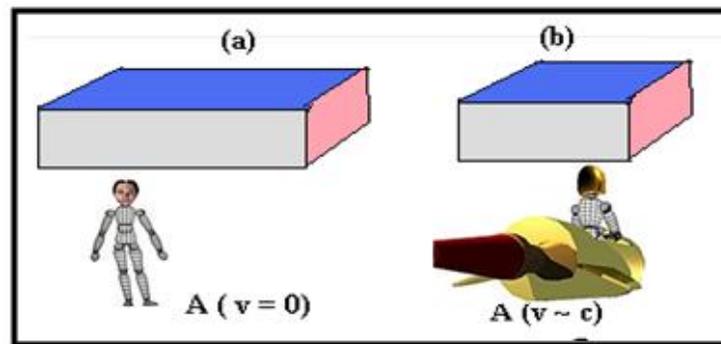
$$k = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

dapat ditelusuri nilai konstanta k . Karena $v < c$, maka $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$, sehingga $k > 1$. Jadi untuk kondisi gerak relatif antara dua pengamat dalam batasan $v < c$, maka nilai konstanta k selalu didapat $k > 1$. Dengan demikian persamaan (2.15) untuk kondisi $v < c$, dapat ditulis menjadi,

$$\frac{L}{L'} = k > 1$$

Maknanya panjang benda L yang diukur oleh pengamat diam atau berada dalam kerangka O lebih panjang daripada hasil pengukuran L' yang dilakukan oleh pengamat yang bergerak terhadap benda.

Jika kecepatan relatif gerak antara dua pengamat dalam batasan $v < c$, maka hasil pengukuran oleh pengamat diam lebih panjang dari hasil pengukuran yang dilakukan oleh pengamat bergerak atau $L > L'$



Gambar 2.12 Efek kontraksi hanya terjadi sepanjang arah gerak pengamat.

(Sumber: Halim, 2008)

Efek kontraksi ini hanya berlaku untuk panjang benda pada sisi yang searah dengan arah gerak relatif pengamat. Sebagai contoh pengamat A bergerak relatif terhadap pengamat B sepanjang sumbu x dan benda S berbentuk persegi panjang diletakkan sepanjang sumbu x dalam kerangka B. Dalam kondisi seperti itu pengamat A akan mengukur sisi persegi panjang benda S sepanjang sumbu x lebih pendek, sedangkan sisi-sisi yang lain (y dan z) tetap tidak terjadi kontraksi. Phenomena ini ditunjukkan dalam gambar 2.12.

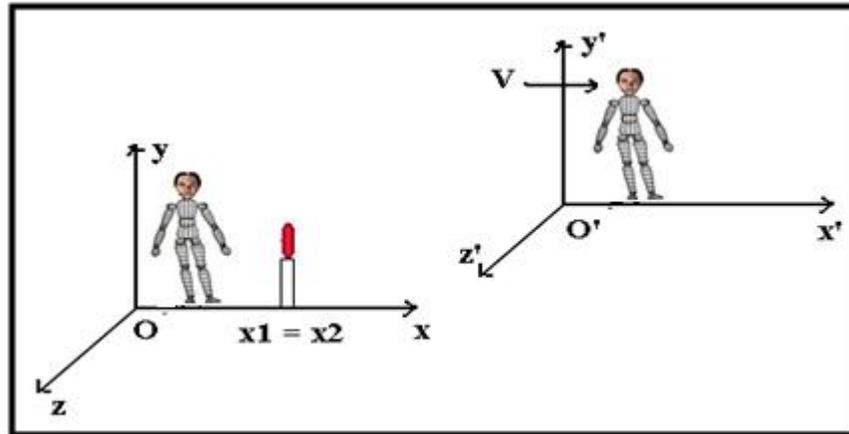
2.10. Dilatasi waktu

Pernah merasa waktu berjalan cepat atau terasa begitu lambat? Seperti saat waktu berlalu begitu cepat ketika anda sedang bersama teman-teman atau saat waktu terasa begitu lambat ketika anda terjebak dalam hujan. Tapi anda tetap tidak bisa mempercepat atau memperlambat perjalanan waktu

Waktu selalu berjalan dalam kecepatan yang konstan. Einstein tidak berpikir demikian. Ide dia adalah semakin kita mendekati kecepatan cahaya, semakin lambat waktunya relatif dibandingkan kondisi orang yang tidak bergerak. Dia menyebutnya melambatnya waktu karena gerakan. Tidak mungkin, kamu bilang? Oke, bayangkan ini. Kamu berdiri di bumi, memegang jam. Teman baikmu ada di dalam roket dengan kecepatan 250.000 km/detik. Temanmu juga memegang sebuah jam. Kalau kamu bisa melihat jam yang dibawa temanmu, kamu akan melihat bahwa jam itu tampak berjalan lebih lambat daripada jam kamu. Sebaliknya temanmu akan merasa jam yang ia bawa berjalan biasa-biasa saja (tidak melambat), dia pikir malah jam kamu yang tampak berjalan lebih lambat.

Untuk melihat perbedaan waktu yang signifikan, kita analisis parameter lain yang terpengaruh secara relativitas, yaitu besaran waktu. Suatu kejadian dalam selang waktu tertentu terpengaruh secara relativitas, bila di ukur oleh dua pengamat yang bergerak secara

relativitas. Pengamat yang bergerak terhadap kejadian akan mengukur kejadian tersebut lebih lama, dibandingkan dengan hasil pengukuran yang diukur oleh pengamat yang diam terhadap peristiwa tersebut. Untuk mudah memahami dalam penurunannya, kita tinjau nyala lilin dan padam lilin dalam kerangka O dan juga diamati oleh pengamat dalam kerangka O^1 seperti dalam gambar 2.12.



Gambar 2.13 Kerdipan cahaya diamati oleh dua pengamat yang bergerak relatif satu terhadap yang lain.
(Sumber: Halim, 2008)

Menurut pengamat O , yang diam terhadap peristiwa, mencatat bahwa lilin nyala pada t_1 dan padam pada t_2 , maka lama lilin tersebut menyala adalah $\Delta t = t_2 - t_1$. Sementara pengamat O^1 , yang bergerak relatif terhadap peristiwa nyala lilin, mencatat lilin menyala pada t_1' dan padam pada t_2' , dengan demikian lama lilin menyala $\Delta t' = t_2' - t_1'$. Berdasarkan Transformasi Lorentz yang dirumuskan dalam persamaan (2.11b) dapat dikaitkan dengan waktu yang diamati oleh kedua pengamat dalam bentuk,

$$t_1' = \frac{t_1 - (v/c^2)x_1}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

$$t_2' = \frac{t_2 - (v/c^2)x_2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

Selisih keduanya $\Delta t' = t_2' - t_1'$ didapat,

$$\Delta t' = t_2' - t_1' = \frac{t_2 - \left(\frac{v}{c^2}\right)x_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{t_1 - \left(\frac{v}{c^2}\right)x_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\Delta t' = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \left[(t_2 - t_1) + \left(\frac{v}{c^2}x_1 - \frac{v}{c^2}x_2\right) \right]$$

Menurut pengamat yang diam terhadap lilin (atau pada kerangka O) posisi lilin tidak berubah mulai saat menyala sampai dengan lilin tersebut padam kembali, yaitu pada $x_2 = x_1$, sehingga suku

$$\left(\frac{v}{c^2}x_1 - \frac{v}{c^2}x_2\right) = 0.$$

Dengan demikian persamaan di atas dapat ditulis kembali,

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(2.16)

Parameter $\Delta t'$ adalah selisih waktu nyala dan padam lilin yang dicatat oleh pengamat **bergerak** terhadap lilin, sedangkan Δt adalah selisih waktu nyala dan padam lilin yang diamati oleh pengamat yang **diam** terhadap lilin. Kecepatan relatif antara kedua pengamat selalu berada

dalam batasan $v < c$. Kalau batasan ini kita masukkan dalam suku v^2/c^2 , maka dapat dikatakan suku

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} > 1$$

Dengan demikian berdasarkan persamaan (2.16) dapat dikatakan bahwa $\Delta t' > \Delta t$ atau dapat juga dikatakan bahwa selang waktu nyala dan padam lebih lama yang dicatat oleh pengamat dalam kerangka bergerak terhadap lilin dibandingkan dengan selang waktu yang dicatat oleh pengamat diam terhadap lilin. Dengan lain perkataan pengamat yang bergerak terhadap lilin melihat proses nyala dan padam lilin terjadi **lebih lambat** dibandingkan proses yang diamati oleh pengamat diam terhadap lilin. Pertanyaan kemudian muncul, pengukuran mana yang paling tepat? Waktu yang paling tepat atau disebut waktu sebenarnya atau *proper time* adalah selang waktu yang dicatat oleh pengamat **diam** terhadap lilin (peristiwa) Δt .

Masih bingung? Ingat, Einstein butuh 8 tahun untuk menemukan hal ini. Dan dia dianggap jenius. Einstein memberikan contoh untuk menunjukkan efek perlambatan waktu yang dia sebut “paradoks kembar”. Seperti permainan penjelajah waktu. Mari kita mencobanya dengan menganggap ada 2 orang kembar bernama Eyne dan Stine. Dua-duanya kita anggap berumur 10 tahun. Eyne memutuskan dia sudah bosan di bumi dan perlu liburan. Dia mendengar bahwa ada hal yang menarik di sistem bintang Alpha3, yang berjarak 25 tahun cahaya. Stine yang harus mengikuti ujian matematika minggu depan, harus tinggal di rumah untuk belajar. Jadi Eyne berangkat sendiri. Ingin sampai secepatnya di sana, dia memutuskan untuk berjalan dengan kecepatan 99,99% kecepatan cahaya. Perjalanan ke sistem bintang itu bolak balik membutuhkan waktu 50 tahun. Apa yang terjadi ketika Eyne kembali? Stine sudah 60 tahun, tapi Eyne masih berumur 10 ½ tahun. Bagaimana mungkin?

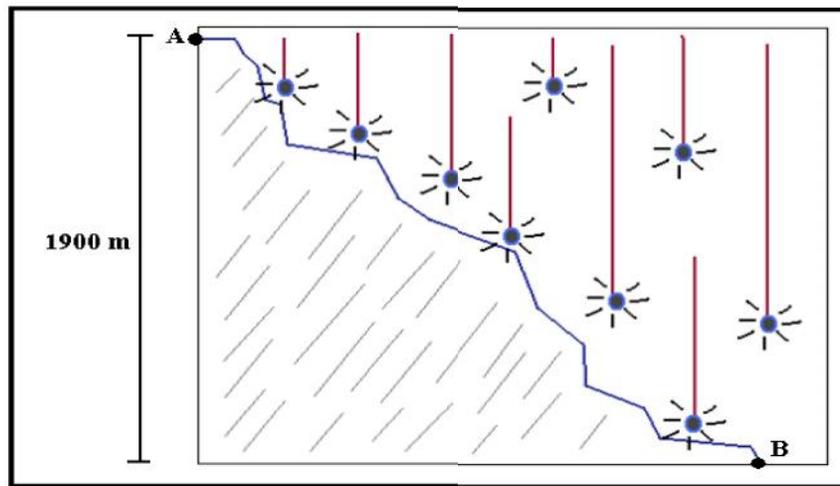
Eyne sudah pergi selama 50 tahun tapi hanya bertambah umur $\frac{1}{2}$ tahun! Hey, apakah Eyne baru saja menemukan mata air awet muda!

Ide Einstein tentang waktu yang melambat tampak benar dan semua adalah teori, tapi bagaimana kamu tahu kalau dia benar? Salah satu cara adalah dengan naik roket dan memacu roket itu mendekati kecepatan cahaya. Tapi sampai saat ini, kita belum bisa melakukannya. Tapi ada satu cara untuk mengetestnya. Bagaimana kita tahu kalau Einstein tidak salah? Percobaan ini mungkin bisa memberikan penjelasan atas idenya. Jam atom adalah jam yang sangat akurat, bisa mengukur satuan waktu yang sangat kecil. Sepersepjutaan detik bisa diukur. Di tahun 1971, ilmuwan menggunakan jam ini untuk mengetest ide Einstein. Satu jam atom diset di atas bumi, dan satu lagi dibawa keliling dunia menggunakan pesawat jet dengan kecepatan 966 km/jam. Pada awalnya kedua jam itu diset agar menunjukkan waktu yang sama. Apa yang terjadi ketika jam dibawa mengelilingi dunia dan kemudian kembali ke titik di tempat jam satunya lagi berada? Sesuai perkiraan Einstein, kedua jam itu sudah tidak menunjukkan waktu yang sama. Jam yang sudah dibawa keliling dunia, menunjukkan keterlambatan waktu seperberapa juta detik! Kamu mungkin bertanya kenapa kok bedanya begitu kecil? Pertanyaan yang bagus! Yah, 966 km/jam cukup cepat, tapi masih belum mendekati kecepatan cahaya. Jika kecepatan pesawat dapat diciptakan sehingga 100.000 km/jam, maka kamu akan melihat bahwa perbedaan kedua akan semakin besar atau nyata.

Sampai sejauh ini kita telah rumuskan dua parameter fisis, yaitu panjang dan waktu, yang memenuhi prinsip relativitas khusus. Rumusan-rumusan tersebut secara matematis telah benar, namun untuk menambah keyakinan kita perlu didukung oleh uji coba laboratorium. Kenapa perlu adanya uji coba laboratorium? Karena hasil rumusan tersebut secara akal dan pengalaman sehari-hari terasa tidak sesuai. Bukti eksperimen terhadap kedua parameter tersebut (panjang dan waktu) telah dilakukan oleh D.H.Frisel dan J.H.Smith pada tahun 1976 di laboratorium *The European Council for Nuclear*

Research (CERN) Jenewa (Serway 2005). Muon merupakan partikel radioaktif memiliki muatan sama dengan muatan elektron, massanya 207 kali masa elektron, bersifat tak stabil, dan bergerak dengan kecepatan $0.994c$ saat mendekati Bumi.

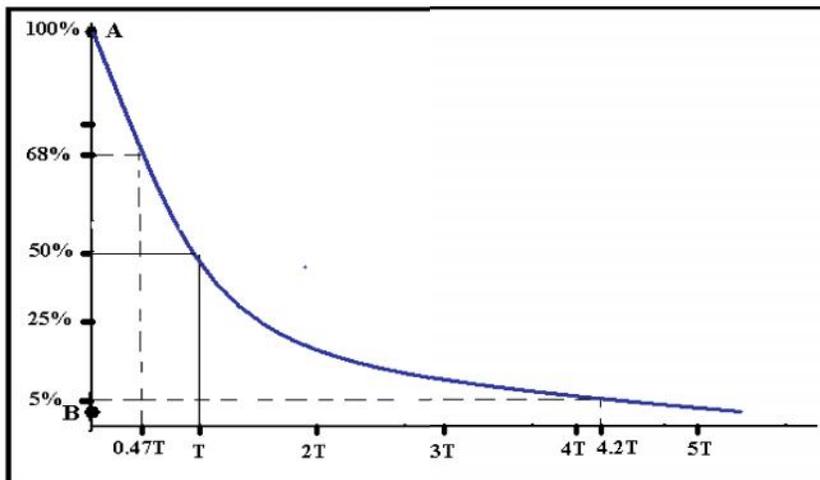
Muon diproduksi dari hasil tumbukan dengan sinar kosmik dengan atom-atom yang ada ribuan kilometer diatas permukaan Bumi. Waktu hidup Muon sekitar $1.5 \mu s$ (proper time) yang diukur dalam kerangka Muon dan Muon bergerak dengan kecepatan $0.994c$.



Gambar 2.14 Ilustrasi eksperimen Friseh dan Smith dengan titik A dan B diatas Bumi dan permukaan laut.
(Sumber: Serway, 2005; 55).

Tujuan percobaan ini untuk membuktikan bahwa hasil pengukuran persentase muon yang tersisa dipermukaan Bumi (data lapangan) sama dengan hasil perhitungan secara relativitas (data perhitungan). Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan perhitungan melalui tiga cara. Pertama perhitungan denganann cara biasa (konsep klasik) tanpa memperhitungkan efek relativitas. Kedua perhitungan

dengan cara memasukkan efek relativitas pada besaran panjang. Ketiga perhitungan dengan cara memasukkan efek relativitas pada besaran waktu. Diagram percobaan mereka ditunjukkan dalam gambar 2.14. Misal dianggap pada titik A massa muon masih utuh 100%, setelah meluruh satu kali atau menempuh waktu peluruhan sekitar $1.5 \mu\text{s}$ massa muon tinggal 50% dari masa mula-mula, begitulah seterusnya massa muon terus berkurang sesuai dengan jumlah peluruhan sampai pada titik B. Diagram proses peluruhan ditunjukkan dalam gambar 2.15.



Gambar 2.15 Diagram peluruhan Muon mulai dari titik A sampai B
(Sumber : : Serway, 2005; 56)

2.10.1. Perhitungan dengan metode klasik

Jarak tempuh lintasan Muon telah diketahui, yaitu 1900 meter dan kecepatan Muon diketahui sekitar $0.0994c$, dengan demikian waktu yang diperlukan Muon untuk menempuh jarak tersebut adalah:

$$t_{AB} = \frac{y_{AB}}{v_{muon}} = \frac{1900 \text{ m}}{0.994 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 6.37 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Ini merupakan waktu yang diperlukan oleh Muon untuk menempuh perjalanan sejauh 1900 m. Dengan demikian Muon selama waktu tempuh tersebut akan meluruh sebanyak:

$$n = \frac{t_{AB}}{T} = \frac{6.37 \times 10^{-6} \text{ s}}{1.5 \times 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{peluruhan}}} = 4.2 \text{ kali peluruhan} \approx 4 \text{ kali}$$

Dengan merujuk pada hasil perhitungan dapat diringkaskan keterkaitan jumlah peluruhan dengan sisa Muon, yaitu:

- Untuk peluruhan ke:
- 1: sisa Muon = 50%
 - 2: sisa Muon = 25%
 - 3: sisa Muon = 12.5%
 - 4: sisa Muon = 6.75%
 - 4.2: sisa Muon \approx 5%

Pola proses peluruhan Muon secara keseluruhan ditunjukkan dalam gambar 2.15. Hasil perhitungan di atas dilakukan oleh dengan merujuk pada konsep perhitungan klasik dan tidak memperhitungkan bagaimana kondisi dan tempat kedudukan pengamat. Hasil perhitungan 4.2 kali peluruhan menghasilkan sisa Muon sekitar 5%, masalahnya apakah hasil ini sesuai dengan data di lapangan.

Kenyataannya data lapangan yang dicatat oleh pengamat di titik B mendapati sisa Muon sekitar 68% dan ini menurut konsep klasik hanya terjadi peluruhan sekitar 0.47 kali peluruhan. Kenapa dua hasil ini berbeda? Dalam perhitungan ini ada dua besaran yang menjadi fokus perhatian, yaitu waktu peluruhan dan panjang lintasan yang ditempuh oleh Muon. Data waktu peluruhan $1.5 \mu\text{s}$ yang digunakan dalam perhitungan diatas adalah waktu peluruhan menurut pengamat dalam Muon, sedangkan panjang lintasan Muon 1900 m merupakan

ukuran menurut pengamat yang ada di Bumi. Pertanyaan sekarang apakah waktu paruh tersebut juga sama dengan yang dicatat oleh pengamat yang ada di Bumi dan panjang lintasan itu apakah juga sama dengan panjang lintasan yang diukur oleh pengamat dalam Muon. Untuk itu kita perlu mencoba lakukan perhitungan dengan mengambil hasil pengukuran waktu paruh dan panjang lintasan sesuai dengan kerangka pengamat masing-masing.

2.10.2. Pengamat dalam Moun (efek kontraksi panjang)

Perhitungan dengan cara kedua pengamat berada dalam kerangka Muon, sehingga waktu paruh menjadi waktu sebenarnya (**proper time**) sedang panjang lintasan atau jarak tempuh Moun merupakan panjang relativitas atau bukan panjang yang sebenarnya menurut pengamat dalam Muon. Dengan demikian besaran panjang harus dihitung kembali dengan mengambil persamaan relativitas:

$$L = L' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 1900 \sqrt{1 - \frac{(0.994c)^2}{c^2}} = 208.05 \text{ m}$$

Jadi panjang lintasan gerak Muon dari titik A ke titik B menurut pengamat dalam kerangka Muon adalah 208.05 m, dimana kelihatannya jauh lebih pendek. Ini bermakna waktu untuk melakukan peluruhan atau jumlah kali peluruhan Muon lebih singkat. Dengan panjang lintasan seperti itu dapat dihitung waktu yang diperlukan Muon untuk mencapai permukaan Bumi.

$$t_{AB} = \frac{L'}{V_{muon}} = \frac{208.05 \text{ m}}{0.994 \times 3 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.698 \times 10^{-6} \text{ s}$$

Dengan demikian jumlah kali peluruhan partikel Muon selama waktu t_{AB} tersebut adalah:

$$n = \frac{t_{AB}}{T} = \frac{0.698 \times 10^{-6} \text{ s}}{1.5 \times 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{peluruhan}}} = 0.465 \text{ kali peluruhan}$$

Berdasarkan grafik data lapangan dalam gambar 2.15 dapat dilihat bahwa untuk peluruhan Muon sebanyak 0.465 kali akan tersisa Muon sekitar 68% dan ini sesuai dengan data lapangan.

2.10.3 Pengamat di Bumi (efek pemuluran waktu)

Perhitungan juga dapat dilakukan dengan memposisikan besaran waktu dan panjang berdasarkan pengamat dalam kerangka acuan Bumi atau pengamat bergerak terhadap Muon. Parameter yang berbeda untuk pengamat di Bumi adalah waktu paruh Muon, dimana waktu paruh Muon menurut pengamat Bumi dipandang sebagai besaran relativitas ($\Delta t'$). Sedangkan parameter sebenarnya menurut pengamat di Bumi adalah panjang atau disebut dengan **proper lenght (L)**. Dengan demikian dalam perhitungan waktu peluruhan perlu dimasukkan faktor relativitas atau menggunakan persamaan:

$$Ut' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{Ut}{\sqrt{1 - \frac{(0.994c)^2}{c^2}}} = 9Ut$$

Menurut pengamat di Bumi (titik B) selama waktu menempuh perjalanan 6.37×10^{-6} s terjadi peluruhan sebanyak

$$n = \frac{t_{AB}}{T} = \frac{6.37 \times 10^{-6} \text{ s}}{9 \times 1.5 \times 10^{-6} \frac{\text{s}}{\text{peluruhan}}} = 0.471 \text{ kali peluruhan}$$

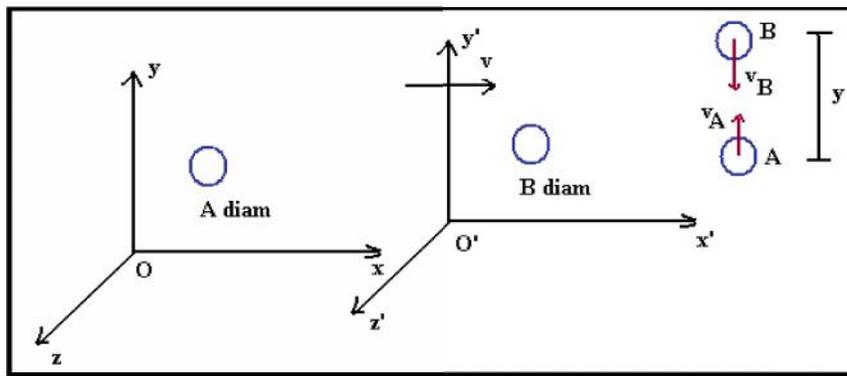
Berarti menurut pengamat di Bumi Muon terjadi peluruhan sebanyak 0.471 kali, dengan kata lain tidak sampai satu kali peluruhan. Jika kita cek diagram data lapangan dalam gambar 2.15 ternyata untuk peluruhan 0.471 kali peluruhan akan tersisa Muon sekitar 68% di titik B dan ini sesuai dengan kenyataan sebenarnya.

2.11. Massa relativitas

Kita telah memahami aspek kinematika secara relativitas khusus, yaitu aspek panjang dan aspek waktu. Dalam bagian sekarang kita akan lihat bagaimana efek relativitas khusus terpengaruh terhadap parameter dinamis (massa dan momentum). Pembahasan kita awali dengan kasus tumbukan lenting sempurna atau tumbukan elastis antara partikel A dan B. Ilustrasinya seperti dalam gambar 2.16. Kerangka O^1 bergerak relatif terhadap kerangka O dengan kecepatan v . Sebelum tumbukan partikel A diam terhadap pengamat dalam kerangka diam O dan partikel B diam terhadap pengamat dalam kerangka bergerak O^1 . Setelah beberapa saat kemudian benda A dilempar keatas dengan kecepatan v_A , sedangkan benda B dilempar kearah bawah (-y) dengan kecepatan v_B dengan ketentuan

$$v_A = v_B \quad (2.17)$$

artinya kecepatan benda A yang dicatat oleh pengamat dalam kerangka O , sedangkan v_B adalah kecepatan benda B yang dicatat oleh pengamat dalam kerangka O^1 .



Gambar 2.16 Ilustrasi diagram efek relativitas massa
(Sumber: Halim, 2008)

Setelah tumbukan kedua partikel saling memantulkan, partikel A dipantulkan ke arah bawah ($-y$) dengan kecepatan v'_A , sedangkan partikel B dipantulkan ke arah atas (y) dengan kecepatan v'_B . Karena tumbukan dilakukan secara elastis sempurna, maka berlaku:

$$v'_A = v'_B \quad (2.17a)$$

tanda ",' di atas v artinya kecepatan setelah tumbukan, sedangkan tanda ",' di atas B artinya kecepatan yang diamati oleh pengamat dalam kerangka O' . Waktu gerak bolak-balik partikel A menurut pengamat dalam kerangka O adalah:

$$T_A = y/v_A \quad (2.17b)$$

dan waktu yang diperlukan oleh partikel B menurut pengamat dalam kerangka O' adalah:

$$T_B = y/v'_B \quad (2.17c)$$

Menurut pengamat dalam kerangka O hukum kekekalan tumbukan sebelum tumbukan ditulis,

$$m_A v_A = m_B v_B \quad (2.17d)$$

dimana m_B dan v_B merupakan massa dan kecepatan benda B yang diukur oleh pengamat dalam kerangka O dalam hal ini kecepatan benda B menurut pengamat dalam kerangka O dinyatakan dalam bentuk

$$v_B = y/T \quad (2.17e)$$

dimana T adalah waktu bolak-balik partikel B yang diukur pengamat dalam kerangka O. Beda waktu bolak-balik selama tumbukan antara hasil yang diukur oleh pengamat dalam kerangka O dengan hasil ukur oleh pengamat dalam kerangka O' didasarkan pada persamaan (2.16), yaitu:

$$T_0 = T \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \quad (2.18a)$$

Bila persamaan (2.18a) dimasukkan ke dalam persamaan (2.17b), maka didapat,

$$T \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \frac{y}{v_A}$$

$$v_A = \frac{y}{T \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(2.18b)

Persamaan (2.17c) dan (2.18b) disubsitusikan ke persamaan (2.17d) didapat,

$$m_A \frac{y}{T \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m_B \frac{y}{T}$$

atau

$$m_A = m_B \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

(2.18c)

Menurut pengamat dalam kerangka O, hukum kekekalan momentum akan berlaku jika massa partikel A (m_A) harus memenuhi hubungan seperti dalam persamaan (2.18c). Berdasarkan persamaan (2.18c) dapat dipahami bahwa massa partikel B lebih besar daripada partikel A menurut pengamat dalam kerangka O. Hal ini disebabkan partikel B bergerak relatif terhadap pengamat dalam kerangka O, sedangkan partikel A diam terhadapnya. Dengan demikian dalam bentuk yang lebih umum untuk $m_B = m$ dan $m_A = m_0$, dapat ditulis menjadi,

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

(2.19)

Berdasarkan persamaan (2.19) dapat dilihat bahwa massa suatu benda akan bertambah besar jika kecepatan relatif antara kedua pengamat juga bertambah besar. Tentunya ini bertentangan dengan konsep

Hukum II Newton dimana gaya terkait langsung dengan percepatan benda, sedang massa dalam konsep klasik dianggap konstan. Phenomena ini merupakan satu bentuk penyempurnaan terhadap Hukum II Newton dan bukan pertentangan antara kedua konsep.

Perbedaannya dalam konsep klasik kecepatan benda yang dikaji jauh lebih kecil dari kecepatan cahaya ($v \ll c$) sedang untuk kecepatan benda mendekati kecepatan cahaya ($v \approx c$) tidak pernah dipersoalkan. Untuk benda yang bergerak dengan kecepatan mendekati kecepatan cahaya berlaku hukum relativitas Einstein, sedangkan untuk benda yang bergerak dengan kecepatan sangat jauh dari kecepatan cahaya maka kajiannya menggunakan konsep mekanika klasik.

2.12. Momentum dan Energi Relativistik

Pada bagian sebelumnya kita telah tunjukkan bahwa massa adalah besaran relativitas khusus. Massa dan momentum adalah dua besaran klasik yang tidak dapat dipisahkan, sesuai dengan definisi:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} \quad (2.20)$$

dengan demikian berdasarkan persamaan (2.19) momentum yang memenuhi konsep relativitas khusus adalah:

$$\mathbf{p} = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.20a)$$

Perlu dicatat bahwa tidak semua rumusan dinamik dapat disisipkan konsep masa relativitas seperti halnya yang dilakukan terhadap persamaan momentum (2.20a). Sebagai contoh kita tuliskan rumusan energi kinetik relativitas dari rumus klasik,

$$E_k = \frac{1}{2} mv^2$$

Kemudian kita tulis rumus energi kinetik dengan menyisipkan efek relativitas terhadap massa, yaitu:

$$E_k = \frac{1}{2} \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (2.20b)$$

Penulisan seperti persamaan (2.20b) tidak tepat, karena tanpa mendefinisikan kembali pengertian energi kinetik dalam konteks konsep relativitas. Untuk mendapatkan bentuk persamaan energi kinetik yang paling tepat dalam konteks relativitas, kita perlu analisis definisi dasar konsep energi kinetik dalam pandangan klasik. Dalam mekanika klasik energi kinetik didefinisikan sebagai usaha untuk merubah laju sebuah objek dari keadaan awal (i) ke keadaan final (f).

$$\Delta E_k = E_{kf} - E_{ki} = W = \int F dx$$

Jika benda bergerak dari keadaan diam, maka $E_{ki} = 0$, sehingga persamaan diatas dapat ditulis

$$E_k = \int F dx$$

Agar gaya juga terpengaruh secara relativitas, maka kita ambil definisi gaya dalam konteks klasik,

$$F = dp/dt$$

Dimana p secara relativitas telah didefinisikan dalam persamaan (2.20a), sehingga dapat ditulis

$$E_k = \int dp/dt dx = \int dp dx/dt = \int v dp$$

Dengan menggunakan definisi

$$d(vp) = vdp + pdv$$

atau

$$vdp = d(vp) - pdv$$

kita dapat tuliskan energi kinetik dalam bentuk,

$$E_k = \int [d(vp) - pdv]$$

$$E_k = vp - \int_{v=0}^v pdv = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \int_{v=0}^v \frac{m_0 v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} dv$$

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \int_{v=0}^v \frac{v}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} dv$$

(2.20d)

Integral ini dapat diselesaikan dengan mengambil pemisalan,

$$u = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right) \quad (2.20e)$$

$$du/dv = -2v/c^2$$

$$dv = -\frac{1}{2} c^2/v du$$

$$v dv = -\frac{1}{2} c^2 du \quad (2.20f)$$

substitusi persamaan (2.20e) dan (2.20f) ke bentuk (2.20d) sehingga didapat

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - m_0 \int_{v=0}^v \frac{\frac{1}{2} c^2}{u^{1/2}} du$$

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + m_0 \frac{1}{2} c^2 2u^{1/2} \Big|_0^v$$

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + m_0 c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \Big|_0^v$$

$$E_k = \frac{m_0 v^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} + m_0 c^2 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} - m_0 c^2$$

(2.20g)

Berdasarkan definisi masa relativitas dalam persamaan (2.19),

$$\frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = m \quad \text{atau} \quad m_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = m \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)$$

Sehingga persamaan (2.20g) dapat disusun kembali menjadi,

$$E_k = m c^2 - m_0 c^2 \quad \text{atau}$$

$$E_k = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right] \quad (2.21)$$

Parameter mc^2 dalam persamaan diatas merupakan besaran energi total atau energi partikel yang bergerak, biasanya ditulis dengan,

$$E = mc^2 \quad (2.21a)$$

Sedangkan m_0c^2 merupakan besaran energi untuk partikel dalam keadaan diam dan biasa ditulis dengan bentuk,

$$E_0 = m_0c^2$$

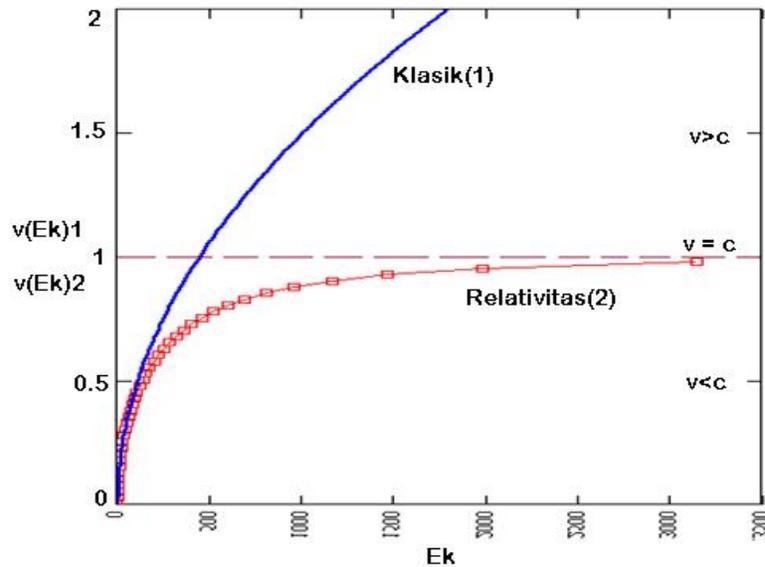
Jadi perbedaan antara E dan E_0 dinyatakan dengan besaran energi kinetik atau

$$E_k = E - E_0 \quad (2.21c)$$

Persamaan (2.21a) merupakan temuan Einstein, yang menyatakan besaran energi dalam satuan massa atau ekuivalensi antara massa dan energi. Suku sebelah kiri (E) merupakan besaran abstrak sedangkan suku sebelah kanan (m) merupakan besaran real. Secara tidak langsung persamaan (2.21a) menyamakan antara konsep abstrak dengan konsep real. Bagaimana mungkin besaran abstrak disamakan dengan besaran real?

Untuk memahami keanehan ini kita beralih sebentar kebidang biologi. Dalam konteks biologi tumbuhan yang terkena sinar matahari akan kelihatan gemuk dan banyak daun, sedangkan tumbuhan yang tidak kena matahari menjadi kurus dan kurang daun. Dari mana daun-daun itu muncul? Inilah proses perubahan energi matahari (abstrak) menjadi daun-daunan (real). Ini merupakan satu

contoh kebenaran konsep Einstein yang dirumuskan dalam persamaan (2.21a).



Gambar 2.17 Perbandingan Energi Kinetik klasik dan relativistik (Sumber: Halim, 2008)

Persamaan (2.21) merupakan bentuk rumusan energi kinetik dalam konteks relativitas. Persamaan ini berlaku untuk benda-benda yang bergerak dengan kecepatan rendah ($v \ll c$) dan juga untuk benda-benda yang bergerak dengan kecepatan tinggi atau mendekati kecepatan cahaya ($v \sim c$). Untuk kasus benda berkecepatan rendah ($v \ll c$) dan dengan menggunakan pendekatan matematik *binomial theorem* persamaan (2.21) dapat dirobah menjadi bentuk persamaan energi kinetik dalam tampilan mekanika klasik ($E_k = \frac{1}{2} mv^2$). Pembuktian ini diberikan kepada anda sebagai latihan (*homework*). Grafik dalam gambar 2.17 menunjukkan perbandingan konsep energi kinetik dalam pandangan klasik dan relativitas.

Dalam pandangan klasik penambahan energi kinetik dapat meningkatkan kecepatan benda melebihi kecepatan cahaya (garis *solid*), ini tentunya sesuatu yang tidak mungkin dalam pandangan relativitas. Sedangkan menurut pandangan konsep relativitas penambahan energi kinetik juga akan meningkatkan kecepatan benda, tetapi tidak melebihi kecepatan cahaya. Ini tentunya sesuai dengan postulat Einstein bahwa kecepatan tertinggi adalah kecepatan cahaya dalam ruang vakum. Perlu dipahami batasan ini hanyalah batasan teoritis yang dimunculkan oleh ide relativitas Einstein, namun demikian dalam kenyataannya benda-benda di alam ini tidak ada yang membatasi kecepatan gerakkannya. Dengan kata lain benda yang ada di alam bisa saja bergerak melebihi kecepatan cahaya, tetapi untuk menganalisis perilakunya tidak sesuai lagi digunakan hukum dan persamaan relativitas Einstein. Pada bagian terakhir Bab ini akan ditunjukkan satu jenis partikel yang bergerak melebihi kecepatan cahaya, bagaimanakah perilakunya?

2.13. Indikasi Baru dalam Relativitas

Pembahasan energi kinetik dalam pandangan klasik dan pandangan relativitas telah membawa pemikiran kita kesebuah pertanyaan; bagaimana kalau energi sebuah partikel terus ditambah apakah tidak mungkin pada suatu saat kecepatan partikel akan melebihi kecepatan cahaya? Bagaimana dengan besaran masa, panjang dan waktu untuk partikel yang bergerak sama atau melebihi kecepatan partikel? Apakah hukum-hukum yang telah dirumuskan Einstein masih dapat digunakan atau perlu dirumuskan persamaan dan hukum-hukum yang lain?

Inilah beberapa pertanyaan yang mungkin menjadi indikasi baru dalam mata kuliah Fisika Modern, khususnya masalah relativitas. Dalam bagian sekarang ini kita akan kaji masalah-masalah tersebut dengan mengacu pada persamaan dan hukum-hukum relativitas yang telah dirumuskan oleh Einstein dan rekan-rekannya.

2.13.1 Kaitan Energi dan Laju

Dalam mekanika klasik antara energi gerak dan kaju terdapat hubungan yang linear, artinya pada saat energi nol partikel akan diam atau kebalikannya. Dalam kasus relativitas partikel diam juga memiliki energi sebesar m_0c^2 , sedangkan energi total partikel dinyatakan dengan bentuk,

$$E = mc^2 = E_0 + E_k = \frac{m_0c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

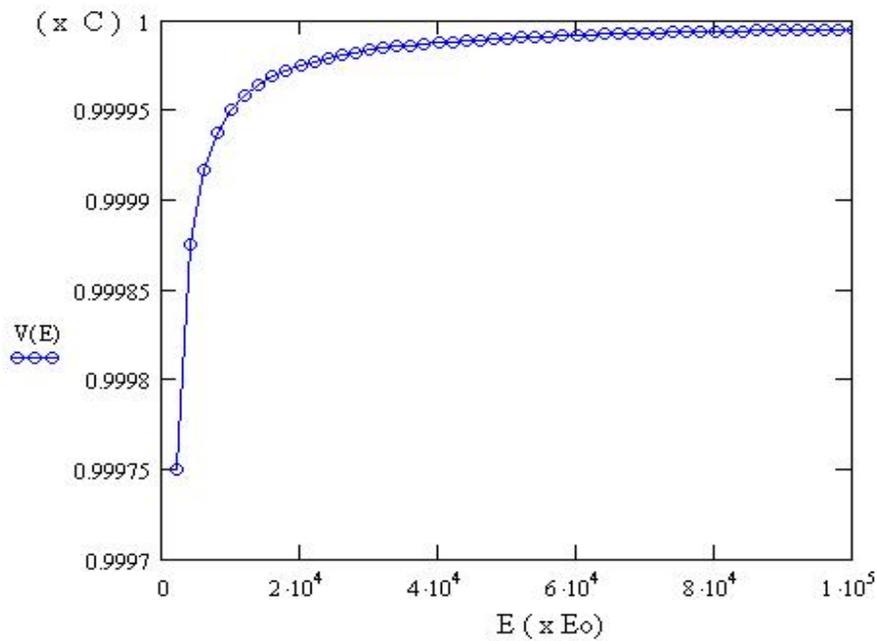
$$1 - \frac{v^2}{c^2} = \frac{m_0^2c^4}{E^2} = \frac{E_0}{E_k}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 1 - \frac{E_0^2}{E^2}$$

$$v = c \sqrt{1 - \frac{E_0^2}{E^2}}$$

(2.22)

Dengan $E_0/E < 1$, berdasarkan persamaan (2.22) menunjukkan kecepatan benda (v) hanya tergantung pada besaran atau suku E_0/E . Jika $E_0/E = 1$ atau $E_0 = E$ bermakna energi diam sama dengan energi total partikel atau benda berada dalam kondisi diam ($v = 0$).



Gambar 2.18 Kecepatan benda terhadap penambahan energi total
(Sumber: Halim, 2008)

Sebaliknya jika $E_0/E = 0$ atau bermakna energi total partikel sama dengan tak terhingga atau $E \sim 0$, maka kecepatan benda sama dengan kecepatan cahaya ($v = c$). Grafik dalam gambar 2.18 digambarkan berdasarkan persamaan (2.22). Berdasarkan gambar 2.18 dapat dipahami bahwa kecepatan benda akan menuju sama dengan kecepatan cahaya (c), jika energi total partikel (E) semakin besar dibandingkan dengan energi diam partikel (E_0). Permasalahannya apakah mungkin energi total partikel terus ditambah sehingga menuju tak terhingga besarnya, kalau ini mungkin berarti ada kemungkinan benda digerakkan dengan kecepatan menuju kekecepatan cahaya.

2.13.2 Tachyons

Dalam penjelasan diatas dikatakan bahwa untuk menggerakkan benda menuju kepada kecepatan cahaya diperlukan energi menuju tak terhingga besarnya. Karena tidak mungkin memperoleh energi menuju tak terhingga besarnya, maka tidak mungkin menggerakkan benda berkecepatan sama atau melebihi kecepatan cahaya.

Tetapi dalam kondisi seperti itu tidak berarti ilmuan berhenti daripada mencari partikel yang bergerak melebihi atau sama dengan kecepatan cahaya. Para ilmuan mengatakan tidak ada alasan mengapa suatu partikel tidak dapat bergerak sama atau melebihi kecepatan cahaya. Kalau dugaan ilmuan tersebut ada, maka kita dapat temukan persamaan energi dan momentum yang sesuai dari persamaan energi dan momentum relativitas yang pernah dibahas diatas.

$$P(\beta) = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$E(\beta) = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

(2.22a)

Dengan $\beta = v/c$. Jika partikel yang diduga oleh ilmuan benar-benar ada, maka untuk kecepatan benda sama atau lebih besar dari kecepatan cahaya ($v > c$) massanya harus imajiner atau berbentuk,

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{i(1 - \beta^2)}}$$

(2.22b)

Sehingga momentum dan energi total partikel juga dinyatakan dalam bentuk imajiner,

$$P(\beta) = \frac{m_0 \mathbf{v}}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

$$E(\beta) = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

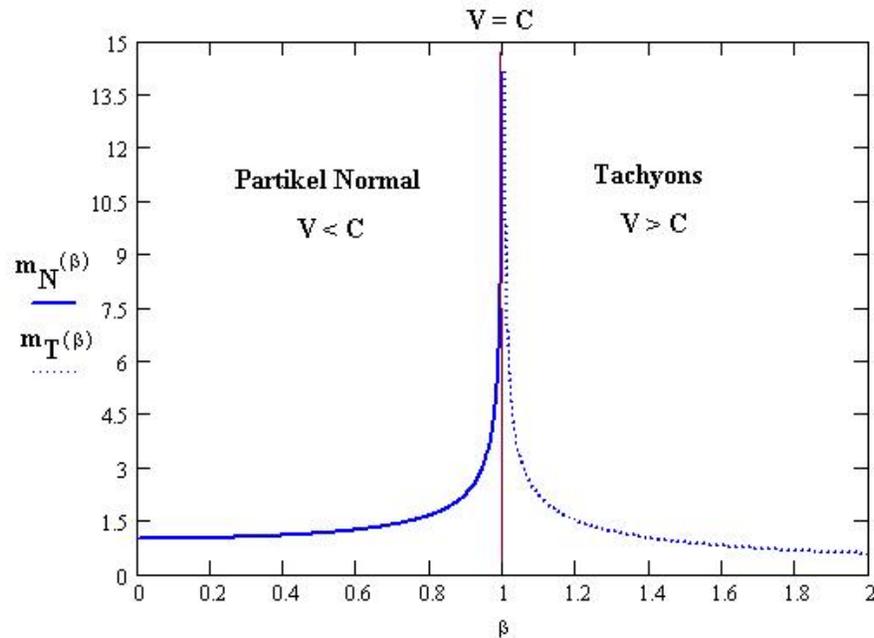
(2.22c)

Selanjutnya dengan menggunakan persamaan (2.22c) dapat dibentuk grafik yang menyatakan hubungan masa dengan laju partikel dalam batasan normal ($v < c$) dan batasan diatas kecepatan cahaya seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.19.

Gambar 2.19 menunjukkan bahwa masa benda akan bertambah sesuai dengan penambahan kecepatan benda menuju sama dengan kecepatan cahaya. Sebaliknya untuk "tachyons" masanya akan berkurang sesuai penambahan kecepatan. Tachyons berasal dari kata-kata Yunani bermakna "swift" artinya cepat. Partikel jenis ini berasal adalah satu jenis partikel. Pada saat kecepatan tachyon sama dengan kecepatan cahaya massanya menuju tak terhingga, sedangkan massa tachyon akan menuju nol pada saat kecepatan tachyons menuju tak terhingga besarnya.

Dalam 2.20 dibawah dibentuk grafik momentum dan energi untuk partikel normal dan tachyons. Untuk partikel normal laju partikel akan bertambah sesuai dengan penambahan energinya. Sedangkan untuk tachyons laju akan bertambah sesuai dengan kehilangan energi yang dimilikinya (garis putus dot). Oleh karena itu pada saat lajunya menuju tak terhingga energi tachyon menuju nol. Partikel seperti ini tidak mungkin diamati oleh kita yang hidup dialam

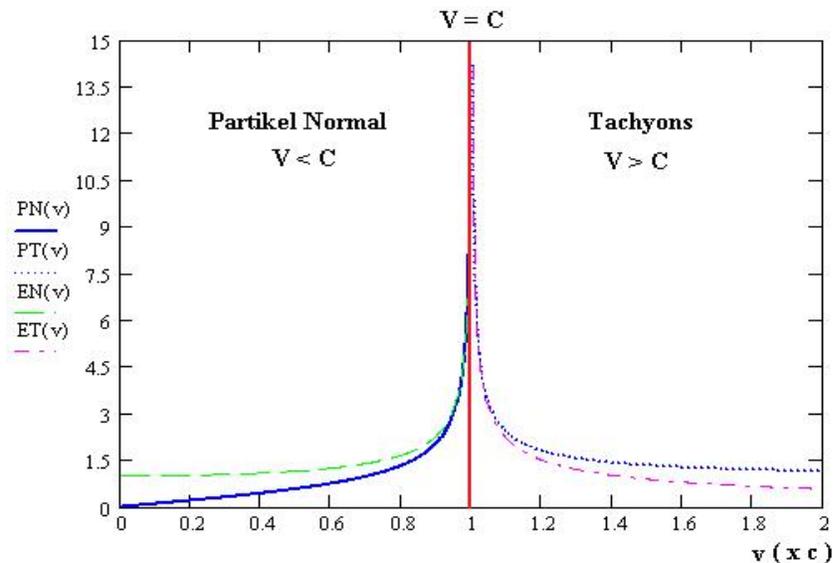
realitas seperti sekarang ini, hal itu disebabkan masa tachyon bersifat imajiner.



Gambar 2.19 Karakteristik masa partikel normal dan Tachyons didasarkan pada persamaan (2.22b) dan (2.19) (Sumber: Halim, 2008)

Jika kita kembali pada postula ke-II yang dikemukakan oleh Einstein bahwa; kecepatan cahaya adalah bersifat universal tidak tergantung pada kerangka acuan pengamat dan juga merupakan kecepatan tertinggi yang hanya dapat dicapai oleh cahaya. Berdasarkan kenyataan ini muncullah berbagai macam pertanyaan. Apakah mungkin suatu partikel bergerak melebihi kecepatan cahaya? Apakah hukum relativitas Einstein perlu direvisi? Perlu diingat bahwa hukum yang dirumuskan Einstein bersifat teoritis dan partikel di alam ini tidak mengetahui ada batasan kecepatan cahaya yang disyaratkan

oleh Einstein. So... boleh boleh saja partikel bergerak melebihi atau kurang dari kecepatan cahaya... suka..suka pertikel.

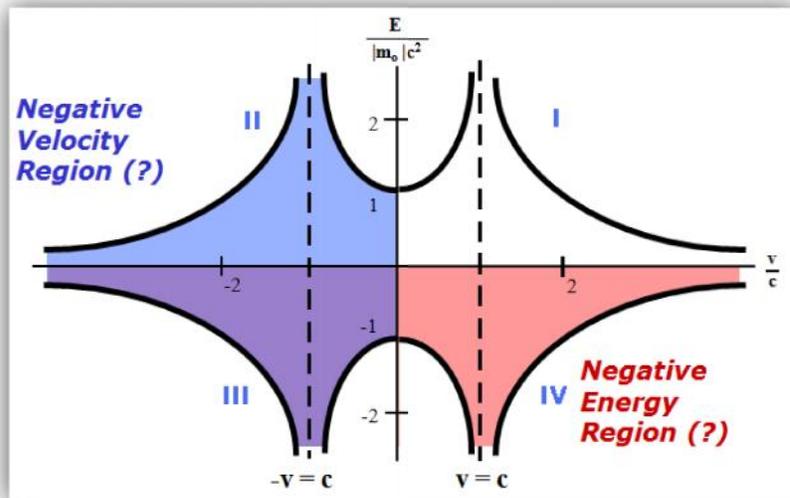


Gambar 2.20 Karakteristik Momentum dan Energi partikel Normal dan Tachyons.
(Sumber: Halim, 2008)

Bukti ilmiah yang menunjukkan bahwa ada partikel yang bergerak melebihi kecepatan cahaya dapat dirujuk pada tiga artikel yang membahas secara mendetail tentang tachyons, yaitu (Taylor, 1969; Krisler, 1973; Alvager & Krisler, 1968). Dari analisa tersebut ada indikasi bahwa teori Relativitas Einstein tidak dapat diterapkan di daerah (ruang) luar angkasa, seharusnya seperti Tachyons yang diramalkan terdapat dalam quarkes. Quarkes adalah partikel teringan yang terdapat (dipancarkan) setelah ledakan besar atau "Big Bang", demikian diperkirakan oleh Gordon Kane Dalen (1993) dari Universitas Michigan, Chicago.

2.13.3 Konsep Simetri Alamiah

Jika kita teliti lebih jauh kedua grafik dalam gambar 2.19 dan 2.20 kita dapat sesuatu yang menarik yaitu sifat simetris antara kecepatan partikel kurang dari c dan lebih dari c . Fakta simetris tersebut ternyata merupakan sebagian kecil pengetahuan yang baru kita ketahui dari banyak ungkapan sifat simetri yang terdapat di alam ini (lihat grafik dalam gambar 2.21 berikut). Kita belum dapat memahami beberapa kuantitas negatif yang muncul dalam fisika, seperti momentum negatif, energi negatif, kecepatan negatif, dll. Pemahaman kita selama ini tentang konsep relativitas hanya terbatas tentang konsep "alam semesta tiga ruang" (tri-space universe), yaitu kuadrat I dalam gambar 2.21.



Gambar 2.21 Konsep Simetri dalam Relativitas
(Sumber: Gregory V.Meholic, 2004)

Berdasarkan grafik tersebut dapat dipahami bahwa terdapat "tiga alam semesta simetri" lagi yang belum kita ketahui, yaitu alam

kuadrat ke-II, III, dan ke-IV. Ketiga alam terakhir ini memiliki kuantitas-kuantitas negatif dan abstrak. Apakah memang ada alam simetri ini dalam kenyataan sebenarnya. Wallahu 'alam.

Untuk memahami fenomena ini secara teoritis, kata pelajari lebih mendetail tentang grafik dalam gambar 2.21. Grafik yang terdapat dalam gambar 2.21 dibentuk melalui kombinasi dua persamaan relativitas khusus, yaitu antara persamaan:

$$m = \frac{m_o}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

dan persamaan

$$E = mc^2$$

Sehingga didapat

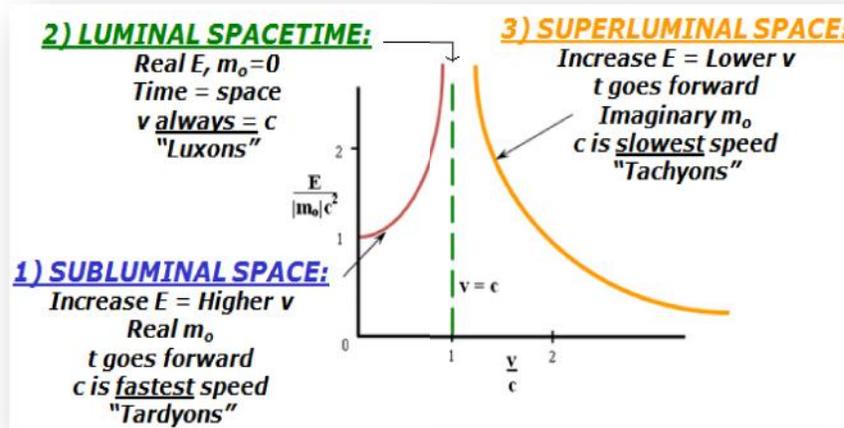
$$E = \frac{m_o c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Dengan melakukan normalisasi terhadap kecepatan, maka didapat hubungan antara masa, energi dan kecepatan.

$$\frac{E}{|m_o|c^2} = \frac{1}{\pm \sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

Persamaan terakhir inilah yang dijadikan sebagai sumber atau acuan pembentukan grafik dalam gambar 2.21. Grafik dalam kuadran I (sebelah kanan bagian atas) merupakan bentuk yang sudah dikenal

dalam gambar 2.19 dan 2.20 diatas. Kita akan bahas secara lebih terperinci konsep alam semesta tiga ruang seperti yang ditunjukkan dalam gambar 2.22 berikut.



Gambar 2.22 Konsep alam semesta tiga ruang
 (Sumber: Gregory V.Meholic, 2004)

Sesuai dengan kecepatan partikel, ruang alam semesta dibagikan kepada tiga bagian; ruang I ($v < c$), ruang II ($v = c$), dan ruang III ($v > c$). Konsep dalam ruang I penambahan energi akan menaikkan kecepatan partikel, masa partikel riil, waktu bergerak kedepan, dan c adalah kecepatan tertinggi. Ruang I ini dikenal sebagai ruang berkategori partikel "Tardyons" yang mana perilaku partikel ini sesuai dengan hukum relativitas Einsten. Konsep ruang II penambahan energi tidak akan menambahn kecepatan, masa dan energi bersifat riil, waktu menyatu dengan ruang, dan kecepatan benda selalu sama dengan c . Kategori partikel dalam ruang II ini dikenal dengan kelompok "Luxons" yang mana perilaku partikel ini tidak dapat diterangkan dengan hanya mengandalkan hukum relativitas Einsten.

Sedangkan konsep dalam ruang III berlaku; penambahan energi akan menyebabkan terjadi pengurangan kecepatan partikel, waktu bergerak ke depan, masa imajiner, dan kecepatan terendah adalah c . Jenis partikel dalam ruang ini dikenal dengan kategori kelas "Tachyons". Dengan demikian dapat dipahami bahwa ruang I dan III merupakan ruang koordinat jarak, sedangkan ruang I dikenal dengan ruang waktu (*spacetime*).

2.14. Contoh Soal dan Latihan Rumah

Berikut akan ditunjukkan dua bagian; contoh soal dan latihan rumah. Setelah anda mempelajari metode penyelesaian soal diharapkan anda mampu mencoba menyelesaikan soal-soal dan latihan.

Contoh 2.5

Berapakah cepat muon harus bergerak agar ia tetap "hidup" ketika tiba di permukaan bumi?. Bila waktu paruh muon menurut pengamat di muon adalah 2×10^{-6} detik. Dan jarak dari titik start muon ke bumi adalah 100 km.

Jawaban

Persamaannya:

$$Ut' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Dimana Δt merupakan waktu paruh menurut pengamat di muon, sementara Δt^1 waktu tempuh selama 100 km menurut pengamat di Bumi, yang besarnya:

$$Ut' = \frac{100 \text{ km}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \cong 3 \times 10^{-4} \text{ m/s}$$

Kita gunakan tanda \cong , karena kecepatan muon $\cong C$, sehingga:

$$3 \times 10^{-4} = \frac{2 \times 10^{-6}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

$$\frac{v^2}{c^2} = 1 - \left[\frac{2 \times 10^{-6}}{3 \times 10^{-4}} \right]^2$$

$$v \cong 0.9998c$$

Contoh 2.6

Seorang pengamat sedang berdiri pada sebuah peron stasiun ketika sebuah kereta api modern berkecepatan tinggi melwatinya dngan laju $U = 0.8 C$. Pengamat tersebut, yang menurutnya panjang peron 60 m, suatu saat mencatat bahwa ujung-ujung kereta api tepat dengan ujung garis stasiun tersebut. Maka tentukanlah:

- Menurut pengamat di peron, berapa lamakah waktu yang di butuh kereta api untuk melewati suatu titik tetap di peron?
- Berapa panjang kereta api yang sebenarnya (panjang proper)?
- Berapa panjang peron menurut pengamat di kereta api?
- Menurut pengamat di kereta api, berapa lamakah waktu yang diperlukan kereta api untuk melewati sebuah titik tetap pada peron?

Jawaban

Pemecahan soal ini, kita gunakan persamaan (2.15), yaitu:

$$L' = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

Dimana L adalah panjang proper (sejati), sedangkan L' adalah panjang relatif.

- (a) Panjang peron menurut pengamat di peron adalah panjang sejati atau $L_p = 60$ m. Dengan demikian menurutnya waktu yang dibutuhkan kereta api untuk melewati titik tetap adalah:

$$\Delta t' = \frac{L_p}{v} = \frac{60 \text{ m}}{2.4 \times 10^8 \text{ m/s}} = 2.5 \times 10^{-7} \text{ s}$$

- (b) Panjang sejati kereta api dapat diperoleh melalui pengambilan panjang relatif kereta api oleh pengamat di peron $L_t^1 = 60$ m, sehingga:

$$L_t = \frac{L_t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{60 \text{ m}}{\sqrt{1 - (0.8)^2}} = 100 \text{ m}$$

Merupakan panjang kereta api yang sebenarnya atau panjang proper.

- (c) Panjang peron menurut pengamat di kereta api, dapat diperoleh dengan mengambil panjang proper peron 60 m, yaitu:

$$L_p' = L_p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 60 \text{ m} \sqrt{1 - (0.8)^2} = 36 \text{ m}$$

Ini merupakan panjang relatif peron

- (d) Karena panjang proper kereta api 100 m, maka waktu yang diperlukan untuk melewati titik tetap di peron adalah:

$$\Delta t' = \frac{L_t}{v} = \frac{100 \text{ m}}{2.4 \times 10^8 \text{ m/s}} = 4.2 \times 10^{-7} \text{ s}$$

Contoh 2.7

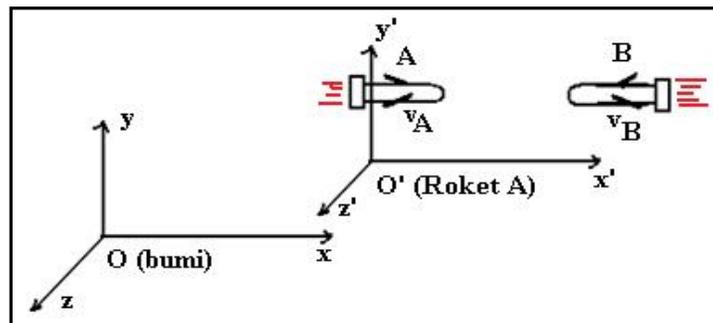
Dua buah raket, A dan B, masing-masing berpindah dengan laju $0.9 C$ relatif terhadap bumi (lihat gambar). Maka tentukanlah laju relatif B terhadap A.

Jawaban

V_x = laju raket B diukur oleh pengamat di O, V = laju relatif antara raket A (pengamat di O^1) dengan pengamat di bumi (O). Dalam hal ini $V = 0.9 C$ dan $V_x = -0.9 C$, sehingga laju raket B relatif terhadap raket A (pengamat di O^1) seperti dalam gambar 2.21.

$$v'_x = \frac{v_x - v}{1 - \frac{v v_x}{c^2}} = \frac{-0.9c - 0.9c}{1 - \left[\frac{(0.9c)(-0.9c)}{c^2} \right]} = -0.9945c$$

Jadi menurut pengamat raket A, raket B berpindah dengan laju $0.9945 C$ dalam arah $-x$.



Gambar 2.21 Ilustrasi Contoh 2.7

(Sumber: Halim, 2008)

- (4) Menurut pengamat yang diam terhadap kerangka O^1 mengamati batang yang panjangnya 1 m dan membuat sudut 45° terhadap sumbu x^1 . Tentukanlah panjang batang tersebut dan sudut yang dibentuk terhadap sumbu x menurut pengamat di O , bila $V = \sqrt{3}/2 C$.

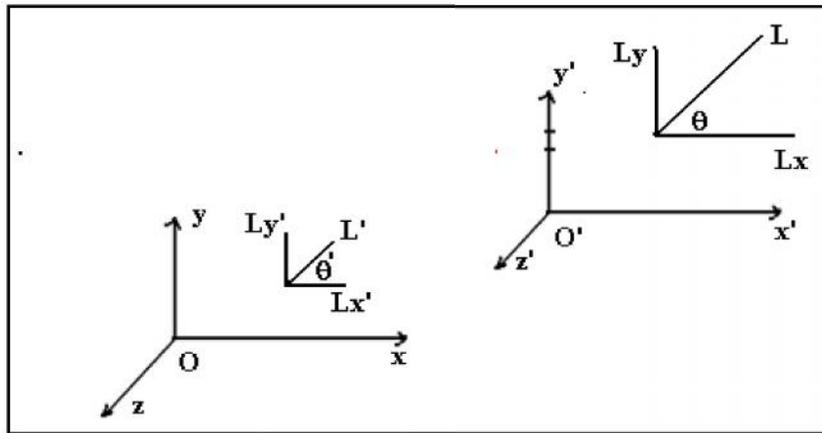
Jawaban

Dalam kerangka O^1 , panjang batang kita nyatakan seperti diagram dalam gambar 2.22. Dimana L adalah panjang proper yang diamati oleh pengamat dalam kerangka yang diam terhadapnya (O^1). Berdasarkan persamaan (2.1a) telah kita ketahui bahwa koordinat yang tegak lurus terhadap arah gerak relatif adalah tidak berubah, sehingga dari gambar 2.22 belaku:

$$L'y = Ly = L \sin \theta$$

Sementara komponen x berubah sesuai dengan besar V , sehingga:

$$L_x' = L_x \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = L \cos \theta \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$



Gambar 2.22 Ilustrasi Contoh 2.7

(Sumber: Halim, 2008)

Dengan demikian panjang batang dan sudut yang dibentuk terhadap sumbu x menurut pengamat di O adalah:

$$L_p' = \sqrt{L_x'^2 - L_y'^2} = L \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2} \cos^2 \theta}$$

Dan

$$\tan \theta = \frac{L_y'}{L_x'} = \frac{\tan \theta}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Berdasarkan nilai yang diketahui $L = 1 \text{ m}$, $\theta = 45^\circ$ dan $V = \sqrt{3}/2 \text{ C}$ didapati:

$$L' = 1 \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2 \cos^2 45}$$

$$L' = 0.625 \text{ m}$$

Dan $\theta = 63^\circ, 27''$ dan untuk

$$L_x' = L \cos 45^\circ \sqrt{1 - \left(\frac{\sqrt{3}}{2}\right)^2}$$

$$L_x' = 0.353 \text{ m}$$

- (5) Berapa laju sebuah proton?, agar massanya menjadi 2 kali dari massa diamnya.

Jawaban

Dari persamaan (2.18c) didapati:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Untuk $m = 2m_0$

$$\frac{m}{m_0} = 2 = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Sehingga diselesaikan didapat

$$v = \frac{\sqrt{3}}{2}c = 0.866c$$

Rangkuman

Teori relativitas Albert Einstein adalah sebutan untuk kumpulan dua teori fisika: relativitas dan relativitas. Kedua teori ini diciptakan untuk menjelaskan bahwa gelombang elektromagnetik tidak sesuai dengan teori gerakan Newton. Gelombang elektromagnetik dibuktikan bergerak pada kecepatan yang konstan, tanpa dipengaruhi gerakan sang pengamat. Inti pemikiran dari kedua teori ini adalah bahwa dua pengamat yang bergerak relatif terhadap masing-masing akan mendapatkan waktu dan interval ruang yang berbeda untuk kejadian yang sama, namun isi hukum fisika akan terlihat sama oleh keduanya.

Dalam pandangan klasik tidak pernah dipersoalkan apakah pengamat yang mengamati sebuah objek dalam keadaan diam atau bergerak. Hal ini disebabkan hasil pengamatan yang diperoleh tetap sama (pengamat diam atau bergerak). Dalam soal seperti itu tidak pernah dipersoalkan bagaimana keadaan orang yang mengamati (pengamat) gerakan benda tersebut, apakah pengamat dalam keadaan diam atau bergerak. Sebaliknya dalam pandangan konsep relativitas hasil pengamatan terhadap sebuah objek sangat tergantung pada keadaan pengamat, apakah pengamat dalam diam atau bergerak. Bila pengamat bergerak relatif terhadap objek hasil pengamatan akan berbeda dengan hasil yang diamati oleh pengamat yang bergerak relatif terhadap objek.

Di dalam percobaan Michelson-Morley telah melakukan perputaran seperti itu dan dilakukan berulang kali, namun pergeseran pola interferensi yang diharapkan sebelumnya tidak pernah teramati. Hal ini membuktikan bahwa ramalan ada eter di antara bumi dan matahari tidak dapat dipertahankan. Lebih jauh hasil ini juga menunjukkan bahwa gerak cahaya dalam alam semesta tidak mengikuti kaedah relatif, seperti diungkapkan dalam transformasi Galileo. Hal ini mendorong Einstein untuk mengemukakan konsep baru dalam teorema relativitas.

Muon diproduksi dari hasil tumbukan dengan sinar kosmik dengan atom-atom yang ada ribuan kilometer diatas permukaan Bumi. Waktu hidup Muon sekitar 1.5×10^{-8} s (proper time) yang diukur dalam kerangka Muon dan Muon bergerak dengan kecepatan $0.994c$. Tujuan percobaan ini untuk membuktikan bahwa hasil pengukuran persentase muon yang tersisa dipermukaan Bumi (data lapangan) sama dengan hasil perhitungan secara relativitas (data perhitungan). Untuk mencapai tujuan tersebut dilakukan perhitungan melalui tiga cara. Pertama perhitungan dengan cara biasa (konsep klasik) tanpa memperhitungkan efek relativitas. Kedua perhitungan dengan cara memasukkan efek relativitas pada besaran panjang. Ketiga perhitungan dengan cara memasukkan efek relativitas pada besaran waktu.

Dalam pandangan klasik penambahan energi kinetik dapat meningkatkan kecepatan benda melebihi kecepatan cahaya (garis *solid*), ini tentunya sesuatu yang tidak mungkin dalam pandangan relativitas. Sedangkan menurut pandangan konsep relativitas penambahan energi kinetik juga akan meningkatkan kecepatan benda, tetapi tidak melebihi kecepatan cahaya. Ini tentunya sesuai dengan postulat Einstein bahwa kecepatan tertinggi adalah kecepatan cahaya dalam ruang vakum. Perlu dipahami batasan ini hanyalah batasan teoritis yang dimunculkan oleh ide relativitas Einstein, namun demikian dalam kenyataannya benda-benda di alam ini tidak ada yang membatasi kecepatan gerakkannya. Dengan kata lain benda yang ada di alam bisa saja bergerak melebihi kecepatan cahaya, tetapi untuk menganalisis perilakunya tidak sesuai lagi digunakan hukum dan persamaan relativitas Einstein. Pada bagian terakhir Bab ini akan ditunjukkan satu jenis partikel yang bergerak melebihi kecepatan cahaya, bagaimanakah perilakunya?

Latihan

- (1) Suatu batang panjangnya 1 m dan berada dalam kerangka O. Panjang batang tersebut sedang diukur oleh pengamat dalam kerangka O^1 yang bergerak relatif terhadapnya dengan laju. Berapa laju V sehingga pengamat dalam kerangka O^1 melihat panjang batang:
- 0.99 m,
 - 0.5 m.
- (2) Sebuah kubus bergerak dengan laju V dalam arah paralel dengan salah satu sisinya. Tunjukkan bahwa volume V dari kubus tersebut dan kerapatannya diberikan oleh:

$$v' = v \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

$$\text{dan } \rho = \gamma m_0 v$$

Dimana M_0 dan V adalah massa dan volume proper (sejati)

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

- (3) Suatu batang panjangnya 1 m dalam kerangka O dan membentuk sudut 30° dengan sumbu x . Berapa kecepatan kerangka O^1 yang relatif terhadap kerangka O, bila kelihatan oleh pengamat di O^1 batang tersebut membentuk sudut 45° terhadap sumbu x^1 .
- (4) Gunakan penjumlahan relativitas untuk kecepatan agar dapat ditunjukkan bahwa (a) $V_x^1 = C$, jika salah satu $V_x = C$ atau $V = C$

terpenuhi, (b) $V_x^1 < C$, jika kedua-duanya $V_x < C$ dan $V < C$ terpenuhi.

- (5) Tunjukkan bahwa momentum relativitas dari suatu partikel dapat ditulis dalam bentuk:

$$p = \frac{(2E_0K + K^2)^{1/2}}{c}$$

Berapa nilai P untuk (a) $\beta \rightarrow 0$, dan (b) $\beta \rightarrow 1$. ($\beta = V/C$)

- (6) Carilah energi total, energi kinetik, dan momentum sebuah proton ($M_0C = 938 \text{ MeV}$) yang bergerak dengan laju $V/C = 0.800$
- (7) Buktikan bahwa untuk kasus benda berkecepatan rendah ($v \ll c$), persamaan energi kinetik relativitas

$$E_k = m_0 c^2 \left[\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right]$$

Dapat dinyatakan dalam bentuk

$$E_k = \frac{1}{2} m v^2$$

(petunjuk: gunakan teori deret binomial)

Momentum dan energi relativistik partikel dapat dihubungkan dengan memanfaatkan persamaan Einstein yang terkenal $E = mc^2$ dan definisi momentum,

Glossarium

Teori relativitas Albert Einstein adalah sebutan untuk kumpulan dua teori fisika: relativitas dan relativitas. Kedua teori ini diciptakan untuk menjelaskan bahwa gelombang elektromagnetik tidak sesuai dengan teori gerakan Newton.

Relativitas khusus menunjukkan bahwa jika dua pengamat berada dalam kerangka acuan lembam dan bergerak dengan kecepatan sama relatif terhadap pengamat lain, maka kedua pengamat tersebut tidak dapat melakukan percobaan untuk menentukan apakah mereka bergerak atau diam.

Relativitas umum menggantikan hukum gravitasi Newton. Teori ini menggunakan matematika geometri diferensial dan tensor untuk menjelaskan gravitasi. Teori ini memiliki bentuk yang sama bagi seluruh pengamat, baik bagi pengamat yang bergerak dalam kerangka acuan lembam ataupun bagi pengamat yang bergerak dalam kerangka acuan yang dipercepat.

Transformasi Galileo merupakan bentuk transformasi yang menjembatani konsep klasik dan relativitas. Dalam transformasi kita kenal dua kerangka acuan. Salah satu terhadap yang lain tergantung secara relatif. Misal masing-masing kerangka acuan dinyatakan dengan S dan S' , di mana S' adalah bergerak dengan kecepatan v terhadap S dalam arah tertentu.

Transformasi Lorentz memandang bahwa transformasi Galileo tidak cukup mampu menjelaskan apa yang terjadi pada dunia elektromagnetis dan Lorentz mengusulkan revisinya. Ia berpegang pada asumsi bahwa tiap pengamat memiliki "waktu tersendiri".

Tachyons berasal dari kata-kata Yunani bermakna "swift" artinya cepat. Partikel jenis ini berasal adalah satu jenis partikel Pada saat kecepatan tachyon sama dengan kecepatan cahaya massanya menuju tak terhingga, sedangkan massa tachyon akan menuju nol pada saat kecepatan tachyons menuju tak terhingga besarnya.

Daftar Pustaka

- Arya, A.P. 2004. *Elementary Modern Physics*. California: Addison-Wesley.
- Beiser, A. 2001. *Concepts of Modern Physics* (3rd edition). New York: McGraw-Hill Inc.
- Halim A, 2008. *Dokumen (foto dan grafik) Mata Kuliah Fisika Modern*, FKIP Unsyiah (tidak dipublikasi)
- Krane, K. 2001. *Fisika Modern*. Diterjemahkan oleh Hans J. Wospakrik. 1992. Jakarta, Indonesia: UI-Press.
- Kusminarto. 1992. *Pokok-pokok Fisika Modern*. Jakarta: DIKTI.
- Serway, R.A., Moses, C.J. & Moyer, C.A. 2005. *Modern Physics* (3rd Edition). United Kingdom: Thomson.
- Taylor, J.R., Zafiratos, C.D., Dubson M.A. 2004. *Modern Physics for Scientists and Engineers* (2nd Edition). Pearson, London: Prentice-Hall.
- Sutrisno. 2002. *Fisika Dasar: Fisika Modern*. Bandung: Penerbit ITB.
- Gregory V. Meholic. 2004. *A Novel View of Spacetime Permitting Faster-than-Light Travel*, February 10, 2004 Space Technologies and Applications International Forum Albuquerque, NM

BAB III

FENOMENA KUANTUM

Tujuan Umum Pembelajaran

Setelah mahasiswa membaca Bab Fenomena Kuantum ini diharapkan mampu memahami dan menguraikan berbagai bentuk gejala kuantum serta mampu menjelaskan beberapa eksperimen yang mendukung fenomena kuantum. Melalui materi dalam Bab ini juga diharapkan mahasiswa mampu mengemukakan beberapa contoh penerapan konsep kuantum dalam kehidupan sehari-hari

Tujuan Khusus Pembelajaran

Setelah mahasiswa mempelajari isi Bab Fenomena Kuantum ini secara khusus diharapkan mahasiswa dapat

- (1) Menjelaskan secara ringkas kegagalan konsep cahaya yang dikemukakan oleh teori elektromagnetik Maxwell
- (2) Menjelaskan pengertian radiasi benda hitam sempurna.
- (3) Menurunkan dan memahami hukum Rayleigh-Jean tentang pandangan klasik radiasi benda hitam.
- (4) Menurunkan dan memahami hukum Planck tentang pandangan modern radiasi benda hitam.
- (5) Memahami dan menjelaskan fenomena bencana ultraviolet

3.1 Pengantar

Dalam bahagian Bab IV ini, kita akan kaji peranan benda-benda mikro dari peristiwa-peristiwa yang ada di alam semesta. Pembahasan akan diawali dengan penjelasan tentang konsep cahaya, yang dianggap sebagai sesuatu yang misteri. Teori klasik mengatakan cahaya sebagai gelombang yang didukung oleh beberapa hasil eksperimen, sementara teori moderen (kuantum) mengatakan cahaya dapat berperilaku sebagai partikel, yang juga didukung oleh beberapa hasil eksperimen. Kedua teori tersebut secara mendetail akan dijelaskan dalam Bab IV ini.

3.2 Kegagalan Teori Gelombang Cahaya

Semenjak abad ke-16 sampai dengan sekarang ini konsep tentang cahaya masih menjadi sesuatu yang misteri. Dua konsep penting dan saling bertentangan telah dikemukakan tentang pengertian cahaya. Pertama dikemukakan oleh Newton (1643-1727), yang mengatakan bahwa cahaya terdiri (tersusun) atas partikel individu yang dipancarkan oleh sumber cahaya dan merambat dalam ruang berbentuk garis lurus. Sebaliknya oleh Huggens (1629-1695) mengatakan bahwa cahaya berbentuk gelombang, seperti halnya gelombang air yang permulaannya berbentuk lingkaran. Dari dua konsep yang berbeda ini, sepanjang sejarah fisika terjadi perselisihan yang agak serius diantara fisikawan. Tetapi hal yang mengherankan kedua konsep tersebut, menurut pengetahuan kita sekarang ini, adalah benar dan dapat didefinisi dengan baik secara fisis dan matematis.

Setelah abad ke-16, orang mulai meninggalkan konsep "Cahaya Sebagai Partikel" yang dikemukakan oleh Newton, para ilmuwan mulai meyakini ide yang dikemukakan oleh Huggens. Hal ini disebabkan banyak eksperimen (seperti peristiwa difraksi, refleksi, interferensii, dst) dapat ditunjukkan oleh cahaya. Secara teoritis,

Maxwell (1813-1879) berhasil merumuskan persamaan gelombang cahaya yang merambat dalam ruang vakum. Ini merupakan suatu-suatunya teori yang memperkuat konsep cahaya sebagai gelombang dan Maxwell berhasil mengkategorikan cahaya sebagai gelombang elektromagnetik. Berikut kita akan bahas secara singkat bagaimana Maxwell merumuskan persamaan gelombang untuk cahaya tersebut.

Persamaan-persamaan dasar Maxwell tentang gelombang elektromagnetik dalam ruang hampa ditulis dalam bentuk:

$$\nabla \cdot (\epsilon \mathbf{E}) = \rho \quad [\text{coulomb/m}^2] \quad (3.1a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad [\text{weber/m}^2] \quad (3.1b)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad [\text{volt/m}^2] \quad (3.1c)$$

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} \mathbf{B} = \mathbf{J} + \frac{\partial(\epsilon \mathbf{E})}{\partial t} \quad [\text{amper/m}^2] \quad (3.1d)$$

Di mana ρ dan \mathbf{J} adalah rapat muatan listrik (coulomb/m^2) dan rapat arus listrik (ampere/m^2). Kita dapat hitung parameter \mathbf{B} dalam persamaan (3.1c) dengan melakukan operasi Curl pada komponen \mathbf{E} dan \mathbf{B} di kedua sisi persamaan (3.1c).

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) \quad (3.1e)$$

Kemudian kita samakan persamaan (3.1d) dengan (3.1e), sehingga didapat.

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = -\mu_0 \frac{\partial \mathbf{J}}{\partial t}$$

Parameter $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E})$ dapat disederhanakan dengan pengambilan identitas vektor

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = \nabla \cdot (\nabla \cdot \mathbf{E}) - (\nabla^2 \cdot \mathbf{E})$$

Bila medan \mathbf{E} tidak divergen, maka $\nabla \cdot \mathbf{E} = \mathbf{0}$, sehingga didapat hubungan dalam bentuk

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) = -(\nabla^2 \cdot \mathbf{E}) \quad (3.1f)$$

Dengan demikian bentuk di atas dapat ditulis menjadi,

$$\nabla^2 \cdot \mathbf{E} - \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = 0 \quad (3.2)$$

Ini merupakan bentuk persamaan gelombang cahaya atau bentuk umum persamaan gelombang elektromagnetik dalam ruang tiga dimensi. Gelombang cahaya tersebut merambat dalam ruang hampa atau dalam ruang yang bebas dari sumber muatan dan sumber arus ($\mu_0 \epsilon_0$). Persamaan 3.2 dapat diselesaikan dengan memilih solusi coba-coba

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 \sin(kz - \omega t) \quad (3.2a)$$

Di mana k adalah bilangan gelombang yang besarnya $k = 2\pi/\lambda$, sedangkan ω adalah frekuensi angular. Persamaan (3.20) dan (3.2a) dapat juga diturunkan untuk parameter \mathbf{B} . Selanjutnya laju intensitas (daya) P dapat ditentukan dari definisi "vektor poyting" \mathbf{S} , yaitu:

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \quad (3.2b)$$

Dan definisi daya dalam arah z

$$\mathbf{P} = \mathbf{S} \cdot \mathbf{A} \quad (3.2c)$$

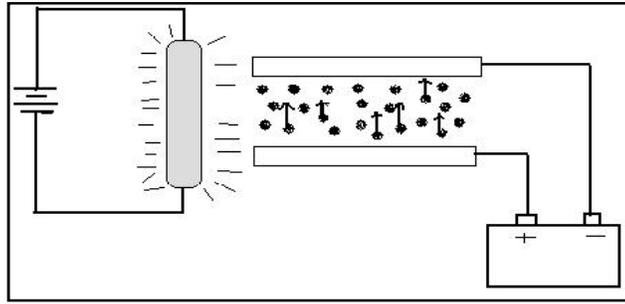
Dengan memanfaatkan dua definisi tersebut, kita dapatkan intensitas gelombang cahaya ditulis dalam bentuk

$$P = \frac{1}{\mu_0 c} E_0^2 A \sin^2(kz - \omega t) \quad (3.3)$$

Dalam penjelasan yang akan datang, kita akan kemukakan percobaan yang hasilnya bertentangan dengan persamaan (3.2) dan (3.3). Hal yang menarik dari persamaan (3.3) adalah intensitas berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo gelombang E_0^2 dan berfluktuasi terhadap waktu frekuensi angular $\omega = 2\pi f$.

Berikut akan kita tunjukkan sesuatu eksperimen, dimana hasil eksperimen tersebut tidak dapat dijelaskan oleh cahaya, bila dianggap gelombang. Bila benda yang dikenai cahaya ukurannya jauh lebih besar dari panjang gelombangnya, maka efek pembiasan dan pemantulan yang lebih menonjol. Sebaliknya bila ukuran benda tersebut mendekati panjang gelombang, maka yang lebih menonjol adalah efek difraksi dan interferensi. Selanjutnya bila ukuran benda sama dengan panjang gelombang cahaya, maka saat cahaya mengenai benda (dalam hal ini sama dengan ukuran atom), maka ia akan diserap dalam bentuk energi radiasi. Kemudian elektron dalam atom akan memanfaatkan energi tersebut untuk membebaskan diri dari ikatan pola atom. Bila elektron berhasil melepaskan diri dari ikatan dengan atom, maka atom tersebut berubah menjadi ion positif atau atom tersebut terionisasi.

Dalam percobaan berikut, sumber cahaya kita gunakan lampu Neon berwarna "ultraviolet", sementara "benda" yang akan "ditumbuk" oleh gelombang elektromagnetik u-v adalah tetesan minyak seperti dalam gambar (3.1)

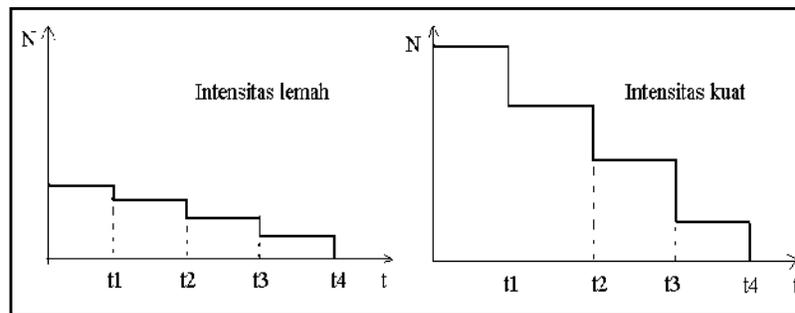


Gambar 3.1 Ilustrasi percobaan tetesan minyak Andrew Millikan
(Sumber: Sutrisno, 2003; 34)

Sebelum percobaan kita laksanakan, kita membuat dulu dugaan berdasarkan persamaan (3.2) dan (3.3). Parameter yang bergetar dalam gelombang cahaya menurut kedua persamaan tersebut adalah medan listrik E . Selanjutnya, dari persamaan (3.3) dapat juga dilihat bahwa intensitas cahaya berbanding lurus dengan kuadrat medan E , ini artinya bila intensitas lemah, maka medan E juga lemah. Dengan kata lain bila intensitas cahaya lemah, maka efek getaran medan E terhadap elektron dalam atom juga lemah, sehingga untuk melepaskan elektron dalam atom memerlukan waktu yang lebih lama dibandingkan dengan cahaya yang intensitasnya lebih besar. Ini dugaan yang kita buat !!.

Hasil percobaan menunjukkan atom-atom yang terionisasi terjadi setelah cahaya $u-v$ disinari, baik intensitasnya lemah atau kuat, itu tidak ada beda. Yang membedakan antara kedua intensitas tersebut adalah "jumlah" atom yang terionisasi. Untuk intensitas lemah didapati jumlah atom yang terionisasi sedikit, sementara untuk intensitas kuat didapati jumlah ion yang lebih banyak, tapi keduanya terjadi dalam selang waktu yang sama. Hasilnya ditunjukkan dalam gambar 3.2. Berdasarkan diagram dalam gambar 3.2 tampak bahwa terjadi ionisasi oleh cahaya lemah sama dengan selang waktu yang

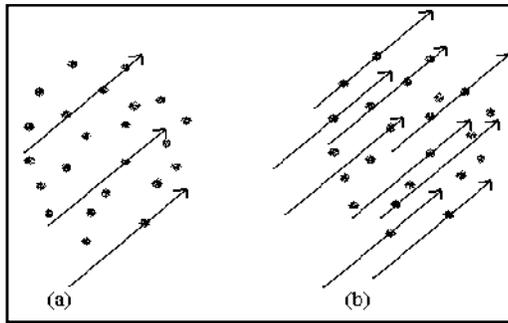
terjadi oleh cahaya kuat. Bedanya hanya pada jumlah atom yang terionisasi.



Gambar 3.2 Perbandingan jumlah ion positif terhadap selang waktu pada intensitas lemah dan kuat
(Sumber: Sutrisno, 2003; 35)

Bila dilihat dari hasil di atas, maka definisi intensitas yang diberikan oleh persamaan (3.3) kurang tepat. Seolah-olah definisi intensitas berbanding lurus dengan jumlah "sesuatu", artinya bila intensitas lemah, maka "sesuatu" itu jumlahnya sedikit, sementara untuk intensitas kuat jumlahnya banyak. Sesuatu itu sekarang ini kita kenal dengan istilah "foton" atau partikel cahaya. Perbandingan intensitas kuat atau lemah untuk definisi cahaya kita sekarang ditunjukkan oleh gambar 3.3

Akhirnya dapat dikatakan, pada saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran mikro (seperti atom), maka ia berperilaku sebagai partikel yang dikenal dengan foton. Sementara saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran makro (seperti cermin atau air), maka cahaya berperilaku sebagai gelombang. Dalam bahagian selanjutnya kita akan pelajari beberapa percobaan yang memerlukan definisi cahaya sebagai kumpulan partikel.



Gambar 3.3 Model cahaya intensitas lemah (a) dan intensitas kuat (b)
(Sumber: Sutrisno, 2003;37)

3.3 Radiasi Benda Hitam

Dalam pembahasan Radiasi Benda Hitam, kita akan bedakan dalam dua sub-bagian. Pertama, menyangkut dengan Radiasi thermal dari suatu benda, sementara yang kedua menyangkut dengan Radiasi Benda Hitam sempurna.

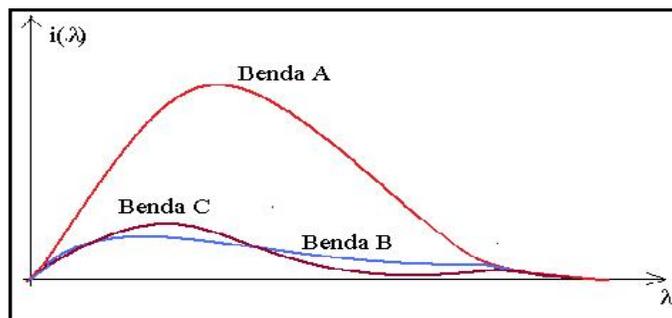
3.3.1 Radiasi Thermal

Pada percobaan tetesan minyak di atas, telah didapat informasi bahwa muka gelombang cahaya harus dipandang sebagai sesuatu yang diskrit, yang dikenal dengan "foton" atau "partikel" cahaya. Sekarang kita akan lihat bagaimana perilaku gelombang **EM** atau cahaya yang dipancarkan oleh suatu benda pada temperatur tertentu yang dikatakan dengan "**Radiasi Thermal**".

Semua benda memancarkan radiasi seperti itu ke sekelilingnya dan sekaligus menyerap juga darinya. Bila temperatur benda lebih tinggi dari temperatur lingkungannya, maka ia akan menjadi dingin, hal itu disebabkan daya pancar radiasi lebih besar dari penyerapan

Radiasi Thermal. Ketika kondisi seimbang tercapai, maka laju pemancaran dan penyerapan radiasi menjadi sama.

Benda-benda padat (seperti zat padat dan liquid) memancarkan radiasi thermal dalam bentuk kontinyu, tidak tergantung dari material penyusun benda, dan hanya tergantung secara kuat pada temperatur. Pada temperatur kamar, benda-benda yang tampak kita lihat bukanlah karena memancarkan radiasi thermalnya, tetapi karena cahaya yang dipantulkan oleh benda tersebut dari sumber lain. Jika tidak ada cahaya yang menyinari, maka kita tidak akan dapat melihatnya.



Gambar 3.4 Daya emisi monokromatik untuk benda hitam sempurna (A) dan benda biasa (B,C)
(Sumber: Krane, 2001;23)

Bila temperatur benda dinaikkan, maka benda kelihatan merah, kuning, terus sampai ke warna violet sesuai dengan kenaikan temperatur. Besar intensitas persatuan luar permukaan benda disebut dengan "**Daya Emisi monokromatik**" dan dinyatakan dengan $i(\lambda)$. Intensitas cahaya yang dipancarkan oleh satuan luas benda untuk daerah panjang gelombang $d\lambda$ disekitar λ adalah

$$dI = i(\lambda)d\lambda \quad (3.4)$$

dengan demikian intensitas total merupakan intergral keseluruhan luas di bawah kurva dari $i(\lambda)$, yaitu:

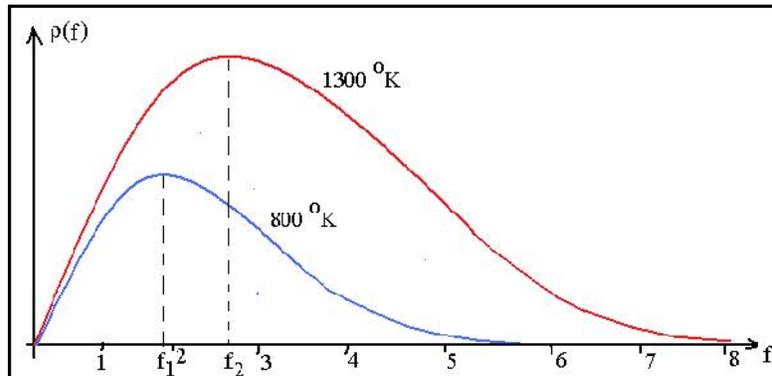
$$I = \int_0^{\infty} i(\lambda) d\lambda \quad (3.4a)$$

Kurva yang ingin diintegral ditunjukkan dalam gambar 3.4. Persamaan (3.4a) terjadi juga untuk kasus sebaliknya, yaitu penyerapan radiasi termal dari sekitarnya. Distribusi daya emisi benda A dalam gambar 3.4 diatas jauh lebih sempurna daripada benda B dan benda C. Ini dapat dikatakan bahwa benda A memiliki daya pancar dan daya serap yang sempurna. Jenis pancaran dan penyerapan seperti ini biasanya datang dari benda "**hitam sempurna**".

3.3.2 Radiasi Benda Hitam Sempurna

Untuk memahami konsep benda hitam sempurna, kita perhatikan uraian berikut. Bayangkan sebuah kotak yang dindingnya berada pada temperatur tertentu. Atom-atom penyusun dinding sedang memancarkan radiasi elektromagnetik dan dalam waktu bersamaan atom-atom tersebut juga menyerap radiasi yang dipancarkan oleh atom-atom yang lain. Akibatnya medan radiasi Elektromagnetik (EM) memenuhi seluruh ruangan tersebut. Ketika radiasi yang terperat dalam kotak tersebut mencapai keseimbangan dengan atom-atom dinding, maka jumlah energi yang dipancarkan oleh atom sama dengan jumlah energi yang diserap olehnya. Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Lummer dan Pringthein pada tahun 1899 menunjukkan bahwa pada kondisi setimbang, radiasi Elektromagnetik yang terperat memiliki distribusi energi yang terdefinisi dengan baik. Maksudnya untuk masing-masing frekuensi terdapat suatu rapat energi yang hanya tergantung pada temperatur dinding.

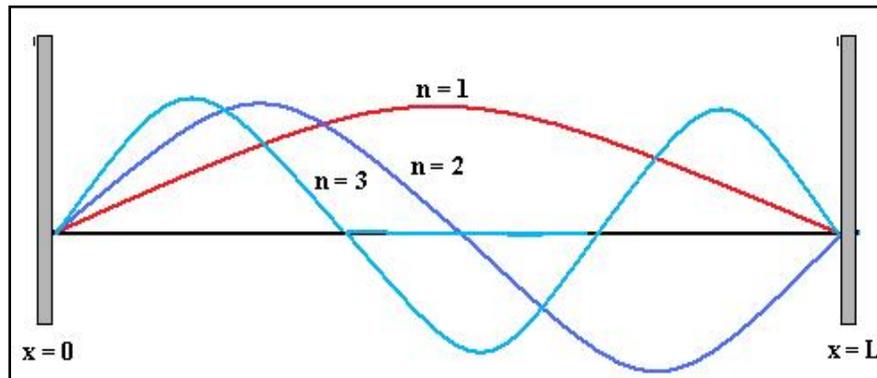
Bila sekarang pada salah satu sisi kotak tersebut terdapat suatu lubang kecil, maka beberapa radiasi Elektromagnetik akan keluar dan efeknya ada kemungkinan untuk dianalisa. Lubang tersebut akan kelihatan sangat terang ketika benda berada pada temperatur tinggi dan intensitas radiasi sangat rendah. Karena proses penyerapan dan pemancaran radiasi dari lubang tersebut secara sempurna, maka lubang tersebut dikatakan dengan model "benda hitam sempurna".



Gambar 3.5 Hasil eksperimen yang dilakukan oleh Lummer dan Prinsler (1899). Kaitan rapat energi terhadap frekuensi radiasi EM (Sumber: Krane, 2001;24)

Pada proses perumusan fungsi distribusi radiasi gelombang Elektromagnetik dikenal dua istilah yang sering digunakan, yaitu "Intensitas" dan "Rapat Energi". **Intensitas** didefinisikan sebagai jumlah daya yang dipancarkan oleh satuan luas permukaan atau dikatakan dengan daya emisi monokromatik, distribusinya ditunjukkan dalam gambar 3.6. Istilah kedua **rapat energi** yang didefinisikan sebagai jumlah energi persatuan volume dalam frekuensi f dan $f + df$ dari spektrum benda hitam dalam kotak bertemperatur diatas suhu mutlak. Pola distribusi rapat energi terhadap frekuensi ditunjukkan dalam gambar 3.5.

Untuk tahap pertama kita akan rumuskan hukum-hukum yang menjelaskan keterkaitan antara intensitas dan panjang gelombang radiasi terhadap perubahan temperatur. Asumsi yang digunakan gelombang elektromagnetik dalam kotak bertindak sebagai **gelombang berdiri** dengan titik simpul pada dinding kotak. Pola gelombang tersebut untuk kotak suatu dimensi diilustrasikan dalam gambar 3.6. Untuk $n = 1$ dikatakan dengan keadaan dasar dan memiliki pola separuh gelombang. Sedangkan untuk $n = 2$ dan $n = 3$ merupakan pola-pola gelombang pada tingkat berikutnya.



Gambar 3.6 Pola amplitudo gelombang berdiri dalam "ruang" suatu dimensi dalam dinding di $x = 0$ dan di $x = L$ untuk tiga bentuk ($n = 1, 2, 3$) (Sumber: Halim, 2008)

Untuk bentuk gelombang 3D dan amplitudo dinyatakan dengan fungsi gelombang, maka kondisi fungsi gelombang terjadi:

$$\begin{aligned} \Psi(x+Lx, y, z) &= \Psi(x, y, z) \\ \Psi(x+Lx, y, z) &= \Psi(x, y, z) \\ \Psi(x+Lx, y, z) &= \Psi(x, y, z) \end{aligned} \tag{3.5}$$

Sementara bentuk umum dari gelombang berdiri memiliki solusi

$$\Psi = e^{ikx} = e^{i(kxx + kyy + kzz)}$$

(3.5a)

Karena gelombang beresilasi sesuai dengan kondisi (3.5), maka (misalnya untuk sumbu x) didapat dari gambar 3.6.

Untuk:

$$\begin{aligned} n_x = 1 &\rightarrow L_x = 1/2 \lambda \\ n_y = 2 &\rightarrow L_y = 2/2 \lambda \\ n_z = 3 &\rightarrow L_z = 3/2 \lambda \\ &\dots\dots \\ n_k = n &\rightarrow L_k = n/2 \lambda \end{aligned}$$

Karena $k = 2\pi/\lambda$, maka

$$L_x = \pi n_x / k_x$$

Atau

$$k_x L_x = \pi n_x \tag{3.5b}$$

Dimana n_x adalah bilangan bulat positif, negatif, dan nol atau

$$n_x = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4, \pm 5, \dots$$

Sehingga jumlah keadaan dalam interval k_x dan $k_x + dk_x$ harus dikali dua, yaitu dari persamaan (3.5b).

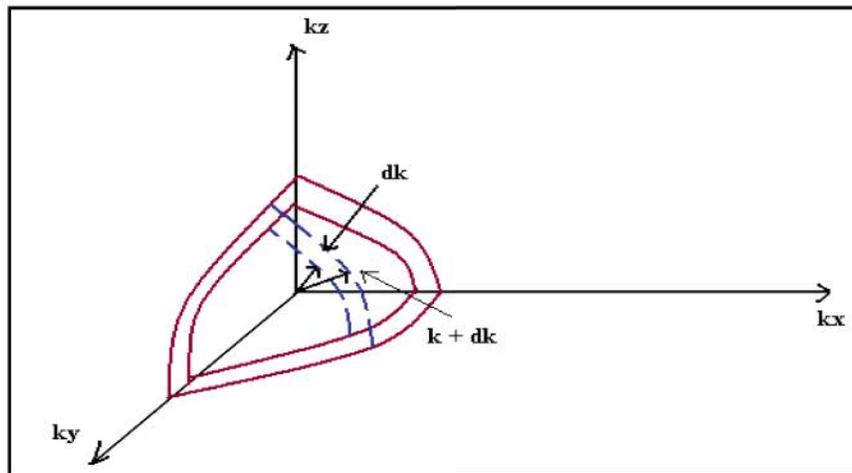
$$k_x L_x = 2\pi n_x \tag{3.5c}$$

Dengan demikian dari sifat periodik (3.5) memberikan hasil

$$k_x(n_x + L_x) = k_x + 2\pi n_x$$

Atau

$$\begin{aligned} k_x &= (2\pi / L_x) n_x \\ k_y &= (2\pi / L_y) n_y \\ k_z &= (2\pi / L_z) n_z \end{aligned} \quad (3.5d)$$



Gambar 3.7. Ilustrasi kulit bola
(Sumber: Halim, 2008)

Untuk k_x terletak di antara rank k_x dan $k_x + dk$, maka bilangan bulat yang mungkin adalah:

$$\begin{aligned} \Delta n_x &= (L_x / 2\pi) dk_x \\ \Delta n_y &= (L_y / 2\pi) dk_y \\ \Delta n_z &= (L_z / 2\pi) dk_z \end{aligned} \quad (3.5e)$$

Ruang k yang kita maksudkan adalah:

Jumlah keadaan (state) translasi dalam ruang k dinyatakan dengan:

$$\begin{aligned}\rho d^3k &= \Delta n_x \Delta n_y \Delta n_z \\ &= [(L_x/2\pi) dk_x] [(L_y/2\pi) dk_y] [(L_z/2\pi) dk_z] \\ &= [(L_x L_y L_z)/(2\pi)^3] dk_x dk_y dk_z\end{aligned}$$

Atau

$$\frac{\dots d^3k}{V} = \frac{1}{(2\pi)^3} d^3k \quad (3.6a)$$

Dalam hal ini ρ adalah jumlah keadaan per satuan volume. Atau dikatakan juga dengan “**Rapat Keadaan (the state density)**”. Bila partikel dalam kotak merupakan kumpulan foton, maka partikel tersebut bersifat tak TERBEDAKAN dan setiap keadaan BOLEH ditempati oleh lebih dari suatu partikel. Ciri partikel seperti sesuai dengan ciri khas dari statistik Bose-Einstein. Bila fungsi partitisi untuk gas foton seperti itu dan ditulis dalam bentuk, maka

$$Z = \sum_{n_s} e^{-\beta n_s \nu}$$

Sehingga

$$Z = \frac{\sum_{n_s} n_s e^{-\beta n_s \nu}}{\sum_{n_s} e^{-\beta n_s \nu}}$$

Dimana n_s = jumlah rata-rata partikel dalam keadaan tertentu atau S.
Persamaan (3.6b) dapat ditulis menjadi

$$n_s = -\frac{1}{S} \frac{\sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s}}{\sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s}}$$

$$n_s = -\frac{1}{S} \frac{1}{\epsilon_s} \ln \left(\frac{\sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s}}{\sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s}} \right)$$

$$n_s = -\frac{1}{S} \frac{1}{\epsilon_s} \ln \sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s}$$

$$\text{Suku } \sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s} = 1 + e^{-\beta \epsilon_s} + e^{-2\beta \epsilon_s} + e^{-3\beta \epsilon_s} + \dots$$

$$\sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots \quad \text{dengan } x = e^{-\beta \epsilon_s}$$

$$\text{Definisi lain } (1-x)^{-1} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots \quad \text{dengan } x = e^{-\beta \epsilon_s}$$

Sehingga dari kedua definisi tersebut didapatkan

$$\sum_{ns} e^{-\beta n_s \epsilon_s} = (1-x)^{-1} = (1 - e^{-\beta \epsilon_s})^{-1}$$

Substitusi hasil ini ke persamaan di atas, maka didapatkan

$$n_s = -\frac{1}{S} \frac{1}{\epsilon_s} \ln(1 - e^{-\beta \epsilon_s})^{-1}$$

$$n_s = \frac{1}{S} \frac{1}{\epsilon_s} \ln(1 - e^{-\beta \epsilon_s})$$

$$n_s = \frac{1}{(e^{\beta \epsilon_s} - 1)} \quad (3.6f)$$

Ini dikatakan dengan distribusi Bose-Einstein atau distribusi Planck. Persamaan (3.6c) memberi gambaran tentang jumlah rata-rata foton dalam masing-masing keadaan ($s = 1, 2, 3, 4, \dots$). Berdasarkan persamaan (3.6a) dan (3.6c) kita dapat menentukan jumlah rata-rata foton per satuan volume $f(k)d^3k$ dalam ruang k , yaitu:

$$f(k)d^3k = n_s \rho d^3k/v$$

$$f(k)d^3k = \frac{1}{(e^{\beta \epsilon_s} - 1)} \frac{d^3k}{2f}$$

Untuk "dua" arah polarisasi dalam rank frekuensi $\omega + d\omega$ dan $k = \omega/c$ didapati:

$$d^3k = 2f = 4fk^2 dk$$

Dan

$$dk = d\omega/c$$

sehingga

$$2f(k)(4\pi k^2 dk) = 2 \frac{4\pi \omega^2 d\omega}{(2\pi c)^2} = \frac{2\pi \omega^2 d\omega}{(2\pi c)^2}$$

Suku sebelah menyatakan rata-rata foton per satuan volume. Bila kuantitas tersebut kita kalikan dengan energi per foton, maka kita akan dapatkan; Energi rata-rata per satuan volume, yang dinotasikan dengan $k(\omega, t)$, sehingga didapat:

$$I(\omega, T) = \frac{h}{\pi^2 c^2} \frac{\omega^3 d\omega}{(e^{-\beta \epsilon_s} - 1)} \quad (3.6d)$$

Atau

$$I(\omega, T) = \frac{h}{\pi^2 c^2} \left(\frac{kt}{h}\right) \frac{\eta^3 d\omega}{(e^\eta - 1)} \quad (3.6e)$$

Bila kita pilih definisi $kw/kT = \eta$, yang menyatakan perbandingan antara energi foton dengan energi termol, maka dapat ditulis:

$$\frac{h}{kT_1} = \frac{h\omega}{kT_2} = \eta$$

Andaikata pada T_1 terjadi $I(\omega, T)$ maksimum, bersesuaian dengan W_1 , maka untuk T_2 dan W_2 juga akan didapati $I(\omega, T)$ maksimum, sehingga dapat ditulis:

$$\lambda T = \frac{2c}{\kappa}$$

Rumus ini dikenal dengan "**Hukum pergeseran Wien**". Parameter dikenal dengan konstanta Wien. Selanjutnya untuk Rapat Energi Total $\rho_0(T)$, untuk sebuah frekuensi biasa ditentukan:

$$\rho_0(T) = \int_0^\infty \rho(\omega; T) d\omega$$

Dari persamaan (3.6e) didapat:

$$\rho_0(T) = \frac{\hbar}{\pi^2 c^3} \left(\frac{kT}{\hbar} \right)^4 \int_0^\infty \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1}$$

Selanjutnya dengan memasukkan definisi integral berikut:

$$\int_0^\infty \frac{\eta^3 d\eta}{e^\eta - 1} = \frac{\pi^4}{15}$$

Sehingga persamaan di atas menjadi:

$$\rho_0(T) = \frac{\pi^2 k^4}{15(c\hbar)^3} T^4 \tag{3.8}$$

Bentuk pernyataan (3.8) dikenal dengan ”**Hukum Stefan-Boltzman**”. Parameter dalam kurung dikenal dengan konstanta Stefan-Boltzman, hasil perhitungan eksperimen didapati,

$$\sigma = \frac{\pi^2 k^4}{15(c\hbar)^3} = 5.6703 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2} \cdot K^4$$

Dengan demikian bentuk (3.8) dapat ditulis menjadi:

$$\rho_0(T) = \sigma T^4 \tag{3.8a}$$

Selanjutnya kita akan turunkan dua perumusan lagi yang menyangkut dengan Radiasi Benda Hitam; perumusan Rayleigh-Jean dan perumusan Planch. Dalam kedua perumusan tersebut kita tetap menganggap seperti dalam ruang 3D.

Tinjauan gelombang dari gelombang Era dalam ruang tiga dimensi (3D). Gelombang Era merambat di ruang dalam arah yang didefinisikan oleh α , β , dan γ . Kondisi batas yang terjadi untuk fungsi gelombang dalam ruang tersebut adalah dari syarat batas tersebut dapat dipahami bahwa (simpul) gelombang terletak di dinding kotak, yaitu di $x = 0$ dan untuk sisi y dan z .

Titik potong bidang simpul gelombang dengan masing-masing sumbu memiliki jarak: Bentuk umum dari solusi persamaan gelombang berdiri dinyatakan dalam bentuk Bagian real untuk masing-masing sumbu dinyatakan dengan Persamaan (3.9c) menggambarkan untuk komponen x , bahwa suatu gelombang yang memiliki amplitudo maksimum E_{0x} , variasi dalam ruang dinyatakan lewat sumbu sindan berosilasi dengan frekuensi f . Harga sin akan nol di titik, yang merupakan tempat-tempat terjadi simpul gelombang. Jarak antara dua simpul dapat ditentukan melalui peninjauan

Selisih keduanya merupakan jarak antara titik simpul, yaitu ini merupakan jarak antara dua simpul seperti ditunjukkan oleh Kuadrat ketiga-tiganya dan penjumlahannya, ini memberi kita gambaran tentang batasan panjang gelombang yang mungkin dimiliki oleh gelombang radiasi dalam kotak. Kita juga dapat menentukan frekuensi yang diizinkan, Jumlah frekuensi yang diizinkan dapat ditentukan melalui ilustrasi ruang 3D dengan n_x , n_y , dan n_z sebagai koordinatnya.

Jadi kita akan menghitung jumlah frekuensi yang diizinkan $N(f) df$ antara interval frekuensi f dan $f + df$. Ini sama dengan jumlah titik yang terisi antara pusat lingkaran berjari-jari r dengan $r + dr$, yaitu $N(r) dr$. Dalam hal ini $N(r) dr$ sama dengan volume ruang tertutup yang dibatasi oleh sel yang dikalikan dengan jumlah titik kisi.

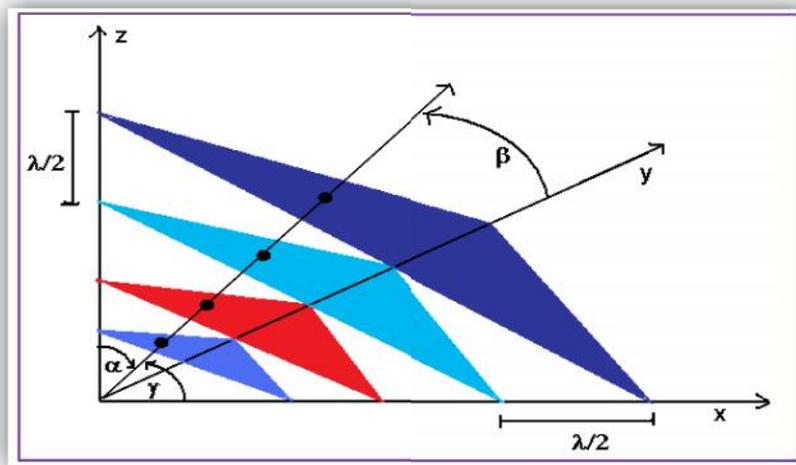
Dari gambar didapati bahwa kerapatan bernilai untuk tiap sel atau dalam suatu sel hanya ada satu titik kisi, sehingga Karena terdapat dua arah polarisasi dari gelombang era yang saling bebas, maka Berdasarkan persamaan (3.10b) dapat dikatakan bahwa jumlah frekuensi yang dibolehkan untuk gelombang dalam kotak, hanya

tergantung pada volume ruangan (3-D) dan tak tergantung dari bentuk kotak tersebut.

Tinjau gelombang berdiri dari gelombang Elektromagnetik (EM) dalam ruang tiga dimensi. Gelombang EM merambat dalam ruang 3-D dengan arah rambatan didefinisikan oleh α , β , dan γ . Syarat batas yang terjadi untuk fungsi gelombang dalam arah tersebut adalah:

$$\begin{aligned} E = 0 \text{ untuk } & x = 0 & x = a \\ & y = 0 & y = a \\ & z = 0 & z = a \end{aligned} \quad (3.9)$$

Berdasarkan syarat batas tersebut dapat dipahami bahwa noda (simpul) gelombang terletak didinding kotak, yaitu pada $x = 0$ dan $x = a$. Hal yang sama juga terjadi untuk sisi y dan z . Ilustrasinya seperti dalam gambar berikut:



Gambar 3.7a. Bidang simpul gelombang dalam ruang 3-D
(Sumber: Halim, 2008)

Titik potong bidang simpul gelombang dengan masing-masing sumbu memiliki jarak.

$$\cos \alpha = \frac{\lambda/2}{\lambda_z/2}$$

$$\cos \beta = \frac{\lambda/2}{\lambda_y/2}$$

$$\cos \gamma = \frac{\lambda/2}{\lambda_x/2}$$

Atau dapat ditulis menjadi bentuk:

$$\lambda_x/2 = \frac{\lambda}{2 \cos \gamma}$$

$$\lambda_y/2 = \frac{\lambda}{2 \cos \beta}$$

$$\lambda_z/2 = \frac{\lambda}{2 \cos \alpha}$$

(3.9a)

Bentuk umum dari solusi persamaan gelombang berdiri dinyatakan dalam bentuk:

$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{-i\omega t} \quad (3.9b)$$

Bagian real untuk masing-masing sumbu dinyatakan dengan

$$E(x, t) = E_{0x} \sin(2\pi/\lambda \cdot x) \sin(2\pi f \cdot t)$$

$$E(y, t) = E_{0y} \sin(2\pi/\lambda \cdot y) \sin(2\pi f \cdot t)$$

$$E(z, t) = E_{0z} \sin(2\pi/\lambda \cdot z) \sin(2\pi f \cdot t)$$

(3.9c)

Persamaan (3.9c) menggambarkan bentuk gelombang berdiri untuk komponen medan listrik dari gelombang elektromagnetik. Gelombang EM yang memiliki amplitudo maksimum E_{0x} (misalnya) bervariasi dalam ruang dinyatakan dengan fungsi $\text{Sin}(2\pi x/\lambda_x)$ dengan frekuensi osilasi dinyatakan dengan f . Harga $\text{Sin}(2\pi x/\lambda_x)$ akan nol pada titik $(2x/\lambda_x) = 0, 1, 2, 3, 4, \dots$, yang merupakan tempat-tempat terjadi simpul gelombang. Jarak antara dua simpul-simpul dapat ditentukan dengan peninjauan

$$\begin{aligned} (2x_0/\lambda_x) &= 0 && \text{(simpul dasar)} \\ (2x_0/\lambda_x) &= 1 && \text{(simpul ke-suatu)} \end{aligned}$$

Selisih keduanya merupakan jarak antara dua titik simpul, yaitu:

$$\begin{aligned} (2x_1/\lambda_x) - (2x_0/\lambda_x) &= 1 - 0 = 1 \text{ atau} \\ \Delta x &= \lambda_x/2 \end{aligned} \quad (3.9d)$$

Ini merupakan jarak antara dua simpul seperti ditunjukkan oleh persamaan (3.9a). Simpul juga terjadi pada jarak $x = y = z = a$, sehingga:

$$\begin{aligned} 2x/\lambda_x &= n_x && \text{untuk } x = a \\ 2y/\lambda_y &= n_y && \text{untuk } y = a \\ 2z/\lambda_z &= n_z && \text{untuk } z = a \end{aligned} \quad (3.9e)$$

Di mana $n_x = 1, 2, 3, \dots = n_y = n_z$. Selanjutnya kombinasi persamaan (3.9a) dan (3.9e) menghasilkan:

$$\begin{aligned} (2a/\lambda) \cos \gamma &= n_x \\ (2a/\lambda) \cos \beta &= n_y \\ (2a/\lambda) \cos \alpha &= n_z \end{aligned}$$

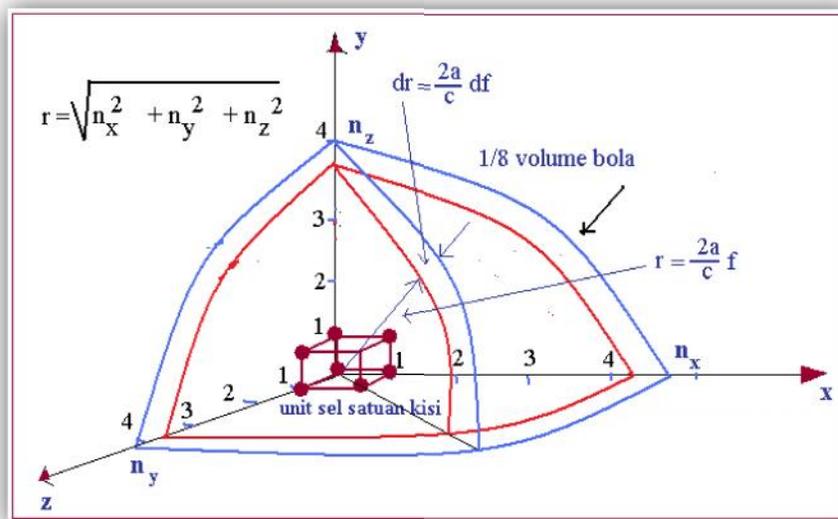
Langkah berikutnya adalah dikuadratkan dan dijumlahkan ketiga-tiga suku diatas, iaitu:

$$(2a/\lambda)^2 (\cos^2 \gamma + \cos^2 \beta + \cos^2 \alpha) = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

$$(2a/\lambda)^2 = n_x^2 + n_y^2 + n_z^2$$

atau

$$\lambda = \frac{2a}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \quad (3.10)$$



Gambar 3.7b. Ilustrasi rapat titik kisi dalam unit sel berjari-jari r
(Sumber: Halim, 2008)

Ini memberi gambaran tentang batasan panjang gelombang yang mungkin dimiliki oleh gelombang radiasi dalam kotak. Kita dapat juga menentukan frekwensi yang dizinkan, yaitu:

$$F = c/\lambda = c/2a = \sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}$$

Sedang jumlah frekwensi yang diizinkan dapat ditentukan melalui ilustrasi ruang 3-D dengan n_x^2 , n_y^2 , n_z^2 sebagai koordinatnya.

Berdasarkan ilustrasi gambar 3.7a, kita tentukan jumlah frekwensi yang diizinkan $N(f) df$ antara interval frekwensi f dan $f+df$. Ini sama dengan jumlah titik yang terisi antara pusat lingkaran berjari-jari r dengan $r + dr$, yaitu $N(r) dr$. Dalam hal ini $N(r)dr$ sama dengan volume ruang tertutup yang dibatasi oleh sel dikalikan dengan jumlah titik kisi. Berdasarkan gambar 3.7b didapat kerapatan bernilai 1 untuk tiap sel atau dalam suatu sel hanya ada suatu titik kisi, sehingga.

$$N(r) dr = 1/8 dV$$

$$N(r) dr = 1/8 4\pi r^2 dr$$

Sedangkan nilai r dari gambar 3.7b didapat:

$$r = (2a/c) f \quad \text{dan}$$

$$2r = (2a/c) df$$

Sehingga gabungannya menjadi:

$$N(f) df = 1/8 4\pi (2a/c)^2 (2a/c) df \cdot f^2.$$

$$N(f) df = \pi/2 (2a/c)^3 f^2 df$$

Karena terdapat dua arah polarisasi gelombang EM yang saling bebas, maka bentuk diatas dapat ditulis menjadi:

$$N(f) df = 2 \cdot \pi/2 (2a/c)^3 f^2 df$$

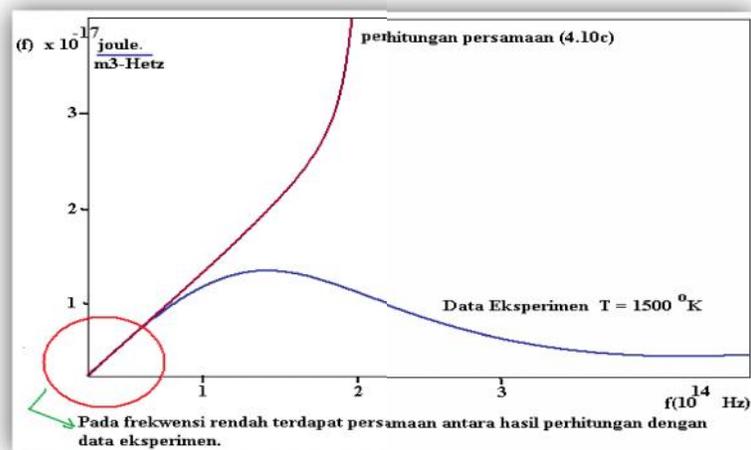
$$N(f) df = 8\pi (a/c)^3 f^2 df \quad (3.10b)$$

Berdasarkan persamaan (3.10b) dapat dikatakan bahwa jumlah frekwensi yang dibolehkan untuk gelombang dalam kotak, hanya tergantung pada volume kotak (a^3) dan tak tergantung pada bentuk kotak.

Selanjutnya kita dapat juga tentukan energi persatuan volume atau "rapat energi", $\rho(f) df$ dengan cara kita lakukan perkalian antara jumlah frekwensi yang diizinkan persatuan volume dengan besar energi tiap partikel atau,

$$\rho(f) df = (N(f)/a^3) df \cdot E$$

$$\rho(f) df = (8\pi f^2/c^3) E \cdot df$$



Gambar 3.8. Perbandinga pola spektrum antara teori dan eksperimen
(Sumber: Halim, 2008)

Dengan mengacu pada teori kinetik klasik atau hukum equipartitisi energi yang telah diketahui adalah energi rata-rata sebuah partikel bersuhu T dinyatakan dengan:

$$E = kT$$

Sehingga bentuk di atas menjadi:

$$\rho(f) df = (8\pi f^2/c^3) kT df \quad (4.10c)$$

Persamaan (3.10c) dikenal dengan “**Rumusan Rayleigh-Jean untuk radiasi benda hitam**”. Persamaan (3.10c) memberi gambaran tentang pola distribusi rapat energi radiasi benda hitam dalam interval frekuensi f dan $f + df$. Pada temperatur T , kita dapat melihat perbandingan hasil perkiraan (3.10c) dengan data eksperimen, seperti gambar 3.8.

Berdasarkan gambar 3.8 dapat dipahami bahwa pada frekuensi rendah, $f < 10^{14}$ Hz, terdapat kesesuaian antara perkiraan teoritis dengan data eksperimen. Sedangkan pada frekuensi yang lebih tinggi besar spektrumnya tak terhingga, sebaliknya hasil eksperimen menunjukkan adanya puncak spektrum atau tertentu besarnya spektrum. Hasil yang tak real, yang diperkirakan oleh persamaan (3.10c), dalam fisika dikenal dengan “**Bencana Ultraviolet**”. Oleh karena itulah, Planck berusaha merumuskan teori baru sebagai alternatif dari kelemahan tersebut.

Lebih jauh dari gambar 3.8 dapat dilihat bahwa data eksperimen sesuai dengan teori (3.10c) pada frekuensi rendah atau

$$\text{Pada saat } f \rightarrow 0, \text{ maka } E \rightarrow kT \quad (3.11)$$

Sebaliknya pada frekuensi tinggi, energi rata-rata akan menuju nol atau,

$$\text{Pada saat } f \rightarrow \infty, \text{ maka } E \rightarrow 0 \quad (3.11a)$$

Berdasarkan persamaan (3.11) dan (3.11a) dapat dilihat bahwa energi rata-rata gelombang datar (standing wave) sebagai fungsi dari

frekuensi, ini merupakan asumsi yang digunakan oleh Planch. Hal ini bertentangan dengan hukum- energi dari suatu sistem yang tak tergantung pada frekuensi. Untuk mendapatkan kerapatan energi, kita akan menggunakan bentuk khusus dari distribusi Boltzman

$$P(\varepsilon) = \frac{e^{-\varepsilon/kT}}{kT} \quad (3.11b)$$

Dimana $P(\varepsilon)d\varepsilon$ adalah probabilitas untuk mendapatkan suatu partikel yang berenergi antara ε dan $\varepsilon+d\varepsilon$. Dengan menggunakan persamaan (3.11b), kita dapat menentukan energi rata-rata dari suatu sistem, yaitu:

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \varepsilon p(\varepsilon)}{\sum_{n=0}^{\infty} p(\varepsilon)}$$

Nilai rata-rata di atas digunakan tanda "sigma" atau "jumlah" dalam perhitungannya. Ini didasarkan pada postulat Planch bahwa energi dari suatu partikel bersifat dan kelipatan dari $E = nhf$ atau:

$$\varepsilon = 0, hf, 2hf, 3hf, \dots = nhf$$

sehingga

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{nhf}{kT} e^{-nhf/kT}}{\sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{kT} e^{-nhf/kT}}$$

Jika kita ambil definisi

$$\alpha = \frac{hf}{kT}$$

maka

$$\varepsilon = kT \frac{\sum_{n=0}^{\infty} n\alpha e^{-n\alpha}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}}$$

Suku sebelah kanan atas dapat diurai menjadi:

$$\sum_{n=0}^{\infty} n\alpha e^{-n\alpha} = - \sum_{n=0}^{\infty} \alpha \frac{d}{d\alpha} e^{-n\alpha} = -\alpha \frac{d}{d\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}$$

$$\varepsilon = kT(-\alpha) \frac{d}{d\alpha} \frac{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}}{\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}}$$

$$\varepsilon = kT(-\alpha) \frac{d}{d\alpha} \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}$$

atau karena $\alpha = hf/kT$

$$\varepsilon = -hf \frac{d}{d\alpha} \ln \sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha}$$

Suku $\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha} = 1 + e^{-\alpha} + e^{-2\alpha} + e^{-3\alpha} + \dots$

$\sum_{n=0}^{\infty} e^{-n\alpha} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots$ dengan $x = e^{-\alpha}$

atau $(1+x)^{-1} = 1 + x + x^2 + x^3 + \dots$

$$\varepsilon = -hf \frac{d}{d\alpha} \ln (1 - e^{-\alpha})^{-1}$$

$$\varepsilon = -hf \frac{d}{d\alpha} \frac{(1 - e^{-\alpha})^{-1}}{(1 - e^{-\alpha})^{-1}}$$

$$\varepsilon = -hf \frac{(-1)e^{-\alpha} (1 - e^{-\alpha})^{-2}}{(1 - e^{-\alpha})^{-1}}$$

$$\varepsilon = hf \frac{e^{-\alpha}}{(1 - e^{-\alpha})} : \frac{e^{-\alpha}}{e^{-\alpha}}$$

$$\varepsilon = \frac{hf}{(e^{\alpha} - 1)} = \frac{hf}{e^{hf/kT} - 1}$$

(3.12)

Selanjutnya rapat energi yang memiliki frekuensi antara f dan $f + df$, didapati

$$\rho(f)df = \frac{8\pi f^2}{c^3} \mathbf{E} df$$

$$\rho(f)df = \frac{8\pi f^3}{c^3} \frac{h}{e^{hf/kT} - 1} df$$

(3.13)

Persamaan (3.13) dikenal dengan "Distribusi Spektrum benda hitam Planck". Kita juga dapat menyatakan kerapatan energi dalam bentuk panjang gelombang berdiri. Penurunannya dapat didasarkan pada suatu kesamaan $\rho(\lambda) d\lambda = -\rho(f) df$. Tanda (-) ini diberikan karena parameter $\rho(\lambda)$ dan $\rho(f)$ kedua-duanya positif dan antara $d\lambda$ dan df memiliki tanda yang berlawanan (artinya pada saat f bertambah, maka λ berkurang atau menurun secara eksperimental. Selanjutnya dari hubungan $f = c/\lambda$ menjadi

$$df = -c/\lambda^2 d\lambda$$

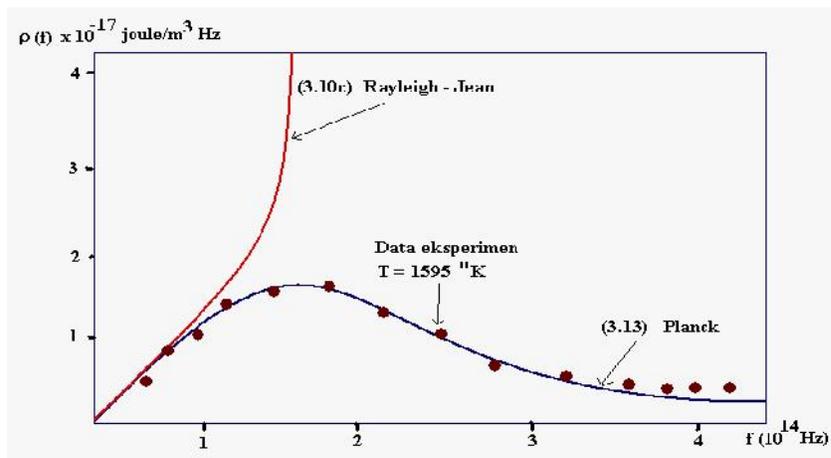
dan

$$\rho(\lambda) = -\rho(f) df/d\lambda = \rho(f) c/\lambda^2. \quad (3.13a)$$

Kombinasi persamaan (3.13) dan (3.13a) didapat,

$$\rho(\lambda)d\lambda = \frac{8\pi c}{\lambda^5} \frac{h}{e^{hc/\lambda kT} - 1} d\lambda \quad (3.13b)$$

Persamaan (3.13b) ditugaskan kepada pembaca untuk membuktikan penurunannya (PR). "Hukum Stefan" dan "Pergeseran Wien" dapat diperoleh dari persamaan (3.13b). Dengan menggunakan persamaan (3.13) dan (3.10c) kita dapat lihat perbandingan kedua pada pola distribusi dengan data eksperimen pada suhu 1595 °K .



Gambar 3.9 Spektrum radiasi benda hitam
(Sumber: Halim, 2008)

Kesimpulannya perumusan persamaan spektrum radiasi benda hitam oleh Planck secara matematis, sesuai dengan data eksperimen. Sementara hasil perumusan oleh Reyleigh – Jean mengalami ketaksesuaian dengan hasil eksperimen pada frekwensi tinggi, seperti ditunjukkan dalam gambar 3.9. Sebagai latihan (PR) selidiki betuk perumusan persamaan (3.13) pada kasus frekwensi tinggi.

3.4 Definisi Cahaya

Untuk memahami definisi hakikat cahaya tidak bisa dipisahkan dari pemahaman hasil percobaan yang terkait dengan cahaya. Kajian tentang cahaya telah dimulai pada awal tahun 1675 oleh Isaac Newton. Hasil kajian Newton, yang dikenal dengan teori *Corpuscular*, menunjukkan bahwa cahaya terdiri dari partikel-partikel kecil (*tiny particles*) yang dipancarkan oleh suatu sumber. Walaupun Huygens pada tahun 1678 telah mengemukakan teori gelombang untuk cahaya, namun tetap tidak diterima oleh pakar fisika ketika itu. Sehingga pada tahun 1801 Young menolak teori Newton dengan menunjukkan bahwa hasil percobaan difraksi hanya dapat dijelaskan jika cahaya dipandang sebagai gelombang, bukan sebagai partikel. Pada tahun 1887, Hertz berhasil membuktikan bahwa cahaya bagian dari gelombang elektromagnet dan Maxwell juga berhasil mengembangkan persamaan gelombang elektromagnet.

Pada awal abad ke-20 banyak pakar fisika yang mengembangkan percobaan, antaranya; radiasi benda hitam, efek fotoelektrik, sinar-x, efek Compton, dan spektral garis optik. Fenomena yang ditunjukkan melalui percobaan tersebut hanya dapat dijelaskan jika cahaya dipandang sebagai partikel, bukan sebagai gelombang. Sehingga pada tahun 1901, Max Planck berhasil mengembangkan persamaan energi diskrit untuk partikel-partikel gelombang elektromagnet (cahaya), yaitu; $E = nh\nu$.

Fenomena difraksi dan energi diskrit adalah bukti bahwa cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel. Oleh karena itu, cahaya dapat kita katakan bukan gelombang dan juga bukan partikel, tetapi dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel.

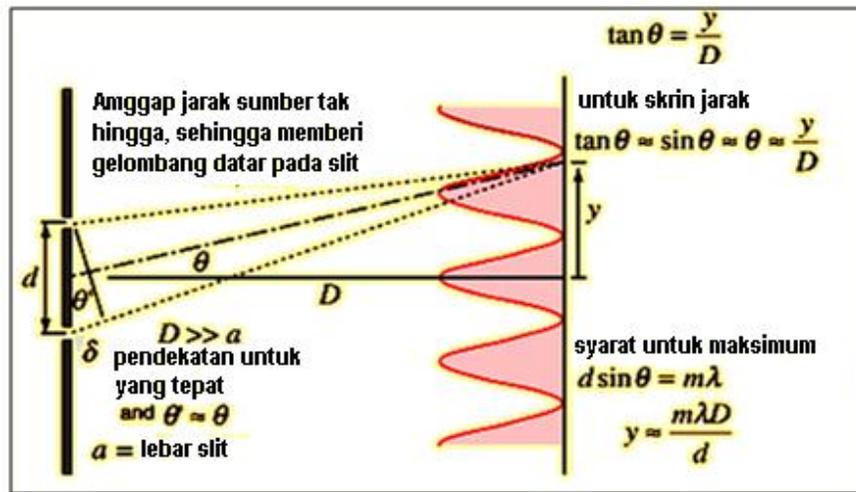
3.5 Sifat-sifat cahaya

Eksperimen celah ganda yang telah dilakukan Thomas Young adalah untuk mengamati sifat difraksi dan sifat interferensii pada cahaya. Kenyataan ini menjadi pendukung untuk kita katakan cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang, yaitu sebagai gelombang elektromagnetik. Sedangkan kita katakan cahaya berkelakuan seperti gelombang, berarti sifat-sifat yang dapat kita amati adalah panjang gelombang, fenomena difraksi, fenomena interferensii, sifat pemantulan, sifat pembiasan, tenaganya kontinu, dan kedudukannya menyebar dalam ruangan.

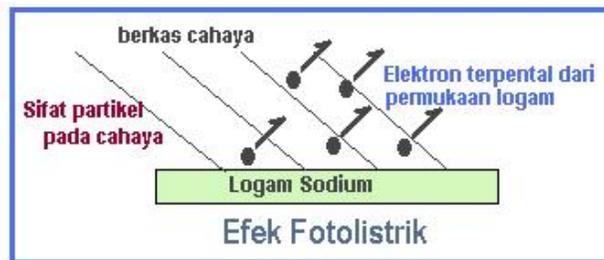
Eksperimen efek fotolistrik dan efek Compton adalah dua bukti percobaan yang membolehkan kita untuk mengatakan bahwa cahaya berkelakuan seperti partikel. Jika kita katakan cahaya adalah berkelakuan seperti partikel, maka sifat-sifat yang dapat kita amati adalah adanya percepatan, momentum, energi berbentuk diskrit, dan kedudukannya dapat diukur secara pasti. Ketika cahaya pada posisi dan waktu tertentu berkelakuan seperti gelombang, maka yang dapat diamati sifat-sifat yang menyatu dengan gelombang. Manakala pada posisi dan waktu yang berlainan cahaya dapat berkelakuan seperti partikel, maka dapat diamati sifat-sifat yang menyatu dengan partikel. Tidak pernah kedua sifat tersebut diamati pada posisi dan waktu bersamaan.

Dalam gambar 3.10 berikut ini, merupakan percobaan interferensii yang pernah dilakukan oleh Thomas Young untuk membuktikan bahwa cahaya dapat menunjukkan sifat-sifat gelombang.

Pola yang terbentuk pada layar merupakan pola gelombang transversal yang terdiri dari puncak atau titik terang atau titik maksimum dan lembah atau titik gelap atau titik minimum.



Gambar 3.10 Susunan percobaan celah ganda Thomas Young
(Sumber: www.hyperphysic.phy-astr.gsu.edu)



Gambar 3.11 ilustrasi fenomena efek fotolistrik
(Sumber: Halim, 2008)

Tujuan utama percobaan ini bukan untuk menunjukkan terang muncul dari puncak dan gelap muncul dari lembah, tetapi untuk membuktikan

bahwa cahaya koheren yang melalui celah ganda tersebut berkelakuan seperti gelombang. Cahaya **hanya** berkelakuan seperti gelombang, **bukan** untuk menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang.

Dalam gambar 3.11 merupakan suatu bentuk percobaan untuk membuktikan bahwa cahaya dapat berkelakuan seperti partikel, yang dikenal dengan percobaan efek fotolistrik. Fenomena efek fotolistrik hanya dapat dijelaskan dengan anggapan bahwa cahaya seperti partikel yang disebut dengan foton.

3.6 Contoh Fenomena Cahaya dalam kehidupan

Dalam bagian ini akan dibentangkan beberapa bentuk penggunaan konsep cahaya dalam kehidupan sehari-hari. Konsep cahaya yang kita maksudkan adalah dapat berkelakuan spertimana gelombang atau seperti partikel.

3.6.1 Sel fotolistrik atau panel surya

Untuk daerah yang terpencil atau jauh dari perkotaan dan sukar dilalui oleh energi listrik konvensional, maka digunakan sel fotolistrik sebagai energi alternatif. Cahaya matahari dari berbagai ukuran frekuensi mengenai sel fotolistrik dan memindahkan elektron dari permukaan logam sel fotolistrik menjadi arus fotolistrik.

Melalui suatu perubahan energi matahari dapat dirobah menjadi energi listrik, sehingga dapat digunakan untuk keperluan sehari-hari. Proses menghasilkan energi listrik seperti yang terjadi dalam instrumen pada gambar 3.12 berikut, cahaya dipandang berkelakuan sebagai partikel (yang disebut dengan foton) bukan sebagai gelombang.

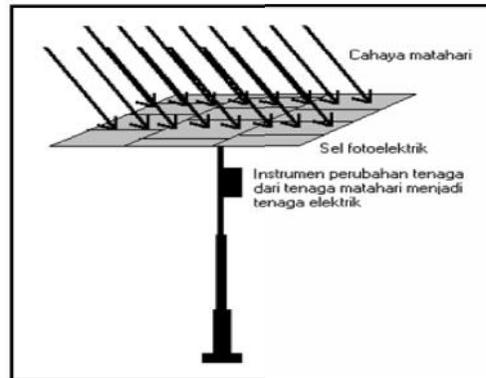


Gambar 3.12. Salah satu contoh panel surya
(Sumber: Halim, 2008)

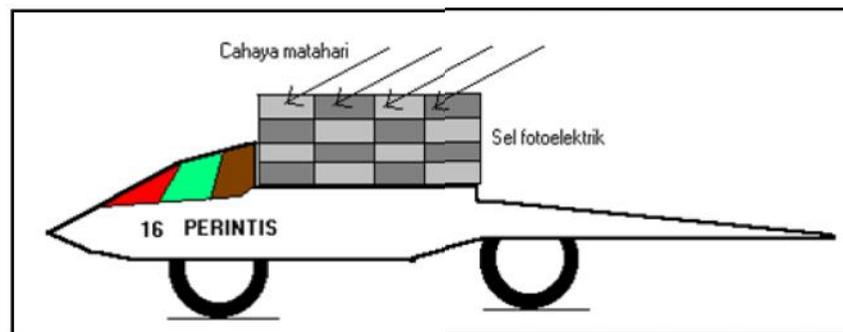


Gambar 3.13. Panel-panel surya yang dipasang di atas atap
(Sumber: Halim, 2008)

Energi diskrit dari partikel cahaya atau foton dinyatakan dengan persamaan $E = nh\nu$. Dalam gambar 3.12 merupakan salah satu panel surya yang tersisa dalam gudang dari sel surya yang telah dipasang diatas rumah, seperti dalam gambar 3.13. Ilustrasi panel listrik dalam gambar 3.12 secara terperinci ditunjukkan dalam gambar 3.14. Cahaya yang mengenai plat panel surya akan berkelakuan seperti partikel, sehingga terjadi tumbukan dengan elektron.



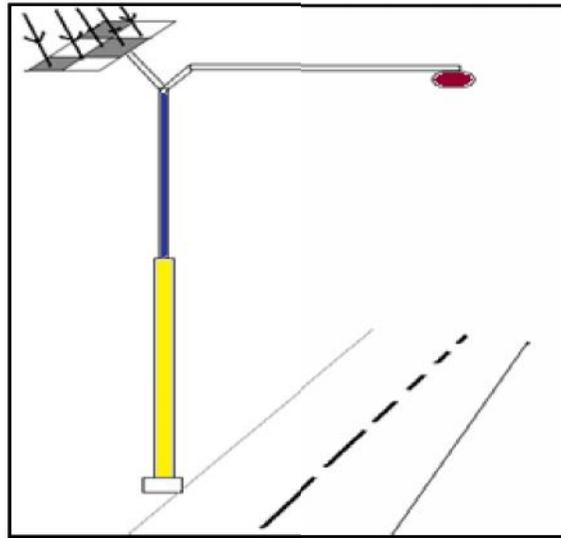
Gambar 3.14 Contoh panel atau selsurya
(Sumber: Halim, 2008)



Gambar 3.15 Aplikasi cahaya untuk transportasi
(Sumber: Halim, 2008)

Dalam gambar 3.15 adalah suatu lagi contoh penggunaan cahaya untuk mendapatkan energi listrik untuk menggerakkan kendaraan. Solar cell ditempatkan pada bagian atap kendaraan, agar mengarah langsung ke arah sinar matahari. Besar ukuran panel sel suarya menggambarkan banyak besar energi matahari yang dirubah menjadi energi listrik untuk menggerakkan kendaraan. Pada kasus ini terjadi perubahan dari energi radiasi matahari menjadi energi listrik

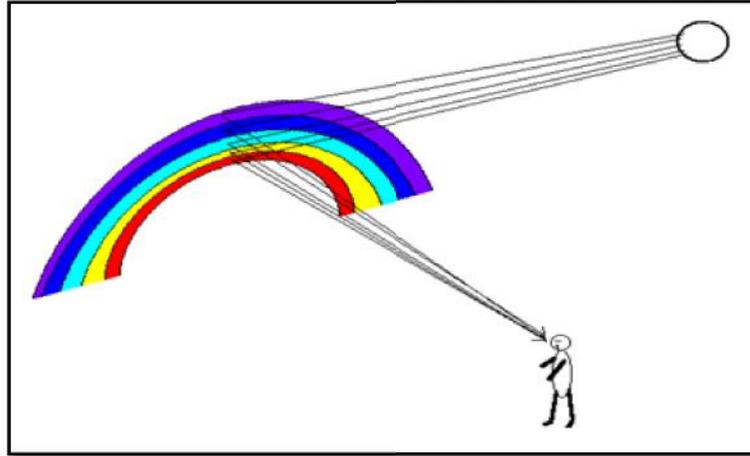
(yang dilakukan oleh panel surya), kemudian dirubah lagi menjadi energi gerak (yang dilakukan oleh komponen kendaraan tersebut). Untuk memenuhi keperluan energi listrik lampu penerangan dikawasan jalan raya yang berada diluar bandar banyak digunakan sel fotolistrik sebagai sumber tenaga. Gambar 3.16 ditunjukkan sel fotolistrik sebagai sumber energi lampu penerangan di jalan raya.



Gambar 3.16 Aplikasi cahaya pada lampu penerangan di jalan raya
(Sumber: Halim, 2008)

3.6.2. Pelangi

Dalam bagian ini kita akan tunjukkan suatu fenomena yang biasa terjadi dalam kehidupan sehari-hari, yaitu terkait dengan pelangi. Fenomena ini terjadi ketika pelangi berada dihadapan pengamat dan matahari berada di belakang pengamat, seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4,17 berikut.



Gambar 3.17 Fenomena difraksi cahaya yang dikenal dengan peristiwa pelangi
(Sumber: Halim, 2008)

Proses pembentukan pelangi hanya dapat dijelaskan jika cahaya dipandang berkelakuan seperti gelombang dan memperlihatkan fenomena pembiasan cahaya. Ini merupakan salah satu contoh bahwa cahaya adalah gelombang. Bukti bahwa peristiwa pelangi adalah proses pembiasan dan dispersi, ketika terjadi pelangi selalu matahari berada di belakang pengamat.

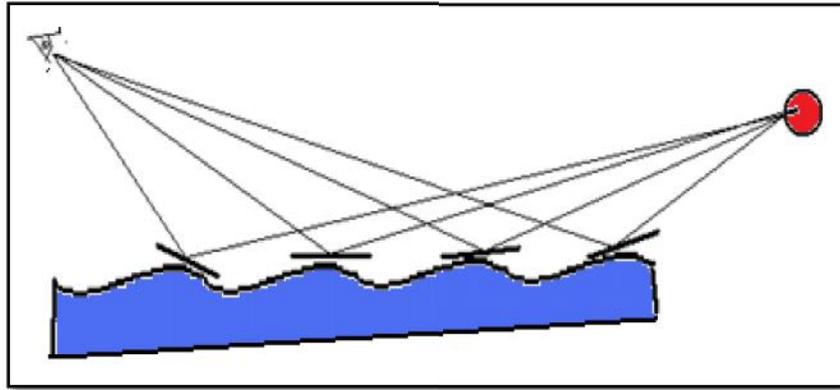
3.6.3. Banyangan matahari pada permukaan air

Suatu fenomena yang menjadi permasalahan dikalangan mahasiswa banyangan matahari atau bulan yang dibentuk oleh permukaan air. Banyangan yang dibentuk bukan bulat, seperti matahari atau bulan, tetapi memanjang seperti suatu kolom (lihat gambar 3.18).



Gambar 3.18 Banyangan matahari pada permukaan air di pagi hari
(Sumber: Halim, 2008)

Pembentukan banyangan suatu benda sangat tergantung pada bentuk permukaan. Banyangan benda yang dibentuk oleh pantulan sinar pada cermin datar akan menyerupai benda asal (ukuran sama, terbalik, dan seolah-olah ada dibelakang cermin atau maya). Permukaan licin, akan membentuk banyangan seperti benda asal, permukaan kurang licin membentuk banyangan yang kurang sama dengan benda asal, sedangkan permukaan air yang normal (seperti permukaan air laut yang sebenarnya) banyangan yang dibentuk akan menyerupai kolom (seperti dalam gambar 3.18). Fenomena ini dapat dijelaskan melalui 3.19 berikut. Setiap suatu gelombang pada permukaan air akan memantulkan sinar matahari, seperti yang terjadi pada cermin datar. Campuran dari beberapa banyangan pada setiap suatu gelombang air akan membentuk banyangan matahari seperti kolom.



Gambar 3.19 Dasar pembentukan bayangan matahari pada permukaan air
(Sumber: Halim, 2008)

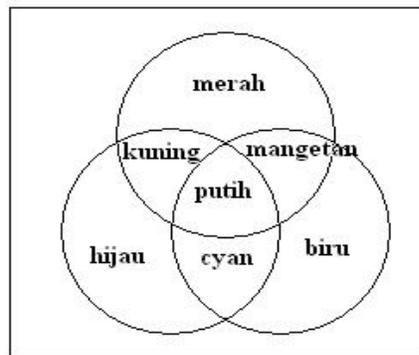
3.6.4. Tulisan ”AMBULANS”

Mahasiswa kemungkinan pernah melihat perkataan AMBULANS di tulis dengan terbalik didepan kendaraan rumah sakit. Apa tujuan perkataan itu disusun seperti itu? Ini bermaksud agar kendaraan didepan dengan mudah dapat membaca perkataan AMBULANS pada cermin sisi kendaraan (cermin cembung) dengan sisi yang sesuai dan memberi laluan untuk kendaraan jenazah tersebut. Ini merupakan salah satu dari kegunaan pantulan cahaya oleh cermin cembung atau jenis cermin lain yang dapat membentuk bayangan terbalik.

3.6.5. Warna objek

Perpaduan warna adalah salah satu masalah yang sering dijumpai dalam kehidupan sehari-hari. Cahaya merupakan gabungan dari berbagai warna dengan merah, hijau, dan biru sebagai warna utama

(primary). Manakala warna sekunder adalah kuning, mangetan, dan kian (cyan). Fenomena penyerapan dan pantulan cahaya telah membentuk berbagai jenis warna-warni dalam kehidupan sehari-hari. Objek yang berwarna merah, akan menyerap seluruh warna, kecuali warna merah atau hanya memantulkan warna merah. Begitu juga dengan objek berwarna biru akan menyerap seluruh warna, kecuali warna biru atau hanya warna biru yang dipantulkan. Untuk suatu objek yang mempunyai kemampuan untuk memantulkan warna biru tetapi cahaya yang datang padanya berwarna kuning (campuran hijau dengan merah) maka objek tersebut akan kelihatan gelap. Dalam gambar 3.20 berikut ditunjukkan suatu metode yang biasa digunakan untuk penggabungan berbagai warna.



Gambar 3.20. Perpaduan berbagai jenis warna
(Sumber: www.oceanexplorer.noaa.gov)

Dalam tabel 3.1 berikut ditunjukkan suatu tabel untuk kemudahan mengetahui warna setiap objek sesuai dengan warna cahaya yang sampai kepadanya. Dalam teori kuantum cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel, namun cahaya yang datang mengenai suatu objek akan diserap dalam bentuk gelombang elektromagnet dengan berbagai nilai frekuensi (warna).

Frekuensi-frekuensi getaran foton cahaya yang bersesuaian dengan frekuensi getaran atom dalam suatu objek akan diserap dan yang berbeda akan dipantulkan. Oleh karena itu, warna suatu objek menurut jenis frekuensi yang dipantulkan oleh objek tersebut.

Tabel 3.1 Perpaduan warna sesuai dengan *filter* masing-masing

	Filter merah	Filter hijau	Filter biru	Filter kuning	Filter mangetan	Filter cyan
Apel merah	merah	hitam	hitam	merah	merah	hitam
Apel hijau	hitam	hijau	hitam	hijau	hitam	hijau
Jeruk	hitam	hitam	hitam	kuning	hitam	hitam
Strawberri	merah	hitam	hitam	merah	merah	hitam

(Sumber: www.oceanexplorer.noaa.gov)

3.7. Kesalahan Konsep Cahaya

Pada bagian ini akan dikemukakan konsep-konsep cahaya yang salah dipahami oleh mahasiswa dan siswa sekolah menengah. Konsep-konsep tersebut sering dijadikan sebagai distraktor dalam naskah soal Ujian Diagnostik Fisika Kuantum (UDFK) atau bentuk tes diagnostik bidang yang lain.

Kesalahan Konsep 1: Tujuan percobaan interferensii untuk menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang

Kelompok peneliti dari Univeristas Andallas mendapati bahwa banyak mahasiswa memahami bahwa tujuan percobaan interferensii untuk menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang. Kesalahpahaman

ini berawal dari hasil yang terbentuk pada layar, yaitu pola gelombang transversal, seperti percobaan interferensii dalam gambar pada bagian 3.2. Oleh karena itu, banyak mahasiswa yang memahami bahwa cahaya adalah gelombang. Sebaliknya hakikat yang sebenarnya objektif percobaan adalah untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang. Hasil penelitian yang dilakukan oleh penulis dengan menggunakan UDFK pada 200 mahasiswa menunjukkan bahwa 21% mahasiswa memahami tujuan percobaan interferensii adalah untuk membuktikan bahwa cahaya adalah gelombang. Ini merupakan suatu pemahaman yang salah, Tujuan sebenarnya percobaan interferensii adalah untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti gelombang dan sebanyak 52% mahasiswa memilih pemahaman seperti itu (Halim, 2007).

Kesalahan Konsep 2: Pada percobaan pembiasan cahaya terjadi perubahan frekuensi (warna) cahaya.

Miskonsepsi jenis ini berasal dari efek perubahan panjang gelombang dan kecepatan cahaya ketika melalui media yang berbeda kerapatannya. Persamaan yang terkait antara kecepatan, frekuensi, dan panjang gelombang cahaya adalah;

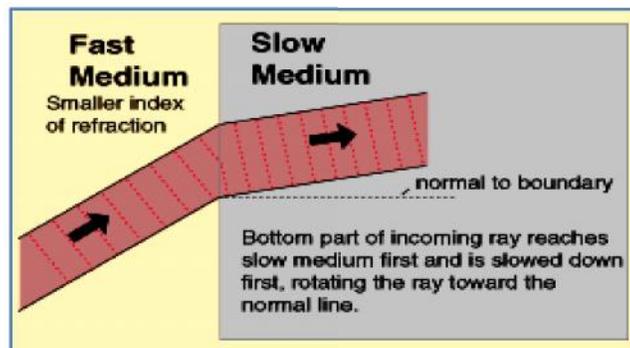
$$\lambda = f \cdot v \quad (1) \quad \text{atau} \quad f = \frac{v}{\lambda} \quad (2)$$

Berdasarkan pada persamaan (1), perubahan kecepatan gelombang cahaya akan berefek pada panjang gelombang cahaya. Banyak mahasiswa memahami bahwa perubahan panjang gelombang berbanding lurus dengan perubahan kecepatan dalam persamaan (2) dan juga disertai dengan perubahan frekuensi. Pemahaman yang benar adalah perubahan panjang gelombang sebanding dengan perubahan kecepatan, sehingga frekuensi tidak berubah atau konstan. Ini akan

mudah dipahami dengan menunjukkan contoh perhitungan. Untuk masa tertentu panjang gelombang berubah dari 2, 4, dan 8, sedangkan kecepatan pada masa yang sama berubah dari 1, 2, dan 4, maka didapati frekuensi tetap sama, yaitu 2.

Kesalahan Konsep 3: Pada percobaan pembiasan terjadi pembengkokan pada berkas cahaya.

Miskonsepsi jenis ini berasal dari fenomena yang tampak bahwa berkas cahaya melalui media yang berbeda kerapatan akan membengkok (*bending*) dari garis normal, seperti dalam gambar 3.21 berikut.



Gambar 3.21 Fenomena pembiasan cahaya dari medium cepat ke medium lambat

(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Masalah yang muncul adakah berkas cahaya tersebut **benar-benar membengkok** atau hanya **nampak pada mata saja**, sedangkan hakikat yang sebenarnya tidak terjadi seperti itu. Untuk penjelasan lebih lanjut lihat gambar 3.22 berikut dimana ditunjukkan fenomena tersebut yaitu suatu contoh pembiasan objek padat (pinsil).

Tampak dengan mata kita bahwa pensil tersebut mengalami kelengkungan, namun pada hakikat yang sebenarnya pensil tersebut tidak mengalami kelengkungan atau pensil tidak patah seperti yang tampak dengan mata kita. Masalah yang sama juga terjadi untuk berkas cahaya yang datang dari udara masuk kepermukaan air.



Gambar 3.22 Fenomena pensil dalam air
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Kesalahan Konsep 4: Manusia normal dapat melihat objek karena adanya partikel-partikel kecil dalam berkas cahaya yang dipantulkan oleh objek sehingga mengenai mata dan terefek untuk melihat benda.

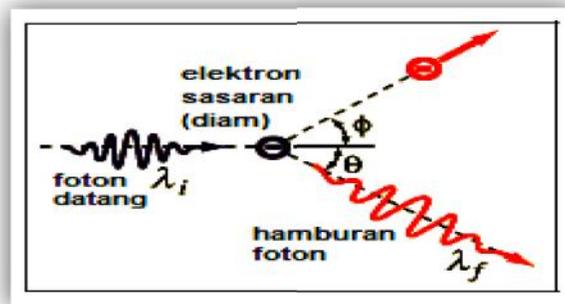
Miskonsepsi disebabkan dari pemahaman bahwa teori kospuler yang dikemukakan oleh Newton, yang menyatakan bahwa manusia dapat melihat objek karena dalam cahaya terdapat partikel-partikel kecil mengenai objek kemudian dipantulkan dan masuk kedalam mata, sehingga manusia terefek melihat benda. Berdasarkan pada hasil kajian menunjukkan bahwa 40% mahasiswa masih memegang pemahaman pada teori kospuler Newton (Halim 2007). Miskonsepsi

juga dapat disebabkan dari pemahaman bahwa partikel-partikel kecil yang terdapat dalam cahaya, seperti teori kospuler Newton, disamakan dengan konsep foton, seperti yang dipahami dalam konsep fisika moderen. Kedua-dua pemahaman tersebut **tidak** sesuai untuk menjelaskan jawaban atas pertanyaan kenapa manusia normal dapat melihat benda.

Manusia normal dapat melihat objek karena adanya pantulan cahaya oleh objek dan terbentuk bayangan dalam mata **bukan** karena terdapat partikel-partikel kecil dalam berkas cahaya. Ini sesuai dengan pandangan teori optik geometri dan optik fisis. Fenomena pantulan dan terbentuk bayangan dalam mata merupakan suatu fenomena yang mendukung pandangan bahwa cahaya berkelakuan seperti gelombang.

Kesalahan Konsep 5: Foton adalah sebuah partikel yang mempunyai gelombang di dalamnya

Miskonsepsi ini disebabkan dari pemahaman bahwa foton adalah partikel yang bergerak sesuai dengan gelombang elektromagnet dan juga terdapat dalam beberapa buku teks yang menunjukkan gambar seperti dalam gambar 3.23.



Gambar 3.23 Diagram percobaan efek Compton

(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

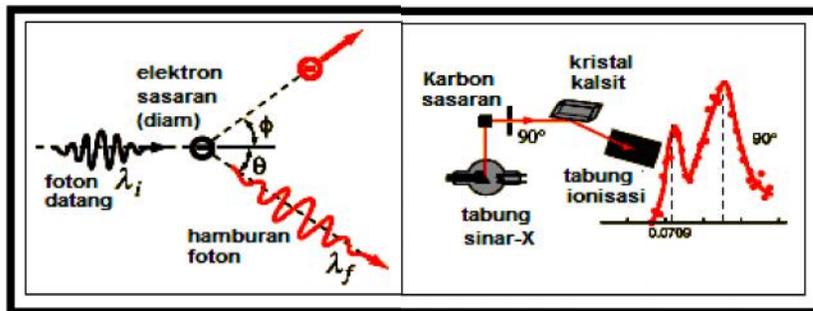
Miskonsepsi ini dapat juga disebabkan dari pemahaman penafsiran foton dengan kata-kata "paket gelombang". Paket gelombang dipahami sebagai bungkusan kecil yang berisi gelombang, seperti dalam gambar 3.23 di atas. Dalam gambar tersebut, foton dinyatakan dalam bentuk "paket gelombang". Ini merupakan salah satu riil bentuk foton yang sering dijumpai dalam buku-buku teks fisika kuantum universitas. Berdasarkan kepada gambar seperti itu banyak mahasiswa (20%) yang menganggap bahwa foton seperti partikel yang mengandung gelombang didalamnya (Halim 2007).

Partikel-partikel dasar (elektron, neutron, dan foton) sampai saat ini belum ada pakar yang mengetahui bentuk yang sebenarnya, apakah bulat, lonjong, atau empat persegi. Pemahaman konsep partikel-partikel dasar akan salah ketika partikel tersebut dikemukakan dalam bentuk gambar. Bahasa yang tepat, foton merupakan suatu sistem kuantum, dimana sifatnya mengikut sifat gelombang elektromagnetik. Dikatakan sistem kuantum, karena dapat berkelakuan ganda, seperti gelombang atau seperti partikel (Fyman, 1964).

Kesalahan Konsep 6: Cahaya berperilaku seperti gelombang, ketika berinteraksi dengan bahan

Kalimat pernyataan ini sebagian benar, yaitu berperilaku seperti gelombang, tetapi fenomena ini hanya dapat diamati sewaktu cahaya melalui celah ganda sempit dan menampakkan pola interferensii. Hasil kajian yang lalu menunjukkan bahwa 30% mahasiswa memahami bahwa cahaya berperilaku seperti gelombang, ketika berinteraksi dengan partikel dalam bahan (Halim 2007).

Miskonsepsi ini juga disebabkan dari gambar yang digunakan untuk menjelaskan pola interaksi antara cahaya (foton) dengan bahan seperti dalam gambar 3.24. Dalam efek Compton interaksi terjadi antara elektron diam dengan berkas gelombang elektromagnetik datang yang berkelakuan seperti partikel atau foton.



Gambar 3.24 Grafik percobaan efek Compton
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Kesalahan Konsep 7: Cahaya adalah gelombang, tetapi dapat berperilaku dengan beberapa sifat partikel

Semua bentuk gelombang mempunyai sifat yang sama, yaitu dapat menunjukkan fenomena pemantulan, pembiasan, difraksi, dan interferensi. Bahkan suatu sistem fisika dikatakan dapat berkelakuan seperti gelombang, jika dapat menampilkan fenomena-fenomena tersebut. Dalam kehidupan sehari-hari mahasiswa dan juga masyarakat biasa dapat mengamati bahwa cahaya selalu menampilkan fenomena pemantulan, pembiasan, difraksi, dan interferensi. Oleh karena itu, banyak mahasiswa yang berfikir bahwa cahaya adalah suatu bentuk gelombang. Pada tahap percobaan lebih lanjut, seperti percobaan efek fotolistrik dan efek Compton, cahaya dapat memperlihatkan fenomena kuantum.

Beberapa fenomena yang wujud dalam percobaan efek fotolistrik tidak dapat dijelaskan dengan hanya menggunakan teori radiasi gelombang elektromagnet klasik. Berdasarkan hasil percobaan efek fotolistrik dapat dikemukakan beberapa kesimpulan,

- (i) Jumlah elektron yang dipancarkan dari suatu logam karena pengaruh sinar cahaya tergantung pada intensitas cahaya.
- (ii) Energi kinetik maksimum elektron yang dipancarkan tergantung pada frekuensi sinar dan bukannya pada intensitas sinar
- (iii) Terdapat suatu frekuensi ambang (f_c). Jika sinar yang datang memiliki frekuensi lebih kecil dari frekuensi ambang f_c maka tidak akan terjadi pengeluaran elektron dari permukaan logam walaupun intensitas sinar tersebut diperbesar. Nilai frekuensi ambang ini tergantung pada jenis logam atau tergantung pada karakteristik logam dan tidak tergantung pada intensitas penyinaran.
- (iv) Elektron akan dikeluarkan segera dari permukaan logam setelah disinari dengan cahaya yang frekuensinya melebihi frekuensi ambang $f > f_c$, walaupun pada intensitas rendah.

Kesimpulan (ii) di atas tidak dapat dijelaskan dengan hanya menggunakan teori gelombang elektromagnet klasik yang dipopori oleh Maxwell. Karena menurut teori tersebut, energi atau intensitas sinar elektromagnet berbanding dengan amplitude intensitas gelombang elektromagnetik dan bukan dengan frekuensi. Hal ini bertentangan dengan kesimpulan dari eksperimen efek fotolistrik, yaitu kemampuan gelombang elektromagnetik atau cahaya mengeluarkan elektron tergantung pada warna atau frekuensi gelombang EM.

Kesimpulan (iii) di atas juga tidak dapat dijelaskan dengan hanya menggunakan teori gelombang elektromagnet klasik. Menurut teori gelombang EM atom-atom dalam logam akan menyerap energi sinar elektromagnet secara diskrit dan menyebabkan elektron-elektron bergetar sesuai atau sama dengan frekuensi sinar elektromagnet. Atom-atom dalam logam akan terus menyerap energi sinar sehingga

cukup untuk membebaskan elektron dari logam tersebut. Oleh karena itu, sinar dengan frekuensi lebih kecil dari frekuensi ambang (f_c) pun masih bisa mengeluarkan elektron, jika diberi waktu yang secukupnya untuk atom mengumpulkan energi, sehingga cukup untuk membebaskan elektron dari logam tersebut. Ini bermakna pengeluaran elektron dapat terjadi untuk semua nilai frekuensi sinar dan tidak ada frekuensi ambang seperti dalam kesimpulan eksperimen. Menurut kesimpulan eksperimen efek fotoelektrik, elektron dibebaskan **dengan segera** (tidak ada waktu *delay*) setelah sinar dikenakan pada suatu logam jika sinar itu mempunyai frekuensi melebihi frekuensi ambang. Hasil pengamatan pada percobaan efek fotolistrik selang waktu antara penyinaran dengan pelepasan elektron sekitar 10^{-9} s.

Sebagai kesimpulannya teori elektromagnet klasik gagal untuk menjelaskan fenomena efek fotolistrik terkait dengan wujudnya frekuensi ambang dan pemancaran elektron. Oleh karena itu, suatu konsep baru mengenai sinar elektromagnet telah dikemukakan oleh Einstein untuk menjelaskan fenomena yang terjadi dalam percobaan efek fotolistrik, yang dikenal dengan "konsep kuantisasi cahaya". Berdasarkan teori yang diusulkan oleh Einstein, energi sinar elektromagnet merupakan suatu kuantum atau korpuskel yang disebut dengan *foton*. Foton merupakan suatu sistem kuantum energi sinar elektromagnet yang dapat diserap dan dipancarkan. Setiap foton mengandung energi yang dinyatakan dengan persamaan

$$E = hf$$

Keberhasilan teori kuantum cahaya dalam menjelaskan fenomena efek fotolistrik menghantarkan kita kepada suatu kesimpulan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti partikel. Hasil ini juga menunjukkan satu implikasi lain, dimana sebagian berpikir bahwa cahaya adalah gelombang, tetapi dapat menunjukkan atau berperilaku seperti partikel.

Kesalahan Konsep 8: Cahaya adalah campuran antara gelombang dan partikel

Dalam pemahaman sehari-hari, kata campuran bermakna dalam suatu sistem terdapat dua benda yang dapat dirasakan wujudnya dalam waktu bersamaan. Seperti dalam air diletakkan garam dan gula, maka dalam waktu yang bersamaan air tersebut ada rasa asin dan juga manis. Tetapi tidak pernah dijumpai pada air tersebut dua rasa (asin dan manis) dalam masa dan tempat yang terpisah. Setelah rasa asin wujud pula rasa manis atau sebaliknya. Oleh karena itu, dikatakan bahwa air tersebut merupakan campuran dari garam dan gula.

Apakah untuk gelombang elektromagnetik dapat dikatakan "campuran" antara gelombang dan partikel. Kesalahan pemahaman konsep ini disebabkan dari fenomena yang ditunjukkan oleh cahaya pada dua percobaan yang terpisah, yaitu pada percobaan efek fotolistrik didapati fenomena partikel dan melalui percobaan difraksi, pembiasan, interferensii, dan pemantulan menunjukkan fenomena gelombang.

Berdasarkan dua percobaan tersebut, mahasiswa memahami bahwa cahaya dapat menunjukkan fenomena gelombang dan juga fenomena partikel. Oleh karena itu, mahasiswa berkesimpulan bahwa cahaya merupakan campuran dari gelombang dan partikel. Suatu masalah penting yang tidak atau salah dipahami oleh mahasiswa, yaitu fenomena gelombang dan partikel **tidak** ditunjukkan dalam waktu bersamaan tetapi dalam waktu dan tempat yang terpisah. Oleh karena itu, menurut pandangan ini cahaya tidak tepat dikatakan campuran antara gelombang dan partikel. Perkataan atau konsep yang lebih tepat adalah cahaya merupakan suatu sistem kuantum yang dapat menunjukkan fenomena gelombang pada suatu waktu atau fenomena partikel pada waktu dan tempat yang lain.

Rangkuman

Bila benda yang dikenai cahaya ukurannya jauh lebih besar dari panjang gelombang cahaya, maka efek pembiasan dan pemantulan yang lebih dominan kelihatannya. Sebaliknya bila ukuran benda tersebut mendekati panjang gelombang cahaya, maka yang lebih dominan adalah efek difraksi dan interferensii. Selanjutnya bila ukuran benda sama dengan panjang gelombang cahaya, maka saat cahaya mengenai benda (ukurannya mendekati ukuran atom), maka cahaya akan diserap dalam bentuk energi radiasi. Kemudian elektron dalam atom akan memanfaatkan energi tersebut untuk membebaskan diri dari ikatan pada atom. Bila elektron berhasil melepaskan diri dari ikatan dengan atom, maka atom tersebut berubah menjadi ion positif atau atom tersebut sudah terionisasi. Pada saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran mikro (seperti atom), maka ia berperilaku sebagai partikel yang dikenal dengan foton. Sementara saat cahaya bertumbukan dengan benda berukuran makro (seperti cermin atau air), maka cahaya berperilaku sebagai gelombang. Dalam bahagian selanjutnya kita akan pelajari beberapa percobaan yang memerlukan definisi cahaya sebagai kumpulan partikel.

Pada temperatur kamar, benda-benda yang tampak kita lihat bukanlah karena memancarkan radiasi thermalnya, tetapi karena cahaya yang dipantulkan oleh benda tersebut dari sumber lain. Jika tidak ada cahaya yang menyinari, maka kita tidak akan dapat melihatnya. Bila temperatur benda dinaikkan, maka benda kelihatan merah, kuning, terus sampai ke warna violet sesuai dengan kenaikan temperatur. Besar intensitas per satuan luas permukaan benda disebut dengan "**Daya emisi monokromatik**" dan dinyatakan dengan $i(\lambda)$.

Percobaan celah-ganda Thomas Young yang dilakukan pada tahun 1801 merupakan suatu percobaan untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat memperlihatkan perilaku gelombang, yaitu sifat interferensii dan difraksi. Lebih lanjut James Clerk Maxwell pada tahun 1864 telah memasukkan cahaya kedalam kelompok gelombang

elektromagnet dan berhasil merumuskan formula gelombang elektromagnetik dalam ruang vakum. Bukti sejarah ini telah mengajak kita untuk mengatakan bahwa cahaya adalah gelombang, yaitu salah satu gelombang elektromagnetik.

Percobaan efek fotolistrik yang dikaji pertama sekali oleh Heinrich Hertz pada tahun 1887 menunjukkan bahwa radiasi elektromagnet yang diarahkan pada permukaan logam akan menyebabkan "terusir" elektron dari permukaan logam. Pada tahun 1902, Philip Lenard mengamati bahwa energi kinetik fotoelektron **tidak** tergantung pada intensitas cahaya, tetapi tergantung pada frekuensi cahaya. Dengan perkataan lain energi cahaya harus dianggap berbentuk diskrit, bukan kontinu seperti dipahami oleh teori Maxwell. Sampai pada tahun 1905, Einstein mengusulkan bahwa energi gelombang elektromagnetik atau energi cahaya harus dianggap terkuantisasi dalam bentuk deretan partikel atau kuantum (yang berasal dari kata latin "kuantum" artinya "how much"). Pada tahun 1926 deretan partikel tersebut diberi nama dengan foton. Ini suatu fakta sejarah yang memaksa kita untuk menyimpulkan bahwa energi cahaya berbentuk diskrit atau deretan partikel yang dikenal dengan foton dan ini ditandai dengan awalnya lahir teori radiasi kuantum.

Lalu apa bahasa yang paling sesuai digunakan untuk CAHAYA? Partikel atau Gelombang. Salah kalau kita katakan cahaya adalah partikel atau gelombang, karena cahaya tidak pernah berubah bentuk menjadi partikel atau gelombang. Lebih tepat kita katakan cahaya dapat berkelakuan seperti gelombang atau seperti partikel. Foton yang dianggap sebagai penjelmaan paket energi cahaya dan terdapat dalam berkas cahaya lebih tepat kita sebut dengan istilah "partikel gelombang" atau "sistem kuantum".

Percobaan efek fotolistrik adalah percobaan yang digunakan untuk membuktikan kebenaran sifat partikel pada cahaya. Ternyata terdapat beberapa hasil percobaan efek fotolistrik yang tidak dapat dijelaskan dengan konsep elektromagnet klasik antaranya; (i) Jika frekwensi cahaya dibawah frekwensi ambang materi/bahan, maka

tidak ada "arus elektron" yang mengalir dalam tabung, walau pun intensitas cahaya dinaikan. (ii) Untuk frekuensi cahaya diatas frekuensi ambang bahan, penambahan intensitas cahaya akan menambah **jumlah** arus elektron yang mengalir dalam tabung. (iii) Energi kinetik elektron yang mengalir dalam tabung **tidak** tergantung pada intensitas cahaya, tetapi hanya tergantung pada frekuensi cahaya.

Percobaan lain yang mendukung bahwa cahaya dapat berperilaku seperti partikel adalah percobaan efek Compton. Proses efek Compton terjadi interaksi antara radiasi elektromagnet dengan elektron diam. Setelah interaksi elektron dan berkas radiasi gelombang elektromagnet terhambur dengan ϕ adalah sudut hamburan antara keduanya. Hasil percobaan menunjukkan bahwa energi radiasi elektromagnet berkurang setelah tumbukan dibandingkan dengan sebelum tumbukan. Berdasarkan konsep tumbukan, proses interaksi antara radiasi EM dan elektron ini dapat dianggap sebagai interaksi antara dua objek yang memiliki masa diam. Oleh karena itu, perumusan teori interaksi ini dapat digunakan hukum kekekalan energi dan hukum kekekalan momentum linear, seperti yang biasa digunakan pada proses interaksi dua benda. Sebagai contoh hasil percobaan efek Compton dengan menggunakan sinar-X ($\lambda = 0.74 \text{ \AA}$) yang diarahkan pada atom grafit. Setelah dihitung ternyata hubungan antara energi foton yang terhambur dengan sudut hamburan yang diperoleh dari hasil eksperimen ternyata cocok dengan nilai yang diramalkan secara teori. Kesesuaian antara hasil percobaan ini dengan ramalan teori, yang dirumuskan berdasarkan hukum kekekalan energi dan momentum linear, menunjukkan bahwa berkas radiasi gelombang elektromagnet berperilaku seperti partikel.

Lebih jauh dapat disimpulkan bahwa tujuan percobaan ini adalah untuk menguatkan teori kuantum dan menolak teori gelombang elektromagnet klasik. Pada percobaan efek Compton terjadi interaksi antara berkas radiasi gelombang elektromagnet dengan elektron. Bukti yang mendukung bahwa berkas radiasi elektromagnet berperilaku seperti partikel dapat dipahami dari fenomena sebelum, pada saat,

setelah proses interkasi. Terdapat tiga indikasi pada efek Compton yang dapat dijadikan sandaran untuk mengatakan bahwa gelombang elektromagnetik dapat berperilaku seperti partikel. Pertama, fenomena dan proses tumbukan antara radiasi gelombang EM dengan elektron diam mirip dengan interaksi antara dua partikel yang memiliki masa diam. Kedua, panjang gelombang radiasi elektromagnetik berkurang setelah mengalami interaksi dibandingkan sebelum terjadi interaksi. Ini menunjukkan ada transfer energi dari radiasi ke elektron selama proses interaksi. Ketiga, dalam merumuskan teorinya Compton menggunakan konsep dualisme ($E = hf$), sehingga hasil rumusan sesuai dengan hasil percobaan efek Compton.

Pemahaman konsep elektromagnet klasik, intensitas cahaya berbanding lurus dengan energi atau berbentuk $I = \epsilon_0 c |E|^2$. Artinya penambahan intensitas cahaya akan menaikkan energi cahaya secara malar. Hasil percobaan efek fotolistrik menunjukkan keadaan yang berlawanan, dimana penambahan intensitas tidak terjadi kenaikan energi cahaya, akan tetapi energi cahaya bertambah apabila frekuensi cahaya dinaikan. Kenyataan ini memaksa kita untuk menerima hipotesis Planck dan rumusan Einstein, yaitu untuk energi cahaya dengan rumusan $E \cong hv$ dan untuk intensitas cahaya dengan rumusan $I \cong Nh\nu$. Parameter N merupakan **jumlah partikel** yang ada dalam berkas cahaya dan bergerak secara diskrit. Oleh karena itu, dapat disimpulkan bahwa cahaya harus dipandang sebagai aliran paket-paket energi yang kemudian diberi nama dengan foton. Percobaan celah-ganda Thomas Young yang dilakukan pada tahun 1801 merupakan percobaan untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat memperlihatkan perilaku gelombang, yaitu sifat interferensi dan difraksi. Lebih lanjut James Clerk Maxwell pada tahun 1864 telah memasukkan cahaya kedalam kelompok gelombang elektromagnet dan berhasil menunjukkan rumusan formulanya.

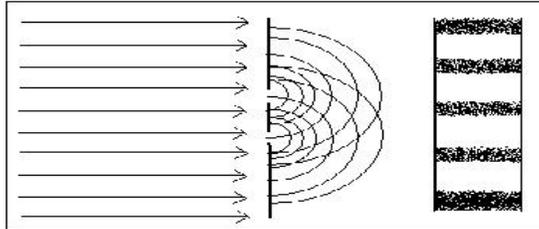
Pola interferensi dari hasil percobaan celah ganda T. Young menunjukkan bahwa berkas cahaya mempunyai bentuk yang sesuai dengan gelombang melintang (transversal). Garis terang dan daerah

gelap pada pola interferensi cocok dengan puncak dan lembah pada gelombang melintang. Jarak antara puncak suatu ke puncak berikutnya merupakan tafsiran panjang gelombang cahaya. Tambahan pula pola interferensi tersebut disebabkan dari proses difraksi cahaya melalui celah ganda. Bukti-bukti ini menjadi pendukung utama untuk mengatakan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti gelombang, yang dikelompokkan kedalam kumpulan gelombang elektromagnet.

Fenomena lain, dalam banyak buku teks fisika ditemukan penjelasan bahwa berkas cahaya terjadi pembengkokkan saat melalui dari medium rapat rendah ke medium yang lebih rapat (misalnya dari udara ke air). Adakah fenomena ini benar-benar terjadi atau hanya sekedar pengaruh pada efek penglihatan dengan mata. Fenomena pembengkokkan tidak pernah terjadi pada cahaya. Perlu diingat bahwa cahaya sentiasa bergerak lurus, fenomena pembengkokkan hanya karena faktor penglihatan sahaja. Untuk mendukung pandangan ini dapat dipelajari fenomena pincil yang diletakkan dalam gelas yang berisi air. kelihatannya pincil dalam gelas tersebut mengalami patah atau terjadi pembengkokkan, tetapi pada hakikat sebenarnya pincil tersebut tetap utuh dan tidak terjadi patah.

Latihan

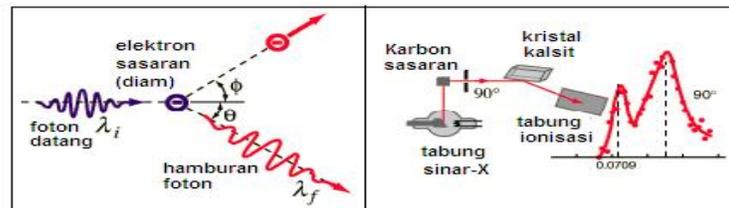
1. Cahaya koheren ditunjukkan pada ganda celah dua akan membentuk pola interferensii seperti dalam gambar di bawah.



Tujuan utama percobaan ini adalah untuk

- A. Menunjukkan puncak dan lembah gelombang cahaya
 - B. Membukti bahwa terang keluar dari puncak dan gelap keluar dari lembah gelombang
 - C. Membuktikan bahwa muka sinar dan gelombang adalah sama
 - D. Menunjukkan bahwa cahaya adalah gelombang
 - E. Menunjukkan bahwa cahaya mempunyai sifat-sifat gelombang
2. Pada percobaan pembiasan cahaya, terjadi salah satu pernyataan di bawah ini :
 - A. Frekuensi (warna) cahaya berubah
 - B. Sifat-sifat cahaya berubah
 - C. Terjadi kelengkungan pada berkas cahaya
 - D. Frekuensi (warna) cahaya tidak berubah
 - E. Laju cahaya tetap, yaitu 3×10^8 m/s
 3. Manusia normal dapat melihat benda, karena
 - A. Karena adanya partikel-partikel kecil dalam berkas cahaya yang dipantulkan oleh objek sehingga mengenai mata dan terefek untuk melihat benda.
 - B. Karena bayangan objek terbentuk dalam mata

- C. Karena adanya cahaya matahari atau cahaya lampu lainnya
- D. Karena objek dapat memantulkan cahaya
- E. Karena adanya pantulan cahaya oleh objek dan terbentuk bayangan dalam mata.
4. Berbagai konsep, teori, dan hipotesis telah dikemukakan oleh pakar fisika tentang bentuk dan hakikat FOTON yang sebenarnya. Diantara lima pernyataan di bawah, pilih salah satu jawaban yang paling benar menurut anda.
- A. Foton adalah sebuah partikel yang mempunyai gelombang di dalamnya
- B. Foton adalah gumpalan/potongan energi yang ditransfer dari/ke gelombang EM
- C. Foton adalah suatu sistem kuantum, sifatnya sesuai dengan sifat gelombang EM
- D. Foton adalah gelombang, tetapi dapat menunjukkan beberapa sifat partikel
- E. Foton sebuah partikel, sebagaimana halnya elektron.
5. Pernyataan di bawah berkaitan dengan proses interaksi antara cahaya tampak dengan bahan (lihat gambar: bukan seperti kejadian yang sebenarnya), pernyataan yang benar adalah:



- A. Interaksi sama seperti tumbukan antara dua objek padat.
- B. Cahaya berperilaku seperti partikel ketika berinteraksi dengan bahan

- C. Cahaya berubah menjadi partikel ketika terjadi interaksi dengan bahan
 - D. Tidak pernah terjadi interaksi antara cahaya dengan bahan
 - E. Cahaya berperilaku seperti gelombang, ketika berinteraksi dengan bahan
6. Berbagai macam bentuk teori dan eksperimen telah dilakukan oleh pakar fisika untuk mengetahui hakikat yang sebenarnya tentang CAHAYA. Lima pernyataan di bawah, anda diminta untuk memilih salah satu jawaban yang paling sesuai.
- A. Cahaya adalah campuran antara partikel dan gelombang
 - B. Cahaya dapat berperilaku seperti partikel atau seperti gelombang
 - C. Cahaya adalah gelombang
 - D. Cahaya adalah partikel
 - E. Cahaya adalah gelombang, tetapi dapat berperilaku dengan beberapa sifat partikel
7. Buktikan kembali persamaan (3.2) dengan menggunakan persamaan (3.2a)
8. Buktikan persamaan (3.6f)
9. Dalam konteks penyerapan dan pemancaran radiasi apa beda antara benda hitam sempurna dengan benda biasa.

Glossarium

Cahaya bukan gelombang elektromagnet atau juga bukan partikel atau bukan juga campuran antara keduanya. Cahaya merupakan suatu sistem kuantum yang dapat menunjukkan fenomena gelombang atau fenomena partikel pada waktu dan tempat yang terpisah, bukan pada pada waktu dan tempat yang bersamaan.

Sifat cahaya yang paling dominan adalah seperti gelombang elektromagnet atau seperti partikel. Kedua sifat tersebut ditunjukkan oleh dua hasil percobaan yang berbeda, yaitu percobaan efek fotoelektrik dan percobaan interferensii cahaya. Sebagai gelombang, cahaya dapat menunjukkan sifat pemantulan, difraksi, interferensii, pembiasan, dan polarisasi, sebagaimana halnya yang sring terjadi pada gelombang elektromagnet.

Percobaan interferensii adalah untuk menunjukkan bahwa cahaya dapat berperilaku seperti gelombang, yaitu dapat menunjukkan pola gelombang transversal. Bukan untuk menunjukkan bahwa cahaya datang dari puncak dan gelap datang dari lembah gelombang cahaya.

Percobaan pembiasan merupakan pembelokan cahaya yang hanya terjadi perubahan panjang gelombang dan kecepatan cahaya, sedangkan frekuensi cahaya tetap tidak berubah. Fenomena pelengkungan berkas cahaya hanya pada penglihatan dengan mata, sedangkan hakikat yang sebenarnya tidak terjadi perubahan pada arah gerak cahaya. Fenomena pembanding dapat diketahui dari pincil yang diletakkan dalam cawan berisi air. Nampak dengan mata, pincil, mengalami pelengkungan, namun pada hakikatnya tidak mengalami perubahan atau pelengkungan.

Foton merupakan suatu sistem kuantum yang mempunyai energi *diskrit* (terpisah) antara suatu bagian dengan bagian yang lain. Foton

mempunyai sifat sesuai dengan sifat gelombang elektromagnet. Energi foton berbanding dengan frekuensi gelombang elektromagnet, bukan dengan intensitas radiasi gelombang elektromagnet.

Cahaya Sebagai Partikel maksudnya cahaya dapat berperilaku seperti partikel. Fenomena ini pernah dikemukakan oleh Newton dan para ilmuwan mulai meyakini ide yang dikemukakan oleh Huggens. Hal ini disebabkan banyak eksperimen (seperti peristiwa difraksi, refleksi, interferensi, dst) dapat ditunjukkan oleh cahaya.

Intensitas didefinisikan sebagai jumlah daya yang dipancarkan oleh satuan luas permukaan atau dikatakan dengan daya emisi monokromatik.

Rapat energi yang didefinisikan sebagai jumlah energi persatuan volume dalam frekuensi f dan $f + df$ dari spektrum benda hitam dalam kotak bertemperatur diatas suhu mutlak.

Daya Emisi monokromatik adalah besar intensitas persatuan luar permukaan benda yang dinyatakan dengan $i(\lambda)$. Intensitas cahaya yang dipancarkan oleh satuan luas benda untuk daerah panjang gelombang $d\lambda$ disekitar λ

Bencana Ultraviolet merupakan penambahan frekuensi kearah yang lebih tinggi sehingga besar spektrumnya tak terhingga, sebaliknya hasil eksperimen menunjukkan adanya puncak spektrum atau tertentu besarnya spektrum.

Daftar Pustaka

- Arya, A.P. 2003. *Elementary Modern Physics*. California: Addison-Wesley.
- Beiser, A. 2001. *Concepts of Modern Physics* (3rd edition). New York: McGraw-Hill Inc.
- Feynman, 1964. *The Feynman Lectures on Physics Vol III*, Addison-Wesley, USA
- Halim A, 2007. *Pengembangan dan Aplikasi Ujian Diagnostik Fisika Kuantum (UDFK)*, Pendidikan Sains, UKM.
- Halim A, 2008. *Dokumen (foto dan grafik) Mata Kuliah Fisika Modern*, FKIP Unsyiah (tidak dipublikasi)
- Krane, K. 2001. *Fisika Modern*. Diterjemahkan oleh Hans J. Wospakrik. 1992. Jakarta, Indonesia: UI-Press.
- Kusminarto. 1993. *Pokok-pokok Fisika Modern*. Jakarta: DIKTI.
- Serway, R.A., Moses, C.J. & Moyer, C.A. 2005. *Modern Physics* (3rd Edition). United Kingdom: Thomson.
- Taylor, J.R., Zafiratos, C.D., Dubson M.A. 2003. *Modern Physics for Scientists and Engineers* (2nd Edition). Pearson, London: Prentice-Hall.
- Sutrisno. 2003. *Fisika Dasar: Fisika Modern*. Bandung: Penerbit ITB.

BAB IV

STRUKTUR ATOM

Tujuan Umum Pembelajaran

Setelah mahasiswa membaca Bab Struktur Atom ini diharapkan mampu memahami dan menguraikan berbagai bentuk model atom, struktur atom, dan spektrum atomic serta mampu menjelaskan beberapa eksperimen yang mendukung model dan atau struktur sebuah atom.

Tujuan Khusus Pembelajaran

Setelah mahasiswa mempelajari isi Bab Struktur Atom secara khusus diharapkan mahasiswa dapat

- (1) Menjelaskan perbedaan bentuk dan model atom sesuai dengan definisi saintifik
- (2) Menjelaskan secara sistematis perkembangan model-model atom.
- (3) Menjelaskan kelebihan dan kelemahan model-model atom.
- (4) Menjelaskan prinsip eksperimen yang mendukung setiap model atom.
- (5) Menunjukkan konsep model atom yang sesuai dengan pemahaman saintifik
- (6) Menjelaskan definisi dan ciri-ciri atom Hidrogen
- (7) Menjelaskan struktur atom Hydrogen sebagai salah satu bentuk atom yang paling sederhana.
- (8) Menjelaskan prinsip eksperimen yang mendukung struktur atom yang dikaji.

4.1 Pengantar

Struktur atom merupakan salah satu bentuk sistem fisika yang bersifat abstrak dan mikroskopik. Beberapa model atom telah dikemukakan oleh pakar fisika namun belum sampai pada tahap akhir menuju kepada bentuk atom yang sebenarnya. Walaupun demikian beberapa model atom telah didukung oleh eksperimen sederhana. Suatu eksperimen hanya mampu menunjukkan salah satu karakter atom dan eksperimen yang lain menunjukkan karakter yang lain dari bagian atom. Berdasarkan hasil eksperimen seperti itu pakar fisika mengambil kesimpulan tentang model atom yang dikaji dan menggambarkan modelnya. Hasil penelitian yang telah dilakukan menunjukkan banyak mahasiswa menganggap model atom yang ditunjukkan oleh pakar sebagai bentuk atom yang sebenarnya (Halim 2007). Ini merupakan salah satu bentuk kesalahpahaman yang telah tercemar mahasiswa dalam memahami model atom. Dalam Bab ini akan diuraikan beberapa penjelasan yang terkait dengan model dan struktur yang telah dihasilkan oleh pakar fisika modern.

4.2 Pengertian Bentuk dan Model Atom

Sebagaimana dijelaskan pada bagian sebelumnya banyak mahasiswa memahami model atom sebagai bentuk atom yang sebenarnya. Mereka menyangka gambar atom yang ditunjukkan dalam sebagian besar buku teks fisika modern atau buku teks kimia merupakan bentuk yang sebenarnya. Sangkaan seperti ini kemungkinan muncul dari keterbatasan mahasiswa memahami perbedaan antara model dengan bentuk atom yang sebenarnya.

Bentuk atom merupakan wujud atom yang riil sebagaimana bentuk yang sebenarnya. Bentuk atom yang riil atau tepat sama dengan bentuk sebenarnya sampai saat ini belum diketahui oleh pakar. Terdapat beberapa sebab kenapa pakar fisika modern sukar

menentukan bentuk atom yang sebenarnya, diantaranya karena atom dan penyusunnya (elektron, proton, dan neutron) memiliki dua sifat (dualisme), yaitu sebagai gelombang dan juga sebagai partikel. Kedua sifat tersebut tidak dapat muncul pada tempat dan waktu bersamaan, melainkan pada kondisi yang terpisah. Karena ketidakpastian bentuk dari partikel-partikel tersebut, sehingga muncul ketidakpastian posisi dan momentum partikel-partikel penyusun atom. Akibatnya tidak mungkin digambarkan bentuk atom yang sebenarnya.

Model atom merupakan manifestasi atau terjemahan hasil pengamatan pakar melalui eksperimen atomik. Semua gambar atom yang sering ditemui dalam buku teks fisika modern merupakan model-model atom yang dikemukakan oleh pakar dan perlu ditekankan bahwa itu **bukan** bentuk atom yang sebenarnya. Ada pakar fisika yang menggambarkan model atom berdasarkan asumsi atau nberkasi, ada pakar yang menggambarkan model atom berdasarkan hasil percobaan, dan ada juga pakar menggambarkan model atom berdasarkan perhitungan matematis. Setiap model atom yang ditunjukkan oleh pakar semuanya berdasarkan penyempurnaan terhadap kelemahan-kelemahan yang telah diketahui dari model atom sebelumnya.

4.3 Model-Model Atom

Konsep atom di dalam bahan telah dipelopori oleh Democritus dan Empicurian, ahli falsafah Greek pada abad kelima masehi. Atom dalam bahasa Greek "atomos" berarti sesuatu yang tidak dapat dibelah lagi. Walau bagaimanapun, konsep atom yang dikemukakan itu tidak mendapat perhatian pada waktu itu, karena kekurangan data eksperimen untuk mendukung kebenarannya. Pakar lain, John Dalton (1803) menyatakan bahwa atom adalah bagian dasar yang tidak dapat dibagi-bagikan lagi walaupun dengan proses kimia. Atom merupakan benda terkecil untuk suatu unsur yang dapat mengambil

bagian dalam perubahan kimia. Untuk memmahasiswai karakteristik dan sifat-sifat atom pakar fisika menunjukkan model-model atom.

4.3.1 Model Atom Dalton

Pada tahun 1803, John Dalton mengemukakan pendapatnya tentang atom. Teori atom Dalton didasarkan pada dua hukum, yaitu hukum kekekalan massa (hukum Lavoisier) dan hukum susunan tetap (hukum prouts). Lavoisier menyatakan bahwa "Massa total zat-zat sebelum reaksi akan selalu sama dengan massa total zat-zat hasil reaksi". Sedangkan Prouts menyatakan bahwa "Perbandingan massa unsur-unsur dalam suatu senyawa selalu tetap". Dari kedua hukum tersebut Dalton mengemukakan pendapatnya tentang atom sebagai berikut:

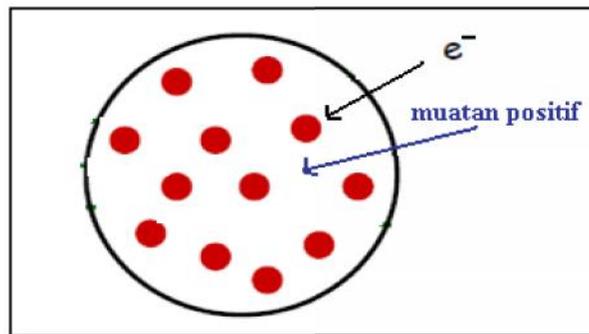
1. Atom merupakan bagian terkecil dari materi yang sudah tidak dapat dibagi lagi
2. Atom digambarkan sebagai bola pejal yang sangat kecil, suatu unsur memiliki atom-atom yang identik dan berbeda untuk unsur yang berbeda
3. Atom-atom bergabung membentuk senyawa dengan perbandingan bilangan bulat dan sederhana. Misalnya air terdiri atom-atom hidrogen dan atom-atom oksigen
4. Reaksi kimia merupakan pemisahan atau penggabungan atau penyusunan kembali dari atom-atom, sehingga atom tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan.

Hipotesa Dalton digambarkan dengan model atom sebagai bola pejal. Teori atom Dalton tidak dapat menerangkan suatu larutan dapat menghantarkan arus listrik. Bagaimana mungkin bola pejal dapat menghantarkan arus listrik? padahal listrik adalah elektron yang bergerak. Berarti ada partikel lain yang dapat menghantarkan arus listrik. Secara garis besar Dalton menyimpulkan model atomnya dalam bentuk kalimat berikut.

- *All matter is made of atoms.*
- *Atoms of an element are identical.*
- *Each element has different atoms.*
- *Atoms of different elements combine in constant ratios to form compounds.*
- *Atoms are rearranged in reactions*

4.3.2 Model Atom J.J Thomson

Model atom Thomson adalah model atom yang pertama sekali mendapat perhatian ialah model atom yang telah disarankan oleh J.J.Thomson (1898). Model atom jenis ini mengatakan bahwa atom merupakan suatu sfera atau bola padat seragam yang terdiri dari muatan-muatan positif dengan elektron-elektron tertabur kedalam sfera secara merata sehingga membentuk suatu susunan atom yang stabil secara elektrostatis.

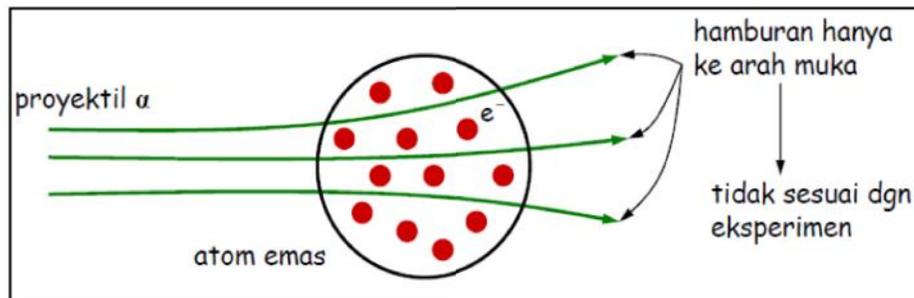


Gambar 4.1 Model atom Thomson
(Sumber: Halim, 2008)

Gambar 4.1 menunjukkan model atom seperti yang disarankan oleh J.J Thomson. Model atom ini juga dikenal sebagai istilah *model kueh puding*.

Kegagalan model atom Thomson ialah tidak mampu menjelaskan fenomena yang menunjukkan bahwa elektron bergetar dengan frekuensi tertentu. Hasil eksperimen Hamburan Rutherford tidak dapat dijelaskan dengan menggunakan model atom Thomson. Menurut model atom Thomson partikel alpha yang digunakan sebagai proyektil pada percobaan Rutherford harus dihamburkan kearah muka dengan kata lain tidak ada partikel alpha yang direfleksi ke depan (seperti dalam gambar 4.2).

Sedangkan hasil percobaan yang didapat oleh Rutherford terdapat partikel alpha yang direfleksi ke depan. Oleh karena itu Rutherford menyarankan suatu model atom yang lain yang lebih sesuai dengan hasil uji coba hamburan partikel alfa.



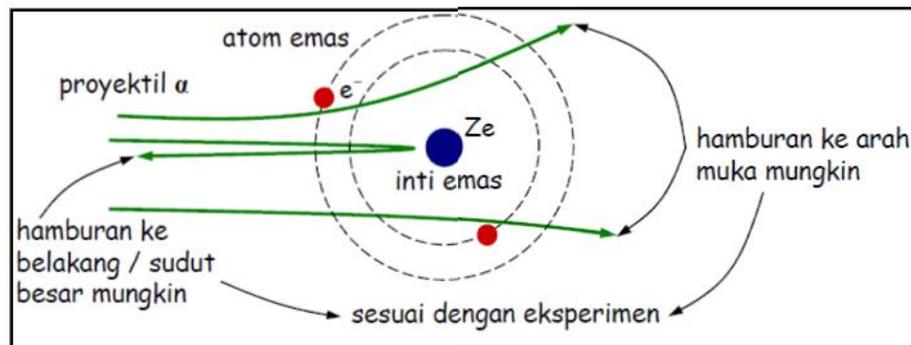
Gambar 4.2 Perkiraan hasil percobaan Rutherford dengan model atom J.J Thomson

(Sumber: www.wikipedia.org/atom)

4.3.3 Model Atom Rutherford

Model atom Rutherford merupakan model atom klasik yang didasarkan pada hasil kajian hamburan partikel alpha dan juga penyempurnaan dari model atom Thomson. Dalam uji coba hamburan

partikel alpha yang dilakukan oleh Geiger dan Marsden (1911) menggunakan suatu sampel yang dapat mengeluarkan partikel alpha dibelakang layar berlobang kecil. Berkas partikel alpha yang diarahkan kepada sekeping emas tipis banyak yang dihamburkan ke sudut-sudut besar, bahkan ada partikel alpha yang dihamburkan ke belakang atau 180° terhadap arah datang partikel alpha. Pola Hamburan partikel alpha dalam uji coba hamburan Rutherford ditunjukkan dalam gambar 4.3.

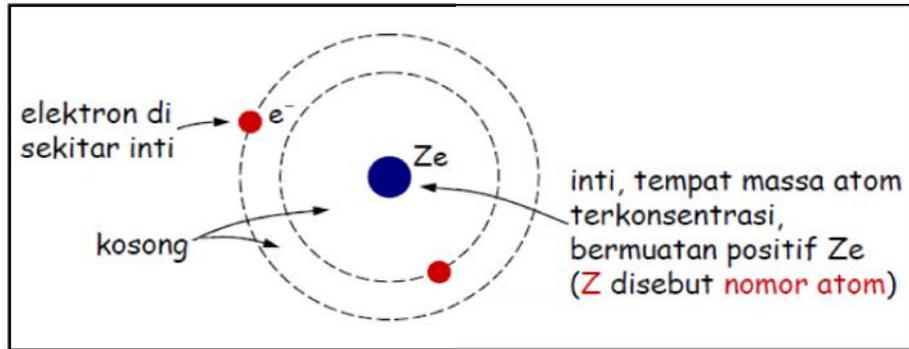


Gambar 4.3 Perkiraan hasil percobaan hamburan alpha menurut Model atom Rutherford
(Sumber: www.wikipedia.org/atom)

Dengan didasarkan pada hasil uji coba hamburan partikel alpha, Rutherford menyarankan suatu model atom yang terdiri dari suatu inti yang bertumpu semua waktu bermuatan positif. Sedangkan muatan negatif berada pada jarak tertentu dari pusat atom. Oleh karena itu, Rutherford menyarankan suatu model atom seperti yang ditunjukkan dalam gambar 4.4.

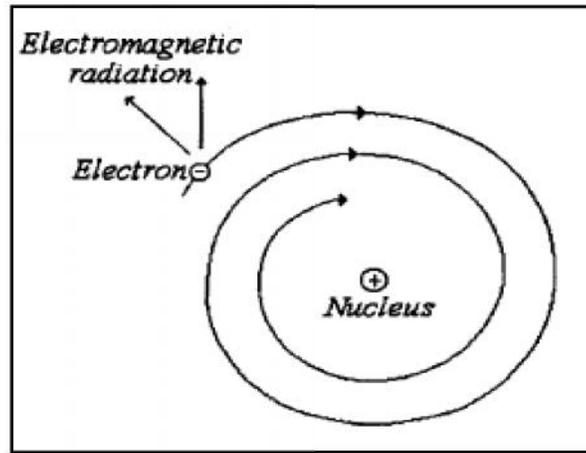
Kegagalan model atom Rutherford adalah tidak mampu menjelaskan susunan dan kedudukan elektron dalam suatu atom pada saat dikaitkan dengan pemamcaran radiasi elektromagnet. Untuk

menjelaskan sifat kestabilan elektron dalam atom (hasil uji coba) digunakan hukum-hukum klasik, yaitu hukum gerak Newton dan hukum Coulomb.



Gambar 4.4 Model atom hasil percobaan Hamburan Rutherford
(Sumber: www.wikipedia.org/atom)

Walau bagaimanapun, menurut pandangan teori klasik, sembarang partikel bermuatan yang bergerak akan memancarkan energi dalam bentuk radiasi elektromagnet. Ini bermakna elektron yang memancarkan radiasi elektromagnet akan kehilangan energi dan jari-jari orbit akan mengecil. Lama kelamaan atau setelah beberapa saat mengelilingi inti, elektron akan bergabung dengan inti dan akhirnya atom akan musnah. Ilustrasi ini ditunjukkan dalam gambar 4.4. Dalam kenyataannya masih banyak atom yang stabil. Inilah kegagalan utama model atom Rutherford. Model atom Rutherford bukan hanya gagal menjelaskan fenomena yang berlaku, tetapi juga hukum dasar dalam menurunkan persamaan masih menggunakan idea dan metode klasik.



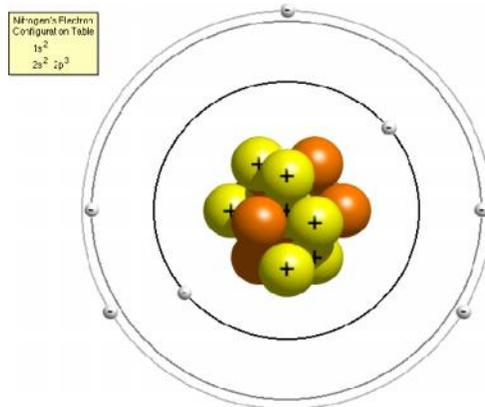
Gambar 4.5 Bentuk kegagalan model atom Rutherford
(Sumber: Pfeffer J.I, and Nir S, 2000)

4.3.4 Model Atom Bohr

Model atom Bohr merupakan model atom yang berusaha mengatasi kegagalan model atom Rutherford. Model atom Bohr menjelaskan gerakan elektron disekitar inti dengan cara tertentu untuk mengelakkan elektron tertarik kedalam inti bermuatan positif. Neils Bohr (1911) telah mengemukakan suatu teori untuk menjelaskan pergerakan elektron di dalam atom hidrogen. Bohr menyarankan suatu model semiklasik dengan mengandaikan atom sebagai sistem tata surya mikroskopik dengan elektron bergerak dalam orbit bulat mengelilingi inti. Gerakan elektron mengelilingi inti ini mematuhi hukum-hukum mekanik klasik dan elektromagnet. Sebagai tambahan terhadap ciri-ciri tersebut, Bohr telah menyesuaikan model atom tersebut dengan menjelaskan secara kuantum, yaitu dengan didasarkan pada sifat dualisme cahaya yang disarankan oleh de Broglie.

Untuk mempertahankan model atomnya, Bohr telah mengemukakan dua postulat yang terkait dengan gerak elektron disekitar inti atom. Postulat Bohr pertama menyatakan bahwa suatu

elektron yang berada pada orbit tertentu akan terus bergerak dalam orbit tersebut tanpa memancarkan energi. Keadaan ini berlaku apabila momentum sudut elektron sama dengan $n \cdot h$. Postulat Bohr kedua mengatakan bahwa apabila elektron berada pada tingkat energi yang lebih tinggi akan mengalami transisi ke ke tingkat energi yang lebih rendah, maka atom akan memancarkan foton dengan energi tertentu sesuai dengan frekuensi yang terkait dengan teori kuantum Planck yang dinyatakan dengan $E = h \cdot \nu$. Berdasarkan pada postulat Bohr pertama dan kedua dapat ditunjukkan dalam bentuk gambar model atom Bohr serti dalam gambar 4.6.



Gambar 4.6 Model Atom Bohr
(Sumber: Nowikow & Heimbecker 2001)

Kegagalan model atom Bohr tidak mampu menjelaskan garis spektrum yang rapat antara satu sama lain yang disebut *struktur halus*. Kewujudan struktur halus ini adalah disebabkan terdapatnya pemecahan tingkat-tingkat energi menjadi beberapa tingkat energi yang mempunyai perbedaan energi sangat kecil. Walau bagaimanapun model atom Bohr telah berhasil menjelaskan fenomena pemancaran radiasi elektromagnet, tetapi masih tetap menggunakan idea-idea klasik (dimana elektron bergerak dalam kedudukan tertentu

disekeliling inti). Sesuai dengan prinsip ketakpastian Heisemberg, kedudukan dan momentum tidak dapat ditentukan secara serentak dengan tepat, oleh karena itu penggunaan idea-idea klasik dalam model atom Bohr bertentangan dengan teori ketakpastian Heisemberg.

Terdapat empat postulat yang digunakan Bohr untuk menutupi kelemahan model atom Rutherford, antara lain :

1. Atom Hidrogen terdiri dari sebuah elektron yang bergerak dalam suatu lintas edar berbentuk lingkaran mengelilingi inti atom ; gerak elektron tersebut dipengaruhi oleh gaya coulomb sesuai dengan kaidah mekanika klasik.
2. Lintas edar elektron dalam hydrogen yang mantap hanyalah memiliki harga momentum angular L yang merupakan kelipatan dari tetapan Planck dibagi dengan 2π .

$$\mathbf{L} = n \cdot \hbar = n \cdot \frac{h}{2\pi}$$

dimana $n = 1,2,3,\dots$ dan disebut sebagai bilangan kuantum utama, dan h adalah konstanta Planck.

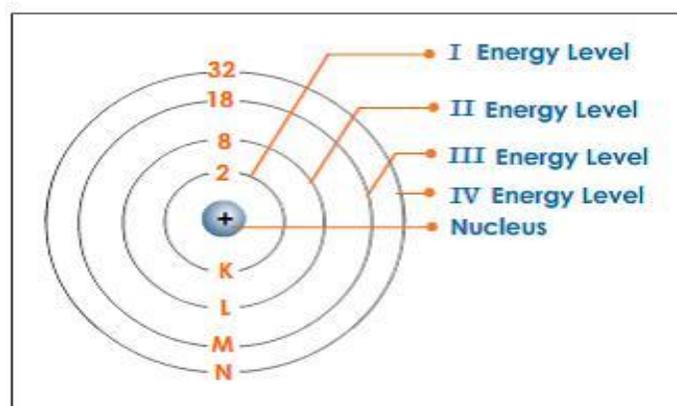
3. Dalam lintas edar yang mantap elektron yang mengelilingi inti atom tidak memancarkan energi elektromagnetik, dalam hal ini energi totalnya E tidak berubah.
4. Jika suatu atom melakukan transisi dari keadaan energi tinggi E_U ke keadaan energi lebih rendah E_I , sebuah foton dengan energi $h\nu = E_U - E_I$ diemisikan. Jika sebuah foton diserap, atom tersebut akan bertransisi ke keadaan energi rendah ke keadaan energi tinggi.

Berdasarkan pada postulat tersebut Bohr menggambarkan model atom yang diusulkannya dalam bentuk kata-kata berikut ini:

"Bohr menyatakan bahwa elektron-elektron hanya menempati orbit-orbit tertentu disekitar inti atom, yang masing-masing terkait sejumlah energi kelipatan dari suatu nilai kuantum dasar. (John Gribbin, 2002)"

Model Bohr dari atom hidrogen menggambarkan elektron-elektron bermuatan negatif mengorbit pada kulit atom dalam lintasan tertentu mengelilingi inti atom yang bermuatan positif. Ketika elektron meloncat dari suatu orbit ke orbit lainnya selalu disertai dengan pemancaran atau penyerapan sejumlah energi elektromagnetik hf . Deskripsi ini sesuai seperti ditunjukkan dalam gambar 4.6a berikut. Secara mendetail Bohr juga menggambarkan kedudukan elektron dalam atom seperti diutarakan dalam diagram berikut:

”Ada aturan fisika kuantum yang hanya mengizinkan sejumlah tertentu elektron dalam tiap orbit. Hanya ada ruang untuk dua elektron dalam orbit terdekat dari inti. (John Gribbin, 2005)”



Gambar 4.6a. Model Kulit Atom Bohr
(Sumber: Nowikow & Heimbecker 2001)

Model ini adalah pengembangan dari model puding prem (1904), model Suaturnian (1904), dan model Rutherford (1911). Karena model Bohr adalah pengembangan dari model Rutherford, banyak sumber mengkombinasikan kedua nama dalam penyebutannya menjadi model Rutherford-Bohr.

Kunci sukses model ini adalah dalam menjelaskan forpertama sekali Rydberg mengenai garis-garis emisi spektral atom hidrogen,

walaupun forpertama sekali Rydberg sudah dikenal secara eksperimental, tetapi tidak pernah mendapatkan landasan teoritis sebelum model Bohr diperkenalkan. Tidak hanya karena model Bohr menjelaskan alasan untuk struktur forpertama sekali Rydberg, ia juga memberikan justifikasi hasil empirisnya dalam hal suku-suku konstanta fisika fundamental.

Model Bohr adalah sebuah model primitif mengenai atom hidrogen. Sebagai sebuah teori, model Bohr dapat dianggap sebagai sebuah pendekatan orde pertama dari atom hidrogen menggunakan mekanika kuantum yang lebih umum dan akurat, dan dengan demikian dapat dianggap sebagai model yang telah usang. Namun demikian, karena kesederhanaannya, dan hasil yang tepat untuk sebuah sistem tertentu, model Bohr tetap diajarkan sebagai pengenalan pada mekanika kuantum.

Dengan menggunakan konsep model atom yang telah dikembangkan olehnya, Bohr menggunakan ide tersebut untuk mengkaji model atom Hidrogen (atom H) dan juga atom-atom sederhana yang mirip atom H. Menurut pandangan Bohr gaya tarik antara elektron atom dengan proton ditengah atom (inti atom) merupakan sifat alamiah untuk setiap atom. Jadi gaya tarik Coulomb antara elektron dan inti dinyatakan dalam betuk,

$$F_E = \frac{-kZe^2}{r^2} \quad (4.1)$$

Dimana r adalah jarak antara inti atom dan elektron dan k adalah konstanta pembanding.

Secara klasik, ketika dua partikel yang diikat oleh gaya pusat (*central force*) seperti gaya elektrostatis yang beraksi antara dua partikel bermuatan positif, maka partikel yang lebih kecil akan mengorbit partikel yang lebih besar dalam bentuk Ellip. Prinsip inilah yang digunakan oleh Bohr untuk menunjukkan struktur atom

Hidrogen atau yang mirip dengan atom Hidrogen, dimana elektron yang lebih kecil ukurannya mengelilingi pusat atom dalam bentuk ellip atau lingkaran.

Dalam kasus orbit elektron berbentuk lingkaran dengan jari-jari R , energi potensial elektron E_p , dan energi kinetik elektron E_k secara berturut-turut dinyatakan dalam bentuk,

$$E_p = \frac{-kZe^2}{R} \quad (4.2)$$

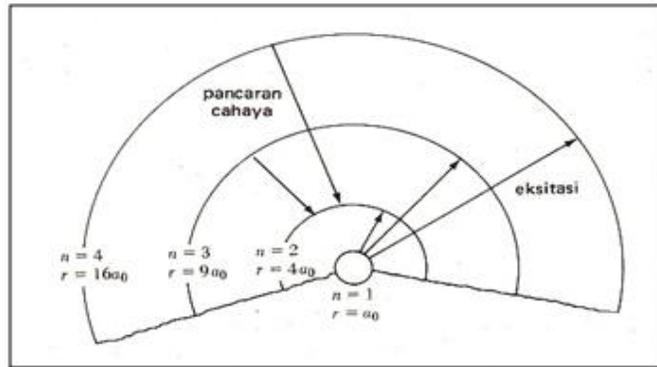
$$E_k = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{kZe^2}{2R} \quad (4.3)$$

Dimana m_e adalah waktu elektron dengan kecepatan orbitnya v (Pfeffer & Nir 2000). Dengan demikian energi total elektron yang berorbit dinyatakan dalam bentuk,

$$E = E_p + E_k = \frac{-kZe^2}{2R} \quad (4.4)$$

Tanda negatif menunjukkan elektron terikat pada inti, sehingga untuk melepaskannya memerlukan pemasukan atau tambahan energi dari luar.

Persamaan (4.4) merupakan bentuk klasik energi elektron yang bergerak melingkar dengan kecepatan konstan. Sekarang Bohr mengemukakan asumsi baru tersebut dengan bagaimana energi dibebaskan selama pembentukan atom Hidrogen dari elektron dan proton bebas. Selama pembebasan energi elektron terus bergerak melingkar dalam bentuk spiral (lihat gambar 4.6b).



Gambar 4.6b Proses eksitasi dalam model Bohr untuk atom H
(Sumber: Nowikow & Heimbecker 2001)

Berdasarkan diagram dalam gambar 4.6b dapat dikemukakan beberapa ketentuan:

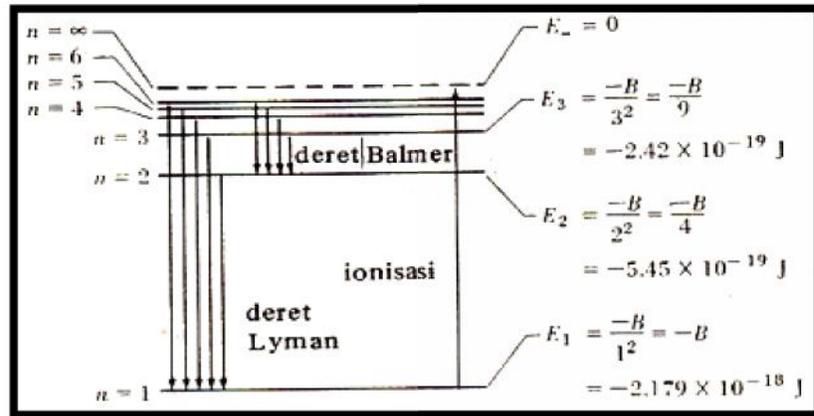
- Lintasan yang diizinkan untuk elektron dinomori $n = 1, n = 2, n = 3$ dst. Bilangan ini dinamakan bilangan kuantum, huruf K, L, M, N juga digunakan untuk menamakan lintasan
- Jari-jari orbit diungkapkan dengan $1^2, 2^2, 3^2, 4^2, \dots, n^2$. Untuk orbit tertentu dengan jari-jari minimum $a_0 = 0,53 \text{ \AA}$

$$a_0 = \frac{4fV_0\hbar^2}{me^2} \quad (4.5)$$

- Jika elektron tertarik ke inti dan dimiliki oleh orbit n , energi dipancarkan dan energi elektron menjadi lebih rendah sebesar Kombinasi Persamaan (4.4) dan momentum sudut elektron $L = nh$ maka didapat:

$$E_n = \frac{-B}{n^2},$$

B : konstanta numerik dengan nilai $2,179 \times 10^{-18} \text{ J} = -13.6 \text{ eV}$



Gambar 4.6c Tingkat-tingkat energy Hidrogen model Bohr
(Sumber: Nowikow & Heimbecker 2001)

Dengan demikian, tingkat energi terendah untuk atom hidrogen ($n = 1$) adalah -13.6 eV . Tingkat energi berikutnya ($n = 2$) adalah -3.4 eV . Tingkat energi ketiga ($n = 3$) adalah -1.51 eV , dan seterusnya. Harga-harga energi ini adalah negatif, yang menyatakan bahwa elektron berada dalam keadaan terikat dengan proton. Harga energi yang positif berhubungan dengan atom yang berada dalam keadaan terionisasi yaitu ketika elektron tidak lagi terikat, tetapi dalam keadaan tersebar.

Dengan teori kuantum, Bohr juga menemukan rumus matematika yang dapat dipergunakan untuk menghitung panjang gelombang dari semua garis yang muncul dalam spektrum atom hidrogen. Nilai hasil perhitungan ternyata sangat cocok dengan yang diperoleh dari percobaan langsung. Namun untuk unsur yang lebih rumit dari hidrogen, teori Bohr ini ternyata tidak cocok dalam meramalkan panjang gelombang garis spektrum. Meskipun demikian, teori ini diakui sebagai langkah maju dalam menjelaskan fenomena-fenomena fisika yang terjadi dalam tingkatan atomik. Teori kuantum dari Planck diakui kebenarannya karena dapat dipakai untuk

menjelaskan berbagai fenomena fisika yang saat itu tidak bisa diterangkan dengan teori klasik.

- **Kelebihan Teori Bohr**

- Keberhasilan teori Bohr terletak pada kemampuannya untuk meoramalkan garis-garis dalam spektrum atom hidrogen
- Salah satu penemuan adalah sekumpulan garis halus, terutama jika atom-atom yang dieksitasikan diletakkan pada medan magnet

- **Kelemahan Teori Bohr**

- ✚ Struktur garis halus ini dijelaskan melalui modifikasi teori Bohr tetapi teori ini tidak pernah berhasil memerikan spektrum selain atom hydrogen
- ✚ Belum mampu menjelaskan adanya stuktur halus(fine structure) pada spectrum, yaitu 2 atau lebih garis yang sangat berdekatan
- ✚ Belum dapat menerangkan spektrum atom kompleks
- ✚ Intensitas relatif dari tiap garis spektrum emisi.
- ✚ Efek Zeeman, yaitu terpecahnya garis spektrum bila atom berada dalam medan magnet.

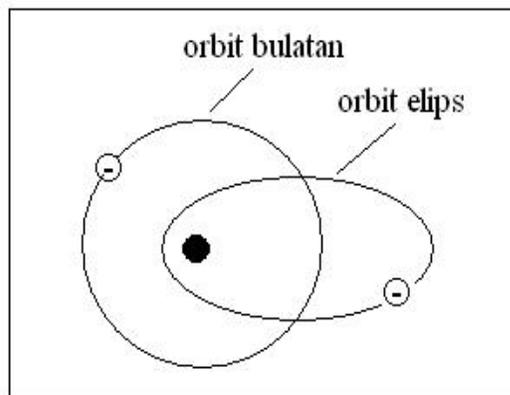
- **Kesimpulan model atom Bohr**

- ❖ Teori atom Bohr menyatakan bahwa elektron harus mengorbit di sekeliling inti seperti planet mengorbit Matahari.
- ❖ Model Bohr disambut sebagai langkah maju yang penting karena dengan cara memberi jarak pada orbit elektron, dapat menjelaskan spektrum cahaya dari sebuah atom.
- ❖ Elektron dapat berpindah dari suatu orbit ke orbit lain dengan cara lompatan kuantum, dan lompatannya selalu melibatkan emisi atau absorpsi kuantum utuh dengan jumlah energi ekuivalen dengan hf atau kelipatannya, tapi tidak pernah ada nilai diantaranya.

- ❖ Bohr masih memakai hukum Newton disamping beberapa postulat lain, nilai teori bohr tidaklah pada prediksi yang dapat dihasilkan tetapi pada pengertian dan hukum yang baru di ungkapkan

4.3.5 Model Atom Sommerfeld

Model atom Sommerfeld merupakan suatu saranan model atom untuk mengatasi kegagalan model atom Bohr dalam menjelaskan bentuk gerakan elektron mengelilingi inti. Model atom Sommerfeld berpertama sekali dengan suatu *postulat pengkuantuman Sommerfeld*, yang menyatakan bahwa sembarang sistem fisika dengan koordinatnya merupakan fungsi berkala terhadap waktu. Konsep energi dalam model atom Sommerfeld sama seperti yang dikemukakan dalam model atom Bohr, dimana keduanya tergantung pada nilai nomor kuantum utama. Perbedaan antara keduanya adalah nilai nomor kuantum utama, n , dapat diungkapkan dalam sebutan n_r dan n_ϕ .



Gambar 4.7 Model atom Sommerfeld
(Sumber: Halim, 2008)

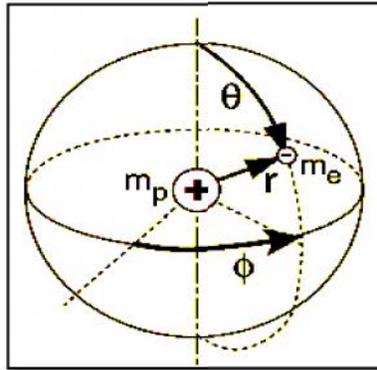
Elektron dalam model atom Sommerfeld dapat mengelilingi inti dalam bentuk orbit lingkaran atau orbit berbentuk elips. Setelah dilakukan perbaikan, model atom Sommerfeld dapat menunjukkan dan menjelaskan terbentuknya *struktur halus* pada tingkat-tingkat energi atom hidrogen. Gambar model atom Sommerfeld ditunjukkan dalam gambar 4.7.

Kegagalan model atom Sommerfeld tidak mampu menjelaskan struktur halus untuk atom-atom yang mempunyai lebih dari satu elektron. Ini karena teori Sommerfeld hanya mengandung dua nomor kuantum, yaitu nomor kuantum utama, n , yang menggambarkan tingkat-tingkat energi elektron dan nomor kuantum momentum sudut yang menggambarkan pergerakan elektron dalam orbit elips yang berbeda. Walau bagaimanapun, dalam sistem terperinci, yang berada dalam ruang tiga dimensi terdapat sekurang-kurangnya tiga jenis nomor kuantum. Nomor kuantum yang ketiga dikenal dengan nomor kuantum magnet. Nomor kuantum inilah yang tidak diperhitungkan oleh model atom Sommerfeld.

4.3.6 Model atom teori kuantum

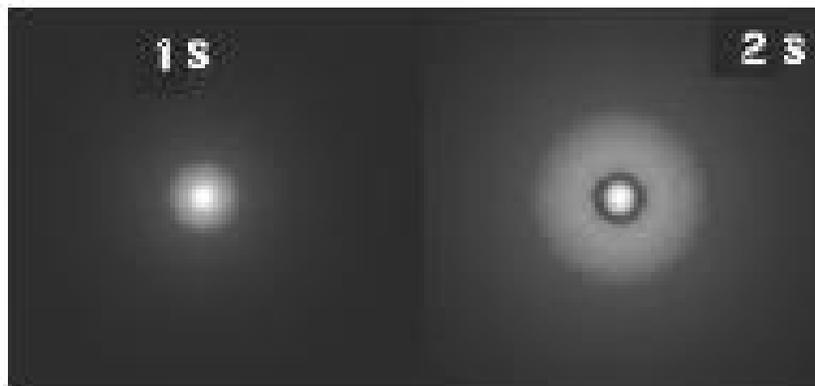
Model atom teori kuantum merupakan suatu model atom hidrogen yang bertujuan untuk mengatasi model atom Sommerfeld untuk kes elektron dalam ruang tiga dimensi. Kedudukan elektron dalam ruang tiga dimensi ditunjukkan dalam gambar 4.8. Untuk menjelaskan gerakan elektron dalam ruang tiga dimensi digunakan persamaan Schrodinger dengan fungsi gelombang tergantung pada jari-jari orbit (r), sudut zenit (θ), dan sudut azimuth (ϕ). Penggambaran distribusi rapat probabilitas elektron $|\Psi|^2$ yang didasarkan pada fungsi gelombang elektron atom hidrogen untuk nilai nomor kuantum yang berbeda-beda ditunjukkan dalam gambar 4.9. Oleh karena itu, energi elektron dalam ruang tiga dimensi tergantung pada nomor kuantum

utama (n), nomor kuantum orbital (l), dan nomor kuantum magnet (m_l).



Gambar 4.8 Kedudukan elektron dalam ruang tiga dimensi
(Sumber: Halim, 2008)

Dalam gambar 4.9 menunjukkan suatu model atom kuantum yang digambarkan dengan menggunakan persamaan distribusi rapat probabilitas elektron, $|\psi|^2$ untuk beberapa keadaan energi dalam ruang tiga dimensi. Ini bukan bentuk atom yang sebenarnya, tetapi hanyalah model rapat elektron atau model awan elektron disekitar inti atom.



Gambar 4.9 Model atom teori Kuantum
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Kesimpulan yang dapat dikatakan bahwa sampai saat ini model atom yang banyak diterima oleh pakar kuantum adalah model atom teori kuantum. Sedangkan bentuk atom dan kedudukan elektron disekitar inti dengan tepat tidak ada yang tahu.

Tetapi model yang berdekatan adalah model awan elektron, yaitu kedudukan elektron disekitar inti digambarkan dengan rapat probabilitas yang dapat ditentukan keberadaan elektron dengan menggunakan kuadrat fungsi gelombang elektron. Mengenai kedudukan elektron disekitar inti berdasarkan pada atau sesuai dengan besar energi yang dimiliki oleh elektron. Perlu dipertegas sekali lagi bahwa sampai saat ini hanya ada model atom atau bukan bentuk yang sebenarnya.

4.4 Struktur Atom

Berdasarkan model atom yang telah dibicarakan pada bagian sebelumnya dapat dipahami bahwa atom terbentuk dari partikel bermuatan negatif atau elektron bergerak mengelilingi inti. Sedangkan partikel bermuatan positif terkumpul pada inti atom. Dalam bagian ini akan ditunjukkan secara mendetail partikel-partikel elementer yang berfungsi sebagai pembangun atom.

4.4.1 Elektron

Perkataan *elektron* yang diciptakan pada tahun 1894 berasal dari istilah *daya listrik* yang diperkenalkan oleh William Gilbert. Asalnya ialah (elektron), sepatah perkataan Greek yang berarti *ambar*. Elektron adalah suatu partikel dasar subatom memiliki massa 9.11×10^{-31} kg yang bermuatan negatif sebesar -1.6×10^{-19} C. Electron mempunyai putaran-1/2 lepton, tidak terkait dengan interaksi kuat dan tidak mempunyai substruktur. Bersama-sama dengan nucleus

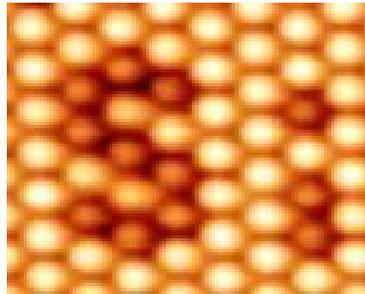
atom, elektron menyusun atom-atom yang bertanggungjawab terhadap ikatan kimia. Aliran arus listrik dalam konduktor zat padat disebabkan pergerakan elektron-elektron dan atau juga *hole-hole*. Demikianlah pemahaman elektron dari sudut pandang fisika klasik yang didukung oleh hasil uji coba: J.J.Thomson pada tahun 1907 yang berhasil menemukan elektron bermuatan negatif dan perbandingan e/m , tetapan minyak Millikan tahun 1917 yang berhasil menemukan muatan listrik elektron terkuantisasi, uji coba hamburan Rutherford pada tahun 1911 yang dapat memastikan bahwa elektron *discrete* dan muatan terkecil yang tidak dapat dibelah lagi, dan uji coba Stern-Gerlach yang berhasil menentukan spin elektron. Berdasarkan hasil ini memaksa kita untuk menyatakan bahwa elektron adalah partikel, bukan gelombang.

Seterusnya dari sudut pandang lain pula elektron yang dibelau oleh kristal nikel mempunyai panjang gelombang 1.65 \AA . Pola interferensi elektron juga telah disangati melalui uji coba celah ganda oleh Merli dan Missoroli (1976). Pola interferensi, sebagai hasil uji coba celah ganda, juga telah digunakan untuk mengembangkan mikroskop elektron (Donati.e.al, 1973). Semua informasi ini memberi dukungan terhadap kesimpulan bahwa elektron adalah gelombang, bukan partikel.

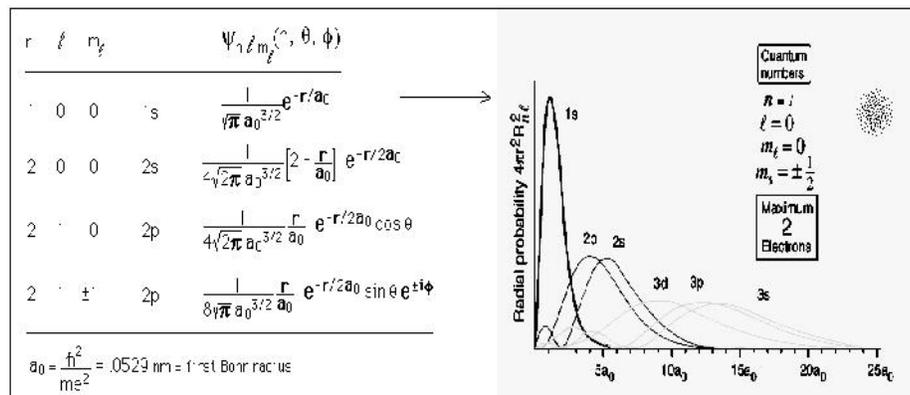
Berdasarkan hasil dari hasil uji coba tersebut, apa yang seharusnya diberi nama untuk elektron, partikel atau gelombang. Berdasarkan pandangan Feynman (1964), untuk partikel-partikel dasar, seperti elektron, neutron, proton, dan foton, lebih tepat disebut dengan istilah *sistem-sistem kuantum*. Makna sistem kuantum tersebut adalah dapat menunjukkan dua sifat yang terpisah dalam waktu dan tempat yang terpisah pula. Pada waktu berprilaku seperti gelombang, fenomena partikel tidak dapat disangati, begitu juga keadaan sebaliknya.

4.4.2 Atom hidrogen

Atom hidrogen merupakan suatu bentuk atom yang sangat sederhana, yang banyak didapat disekitar kita. Atom hidrogen terdiri dari inti dan suatu elektron yang mengelilingi inti. Berbagai bentuk percobaan telah dilakukan oleh pakar kimia dan fisika untuk mendapatkan informasi tentang atom hidrogen. Penggambaran bentuk struktur atom hidrogen didasarkan pada hasil uji coba model atom, berawal dari model atom Thomson sampai dengan model atom mekanik kuantum.

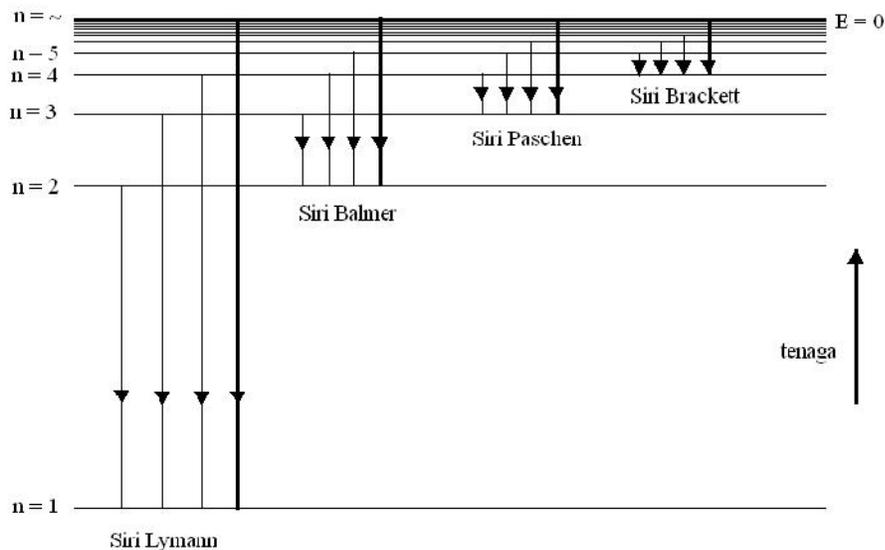


Gambar 4.9a Bentuk atom yang sebenarnya hasil scan dengan STM
(Sumber: www.ohgizmo.com/2008/10/23)



Gambar 4.10 Persamaan dan penggambaran kerapatan (*density*) kemungkinan menemukan elektron dalam atom hidrogen berdasarkan model teori kuantum
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Berdasarkan pandangan Bohr, elektron dalam atom hidrogen bergerak dalam orbit berbentuk lingkaran, seperti yang terjadi pada gerak satelit atau planet dalam tata surya. Hasil uji coba model atom Bohr menunjukkan bahwa jari-jari orbit elektron terkecil ($n = 1$) pada atom hidrogen ialah 0.529 \AA dan ini disebut dengan *jari-jari Bohr*. Sedangkan menurut pandangan Sommerfeld elektron dalam atom hidrogen, bukan hanya bergerak dalam orbit berbentuk lingkaran, tetapi juga berorbit dalam bentuk elips. Berdasarkan pandangan Sommerfeld bentuk wujud atom hidrogen tidak cocok dianalogikan dengan model gerak dan susunan tata surya, seperti yang disarankan oleh Bohr.

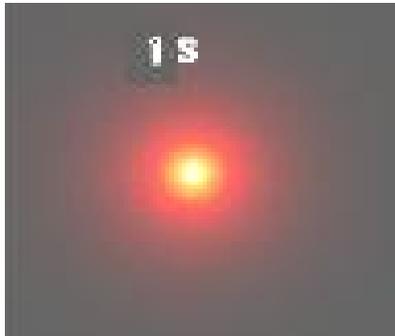


Gambar 4.11 Deret Spektrum Atom Hidrogen
(Sumber: Arthur Baiser 1969)

Perkembangan teori kuantum telah menyempurnakan model atom hidrogen, yaitu dengan menyelesaikan persamaan Schrodinger dalam tiga dimensi yang melibatkan nomor kuantum utama, nomor

kuantum orbital, dan nomor kuantum magnet. Hasil dari penyelesaian persamaan Schrodinger berbentuk fungsi *radial* $[R(r)]$, fungsi *orbital* $[\Theta(\theta)]$, dan fungsi *magnet* $[\Phi(\phi)]$. Penggambaran model atom hidrogen yang berbentuk awan elektron dalam banyak buku teks didasarkan pada ketiga fungsi tersebut. Inilah model atom hidrogen yang banyak diterima oleh pakar fisika sampai saat ini, tetapi ini bukanlah bentuk yang sebenarnya dari atom hidrogen tetapi lebih mendekati kepada bentuk yang riil (seperti ditunjukkan dalam gambar 4.9a)

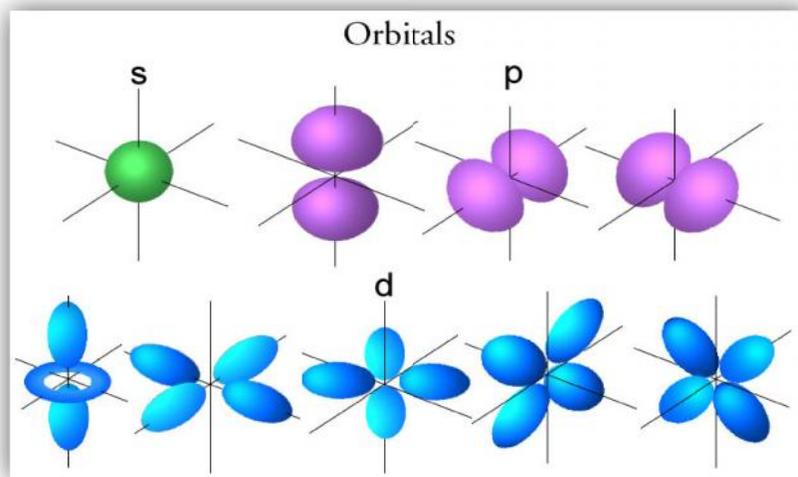
Spektrum garis atom hidrogen, pertama sekali diselidiki oleh Balmer pada tahun 1885, terdiri dari deret spektrum garis pada daerah cahaya nampak. Atom hidrogen juga mempunyai deret spektrum garis pada daerah ultra ungu (deret Lyman) dan pada daerah infra merah (deret Paschen, deret Brackett, dan deret Pfund). Deret spektrum garis ini merupakan ciri-ciri khas atom hidrogen, karena untuk atom yang berbeda akan menghasilkan deret spektrum garis yang berbeda pula. Inilah suatu metode yang sudah terkenal digunakan pakar kimia dan fisika untuk menentukan jenis atom dalam suatu sistem fisis. Deret spektrum tersebut ditunjukkan dalam gambar 4.11.



Gambar 4.12 Model kuantum atom Hidrogen
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

4.5 Penggambaran distribusi elektron atom hidrogen

Penggambaran distribusi rapat elektron atom hidrogen yang telah diterima oleh pakar fisika kuantum pada waktu sekarang ini adalah penggambaran yang didasarkan pada hasil penyelesaian persamaan Schrodinger dalam tiga dimensi. Persamaan tersebut melibatkan tiga nomor kuantum (nomor kuantum utama, orbital, dan magnet) dan hasil dari penyelesaian persamaan tersebut adalah fungsi *radial* $[R(r)]$, fungsi *orbital* $[\Theta(\theta)]$, dan fungsi *magnet* $[\Phi(\phi)]$.



Gambar 4.13 Distribusi Kerapatan Kemungkinan elektron $|\Psi|^2$ elektron dalam atom Hidrogen

(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Perpaduan ketiga fungsi tersebut menghasilkan fungsi gelombang elektron atom hidrogen dalam tiga dimensi, yaitu $\Psi(r, \theta, \phi)$. Ini merupakan persamaan utama yang menjadi dasar dalam penggambaran distribusi rapat probabilitas elektron $|\Psi|^2$. Hasil

penggambaran ini menunjukkan interpretasi fungsi gelombang elektron atom hidrogen untuk model teori kuantum. Sebagai contoh untuk kasus $n = 1$, $l = 0$, dan $m = 0$ didapati bentuk pemodelan seperti dalam gambar 4.12.

Untuk nomor-nomor kuantum dan keadaan yang lain, hasil penggambaran atom hidrogen ditunjukkan dalam gambar 4.13 berikut. Huruf s, p, dan d serta angka 1, 2, dan 3 menunjukkan suatu keadaan. Dalam penggambaran distribusi rapat probabilitas elektron $|\Psi|^2$ yang berdasarkan pada fungsi gelombang elektron masih tetap menggunakan model atom hidrogen versi Bohr, yaitu jari-jari Bohr, $a_0 = h^2/me^2$. Ini maknanya model kuantum atom hidrogen juga didasarkan pada model atom hidrogen sebelumnya

4.6 Kesalahan konsep elektron dan model atom

Pada bagian ini akan dikemukakan beberapa konsep elektron dan konsep model atom yang sering salah dipahami oleh mahasiswa. Pada akhir pembahasan ditunjukkan konsep yang tepat sesuai dengan pemahaman para fisikawan atau kimian.

Kesalahan Konsep 1: Elektron adalah campuran antara partikel dan gelombang

Manifestasi gelombang yang tidak mempunyai contoh pada perilaku partikel-partikel Newtonian adalah difraksi. Pada tahun 1927, Davisson dan Gerner dari Amerika Serikat dan G.P. Thomson dari England mengesahkan hipotesis de Broglie dengan menunjukkan bahwa elektron memperlihatkan pola difraksi apabila elektron dihamburkan dari bidang kristal yang atom-atomnya mempunyai jarak yang sebanding. Hasil uji coba difraksi elektron menunjukkan panjang gelombang elektron sekitar 1.65 \AA , sedangkan panjang gelombang elektron yang dihitung dari konsep momentum elektron didapati

sekitar 1.66 \AA . Oleh karena itu, eksperimen Davisson-Germer membuktikan kebenaran hipotesis de Broglie tentang **sifat gelombang** untuk benda-benda masive yang bergerak. Dari percobaan efek fotolistrik menunjukkan bahwa berkas cahaya yang bergerak dipandang **sebagai partikel**. Konsep kuantisasi berkas cahaya ternyata dapat menjelaskan fenomena yang ditunjukkan oleh uji coba efek fotolistrik dengan tepat.

Prilaku yang ditunjukkan oleh cahaya (sebagai partikel atau sebagai gelombang) dari kedua uji coba di atas menjadi sebab untuk kesalahpahaman definisi elektron, yaitu campuran antara partikel dan gelombang. Makna "campuran" dalam kehidupan sehari-hari merupakan gabungan dua fenomena yang dapat disangati dalam waktu dan tempat bersamaan. Seperti dalam suatu cairan terdapat garam dan gula, maka kedua rasa tersebut dapat diketahui dalam waktu yang bersamaan. Dalam kenyataan sebenar, prilaku partikel dan gelombang yang ditunjukkan oleh elektron, hanya dapat diketahui dalam waktu dan tempat terpisah.

Kesalahan Konsep 2: Elektron adalah partikel

Eksperimen yang telah dilakukan oleh Thomson (1897) dan beberapa eksperimen lainnya telah berhasil menentukan nilai e/m ($e/m = 1.76 \times 10^{11} \text{ C/kg}$) untuk elektron. Namun demikian, waktulah yang timbul pada waktu itu adalah untuk menentukan nilai e dan m elektron secara terpisah. Banyak usaha yang telah dilakukan untuk menentukan muatan elektron, dan antara eksperimen yang telah berhasil ialah eksperimen yang telah dilakukan oleh Millikan. Setelah mengulang beberapa kali eksperimen dan dengan memperhatikan pergerakan tetesan minyak, Millikan didapati muatan yang dibawa oleh setiap tetesan minyak merupakan kelipatan bilangan bulat dari nilai muatan elektron, e , yaitu $Q = ne$. Eksperimen ini secara langsung dapat membuktikan bahwa "**muatan listrik adalah terkuantum**", dan juga

dapat menentukan nilai dari muatan elektron itu sendiri. Nilai muatan elektron yang telah diterima adalah $e = 1.602 \times 10^{-19}$ C. Dengan didasarkan kepada nilai e/m (hasil eksperimen Thomson) dan nilai e (hasil kajian Millikan) dapat dihitung massa elektron, yaitu $m = 9.11 \times 10^{-31}$ kg. Hasil massa elektron lebih kecil dari massa atom hidrogen.

Hasil nilai e dan m dalam kedua uji coba tersebut menjadi sebab utama terbentuknya kesalahpahaman konsep bahwa "elektron adalah partikel". Biasanya suatu sistem fisis yang dapat dihitung massa, ini bermakna sistem tersebut merupakan suatu partikel yang mempunyai kecepatan dan momentum. Ini merupakan ciri-ciri utama suatu partikel.

Kesalahan Konsep 3: Elektron adalah gelombang

Hipotesis de Broglie yang terkait dengan sifat partikel pada gelombang telah dibuktikan kebenarannya melalui tiga uji coba, yaitu eksperimen difraksi elektron oleh Davisson dan Germer (1927), uji coba difraksi elektron oleh Thomson dan Reid (1947), dan eksperimen difraksi neutron oleh Wollan dan Shull. Hasil uji coba difraksi elektron yang dilakukan oleh Davisson dan Germer didapati bahwa panjang gelombang elektron 1.65 \AA , sedangkan panjang gelombang elektron yang dihitung dari konsep momentum didapati 1.66 \AA . Oleh karena itu, eksperimen Davisson-Germer memberikan bukti langsung dari hipotesis de Broglie tentang sifat gelombang untuk benda-benda yang bergerak. Sedangkan uji coba Thomson dan Reid didapati bahwa pola difraksi elektron berbentuk pola cincin gelap dan terang, pola ini sama dengan yang dibentuk oleh sinar-x. Ini merupakan suatu bukti bahwa berkas elektron dapat menunjukkan perilaku seperti gelombang radiasi elektromagnet atau sinar-x. Berdasarkan kepada energi dan kecepatan neutron termal dan dengan menggunakan hipotesis de Broglie dapat dihitung panjang gelombang neutron, yaitu 1.82 \AA . Nilai panjang gelombang ini hampir sama dengan panjang gelombang

yang dihasilkan oleh difraksi sinar-x pada suatu kristal. Ini membuktikan bahwa neutron juga dapat bersifat sebagai gelombang.

Berdasarkan kepada tiga hasil uji coba tersebut banyak mahasiswa yang berpandangan bahwa elektron adalah gelombang radiasi elektromagnet. Hasil kajian tersebut juga menjadi sebab utama kesalahpahaman mahasiswa, yaitu mereka berpandangan bahwa elektron adalah gelombang.

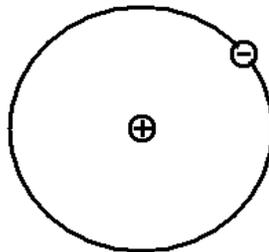
Kesalahan Konsep 4: Elektron adalah partikel, tetapi dapat berperilaku dengan beberapa sifat gelombang

Kesalahpahaman ini bersumber dari informasi hasil uji coba efek fotolistrik, efek Compton, dan hasil pengukuran massa dan muatan elektron melalui uji coba tetesan minyak Millikan. Berdasarkan hasil uji coba tersebut dapat dikatakan bahwa elektron mempunyai energi, momentum dan kecepatan yang sama dengan partikel masif biasa. Namun dari uji coba difraksi partikel didapati bahwa elektron dapat menunjukkan sifat-sifat gelombang, yaitu panjang gelombang yang diukur melalui uji coba sama dengan panjang gelombang yang dihitung dengan persamaan Bragg (untuk kasus sinar-X). Mahasiswa berpikir bahwa pada waktu elektron menunjukkan sifat-sifat gelombang juga mempunyai bentuk seperti suatu partikel yang mempunyai massa. Pemikiran inilah yang menjadi sebab kesalahpahaman konsep tentang bentuk hakikat elektron yang sebenarnya. Akibatnya banyak mahasiswa yang berpikir bahwa elektron adalah partikel, tetapi dapat berperilaku dengan beberapa sifat gelombang. Kesalahpahaman konsep jenis ini juga disebabkan dari metode Pengajaran dan Pembelajaran Fisika Modern yang pertama sekali tentang konsep atom pada semester pertama atau pada jenjang sekolah menengah.

Untuk mendefinisikan elektron secara tepat perlu didasarkan pada hasil kajian. Berdasarkan hasil uji coba yang telah dilakukan istilah yang cocok digunakan untuk sebutan nama elektron adalah sistem kuantum yang dapat memperlihatkan sifat partikel atau sifat gelombang. Kita tidak ada bukti yang kuat untuk mengatakan bahwa elektron adalah selalu berbentuk partikel.

Kesalahan Konsep 5: Atom terdiri dari inti yang dikelilingi oleh elektron atau seperti model tata surya

Kesalahpahaman jenis ini bersumber dari model-model atom yang ditulis oleh dosen dalam buku teks atau dijelaskan dalam rung kuliah, seperti dalam gambar 4.14 berikut. Selalunya pada waktu dibincangkan model atom, guru atau dosen menunjukkan model tata surya sebagai model atom. Ini adalah suatu metode (metode analogi) yang sangat mudah untuk menjelaskan kepada mahasiswa tentang bentuk dan struktur atom. Setelah menerima model seperti itu banyak mahasiswa berpikir itulah bentuk dan struktur atom hidrogen yang sebenarnya.



Gambar 4.14 Model atom hidrogen versi Bohr
(Sumber: Halim, 2004)

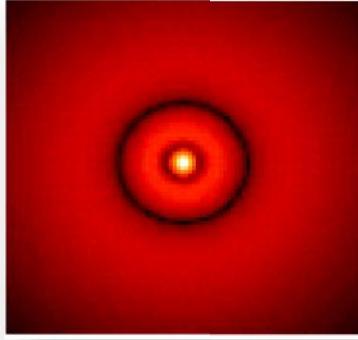
Berdasarkan sejarah penelitian tentang bentuk dan struktur atom yang telah dilakukan, bentuk dan struktur atom yang sama dengan model tata surya adalah model atom Rotherford dan model

atom Bohr. Tetapi perlu dipahami bahwa model tersebut bukanlah bentuk atom yang sebenarnya, melainkan sebuah model atom yang disarankan oleh kedua peneliti tersebut. Penggambaran model atom hidrogen seperti itu telah memasukkan suatu idea yang tidak sesuai, yaitu elektron dan inti adalah partikel, yang mempunyai bentuk dan *trajektori*. Mahasiswa yang menerima model ini sebagai suatu model atom hidrogen, bermakna mereka telah menggunakan konsep klasik untuk memahami fenomena kuantum. Ini merupakan sebab utama dan paling dominan sehingga banyak mahasiswa terjadi kesalahpahaman dalam memahami konsep-konsep kuantum.

Implikasi dari model atom yang digambarkan oleh teori Bohr dan Rutherford menyebabkan banyak guru dan dosen menunjukkan model sistem tata surya untuk memudahkan mengajarkan konsep struktur atom kepada siswa atau mahasiswa. Tanpa disadari banyak mahasiswa berpikir dan berpegang dengan teguh bahwa susunan atom dalam kristal adalah seperti susunan dan posisi dalam sistem tata surya. Secara tidak langsung mereka berpikir elektron dan atom adalah benda seperti halnya planet dan matahari dalam sistem tata surya.

Kesalahan Konsep 6: Atom terdiri dari inti yang dikelilingi oleh awan elektron atau seperti model awan elektron

Pemahaman ini biasanya bersumber dari gambar yang banyak ditemui dalam buku-buku teks fisika kuantum, sebagai contoh dalam gambar 4.15 berikut. Banyak mahasiswa mamahami bahwa gambar tersebut merupakan bentuk atom hidrogen.

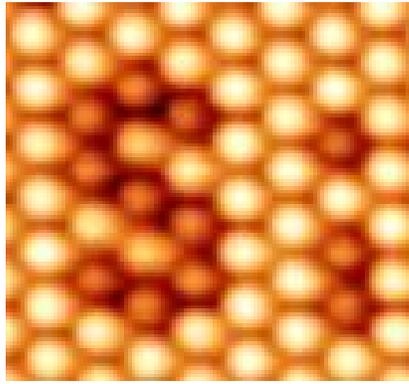


Gambar 4.15 Rapat probabilitas elektron
(Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

Gambar tersebut bukanlah bentuk struktur atom hidrogen, tetapi penggambaran rapat probabilitas elektron dalam orbit disekitar inti atom hidrogen yang didasarkan pada persamaan $|\Psi|^2$.

Mahasiswa yang berpikir gambar tersebut merupakan bentuk atom hidrogen, berarti pada mereka terjadi kesalahpahaman dalam memahami konsep kerapatan probabilitas menemukan elektron disekitar inti atom hidrogen. Bagaimana mungkin elektron bergerak dalam orbit tiga dimensi (ruang) digambarkan menjadi bentuk dua dimensi. Satu kesalahan lagi tentang penggambaran distribusi elektron sebagai awan elektron yang menunjukkan bahwa elektron mempunyai struktur dan *trajektori*, ini suatu pandangan yang didasarkan kepada pemahaman fisika klasik.

Perlu digarisbawahi bahwa hasil penelitian akahir-akhir ini dengan menggunakan peralatan canggih, seperti peralatan STM (*Surface Tunneling Measurement*) telah membuka wawasan kita tentang sebagian struktur atom yang sebenarnya. Gambar 4.15a menunjukkan salah satu hasil yang yang diperoleh dari pelataran STM tersebut.

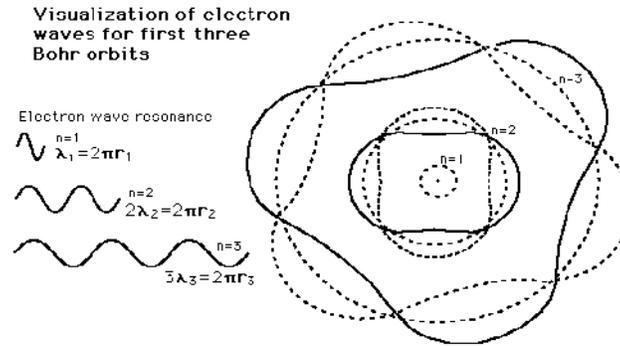


Gambar 4.15a Bentuk atom yang sebenarnya hasil scan dengan STM
(Sumber: www.ohgizmo.com/2008/10/23)

Dalam gambar tersebut atom hanya kelihatan dalam bentuk kabut awan yang mewakili seluruh elemen penyusun atom. Elektron tunggal dan juga atom tunggal tidak dapat diketahui atau terdeteksi dengan pasti. Titik kabur putih tersebut merupakan bentuk kombinasi awan elektron dan awan atom yang membentuk setiap titik atom dalam kristal. Bagaimanakah bentuk satu elektron atau satu atom, dengan bantuan STM ilmuwan belum dapat mengetahui dengan pasti, apakah berbentuk gelombang atau partikel. Wallahu 'alam.

Kesalahan Konsep 7: Atom terdiri dari inti yang dikelilingi oleh gelombang elektron atau seperti model lintasan gelombang elektron

Pandangan ini pertama sekali muncul dari model atom Bohr, yaitu pengkuantuman gelombang elektron dalam atom hidrogen, seperti dalam gambar 4.16. Ini bukanlah bentuk yang sebenarnya dari atom hidrogen atau sembarang bentuk atom jenis yang lain, tetapi hanyalah penggambaran gelombang elektron bersesuaian dengan jari-jari orbit Bohr ($n\lambda=2\pi r$).



Gambar 4.16 Manifestasi gelombang de Broglie pada elektron atom hidrogen (Sumber: www.hyperphysics.phy-astr.gsu.edu)

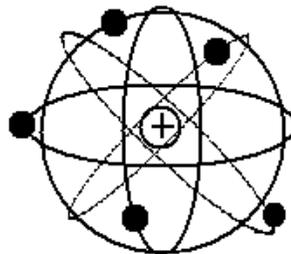
Tidak ada persamaan khas untuk mendapatkan penggambaran seperti itu, tetapi hanyalah pemindahan dari bentuk gelombang berdiri kedalam bentuk gelombang elektron dalam orbitnya disekitar inti atom hidrogen

Mahasiswa memahami bahwa gambar tersebut adalah bentuk atom hidrogen, ini bermakna telah berlaku kesalahpahaman dalam memahami konsep panjang gelombang elektron dan jari-jari orbit Bohr. Pemahaman yang benar adalah dengan mempertimbangkan bentuk gelombang elektron dalam atom hidrogen. Seolah-olah ianya berupa getaran gulungan dawai, dan dipostulatkan bahwa elektron dapat mengelilingi inti atom untuk selama-lamanya tanpa memancarkan energi dengan syarat bahwa orbitnya kelipatan bilangan bulat dari panjang gelombang de Broglie atau $n\lambda = 2\pi r$. Dapat juga dikatakan bahwa gelombang-gelombang tersebut merupakan penjelmaan dari konsep dualisme gelombang pada partikel (elektron) yang sedang bergerak dengan kecepatan tetap disekitar inti atom.

Kesalahan Konsep 8: Atom terdiri dari inti yang dikelilingi banyak orbital elektron atau seperti model tata surya 3 dimensi

Kesalahpahaman ini bersumber dari penggambaran simbol energi inti atom dengan gambar seperti dalam gambar 4.17. Gambar tersebut adalah manifestasi dari postulat pertama atom Bohr untuk model tiga dimensi. Gambar tersebut **bukan** bentuk atom hidrogen yang sebenarnya, tetapi hanyalah suatu model dan juga suatu simbol energi inti atom yang biasa dipakai oleh insiyur untuk menyatakan sistem atau daerah yang terdapat energi inti atom.

Mahasiswa yang memahami bahwa gambar tersebut adalah bentuk atom hidrogen yang sebenarnya, maka mahasiswa tersebut memiliki dua kesalahpahaman.



Gambar 4.17 Model atom yang mewakili simbol energi inti
(Sumber: Halim, 2004)

Pertama, penggambaran model atom tersebut tidak didasarkan kepada salah satu dari persamaan-persamaan standar yang ada dalam fisika untuk model atom hidrogen. Gambar tersebut hanyalah wujud dari pemahaman model atom Bohr dalam ruang tiga dimensi. Kedua, penggambaran model atom hidrogen tersebut berdasarkan pada pandangan klasik, dimana elektron dinyakini sebagai suatu partikel yang mempunyai bentuk dan *trajektori* (lintasan) disekitar inti atom hidrogen.

Kesalahan Konsep 9: Atom adalah bagian benda terkecil, yang tidak mungkin dipecah/dihancurkan lagi

Kesalahpahaman ini bersumber dari definisi yang terdapat dalam buku-buku teks klasik, pada waktu sebelum elektron dan proton ditemukan. Sebagian besar mahasiswa masih menggunakan pemahaman berdasarkan definisi tersebut. Pada kenyataannya atom bukanlah bagian terkecil, tetapi terdiri dari inti (proton dan neutron) yang dikelilingi oleh elektron pada jarak orbit tertentu dari inti. Sampai saat ini telah dikaji bahwa neutron dan proton juga bukan bagian terkecil, tetapi dibangun dari partikel-partikel dasar yang lain, yang dikenal dengan *quark*.

Kesalahan Konsep 10: Atom terdiri dari partikel-partikel inti (proton dan neutron) dan partikel orbital (elektron) yang membentuk sebuah sistem seperti sistem tata surya (matahari dan planet-planet)

Kesalahpahaman ini bersumber dari definisi yang dikemukakan oleh Bohr dalam postulatnya yang pertama. Kesalahan definisi tersebut, karena atom Bohr menganalogikan sistem makroskopik dengan alam mikroskopik. Matahari dan planet-planet adalah benda-benda klasik yang bermassa dan nampak dilihat dengan mata serta dapat disentuh dengan tangan. Sedangkan elektron, proton, dan neutron adalah partikel-partikel mikroskopik, tidak pasti apakah berbentuk partikel atau berbentuk gelombang. Sampai saat ini belum ada pakar fisika yang dapat menyentuh atau melihat dengan mata bentuk sebenar dari partikel-partikel tersebut. Oleh karena itu, mahasiswa yang berpikir bahwa susunan dan kedudukan atom SAMA DENGAN susunan dan

kedudukan planet dalam sistem tata surya adalah suatu pemikiran yang tidak tepat.

Seperti telah diuraikan pada bagian "elektron dan atom hidrogen" terdahulu bahwa analogi atau model susunan dan kedudukan elektron dalam suatu atom lebih tepat menggunakan pandangan konsep kuantum. Dimana kedudukan elektron hanya dapat ditunjukkan melalui penggambaran rapat probabilitas elektron disekitar inti atom, seperti ditunjukkan dalam gambar 4.15 di atas.

Kesalahan Konsep 11: Atom yang banyak partikel (proton, neutron, dan elektron) didalamnya, ukuran lebih besar dibandingkan dengan atom sedikit jumlah partikel

Kesalahpahaman ini bersumber dari definisi atom yang biasa ditunjukkan dalam buku teks, seperti: "Atom terdiri dari inti (proton dan neutron) dan dikelilingi oleh elektron-elektron". Massa atom lebih banyak berada pada inti atom dibandingkan dengan massa elektron disekitar inti atom. Berdasarkan pada definisi dan pemahaman tersebut, banyak mahasiswa yang berpikir bahwa penambahan partikel-partikel dalam inti dan elektron dalam orbital akan bertambah ukuran atom. Kalau kita gunakan pandangan klasik, pemikiran tersebut dapat menjadi benar. Namun apakah partikel-partikel dalam atom dapat sepenuhnya disamakan dengan benda-benda klasik, seperti yang ada dalam alam makroskopik? Jawabannya tidak dapat, karena partikel-partikel atom mempunyai dua sifat, yaitu berperilaku sebagai partikel atau sebagai gelombang.

Rangkuman

Dapat dikatakan bahwa sampai saat ini model atom yang banyak diterima oleh pakar kuantum adalah model atom teori kuantum. Sedangkan bentuk atom dan kedudukan elektron disekitar inti tidak ada yang tahu dengan tepat bentuk yang sebenarnya. Tetapi model yang berdekatan dengan realita adalah model awan elektron, yaitu disekitar inti digambarkan rapat probabilitas menentukan elektron dengan menggunakan fungsi gelombang elektron. Menurut teori kuantum mengenai kedudukan elektron disekitar inti atom tergantung pada jumlah energi yang dimiliki oleh elektron. Perlu dikatakan sekali lagi bahwa sampai saat ini hanya ada model atom atau bukan bentuk yang sebenarnya.

Elektron ditemukan oleh J.J.Thomson (1907) dengan symbol e , waktu 0.511 Mev ($9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$), waktu paruh *stable*, muatan -1 , dan putaran $\frac{1}{2}$ lepton. Uji coba tetesan minyak Millikan (1917) telah didapati bahwa muatan listrik elektron terkuantum sebesar $-1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$, uji coba hamburan Rutherford pada tahun 1911 telah membuktikan bahwa elektron bersifat *discrete* dan merupakan massa terkecil yang tak dapat dibelah lagi, dan uji coba Stern-Gerlach telah menentukan spin elektron. Seterusnya sifat difraksi, panjang gelombang, dan pola interferensi telah didapat dari uji coba Merli dan Missoroli (1976) dan Donati, et.al., (1973).

Kajian model atom berpertama sekali pada tahun 1898 oleh J.J.Thomson dan model atom ini dikenal sebagai *model kueh puding*. Model atom mekanika kuantum adalah model atom yang banyak digunakan oleh pakar fisika pada abab sekarang ini. Penggambaran dengan fungsi gelombang elektron, bukanlah bentuk atom, tetapi hanyalah rapat probabilitas untuk menemukan elektron disekitar inti atom.

Gambar atom yang ada dalam buku-buku teks, bukanlah bentuk yang sebenarnya, melainkan model atom yang digunakan untuk kemudahan pelaksanaan proses pengajaran dan pembelajaran

konsep atom. Model atom hidrogen adalah bentuk atau model atom yang sangat sederhana dan paling banyak ditunjukkan dalam buku-buku teks sekolah dan universitas.

Uji coba difraksi elektron berenergi rendah oleh Davisson dan Germer dan difraksi elektron berenergi tinggi oleh Thomson dan Reid merupakan dua bukti kebenaran hipotesis de Broglie tentang keberadaan gelombang dari material bermassa (mis. elektron, proton, neutron, dll). Hasil uji coba ini juga mendukung pendapat atau pandangan yang mengatakan bahwa elektron dapat menunjukkan perilaku gelombang.

Lebih jauh percobaan J.J.Thomson juga telah berhasil menentukan perbandingan muatan listrik (e) dan massa (m) elektron. Sedangkan dari uji coba tetesan minyak Millikan telah berhasil ditentukan muatan listrik elektron. Hasil uji coba hamburan Rutherford pada tahun 1911 dapat dipastikan bahwa elektron bersifat *discrete* dan massa terkecil yang tidak dapat dibelah lagi, dan juga hasil uji coba Stern-Gerlach dapat menentukan sifat kuantisasi spin elektron. Seluruh hasil uji coba ini memaksa kita untuk mendukung pandangan yang mengatakan bahwa elektron dapat berperilaku seperti partikel atau dapat dimasukkan dalam kelompok partikel masif.

Selanjutnya, dari sudut pandangan yang lain elektron dapat didifraksi oleh kristal nikel pada panjang gelombang 1.65 \AA . Pola interferensi elektron juga telah didapati melalui uji coba celah ganda dua oleh Merli dan Missoroli (1976). Pola interferensi, sebagai hasil uji coba celah ganda, juga telah digunakan untuk mengembangkan mikroskop elektron (Donati.e.al, 1973). Semua informasi ini memaksa kita untuk mengatakan bahwa elektron dapat berperilaku seperti gelombang atau dapat dimasukkan dalam kelompok gelombang.

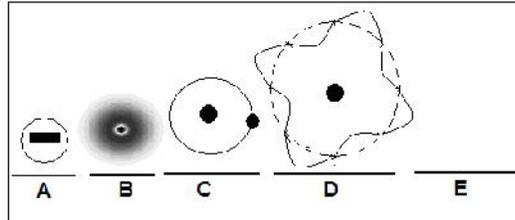
Berdasarkan hasil dari dua bentuk uji coba tersebut, apa nama yang seharusnya disebutkan untuk elektron, partikel atau gelombang. Berdasarkan pandangan Feynman, untuk partikel-partikel dasar (seperti elektron, neutron, proton, dan foton), lebih cocok disebut dengan istilah *sistem-sistem kuantum*. Makna dari sistem kuantum tersebut

adalah dapat menunjukkan dua sifat yang berbeda pada waktu dan tempat yang berlainan. Pada saat menunjukkan perilaku seperti gelombang, perilaku partikel tidak dapat diamati, begitu juga pada keadaan sebaliknya.

Kedudukan satu elektron disekitar inti tidak ada yang tahu dengan tepat posisi dan bentuk yang sebenarnya. Tetapi model yang berdekatan biasa digunakan adalah model awan elektron, yaitu elektron disekitar inti atom digambarkan dengan kerapatan kemungkinan menemukan elektron atau kuadrat dari fungsi gelombang elektron. Kedudukan elektron disekitar inti atom ditentukan berdasarkan pada atau sesuai dengan jumlah energi yang dimiliki oleh elektron. Perlu dinyatakan sekali lagi bahwa sampai saat ini hanya ada model kedudukan elektron dan bukan bentuk yang sebenarnya.

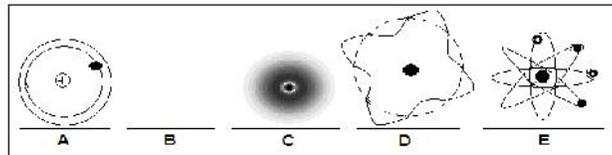
Latihan

1. Berikut diberikan empat gambar bentuk elektron. Anda diminta untuk memilih jawaban (gambar) yang paling sesuai menurut pengetahuan yang telah anda mahasiswai tentang elektron.



- A. Elektron berbentuk bulat dan ditengah-tengah terkumpul muatan negatif
- B. Elektron merupakan distribusi awan muatan, disekitar inti atom
- C. Tidak ada gambar, karena sampai saat ini belum dapat disangati bentuk elektron yang sebenarnya
- D. Elektron berupa sebuah titik partikel yang bergerak disekitar inti atom
- E.. Elektron berupa gelombang yang berpindah disekitar inti atom
2. Keadaan dan kedudukan elektron disekitar inti atom telah dijelaskan dalam buku-buku teks dengan berbagai bentuk. Pilih pernyataan berikut yang paling benar
- A. Elektron dalam sebuah atom berorbit mengelilingi inti, seperti planet mengelilingi matahari
- B. Kedudukan elektron paling tepat divisualisasikan dengan awan elektron.
- C. Elektron berpindah melalui lintasan gelombang untuk mengelilingi inti

- D. Elektron berada dalam orbit tertentu, sesuai dengan energi yang dimilikinya
- E. Tidak ada yang tahu kedudukan elektron secara tepat dalam orbit disekitar inti, karena sangat kecil dan bergerak sangat cepat.
3. Berbagai macam bentuk teori dan eksperimen telah dilakukan oleh pakar fisika untuk mengetahui hakikat yang sebenarnya tentang ELEKTRON. Dari lima pernyataan di bawah, anda diminta untuk memilih salah satu jawaban yang paling tepat.
- A. Elektron adalah campuran antara partikel dan gelombang
- B. Elektron adalah partikel, tetapi dapat berperilaku dengan beberapa sifat gelombang
- C. Elektron adalah partikel
- D. Elektron adalah gelombang
- E. Elektron dapat berperilaku seperti partikel atau seperti gelombang
4. Berdasarkan gambar di bawah, pilih bentuk atom H yang paling sesuai menurut anda,



- A.. Tidak mungkin ditentukan kedudukan elektron secara tepat, karena itu tidak mungkin digambarkan bentuk atom yang sebenarnya
- B. Terdiri dari inti yang dikelilingi oleh awan elektron atau seperti model awan elektron
- C. Terdiri dari inti yang dikelilingi oleh gelombang elektron atau seperti model lintasan gelombang elektron

- D. Terdiri dari inti yang dikelilingi oleh elektron atau seperti model tata surya
 - E. Terdiri dari inti yang dikelilingi banyak orbital elektron atau seperti model orbital rotasi elektron
4. Konsep tentang atom yang anda pahami sampai sekarang ini :
- A. Atom adalah bagian benda terkecil, yang tidak mungkin dipecah/dihancurkan lagi.
 - B. Atom terdiri dari partikel-partikel inti (proton dan neutron) dan partikel orbital (elektron) yang membentuk sebuah sistem seperti sistem tata surya (matahari dan planet-planet)
 - C. Atom yang banyak partikel (proton, neutron, dan elektron) didalamnya, ukurannya lebih besar dibandingkan dengan atom yang sedikit jumlah partikelnya.
 - D. Atom terdiri dari "partikel-partikel kuantum" pada inti dan sekelilingnya
 - E. Semua atom akan menghasilkan energi, yang dikenal dengan energi nuklir.

Glossarium

Elektron adalah salah satu dari sistem-sistem kuantum yang senantiasa berada dalam orbit disekitar inti suatu atom atau sebagai sistem bebas dalam konduktor zat padat. Tiada sesiapa yang dapat mengetahui, struktur, bentuk, kedudukan dan momentum elektron dengan tepat, karena elektron suatu sistem kuantum yang mempunyai sifat sebagai partikel pada tempat dan waktu tertentu atau juga mempunyai sifat sebagai gelombang pada tempat dan waktu yang lain. Elektron bukan partikel dan juga bukan gelombang, tetapi sistem kuantum yang dapat berperilaku seperti partikel atau juga seperti gelombang. Elektron senantiasa berada disekitar inti, sesuai dengan jumlah energi yang dimilikinya. Tidak suatu model pun yang paling sesuai dan dapat divisualisasikan tersebut dengan kedudukan elektron disekitar inti atom.

Sifat gelombang-partikel yang ada pada elektron, menyebabkan elektron susah ditentukan bentuk dan kedudukannya. Sehingga sampai saat ini belum dapat diketahui bentuk yang sebenarnya dari elektron. Gambar elektron yang ada dalam buku teks hanyalah model elektron untuk kemudahan pelaksanaan pengajaran dan pembelajaran

Model atom adalah suatu bentuk penggambaran yang dinyatakan sebagai wakil dari bentuk atom sebenarnya, untuk kemudahan penyampaian informasi atom dalam proses Pengajaran dan Pembelajaran atau melalui buku teks.

Atom merupakan suatu sistem fisika yang terdiri dari “partikel-partikel kuantum” yang berada pada inti (proton dan neutron) dan disekitar inti (elektron). Atom bukan bagian terkecil dari struktur suatu benda.

Daftar Pustaka

- Abdul Latif Awang. 1994. *Fisika Moden dan Mekanik Kuantum*. Ed. Ke-2. Universiti Sains Malaysia, Malaysia: Dewan Bahasa dan Pustaka.
- Arya, A.P. 2004. *Elementary Modern Physics*. California: Addison-Wesley.
- Beiser, A. 2001. *Concepts of Modern Physics* (3rd edition). New York: McGraw-Hill Inc.
- Beiser, Arthur. 1999. *Konsep Fisika Modern*. Jakarta : Erlangga
- Eyring, at all. 1984. *Quantum chemistry*. New York: John-Wiley & Sons Inc.
- Fischler H and Lichtfeldt M 1992 Modern physics and students' conceptions *Int. J. Sci. Educ.* **14** 181–90
- Gasiorowicz, S. 1998. *Quantum Physics*. New York: John-Wiley & Sons Inc.
- Gribbin, John. 2003. *Fisika Kuantum*. Jakarta : Erlangga
- Gribbin, John. 2004. *Bengkel Ilmu : Fisika Modern*. Jakarta : Erlangga
- Halim A, 2007. *Pengembangan dan Aplikasi Ujian Diagnostik Fisika Kuantum (UDFK)*, Pendidikan Sains, UKM.
- Halim A, 2008. *Dokumen (foto dan grafik) Mata Kuliah Fisika Moderen*, FKIP Unsyiah (tidak dipublikasi)
- http://id.wikipedia.org/wiki/Model_Bohr
- Inowi, U.M.O. 1984. Miconception in physics amongst Nigerian secondary school students. *Phys. Educ.* **19**. pp. 279 – 285
- Ireson G, 1999 A multivariate analysis of undergraduate physics students' conceptions of quantum phenomena, *Eur. J. Phys.* **20** pp.193–199.
- Ireson G, 2000. The quantum understanding of pre-university physics students, *Phys. Educ.* **35**(1).
- Krane, K. 2001. *Fisika Modern*. Diterjemahkan oleh Hans J. Wospakrik. 1992. Jakarta, Indonesia: UI-Press.

- Krane, Kenneth. 1988. *Fisika Modern*. Jakarta : UI Press
- Kusminarto. 1993. *Pokok-pokok Fisika Modern*. Jakarta: DIKTI.
- Marshaldi A., 1996. Students' conceptions of quantum physics. *Science educations in Europe*, Current issues and themes, pp 254-266.
- Nowikow, I. & Heimbecker, B. 2001. *Physics; concepts and connections*. Canada: Irwin Publishing.
- Pfeffer, J.I. & Nir, S. 2000. *Modern Physics: An Introduction Text*. Singapore: Imperial College Press.
- Rohlf, J.W. 1994. *Modern Physics from Γ to Z^0* . New York: John Wiley & Sonc Inc.
- Serway, R.A., Moses, C.J. & Moyer, C.A. 2004. *Modern Physics* (3rd Edition). United Kingdom: Thomson.
- Sutrisno. 2003. *Fisika Dasar: Fisika Modern*. Bandung: Penerbit ITB.
- Taylor, J.R., Zafiratos, C.D., Dubson M.A. 2004. *Modern Physics for Scientists and Engineers* (2nd Edition). Pearson, London: Prentice-Hall.
- Wutiprom S., Sharma M.D., Johnston I.D, Chitaree R., Soankwan C., 2006. Preliminary results from a New Quantum Mechanics Conceptual Survey; *Australian Institute of Physics 17th National Congress 2006* – Brisbane, 3-8 December.

Indeks

A

Atom, 8, 9, 15, 121, 161, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 183, 184, 185, 186, 192, 195, 197, 199, 205, 207, 209, 210, 211, 212, 213, 219, 220

C

Cahaya instensitas, 119

Contoh Soal dan Latihan Rumah, 99

D

Definisi Cahaya, 143

Dimensi, 11, 14

E

Efek Compton, 143, 144, 158, 160, 166, 204

Efek fotoelektrik, 143, 162

Elektron, 9, 161, 192, 196, 202, 203, 204, 208, 214, 217, 218, 220

Energi dan Laju, 90

F

Fisika klasik, 1, 3, 14, 17, 19, 23, 196, 208

Fisika modern, 1, 3, 14, 15, 16, 17, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 31, 176, 177

Foton, 158, 162, 165, 170, 172

G

Gelombang, 30, 106, 113, 115, 131, 132, 134, 165

H

Hukum Newton, 4, 37, 192

K

Kecepatan cahaya, 3, 17, 30, 42, 43, 44, 45, 49, 57, 59, 60, 61, 62, 70, 73, 83, 89, 90, 92, 93, 95, 107, 111, 155, 172
Kecepatan relatif, 58, 72
Kerangka Acuan, 31, 33, 35
Konstraksi Lorentz, 66

M

Massa, 2, 5, 8, 9, 10, 15, 22, 27, 29, 31, 75, 80, 81, 83, 84, 88, 93, 105, 108, 111, 178, 196, 203, 204, 213, 214, 215
Max Planck, 3, 143
Mekanika kuantum, 3, 187, 214
Mekanika Newton, 3, 33
Michelson-Morley, 39, 43, 45, 50, 57, 63
Miskonsepsi, 155, 156, 157, 158, 159

P

Panjang, 5, 7, 8, 16, 67, 101, 102, 108
Pelangi, 149

R

Radiasi, 119, 120, 121, 130
Relativitas
 khusus, 4, 17, 22, 29, 30, 31, 33, 34, 35, 47, 50, 52, 62, 63, 64, 70, 74, 75, 78, 79, 80, 83, 84, 85, 87, 89, 90, 92, 95, 96, 99, 106, 107, 108, 109, 110
 umum, 30, 31, 106, 110
Relativitas, 29, 30, 31, 47, 53, 90, 96, 97, 110

S

Sel fotolistrik, 146
Sinar-x, 143, 204
Sistem Satuan Internasional, 7, 8, 14

Standar Massa, 9

Standar Waktu, 10

T

Tachyons, 92, 93, 94, 95, 96, 99, 111

Teori kuantum, 3, 17, 18, 24, 191

Transformasi Galileo, 35, 56, 110

Transformasi kecepatan, 57

Transformasi Lorentz, 50, 51, 54, 56, 66, 71, 110

W

Waktu, 2, 3, 5, 8, 9, 10, 11, 13, 29, 30, 31, 34, 35, 40, 41, 42, 43, 44,
45, 46, 49, 50, 51, 52, 53, 56, 57, 63, 66, 67, 68, 70, 71, 72, 73, 74,
75, 76, 77, 78, 79, 81, 90, 99, 100, 101, 102, 106, 107, 110, 116,
117, 118, 121, 144, 162, 163, 172, 177, 181, 188, 192, 197, 200,
202, 203, 205, 211, 214, 216, 220