PENDAHULUAN FISIKA MODERN

*“Berisi tentang pengertian fisika modern, materi apa saja yang dibahas dan beberapa hal yang dipertanyakan dalam fisika modern”*



Disusun oleh:

KHILDA KHOIRUNNINDIYANI

1001135029

KHUSNUL KHOTIMAH

1001135030

RESTI ALFIANDA

1001135049

SITI MASRIAH

1001135051

PROGRAM STUDI PENDIDIKAN FISIKA **4B**

FAKULTAS KEGURUAN DAN ILMU PENDIDIKAN

UNIVERSITAS MUHAMMADIYAH PROF. DR. HAMKA

JAKARTA SELATAN

2012 M/1433 H

**PEMBAHASAN PENDAHULUAN FISIKA MODERN**

Dinamika Newton telah berulang kali mengalami pengujian ketat, dan membuat ia diterima sebagai dasar bagi pemahaman tentang perilaku alam. Keelektrikan dan kemagnetan telah berhasil dipadukan oleh teoritik Maxwell. Gelombang elektromagnet telah berhasil diamati dan diselidiki sifat-sifatnya oleh Hertz yang berawal dari teori Maxwell .

Fisika modern biasanya dikaitkan dengan berbagai perkembangan yang dimulai dengan teori relativitas khusus dan kuantum. Bidang studi ini menyangkut penerapan kedua teori tersebut untuk memahami sifat atom, inti atom, serta berbagai partikel penyusunnya, kelompok atom dalam berbagai molekul dan zat padat, juga pada skala kosmik (jagad raya), tentang asal mula dan evolusi alam semesta.

1. **TINJAUAN ULANG FISIKA KLASIK**

Konsep fisika modern sangat berbeda dengan fisika klasik, tapi kita seringkali akan merasa perlu untuk merujuk kembali konsep fisika klasik, diantaranya:

***Mekanika***

sebuah benda bermassa m yang bergerak dengan kecepatan v memiliki energi kinetik yang didefinisikan oleh

Momentum linier didefinisikan

Apabila sebuah benda bertumbukan dengan benda lain, maka untuk menganalisis tumbukan dengan menerapkan kedua hukum kekekalan berikut:

1. ***Kekekalan Energi***

Energi total sebuah sistem terpisah (resultan gaya luar yang bekerja padanya nol) selalu konstan. Ini berarti bahwa energi total kedua partikel sebelum tumbukan sama dengan energi total setelah tumbukan

1. ***Kekekalan Momentum Linear***

Momentum linear adalah sebuah vektor, maka penerapan hukum ini memberikan dua buah persamaan, satu bagi komponen x dan komponen y. Momentum linear total sebuah sistem terpisah selalu konstan, artinya momentum linear total kedua partikel sebelum tumbukan sama dengan momentum linear setelah tumbukan.

Penerapan lain dari kekekalan energi berlaku ketika sebuah partikel bergerak dibawah pengaruh sebuah gaya luar *F*. Terdapat juga energi potensial *V* yang sedemikian rupa sehingga untuk gerak satu dimensi berlaku

Energi total E adalah jumlah energi kinetik dan potensial

Ketika partikel bergerak, K dan V dapat berubah, tetapi E tetap konstan. Bila sebuah benda yang bergerak dengan momentum linear **p** berada pada kedudukan **r** dari titik asal O, maka momentum sudut **I** nya terhadap titik O didefinisikan :

Keelektrikan dan Kemagnetan yaitu gaya elektrik statik (gaya Coulomb) antara dua partikel bermuatan q1 dan q2

dalam SI tetapan

Pada kedua persamaan harus muncul. Pada sistem nilai tetapan didefinisikan besarnya 1. Arus elektrik i menimbulkan medan magnet **B.** Dalam sistem SI, B diukur dalam satuan tesla ( T adalah newton per amper meter). Tetapan besarnya

Teori Kinetik Zat yaitu termal rata-rata dari molekul-molekul sebuah gas ideal pada temperatur T adalah

Dimana k adalah tetapan Boltzmann

1. **SATUAN DAN DIMENSI**

Hampir semua tetapan dan variabel fisika yang akan kita gunakan memiliki *satuan* dan *dimensi*. Dimensi sebuah tetapan atau variabel memberitahukan kita tentang jenisnya, sebuah besaran yang dalam satu kerangka acuan memiliki dimensi panjang misalnya tetap memiliki dimensi panjang dalam setiap kerangka acuan lainnya, walaupun besar dan satuan yang kita gunakan mungkin berubah. Yang selalu perlu kita sadari ketika mengerjakan suatu soal adalah merasa yakin bahwa persamaan anda taat asas secara dimensional. Misalnya, jika kita mempunyai suatu persamaan yang mengandung suku ( V + M ) dimana V = kecepatan dan M = massa , maka tidaklah disangsikan lagi bahwa anda telah melakukan suatu kesalahan- dua besaran tidak pernah dapat dijumlahkan kecuali jika mereka memiliki dimensi yang sama.

Memeriksa kesesuaian dimensional dari hasil pekerjaan kita merupakan kebiasaan baik yang perlu dimiliki. Terkadang memang mungkin bagi sebuah besaran untuk memiliki satuan, tetapi tidak berdimensi. Contohnya , arloji kita berjalan lambat dan kehilangan 6,0 detik setiap hari. Laju kehilangan waktunya setiap hari dengan demikian adalah R = 6,0 detik/hari. R adalah suatu besaran tidak berdimensi, R memiliki dimensi t/t tetapi R memiliki satuan dan nilainya berubah bila satuannya berubah. Kita dapat pula menyatakan R sebagai 0,10 menit/hari atau 0,25 detik/jam atau bahkan dalam bentuk tanpa satuan seperti 6,9 x , yang memberikan fraksi kehilangan waktu dalam seberang selang waktu. Contoh lainnya adalah bahwa semua faktor konversi (ubah) seperti 25,4 mm/inci atau 1000 g/kg tidak berdimensi.

Tahun belakangan ini telah digunakan system internasional atau SI, satuan-satuan system ini dalam kebanyakan mirip dengan system mks( meter-kilogram-sekon ). Tentu saja system inci , kaki , dan pon serta satuan-satuan lainnya dalam system satuan “ Inggris “ lama tidak mempunyai tempat dalam system SI, dan kita harus pula memaksakan diri untuk menghindari penggunaan satuan-satuan memudahkan yang telah lazim digunakan seperti atsmosfer (atm) sebagai satuan tekanan, gram per centimeter kubik (g/cm³) sebagai kesatuan massa, kalori (cal) sebagai satuan panas, dan sebagainya.

Dalam fisika modern kita jumpai pula persoalan yang sama dalam memilih satuan yang akan kita gunakan, satuan SI terlalu besar untuk kita gunakan. Sebagai contoh , energi khas yang berkaitan dengan berbagai proses atom atau inti atom adalah sekitar hingga J dan begitu pula ukuran khas sistem atom dan inti berkisar dari hingga m. Beberapa tetapan dan variabel yang akan kita pakai dibahas dibawah ini.

1. ***Panjang***

Satuan SI bagi panjang adalah meter (m),tetapi kita akan membutuhkan ukuran panjang yang lebih pendek dari pada meter bagi system atom dan inti. Kita akan menggunakan beberapa satuan panjang berikut:

Mikrometer = = m

Nanometer = nm = m

Femtometer = fm = m

Panjang gelombang elektromagnetik biasanya diukur dalam satuan nanometer-cahaya tampak memiliki panjang gelombang dalam rentang 400-700 nm. Ukuran atom khasnya 0,1 nm dan inti sekitar 1-10 fm (satuan fm terkadang disebut dengan nama Fermi karena menghargai jasa Enrico Fermi seorang fisikawan perintis dalam bidang fisika inti eksperimen dan teori). Kita seringkali menjumpai satuan Angstrom A ( m) sebagai satuan panjang gelombang. Ada kasusu khusus yang akan kita coba dengan menggunakan satuan SI, kita akan memakai nanometer ketimbang angstrom untuk mengukur panjang gelombang.

1. ***Energi***

Satuan SI bagi energi adalah joule (J) yang juga masih terlalu besar nilainya bagi fisika atom dan inti. Satuan yang lebih sesuai adalah electron-volt (eV), yang didefinisikan sebagai energy yang diperoleh sebuah muatan elektrik sebesar muatan electron setelah tertarik bebas melewati beda potensial elektrik satu volt. Karena sebuah electron memiliki muatan sebesar 1,602 x C dan karena 1 V = 1 J/C, maka kita peroleh kesetaraan :

1 eV = 1,602 x J

Beberapa kelipatan electron-volt yang memudahkan adalah

keV = kilo electron-volt = eV

MeV = mega electron-volt = eV

GeV = giga electron-volt = eV

1. ***Muatan Elektrik***

Satuan baku muatan elektrik adalah coulomb (C), sedangkan sebagai satuan dasarnya adalah muatan electron, yaitu e = 1,602 x C. kita akan lebih sering berkeinginan menghitung energy potensial dari dua muatan elektrik yang berjarak pisah dalam ukuran khas atom atau inti dan menyatakan hasilnya dalam electron-volt. Berikut adalah salah satu cara mudah untuk menghitungnya. Misalnya untuk menghitung energy potensial dari dua electron yang berjarak pisah r = 1,00 nm :

Besaran dapat dinyatakan dalam bentuk yang memudahkan sebagai berikut :

= ( 8,988 x ) ( 1,602 x C )²

N.m²

J.m .

nm

Dengan gabungan tetapan-tetapan yang bermanfaat ini, persoalan menghitung energi potensial elektrik statik kini menjadi sangat mudah. Untuk dua muatan satuan yang berjarak pisah 1,00 nm, maka

V = = = 1,440 eV.nm

= 1,44 eV

Bagi perhitungan dalam orde ukuran khas inti atom, femtometer adalah satuan jarak yang lebih sesuai untuk digunakan :

= 1,440 MeV.fm

Memang mudah diingat bahwa besaran tetap memiliki nilai 1,440 yang tidak bergantung pada apakah kita menggunakan ukuran dan energi khas atom ( eV.nm ) ataukah ukuran dan energi khas inti atom ( MeV.fm ).

1. ***Massa***

Kilogram (kg) adalah satuan SI dasar bagi massa, tetapi nilainya juga terlalu besar, teristimewa untuk digunakan dalam bidang fisika inti dan atom. Kesulitan lainnya, sebagaimana akan kita bahas dalam Bab 2 adalah bahwa kita seringkali tertarik untuk menggunakan persamaan Einsten, E= mc² untuk mengubah massa ke dalam energi dan sebaliknya karena c² adalah suatu bilangan yang besar sekali, maka pengubahan ini sama sekali tidak memudahkan, bahkan dapat menimbulkan kesalahan. Kesulitan ini kita atasi dengan membiarkan faktor c² di dalam pernyataan satuan massa dan mengingat bahwa m = E/c².

Satuan massa lainnya yang kita dapati mudah untuk digunakan adalah satuan massa atom. Satuan ini terutama sangat memudahkan dalam perhitungan energi ikat atom dan inti atom. Satuan massa atom ini didefinisikan sedemikian rupa sehingga massa isotop karbon yang lebih banyak dijumpai di alam adalh tepat sama dengan 12 u. Massa atom lainnya diukur relatif terhadap nilai ini.

1. ***Laju Cahaya***

Salah satu tetapan alam mendasar lainnya adalah laju (speed) cahaya, c, yang akan sering anda gunakan dalam kajian fisika modern. Nilainya adalah

C = 3,00 x

Seringkali memudahkan bagi kita untuk menyatakan berbagai laju yang diukur dalam laju cahaya ; dalam Bab 2 kita akan menjumpai banyak contoh soal yang menyatakan laju sebagai suatu kelipatan pecahan dari c, seperti v = 0,6c. Untungnya sebagian besar persamaan teori relativitas khusus tidak mengandung v melainkan v/c, sehingga dengan demikian seringkali tidaklah perlu untuk mengubah 0,6c ke dalam suatu nilai angka laju dalam meter per detik.

1. ***Tetapan Planck***

Tetapan alam mendasar lainnya adalah tetapan planck, h, yang memiliki nilai

h = 6,63 x

tetapan planck jelas memiliki dimensi energi x waktu, tetapi dengan sedikit perhitungan, anda dapat memperlihatkan bahwa dia juga memiliki dimensi momentum linier x perpindahan yang adalah dimensi momentum sudut. Karena telah dikemukakan bahwa kita hendak menggunakan satuan energi dalam elektron-volt ketimbang joule, jadi ada manfaatnya utnuk menyatakan tetapan Planck dengan menggunakan satuan eV, yaitu :

h = 4,14 x

Dalam berbagai hasil peritungan nanti, akan kita jumpai pula tetapan hasil kali hc.

Dalam satuan di atas kita dapat menurunkan bahwa nilainya adalah

Hc = 1240 eV.nm

= 1240 MeV.fm

Amat menarik untuk dicatat bahwa hc dan memiliki dimensi yang sama dan kita memang telah menghitung keduanya dalam satuan yang sama eV.nm. nilai banding kedua besaran ini dengan demikian adalah sebuah bilangan murni yang tidak bergantung pada sistem satuan yang kita pilih. Kelak akan kita pelajari bahwa nilai banding ini ternyata sangat mendasar dalam bidang fisika atom. Tetapan tidak berdimensi yang disebut tetapan struktur halus, ternyata 2 kali nilai berbanding diatas, yaitu :

= 2π

= 0,007297

Bilangan ini biasanya dinyatakan sebagai

1. **ANGKA BERARTI**

Angka berarti disebut juga sebagai angka penting atau angka signifikan, ada beberapa aturan dalam menentukan angka berarti yaitu:

1. Semua angka bukan nol adalah angka berarti

Contoh:

13,4 : terdapat 3 angka penting yaitu 1,3 dan 4

1. Angka nol dibelakang angka bukan nol adalah angka berarti

Contoh:

2,50 : terdapat 3 angka penting yaitu 2,5 dan 0

2050 : terdapat 4 angka penting yaitu 2,0,5 dan 0

1. Angka nol didepan angka bukan nol bukan termasuk angka berarti

0,25 : terdapat 2 angka penting yaitu 2 dan 5

0,02050 : terdapat 4 angka penting yaitu 2,0,5,dan 0

Lalu dalam pembulatan angka berarti juga ada hal-hal yang harus diperhatikan

1. Penjumlahan dan pengurangan

Dalam penjumlahan atau pengurangan angka tidak berarti (angka taksiran) pertama dari bilangan –bilangan yang dijumlahkan atau dikurangkan menentukan letak angka tidak berarti pertama dari hasil jumlah atau selisihnya, “ *jumlah atau banyaknya angka berarti dalam hal ini tidaklah menentukan”*

Contoh:

1. Jika massa neutron adalah 1,008665 u dan massa proton adalah 1,007276 u, Carilah beda massa antara proton dan neutron, lalu nyatakan hasilnya dalam satuan Me V/c²?

Dik:

Dit :

selisih,hasil dalam satuan MeV/c²?

Jwb:

Selisih =

1,008665 u - 1,007276 u = 0,001389 u

Dalam MeV/c²

1 u = 931,50 MeV/c²

Dalam soal diketahui banyaknya angka berarti pada massa proton dan neutron ada tujuah,dan selisih dari kedua massa tersebut hanya memiliki 4 angka penting,ini membuktikan aturan diatas bahwa “ *jumlah atau banyaknya angka berarti dalam hal ini tidaklah menentukan” .*

1. Perkalian dan pembagian

Dalam perkalian atau pembagian, angka berarti memiliki jumlah angka berarti yang sama dengan jumlah angka berarti dari bilangan yang memilki angka berarti paling sedikit.angka berarti (Significan Figures) juga disebut Angka – angka sebelum angka yang diragukan disebut **angka penting**, sedangkan angka – angka sesudah angka penting disebut angka tidak penting atau angka sama sekali tidak bias dipercaya. Dalam melakukan perhitungan – perhitungan , maka ada dua kaidah / peraturan yang harus diingat bila menggunakan angka berarti :

1. Pada penjumlahan atau pengurangan, jangan menyertakan hasil dibelakang kolom pertama yang mengandung angka yang diragukan.

Contoh :

* Diketahui massa proton dan neutron (hingga tujuh angka berarti) adalah :

*mn*= 1,008665 u

*mp*= 1,007276 u

selisihnya adalah :

1,008665 – 1,007276 = 0,001389 u

jawab : faktor pengubah dari u menjadi MeV/c2

oleh karena itu selisih massanya adalah :

0,001389 u x = 1,294 Mev/c2

Selisih massa dalam satuan u memiliki empat angka berarti.

1. Dalam perkalian atau pembagian, banyaknya angka berarti yang dihasilkan menjadi satu lebih besar dari **bilangan terkecil** yang memuat angka yang masih dapat dipercaya.

Contoh :

* Hitunglah nilai hc hingga empat angka berarti dan tentukan apakah angka nol pada angka terakhir adalah angka berarti?

Jawaban :  *h* = 6,6262 x 10-34 *J.s*

*c*  = 2,9979 x 108 *m/s*

*1 eV* = 1,6022 x 10-19 *J*

*hc* =

= 1239,8 eV.nm

Karena pembulatan menjadi empat angka maka di dapatkn hc = 1240 eV.nm, dimana angka nol termasuk angka penting.

Dari pembahasan dan contoh –contoh tentang angka berarti diatas, hal yang harus diingat adalah melihat langsung angka berarti dari suatu bilangan secara tepat merupakan kebisaan belaka dan begitu kita membentuk kebisaan ini, berkurang juga kesulitan kita dalam menyatakan hasil perhitungan dan meskipun kalkulator kita mempergunakan kedelapan angka pada layar peragannya, tidak semuannya merupakan angka berarti dan sebagai jawab dari persoalan hanya angka berarti yang harus kita catat.

* 1. **TEORI, PERCOBAAN DAN HUKUM**

Ketika pertama kali mempelajari IPA saat di SMP dan SMA kita telah mempelajari tentang “metode ilmiah”yang dinggap merupakan semacam tata kerja (prosedur ) yang dengannya kemajuan ilmu tercapai. Gagasan dasar metode ilmiah ini adalah saat kita berusaha memahami suatu aspek alam tertentu para ilmuan akan menciptakan suatu *hipotesis* atau *teori* yang kemudian akan diuji kebenarannya lewat percobaan dan jika berhasil lulus akan ditingkatkan setatusnya menjadi *hukum*. Tata kerja ini bertujuan menekannkan pentingnya dilakukan berbagai percobaan sebagai cara untuk menguji kebenaran kebenaran berbagai hippotesis dan menolak yang tidak lulus.

Fisika modern merupakan suatu contoh ekstrem yang membutuhkan percobaan. Dengan demikian dalam studi kita tentang fisika modern kita akan berusaha menonjolkan berbagai percobaan yang telah dilakukan untuk mempelajari teori relativitas dan fisika kuantum.

Namun terdapat persoalan yang berkaitan dengan fisika modern yang tetap tidak terpecahkan dan sering kali membingungkan,yaitu mengenai kata “*metode ilmiah*”. Ini mengenai kata “teori”. Terdapat dua definisi tentang perkataan “teori” yang berbeda dan bertentangan dalam kamus :

1. Suatu hipotesis atau dugaan.
2. Suatu kumpulan fakta atau penjelasan.

“metode ilmiah” merujuk ke “teori” menurut definisi pertama. Sedangkan ketika kita berbicara tentang “teori relativitas” maka kita merujuk kedefinisi yang kedua. Teori relativitas dan fisika kuantum kadang-kadang dipandang para siswa sebagai hipotesis belaka dimana bukti-bukti percobaan pendukungnya masih tetap dihimpun dengan harapan bahwa suatu hari bukti-bukti ini akan diajukan kesemacam mahkamah internasional yang akan merubah status “teori” menjadi “hukum”.

Padahal teori relativitas dan teori kuantum, seperti halnya teori atom atau teori evolusi, benar-benar suatu kumpulan fakta dan penjelasan, bukan hipotesis. Oleh karena itu tidak relevan memperdebatkan apakah kedua “teori” itu kelak menjadi hukum. Apakah fakta-fakta itu disebut teori atau hukum hanyakah masalah arti kata (semantik) belaka dan tidak ada sangkut pautnya dengan jasa ilmiah kedua teori ini. Seperti yang berlaku bagi semua asas ilmiah, kedua teori ini akan terus berkembang dan berubah begitu diperoleh penemuan-penemuan baru dan yang harus diingat pula bahwa usaha mencari bebagai kebenaran terakhir atau hukum-hukum abadi bukanlah tujuan ilmu pengetahuan.

Selain mengenai teori masih ada dua pertannyaan lain yang mungkin akan anda temukan ketika mempelajari fisika modern. Pertama mengenai “bagaimana” dari teori-teori ini. Berbagai bukti percobaan yang membentuk dasar fisika modern hampir selalu bersifat *tidak langsung*, tidak seorang pun yang pernah “melihat” sebuah kuantum atau meson pi atau bahkan sebuah inti atom dan tidak ada yang pernah bergerak dengan laju mendekati laju cahaya dan yang lainnya. Walaupun demikian bukti-bukti percobaan ini begitu menyakinkan sehingga tidak seorang pun yang meragukannya. Hendaklah diingat bahwa sebagian besar gagasan fisika modern didukung oleh bukti-bukti percobaan secara tidak langsung yang diperoleh secara analis dan penafsiran hasil-hasil percobaan bukan dari pengamatan langsung.

Pertannyaan kedua yang agak mengesalkan adalah “mengapa” dari teori-teori ini. Mengapa alam berprilaku menurut relativitas einstein ketimbang menurut relativitas galileo? Mengapa partikel kadang-kadang berprilaku sebagai gelombang dan gelombang terkadang berprilaku sebagai partikel? Mengapa atom-atom bergabung membentuk senyawa? Dan lain-lain. Meskipun para ilmuan memiliki jawaban yang luar bisa untuk pertannyaan bagaimana tapi mereka tidak bisa memmberi jawaban tentang hal “mengapanya”. Ini bukan karena kemampuan pengamatan atau percobaan mereka terbatas, melainkan semata-mata karena pertanyaan tersebut berada diluar jangkauan pengamatan percobaan.

Semua pertannyaan ini sangat penting, karena itu sebagai mahasiswa jurusan fisika diharapkan anda dapat menaruh perhatian dan meluangkan waktu untuk memikirkannya.

**Teori Relativitas Khusus**

Teori relativitas khusus Einstein dan teori kuantum Planck memasuki bidang kajian fisika hampIr secara bersamaan pada dasawarsa pertama abad kedua puluh. Kedua teori ini ternyata membawa sejumlah perubahan besar yang sangat mendasar dalam cara kita memandang alam semesta.

Dalam bab ini kita akan mempelajari teori relativitas khusus. Teori relativitas khusus sebenarnya adalah semata-mata suatu sIstem kinematika dan dinamika lain, yang didasarkan pada sekumpulan postulat yang memang berbeda dari fisika klasik. Rumusan yang dihasilkan tidaklah lebih rumit daripada hukum-hukum Newton, namun memang memberi ramalan-ramalan yang tampak bertentangan dengan “akal sehat” kita.

Kita akan lebih dahulu meninjau ulang reLativitas klasik Newton dan kemudian memperlihatkan mengapa Einstein terdorong mengusulkan untuk menggantikannya. Setelah itu, kita akan membahas berbagai aspek matematika teori relativitas khusus, ramalan-ramalannya, dan akhirnya berbagai percobaan yang menguji kebenaran.

1. **KEGAGALAN RELATIVITAS KLASIK**

Pandangan pahaman Newton tentang alam telah memberi suatu kerangka nalar dasar yang membantu kita memahami sejumlah besar gejala alam. Pandangan tentang alam ini, yang sebenarnya berasal dari Galileo, mengatakan bahwa ruang dan waktu adalah mutlak. Sebagai contoh, pernyataan yang lazim dikenal sebagai asas kelembaman (inersia) Galileo, mengatakan bahwa sebuah benda yang diam cenderung diam kecuali jika padanya dikenakan gaya luar. Jadi, hukum-hukum Newton (termasuk asa kelembaman) tidak berlaku dalam kerangka acuan yang mengalami percepatan, kecuali dalam kerangka acuan yang bergerak dengan kecepatan tetap. Kerangka acuan (yang bergerak dengan kecepatan tetap) ini disebut *kerangka lembam* (inersia). Tetapi, mereka semua akan sependapat bahwa hukum-hukum Newton, kekekalan energy dan seterusnya tetap berlaku dalam kerangka mereka. Pembandingan pengamatan-pengamatan yang dilakukan dalam berbagai kerangka lembam, memerlukan *transformasi Galileo*, yang mengatakan bahwa kecepatan (relative terhadap tiap kerangka lembam) mematuhi aturan jumlah yang paling sederhana.

Contoh soal : Andaikan seorag pengamat O, dalam salah satu kerangka lembam mengukur kecepatan sebuah benda v, maka pengamat O’ dalam kerangka lembam lain, yang bergerak dengan kecepatan **u** relative terhadap O, akan mengukur bahwa benda yang sama ini bergerak dengan kecepatan **v’ = v-u** .

Bahasan tentang transformasi kecepatan ini akan kita sederhanakan dengan memilih system koordinat dalam kedua kerangka acuan sedemikian rupa sehingga gerak relative u selalu pada arah x. untuk kasus ini, transformasi Galileo menjadi

V’x = Vx – u

V’y = Vy

V’z = Vz

Tampak bahwa hanya komponen=x kecepatan yang terpengaruh. Dengan mengintegrasika persamaan pertama kita peroleh

X’ = x – ut

Sedangkan diferensiasinya memberikan

Atau

Persamaan diatas memperlihatkan mengapa hukum-hukum Newtin tetap berlaku dalam kedua kerangka acuan tiu. Selama u tetap ( jadi du/dt = 0 ), kedua pengamat ini akan mengukur percepatan yang identik sependapat pada penerapan F = ma. Berikut adalah contoh tentang penerapan transformasi Galileo:

**Contoh 2.1**

Dua buah mobil melaju dengan laju tetap di sepanjang sebuah jalan lurus dalam arah yang sama. Mobil A bergerak dengan laju 60 km/jam, sedangkan mobil B 40 km/jam. Masing-masing laju ini diukur relative terhada seorang pengamat di tanah. Berapakah laju mobil A terhadap mobil B ?

Jawab

Dik : misalkan O = pengamat di tanah

Va = 60 km/jam

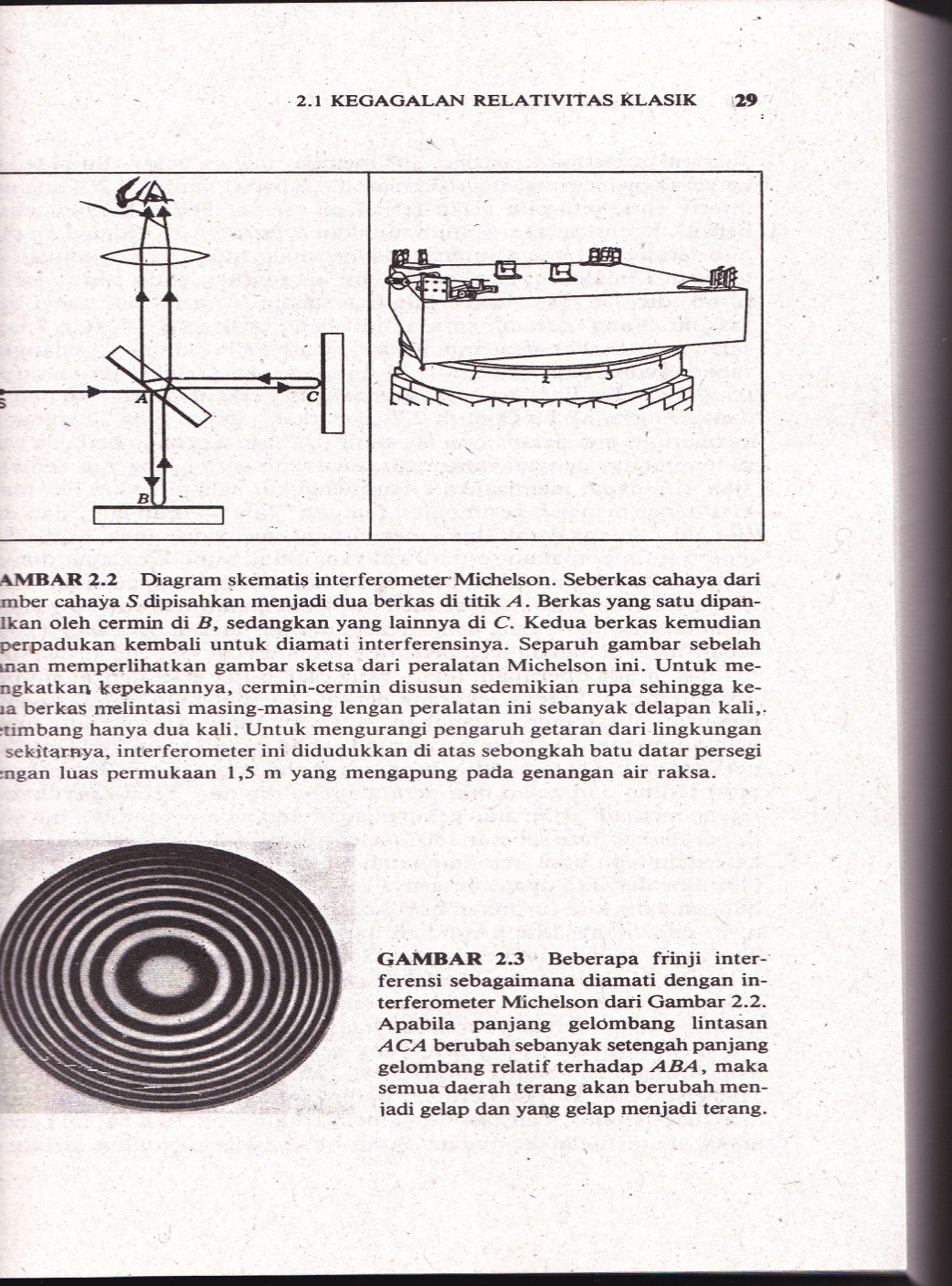
u = 40 km/jam

dit : V’ ?

jawab : V’ = V – u = 60 km/jam – 40 km/jam = 20 km/jam

Gejala gelombang secara umum dapat kita definisikan sebagai rambatan gangguan periodik melalui suatu zat perantara. Zat perantara ini disebut eter. Namun, karena alat ini belum pernah teramati dalam percobaan, maka dipostulatkan bahwa eter tidak bermassa dan tidak tampak, tetapi mengisi seluruh ruang, dan fungsi satu-satunya hanyalah untuk merambat gelombang electromagnet. Konsep eter sangat menarik perhatian ada dua alasannya yaitu Pertama, sulit untuk membayangkan bagaimana sebuah gelombang dapat merambat tanpa memerlukan zat perantara-bayangkan gelombang air tanpa air ! Kedua, pengertian dasar eter ini berkaitan erat dengan gagasan Newton tentang ruang mutlak eter dikaitkan dengan sistem koordinat semesta agung. Dengan demikian keuntungan sampingan yang bakal diperoleh dari penyelidikan terhadap eter ini adalah bahwa dengan mengamati gerak bumi mengarungi eter, akan terungkap pula gerak bumi relative terhadap “ruang mutlak”.

Percobaan awal untuk mendapatkan bukti kehadiran eter pada tahun 1887 oleh fisikawan Amerika, Albert A.Michelson dan rekannya E.W.Morley. percobaan mereka pada dasarnya mempergunakan interferometer Michelson yang dirancang khusus bagi maksud ini gambar diagram skematisnya diperlihatkan pada gambar 2.2 dalam percobaan ini, seberkas cahaya monokromatik (satu warna) dipisahkan menjadi dua berkas yang dibuat melewati dua lintasan berbeda kemudia diperpadukan kembali karena adanya perbedaan panjang lintasan yang ditempuh kedua berkas, maka akan dihasilkan suatu pola interferensi, seperti tampak pada gambar 2.3



Pada pola interferensi, pita-pita gelap terjadi di tempat kedua berkas cahaya berinterferensi secara minimumkan (destructive), sedangkan pita-pita terang di tempat interferensinya maksimum (constructive), interferensi minimum dan maksimum bergantung pada beda fase antara kedua berkas cahaya. Ada dua saham (contribution) bagi beda fase ini. Yang pertama berasal dari jalan ( AB-AC ) karena salah satu berkas menempuh jarak yang lebih panjang, sedangkan saham kedua bagi beda fase ini ternyata akan selalu ada meskipun panjang kedua lintasan berkas tepat sama. Walaupun demikian, Michelson dan Morley menggunakan suatu metode cerdik untuk dapat menarik kesimpulan tentang komponen saham kedua ini. Yaitu, dengan memutarkan seluruh peralatan mereka sebanyak 90⁰. Saham bagi beda fase yang disebabkan oleh beda jalan, tentu saja tidak berubah, tetapi yang oleh gerak eter mengalami perunbahan tanda, karena sekarang berkas sepanjang AC yang bergerak menuruti aliran eter. Adanya perubahan tanda pada saham kedua ini diperkirakan bakal teramati sebagai pola frinji (fringes atau pita) terang dan gelap bila peralatannya diputar.

Setiap perubahan terang menjadi gelap atau gelap menajdi terang menggambarkan suatu perubahan fase sebesar 180⁰ (setengah siklus), yang setara dengan keterdahuluan atau keterlambatan waktu sebesar setengah periode. Untuk semua tampak besarnya sekitar . Ketika Michelson dan Morley melakukan percobaan ini, mereka tidak mengamati adanya perubahan mencolok dalam pola frinji interferensi yang mereka simpulkan hanyalah suatu pergeseran yang lebih kecil daripada 0,01 frinji, yang berhubungan dengan laju Bumi mengarungi eter, paling tinggi 5 km/detik. Sebagai rangkumannya, kita lihat bahwa terdapat suatu rantai nalar yang berawal dari asas kelembaman Galileo, melalui hukum-hukum Newton dengan andaian-andaian implisitnya tentang ruang dan waktu, dan berakhir dengan kegagalan percobaan Michelson-Morley untuk mengamati gerak Bumi relatifit terhadap eter. Dengan demikian, penjelasan yang lebih baru, revolusioner, dan berhasil memerlukan penyususnan ulang konsep-konsep tradisional kita tentang ruang dan waktu, dan oleh karena itu akan merombak beberapa konsep fisika klasik yang paling mendasar.

1. **POSTULAT EINSTEIN**

Albert Einstein (1879-1955) Jerman-Amerika Serikat seorang filsuf yang ramah. Ia adalah guru intelektual bagi dua generasi fisikawan di bidang kajian fisika modern. Permasalahan yang dimunculkan percobaan Michelson-Morley ini ternyata baru berhasil terpecahkan dengan *teori relativitas khusus* yang membentuk landasan bagi konsep – konsep baru tentang ruang dan waktu. Teori ini didasarkan pada dua postulat berikut, yang diajukan Albert Einstein pada tahun 1905 :

1. Asas relativitas : hukum – hukum fisika tetap sama pernyataanya dalam semua system lembam
2. Ketidakubahan laju cahaya : laju cahaya memiliki nilai c yang sama dalam semua system lembam.

Postulat pertama pada dasarnya menegaskan bahwa tidak ada satupun percobaan yang dapat kita gunakan untuk mengukur kecepatan terhadap ruang mutlak yang dapat kita ukur hanyalah laju relative dari suatu system lembam.

Postulat kedua kelihatannya tegas dan pula seolah – olah sederhana. Percobaan Michelson – Morley memang tampaknya menunjukkan bahw alaju cahaya dalam arah lawan turut dan silang adalah sama. Dan postulat kedua semata – mata menegaskan fakta ini bahwa laju cahaya adalah sama bagi semua pengamat, sekalipun mereka dalam keadaan gerak relatif.

1. **AKIBAT POSTULAT EINSTEIN**
2. Pemuluran waktu (*time dilation*)

Seorang pengamat O’yang bergerak dengan laju *u* terhadap pengamat O akan mengukur waktu yang lebih lama dari pada pengamat O yang diam. Semua jam akan berjalan lambat menurut seorang pengamat yang bergerak relatif, termasuk jam biologis, pertumbuhan usia karena efek pemuluran waktu.

Contoh:

1. Berapa cepatkah muon (partikel elementer) harus bergerak agar mereka masih tetap “hidup” ketika tiba dipermukaan bumi ?

Pemecahan:

Anggaplah muon itu bergerak dengan laju menghampiri c. untuk menempuh jarak 100 km, mereka membutuhkan waktu sekitar ∆t′ = 100 km/(). Dengan nilai ∆t didapat dari pengukuran dilaboratorium.

Jawab:

1. Penyusutan panjang (*length contraction*)

Penyusutan panjang terjadi hanya sepanjang arah gerak, semua komponen panjang lainnya (tegak lurus arah gerak) tidak terpengaruh.

Contoh:

1. Seorang pengamat sedang berdiri pada sebuah peron stasiun ketika sebuah kereta api medern berkecepatan tinggi melewatinnya dengan laju u =0,80c. bagi pengamat panjang peron satasiun adalah 60 m. Suatu saat mencatat bahwa ujung depan dan belakang karena itu tepat segaris dengan ujung-ujung peron stasiun,berapakah panjang sejati dari kereta tersebut?

Pemecahan:

Diket: L′= 60 m dit: L.....?

u = 0,80c

c =

jawab :

= 100 m

**Contoh 2.5**

Seorang pengamat sedang berdiri pada sebuah peron stasiun ketika sebuah kereta api modern berkecepatan tinggi melewatinya dengan laju u = 0,80c. Pengamat tersebut, yang baginya panjang peron stasiun adalah 60 m, suatu saat mencatat bahwa ujung-ujung peron stasiun. (a) Berapa lamakah waktu yang dibutuhkan kereta untuk melewati sebuah titik tetap pada peron stasiun, menurut pengamat pero? (b) Berapakah panjang kereta? (c) Berapakah panjang peron stasiun, menurut pengamat di dalam kereta? (d) Berapakah lama waktu yang dibutuhkan sebuah titik tetap pada peron stasiun untuk melewati seluruh badan kereta, menurut pengamat di dalam kereta? (e) Bagi seorang pengamat di dalam kereta, ujung-ujung kereta tidak akan secara serempak berada segaris dengan ujung-ujung peron stasiun. Carilah beda waktu antara saat ketika ujung depan kereta segaris dengan salah satu ujung peron dan saat ketika ujung belakang kereta segaris dengan ujung yang lainnya.

**Pemecahan**

1. Untuk melewati sebuah titik tertentu, kereta api harus menempuh jarak sejauh panjangnya menurut pengukuran pengamat di peron stasiun. Jadi :

Δt = = = 2,5 x s

1. Karena pengamat d peron mengukur panjang tersusutkan kereta api (tetapi ia mengukur panjang sejati peron) 60 m, maka panjang sejati kereta adalah, menurut Persamaan (2.5) :

= = = 100 m

1. Pengamat di kereta mengamati bahwa peron stasiun memiliki panjang tersusutkan , yang berhubungan dengan panjang sejatinya melalui hubungan

= = 60 = 36 m

1. Karena panjang kereta api 100m, maka

= = 4,2 s

Perhatikan bahwaa selang waktu ini telah kita sebut Δt’ untuk menunjukkan bahwa ia *bukanlah* sedang waktu sejati peristia bersilangnya sebuah titik pada peron stasiun dengan ujung depan kereta kemudian dengan ujung belakangnya *tidaklah* terjadi pada titik yang sama dalam ruang menurut pengamat di kereta api. Tentu saja Δt dari bagian a dan Δt’ berkaitan melalui rumus pemuluran waktu, sebagaimana dapat anda perlihatkan sendiri.

1. Selang waktu antara saat ketika ujung depan kerreta api segaris dengan salah satu ujung peron stasiun dan saat ketika ujung belakang kereta api segaris dengan ujung lain peron stasiun itu adalah tidak lain daripada jarak yang “ditempuh” stasiun, 100 – 36 = 64 m, bagi laju relative, yakni :

Δt = = 2,7 s

Jadi, kedua peristiwa yang tampak serempak dalam satu kerangka acuan ternyata terjadi dalam selang waktu 2,7 s bagi kerangka acuan lainnya. Dalam paragraph 2.6 kita akan menyelidiki gejala ala mini lebih lanjut.

Karena dua pengamat yang dalam keadaan gerak relative mengukur selang waktu yang berbeda, maka kita dapat pula bertanya apakah pengukuran frekuensi juga berbeda. Dalam fisika klasik, anda telah mempelajari efek Doppler bagi gelombang suara, yang menerangkan bahwa bila sumber dan pengamat bergerak dengan laju dan relatif terhadap zat perantara, maka frekuensi *v’* yang didengar pengamat *O* berbeda dari frekuensi *v*  yang dipancarkan sumber *S*. hubungannya adalah :

*v’* = *v* (2.6)

Tanda aljabar diatas kita pilih apabila *S* bergerak menuju *O*, atau *O* menuju *S* (*v* adalah laju gelombang dalam zat perantara). Karena semua kecepatan diukur terhadap zat perantara (udara tenang, misalnya), maka gerak sumber memberi pergeseran Doppler yang berbeda dari yang disebabkan gerak pengamat. Sebagai contoh, untuk gelombang suara dalam udara, v = 340 . Andaikanlah sumber memancarkan gelombang bunyi berfrekuensi 1000 Hz. Jika sumber dan pengamat bergerak saling mendekati dengan laju 30 , maka kita dapat mencirikan tiga situasi berikut dari banyak kemungkinan lainnya :

1. Sumber diam dalam zat perantara, sedangkan pengamat bergerak dengan laju 30 menuju sumber :

*v’* = 1000 = 1088 Hz

1. Pengamat diam, sumber bergerak menuju pengamat dengan laju 30 :

*v’* = 1000 = 1097 Hz

1. Sumber dan pengamat masing-masing bergerak saling mendekati dengan laju 15 relatif terhadap zat perantara

*v’* = 1000 = 1092 Hz

Perhatikan bahwa nilai *v’* berbeda untuk ketiga kasus ini berarti, kita dapat membedakan “gerak mutlak” terhadap zat perantara yang merambatkan gelombang bunyi.

Postulat pertama Einsten mengatakan bahwa situasi seperti ini tidak mungkin berlaku bagi gelombang cahaya, karena gelombang cahaya tidak membutuhkan zat perantara (tidak ada “eter”) dan tidak ada percobaan yang dapat mengungkapkan gerak mutlak. Oleh karena itu, kita mensyaratkan bahwa bagi gelombang cahaya terdapat rumus pergeseran Doppler yang berbeda, yang tidak membedakan antara gerak sumber dan gerak pengamat, melainkan hanya melibatkan gerak relative.

Andaikanlah pengamat *O* memiliki sumber radiasi yang memancarkan gelombang cahaya berfrekuensi *v* (menurut pengukuran *O*). pengamat *O’* yang sedang bergerak dngan laju u relative terhadap *O*, mengukur frekuensi yang lebih besar jika ia bergerak menuju *O* (lebih banyak muk gelombang yang melewatinya tiap detik). Sebaliknya, bila ia bergerak menjauhi *O*, ia mengukur frekuensi yang lebih kecil.

Marilah kita tinjau situasi ini dari sudut pandangan *O’*, untuk kasus jarak antara O’ dan sumber berkurang (*O’* bergerak menuju *O*). jika *T’* adalah selang waktu antara dua puncak gelombang menurut pengukuran *O’* (Gambar 2.12) dan adalah panjang gelombang yang dilihat *O’*, maka menurut *O’*, jarak antara dua puncak gelombang adalah *(c – u)T’*, karena setelah satu puncak gelombang tertentu bergerak sejauh *cT’* barulah sumber memancarkan puncak gelombang berikutnya, sementara sumbernya sendiri telah bergerak sejauh *uT’*. Jadi :

*λ’ = (c – u)T’*

Selang waktu *T’* antara dua puncak gelombang menurut pengukuran *O’* berkaitan dengan selang waktu T antara dua puncak gelombang menurut pengukuran *O* , menurut rumus pemuluran waktu, Persamaan (2.4), yakni T’ = ; T berkaitan dengan frekuensi v yang diukur *O* menurut hubungan *T* = . Panjang gelombang *λ’* yang diukur *O’*  berkaitan dengan frekuensi *v’* yang diukur *O’* menurut hubungan *c = λ’ v’*. Jadi

Gambar 2.12 Pengamat *O* memancarkan gelombang berfrekuensi *v*. Ketika *O* berada di titik *A*, ia pancarkan gelombang pertama ; di *B* ia pancarkan gelombang kedua. Gelombang ketiga ( tidak diperlihatkan) baru akan dipancarkan dari titik *C*. Jarak antara dua puncak gelombang menurut pengukuran *O’* adalah .

= *(c – u)* =

Atau

*v’* = *v* = *v* (2.7)

Persamaan (2.7) adalah rumus pergeseran Doppler yang taat asas dengan kedua postulat Einsten. Perhatikan bahwa (tidak seperti halnya dengan rumus klasik) rumus ini *tidak* membedakan antara gerak sumber dan pengamat, dan hanya bergantung pada laju relative *u*. (Jika sumbernya bergerak menjauhi pengamat, maka dalam rumus pergeseran Doppler, gantikan *u* dengan *–u*).

**Contoh 2.6**

sebuah galaksi jauh sedang bergerak menjauhi Bumi dengan laju yang cukup tinggi sehingga garis *(spectrum)* hydrogen biru berpanjang gelombang 434 nm terekam pada 600nm, dlam rentang spectrum merah. Berapakah laju galaksi itu relative terhadap Bum ?

**Pemecahan**

Karena , maka *v’* dan Persamaan (2.7) menunjukkan bahwa galaksi tersebut bergerak menjauhi Bumi. Dengan demikian, diperoleh :

*v’ – v*

atau dengan menggunakan *v* = dan *v’* = ,

600nm = 434nm

Atau

= 0,31

Jadi, galaksi tersebut bergerak menjauhi Bumi dengan laju 9,4 .

1. **TRANSFORMASI LORENTZ**

Seperti halnya dengan transformasi galileo, transformasi lorentz juga mengaitkan koordinat dari suatu peristiwa (x, y, z,t) sebagaimana diamati oleh kerangka acuan O (pengamat yang diam) dengan koordinat peristiwa yang sama (x’, y’, z’, t’) yang diamati oleh kerangka acuan O’(pengamat yang bergerak) yang sedang bergerak dengan kecepatan u terhadap O. Seperti pada pembahasan sebelumnya kita menganggap bahwa gerak relatif adalah sepanjang arah x (atau x’) positif (O’ menjauhi O).

Adapun bentuk persamaan transformasi lorentz ini adalah sebagai berikut :

Keterangan:

x’,y’, z’ = posisi relatif benda (m)

u = kecepatan relatif terhadap O (m/s)

c = laju cahaya ()

t = waktu (s)

lalu andaikan objek yang diamati O bergerak dengan kecepatan v =(). Untuk mencari kecepatannya v′ = ) sebagaimana diamati oleh O′ maka kita perlu menggunakan *transfortasi kecepatan lorentz* berikut:

Contoh:

Dua roket a dan b saling mendekat sepanjang suatu garis lurus seperti pada gambar, masing-masing roket bergerak dengan laju 0,5c relatif terhadap seorang pengamat bebas ditengah keduannya. Dengan kecepatan berapakah pengamat roket yang satu mengamati roket yang lain mendekatinya?

C:\Program Files\Microsoft Office\MEDIA\CAGCAT10\j0215086.wmfC:\Program Files\Microsoft Office\MEDIA\CAGCAT10\j0215086.wmf (roket a) (roket b)

album-67526-m.jpg

O

O′

(didalam roket)

pemecahan:

misalkan O mennyatakan pengamat bebas dan O′ pengamat di roket a. Maka “peristiwa” yang sedang mereka amati adalah mendekatnnya roket b.

dik:

u = 0,5c

dit:

jwb:

= -0,8c

1. **DINAMIKA RELATIVISTIK**

Setelah melihat postulat Einstein yang menuntun kita kepada suatu penafsiran”relatif” terhadap konsep-konsep mutlak seperti panjang dan waktu. Dan darinya berkesimpulan bahwa konsep klasik kita tentang laju relatif tidak lagi benar. Oleh karena itu sekarang kita membahas ulang besaran-besaran dinamika seperti massa, energi, momentum dan gaya. Hukum kekekalan energi, hukum kekekalan momentum linear dan hukum kekekalan momentum sudut dapat diperlihatkan merupakan akibat dari kehomogenan (homogeneity) dan keisotropian (isotropy) alam semesta. Pengertian ketidakubahan (invarience) ini terhadap translasi dalam waktu dan ruang, dan terhadap rotasi (pemutaran) dalam ruang dapat diperlihatkan setara dengan konsep tentang kekekalan energi, momentum linear, dan momentum sudut. Andaikanlah kita kenakan gaya tetap F pada sebuah benda bermassa m, yang memberikan percepatan a = F/m. Jika gaya tersebut kemudian dikenakan selama selang waktu yang cukup lama, maka dinamika klasik meramalkan bahwa partikelnya akan terus bertambah lajunya hingga melampaui laju cahaya.

sebelum sesudah

m1 m2 m1 m2

V1 V2 v’1 v’2

Karena semua kecepatan searah sumbu x maka kita telah mengabaikan indeks bawah x. Dan kecepatan massa 2 dengan V2=-V menurut O

menurut O momentum linear sebelum dan sesudah tumbukan

: m1v1 + m2v2=mv + m(-v)=0

: (2m)(V)=0

Menurut O’

: m1v’1+m2v’2=m(0)+m =

: 2mV’= 2m(-v)=-2mv

m=

disebut massa diam, dalam kerangka acuan yang lainnya massa relativistik m akan lebuh besar dari pada . Ketika laju objek menghampiri laju cahaya, massanya menjadi besar sekali sehingga gaya yang bekerja menjadi kurang efektif untuk menghasilkan suatu percepatan. Saat massanya menjadi takhingga, maka tidak ada lagi percepatan yang dapat dihasilkan oleh suatu gaya hingga, dengan demikian kita tidak pernahdapat mencapai atau melampaui laju cahaya.

Marilah kita periksa bagaimana definisi massa relativistik ini mempertahankan kekekalan momentum dalam kerangka acuan O dan O’. Nyatakan massa yang diukur oleh O dengan m1, m2 dan M (massa gabungan), dan untuk O’ dengan m’1, m’2 dan M ‘. Anggaplah kedua objek ini memiliki massa diam mo yang sama. Kedua massa itu adalah

m1 dan m2

Karena v1 = v2 = v juga

M = m1 + m2

Karena massa gabungan ini diam dalam kerangka acuan O, maka massa M adalah massa diamnya yang dinyatakan dengan Mo. Menurut O’ , m’1 = m0. Karena m’2 bergerak dengan laju v’2 = -2v / (1 + v2 / c2 ) maka

m’22 = mo

Massa gabungan M’ bergerak dengan laju V’ = -v, jadi

M’

Jika disubtitusikan hasil yang diperoleh bagi Mo, yaitu Mo = 2mo  / , maka diperoleh

M’

Disini terlihat bahwa definisi massa yang baru ini berhasil mempertahankan kekekalan momentum menurut O , karena *p*awal  = m1v1 + m2v2  tetap sama dengan nol, seperti *p* akhir. Selanjutnya, kita periksa momentum awal dan akhir dalam kerangka acuan O’:

*P* awal  = m’1 v’1 + m’2 v’2

= mo (0) = mo

=

dan

*p*’ akhir = M’V’ =

Karena p’ awal = p’ akhir, maka definisi baru tentang massa relativistic di atas telah memungkinkan kita untuk mempertahankan berlakunya kekekalan momentum dalam kedua kerangka acuan.

Selain mendefinisikan massa relativistic seperti yang kita lakukan , dapat pula kita mendefinisikan ulang momentum relativistik sebagai berikut :

*p* =

Definisi ini ternyata merupakan pilihan yang terbaik, karena beberapa alesan berikut :

* Dapat memperluasnya dengan mudah ke rumusan dua dan tiga dimensi
* Menghindari kita dari kebingungan penggunaan massa relativistic pada kasus-

kasus .

Contoh :

Dua massa m1 dan m2 yang berjarak pisah r saling tarik – menarik menurut hukum gravitasi , F = Gm1m2 / r2. Kedua massa ini dihubungkan oleh sebuah pegas berskala , yang mencatat gaya antara keduanya. Pengamat O’ berada dalam sebuah pesawat roket yang bergerak menjauhi kedua massa itu dalam arah tegak lurus garis hubung m1 dan m2 . Misalnya, kita menyisipkan pernyataan massa relativistic ke dalam pernyataan klasik bagi gaya di atas, maka kita akan menyimpulkan bahwa O dan O’ akan mengamati pembacaan yang berada pada skala pegas yang sama. Sungguh keliru memperlakukan semua persamaan dinamika seperti yang kita lakukan di atas – dengan sekedar menggantikan massa klasik dengan massa relativistik.

Mengapa di anggap keliru karena tidaklah benar menuliskan energi kinetik sebagai mv2 dengan menggunakan massa relativistik.

Energi kinetik dalam fisika klasik didefinisikan sebagai usaha sebuah gaya luar yang mengubah laju sebuah objek. Definisi yang sama tetap dipertahankan dalam mekanika relativistik ( dengan membatasi bahasa kita dalam satu dimensi). Perubahan energi kinetik K Kf – Ki adalah :

Jika benda bergerak dari keadaan diam, Ki = 0 , maka energi kinetik akhir K adalah :

K

Mengingat gaya masih belum diperlakukan dari segi relativistik, maka kita harus melanjutkan bahasan ini. Tanpa bukti atau pembenaran apapun, kita akan mencoba mempertahankan hukum kedua Newton ( F = dp / dt ) sebagai hubungan dinamika relativistik yang sesuai. Jadi kita peroleh

K dx

Pernyataan yang terakhir dapat kita ubah lebih lanjut bila menggunakan teknik sandar pengintegrasian per bagian, dengan d(pv) = v dp + p dv, yang memberikan :

v

Dengan melakukan integrasi, kita memperoleh :

Yang dapat kita tuliskan dalam bentuk berikut :

Persamaan ini memberikan kita suatu hasil dari bagi pernyataan energi kinetik relativistik. Perbedaan antara besaran mc2 bagi sebuah partikel yang bergerak dengan laju v, dengan besaran moc2 bagi sebuah partikel diam, tidak lain adalah energi kinetiknya. Besaran moc2 disebut energi diam partikel dan dinyatakan dengan Eo . Jadi , sebuah partikel yang bergerak, memiliki energi Eo dan tambahan energi K, sehingga dengan demikian energi relativistik total E partikel adalah :

E = Eo + K = moc2 + K = mc2

Persamaan ini merupakan hasil temuan terkenal Einstein yang menyatakan bahwa energi sebuah benda merupakan ukuran lain dari massanya energi dan massa adalah setara,dan bahwa perolehan atau kehilangan energi sebuah benda dapat dipandang pula sebagai perolehan atau kehilangan massanya.

Contoh Latihan

Lampu pijar 100 W dan catu dayanya (power supply) dalam sebuah wadah tembus cahaya yang digantungkan pada sebuah timbangan yang sangat peka. Hitunglah perubahan massa yang terjadi jika lampu pijar tersebut terus menyala selama satu tahun.

Jawab :

Dik : 100 W = 100 J/s

Dit : ?

Penyelesaian :

Contoh Latihan

Pada suatu jarak yang sama dengan jari – jari orbit bumi ( 1,5 x 1011 m), intensitas radiasi matahari adalah sekitar 1,4 x 103 W/m2. Hitunglah laju (rate) hilangnya massa matahari .

Jawab:

Dik : c2 = 9 x 10 16

4 ( 1,5 x 1011 m)2 ( 1,4 x 103 W/m2) = 4 x 1026 W = 4 x 1026 J/s

Dit: ?

Penyelesaian :

= = 4 x109 kg

Jadi laju kehilangan massa matahari adalah sekitar 4 milyar kilogram per detik. Andaikan laju kehilangan matahari massa ini tetap besarnya, maka matahari kita (dengan massa sekarang sekitar 2 x 1030 kg) hanya akan bersinar untuk massa 1013 tahun lagi.

Contoh Latihan

Carilah kecepatan dan momentum sebuah electron dengan energy kinetic 10,0 MeV !

Penyelesaian :

E = K + = 10,0 MeV + 0,511 MeV= 10,5 MeV

m = E/ = 10,5 MeV/

dengan menggunakan persamaan m = , maka diperoleh

= = 0,9988

cp = = = 10,49 MeV = 10,5 Mev

p = 10,5 MeV/c

perhatikan bahwa, bila v=c, energy relativistic total E hamper sama dengan cp. Ini dikenal sebagai hampiran ***relativitas ekstrem.***

Sebagai rangkuman dari pasal ini, telah kita lihat bahwa konsep-konsep dasar fisika berikut tetap berikut :

1. Hukum kekekalan energi.
2. Hukum kekekalan momentum linier .
3. Hukum Newton kedua, F = dp/dt .

Jika kita memperkenalkan konsep-konsep baru relativitastik berikut :

1. p = /
2. m = /
3. E = mc² = + K = ½

Semua hubungan ini merupakan segi utama dinamika relativistic, yang kelak akan sering kali kita gunakan dalam buku ajar ini. Bagi semua persamaan relativistic ini, baik kinematika maupun dinamika, berlaku persyaratan bahwa apabila v kecil sekali dibandingkan terhadap c, maka semua persamaan itu haruslah memberikan kembali hasil-hasil fisika klasik yang telah kita kenal. Khususnya, K = ½² apabila v << c.

1. **KESEREMPAKAN DAN PARADOKS KEMBAR**

Dalam bab ini kita akan tinjau dua dari akibat teori relativitas khusus. Yang pertama mengenai pengertian keserempakan dan pensinkronan jam. Bagi sebagian besar masalah mensinkronkan arloji atau jam bukanlah suatu proses yang sulit, contoh kita dapat menyetel jam kita dengan langsung melihat pada jam yang berada didekat kita. Namun, metode ini mengabaikan waktu yang dibutuhkan cahaya dari jarum jam untuk merambat ke mata kita. Jika kita berada pada 1 meter dari sebuah jam, maka arloji kita akan terlambat sekitar 3ns atau (3x10-9 s).

Penyerempakan : - waktu patut yaitu selang waktu antara dua kejadian yang terjadi pada titik yang sama dalam suatu kerangka acuan

O’ sebagai pengamat yang bergerak

L

A B  
 O sebagai pengamat yang diam

Dua kejadian yang berbeda menurut pengamat O dan pengamat O’ maka dari itu harus diserempakan

L

Pengamat A melihat jam B dan menyetel jamnya agar sama dengan jam B. Namun tidak bisa serempak. Untuk menyerempakan kedua jam tersebut pengamat di A harus mempercepat selama atau dibutuhkan pengamat C dititik tengah antara jam A dan jam B

A C B

Sekarang ketika pengamat C sudah melihat dan menyerempakan jam A dan B . jadi Keserempakan yaitu dua kejadian dalam kerangka waktu disebut serentak apabila sinyal cahaya mencapai seorang pengamat yang berada di pertengahan dengan waktu yang sama.

Sekarang kita tinjau dalam situasi yang sama dari sudut pengamat bergerak O’. Dalam kerangka acuan O terjadi dua peristiwa penerimaan sebuah sinyal cahaya oleh jam A

t’1 =

t’2 =

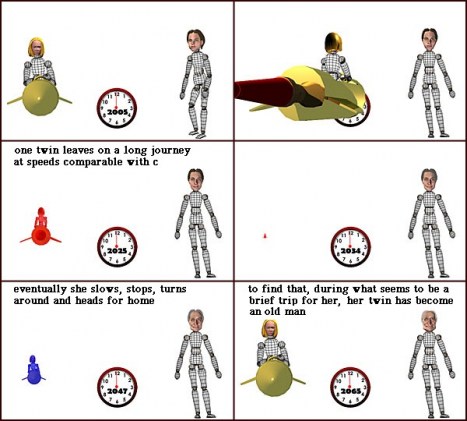
jadi t’2 lebih kecil daripadat’1 sehingga jam B tampak menerima sinyal lebih dulu daripada jam A. Kedua jam tersebut berdetak pada dua saat yang berbedadengan selang waktu sebesar menurut O’.

t’ = t’1 - t’2 =

Perbedaan waktu ini bukanlah efek pemuluran waktu, karena pemuluran waktu dicirikan oleh suku pertama dari transformasi lorentz bagi t’

Sedangkan keterlambatan pensinkronan dicirikan oleh suku keduanya. O’ memang mengamati kedua jam tersebut berjalan lambat sebagai akibat efek pemuluran waktu. O’ juga mengamati bahwa jam B berjalan sedikit lebih cepat daripada jam A. Selang waktu t’ yang diukur O’ antara saat kedua jam tersebut mulai berdetak, dengan menggunakan persamaan t = uL/c2 bagi pembacaan jam B ketika O melihat jam A pada pembacaan 0 (nol). Kita peroleh kesimpulan dua peristiwa yang terjadi serempak dalam satu kerangka acuan tidaklah serempak dalam kerangka acuan yang lain yang bergerak relatif terhadap yang pertama, kecuali jika kedua peristiwa itu terjadi pada tempat yang sama.

Paradox kembar



Hal diatas kelihatannya mustahil, terlebih untuk masa sekarang ini. Tapi itulah implikasi dari sebuah teori fisika relativitas khusus. Teori ini menegaskan bahwa tidak ada satu percobaan yang dapat kita gunakan untuk mengukur kecepatan terhadap ruang mutlak ( tidak adanya kerangka referensi universal) dan bahwa laju cahaya adalah sama bagi semua pengamat sekalipun mereka dalam keadaan gerak relative.

t’1-t’2

Beda waktu ini bukanlah efek pemuluran waktu karena pemuluruan waktu dicirikan oleh suku pertama persamaan transformasi Lorentz bagi t’ , sedangkan keterlambatan pensinkronan dicirikan oleh suku keduanya. O’ memang mengamati kedua jam tersebut berjalan lambat, sebagai akibat efek pemuluran waktu , O’ juga mengamati bahwa jam 2 berjalan sedikit lebih cepat dari pada jam 1. Selang waktu yang diukur O’ antara saat kedua jam tersebut mulai berdetak, memberikan, dengan menggunakan bagi pembacaan jam 2 ketika O melihat jam 1 pada pembacaan 0 (nol).

Oleh karena itu kita peroleh kesimpulan berikut : dua peristiwa yang terjadi serempak dalam satu kerangka acuan tidaklah serempak dalam kerangka acuan lain yang bergerak relative terhadap yang pertama, kecuali jika kedua peristiwa itu terjadi pada tempat yang sama.

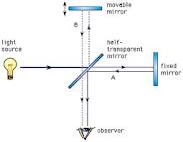
Beralih ke permasalahan yang lazim dikenal sebagai paradoks kembar. Tinjau dua saudara kembar yang bermukim di Bumi. Andaikan salah satunya bernama Casper tetap berdiam di bumi , sedangkan saudara kembar perempuannya Amelia melakukan perjalanan antariksa dengan sebuah pesawat roket menuju suatu planet jauh. Casper , yang memahami teori relaivistas khusus, mengetahui bahwa jam saudara kembarnya akan lebih muda dari padanya ketika ia tiba di bumi kembali. Ini tidak lain adalah apa yang tersirat dari bahasan kita tentang efek pemuluran waktu. Namun, dengan mengingat kembali bahasan tadi, kita ketauhi bahwa bagi dua pengamat yang bergerak relative, masing – masing akan berpendapat bahwa jam saudara kembarnya yang berjalan lambat. Jadi, masalah ini dapat pula kita pelajari dari dua sudut yang berbeda dari sudut pandang Amelia “ bahwa Casper dan Bumilah yang melakukan perjalanan pulang pergi menjauhinya dan kemudian kembali lagi”. Dalam keadaan seperti itu, Amelia akan berpendapat bahwa jam saudara kembarnya yang berjalan lambat, sehingga bagi Amelia saudara kembarnya Casper yang lebih muda dari padanya ketika mereka bertemu kembali. Memang mungkin saja timbul ketidaksepahaman tentang jam siapakah yang berjalan lambat, namun ini hanyalah masalah pemilian kerangka acuan belaka. Inilah paradoksnya ,masing – masing saudara kembar itu memperkirakan bahwa yang lainnya yang lebih muda.

Pemecahan bagi paradox ini terletak pada peninjauan yang tidak simetris terhadap peran kedua saudara kembar itu. Hukum – hukum relativitas khusus hanya berlaku bagi kerangka lembam yang bergerak relative terhadap kerangka lainnya dengan kecepatan tetap. Kita dapat memasok roket Amelia dengan dorongan yang cukup kuat sehingga Amelia dan roketnya mengalami percepatan untuk suatu selang waktu yang singkat, sehingga pesawatnya mencapai suatu laju tetap yang meluncurkannya menuju planet tujuannya, hamper seluruh waktunya ia habiskan dalam suatu kerangka acuan yang bergerak pada kecepatan tetap terhadap Casper. Tetapi, untuk kembli ke Bumi, ia harus memperlambat dan membaalikan pesawtnya. Meskipun gerak ini juga dilakukan dalam selang waktu yang sangat singkat, perjalanan kembali Amelia berlangsung dalam suatu kerangka acuan yang berbeda dari kerangka saudaa kembar ini tidak simetris. Amelia yang harus “meloncat” ke suatu kerangka acuan baru agar dapat kembali, dan *karena itu semua pengamat akan sependapat* bahwa Amelialah yang “sebenarnya” bergerak, sehingga dengan demikian jam miliknya yang “sebenarnya” berjalan lambat. Oleh karena itu Amelialah yang lebih muda ketika ia tiba kembali di Bumi.

Kita akan membuat bahasan ini lebih kuantitatif dengan beberapa contoh numeric (angka). Seperti baahasan di atas, kita menganggap bahwa percepatan dan perlambatan berlangsung dalam selang waktu yang sangat singkat, sehingga seluruh usia Amelia terhitung selama perjalanannya saja.kita anggap planet jauh tersebut diam terhadap Bumi. Andaikan planet itu berjarak 12 tahun cahaya dari Bumi, dan bahwa Amelia bergerak dengan laju 0,6c. maka menurut Casper, saudarinya membutuhkan waktu 20 tahun (20 tahun X 0,6c = 12 tahun cahaya) untuk mencapai planet itu dan 20 taahun lagi untuk kembali di Bumi, dan oleh karena itu saudarinya berpergian untuk total waktu 40 tahun. Tetapi, Casper tidak akan dapat mengetahui apakah saudari kembarnya telah tiba di planet itu sampai sinyal cahaya yang membawa berita tentang ketibaanya di sana mencapai Bumi. Karena cahaya membutuhkan waktu 12 tahun untuk menempuh jarak Bumi\_Planet, maka barulah 32 tahun kemudian setelah keberangkatan Amelia, Casper “melihat” saudarinya tiba di planet itu. Delapan tahun kemudian ia kembali di Bumi. Dari kerangka acuan Amelia pada roket, jaraknya ke planet menyusut dengan faktor sebesar = 0.8 dan karena itu jarak ini adalah 0,8 X 12 = 9,6 thun cahaya. Pada laju 0,6c ini, Amelia akan mengukur lama waktu 16 tahun bagi perjalanannya menuju planet tujuannya, sehingga dengan demikian ia membutuhkan total waktu 32 tahun bagi perjalanan pergi pulang nya. Jadi, Casper berusia 40 tahun, sedangkan Amelia hanya berusai 32 tahun, dan memang benar , bahwa Amelialah yang lebih muda setelah ia kembali di Bumi. Kita dapat mempertegas analisis ni dengan meminta Casper setiap tahun mengirimkan satu sinyal cahaya, pada saat ia berulang tahun, kepada saudari kembarnya. Kita ketahui bahwa frekuensi sinyal yang diterima Amelia akan mengalami pergeseran Doppler. Selama perjalanan pergi, Amelia akan menerma sinyal tersebut pada laju frekuensi (1/thn) X = (1/thn) , sedangkan untuk perjalanan balik, laju sinyal yang diterimanya adalah (1/thn) X atau 2/tahun. Jadi, untuk 16 tahun pertam, selama perjalanan Amelia menuju planet , ia akan menerima 8 sinyal, sedangkan selama 16 tahun perjalanan pulangnya ia akan menerima 32 sinyal, jadi total 40 buah sinyal. Empat puluh sinyal yang diterimanya ini menunjukan bahwa saudari kembarnya telah merayakan 40 kali pesta ulang tahun selama 32 tahun kepergiannya.

1. **UJI PERCOBAAN TEORI RELATIFISTIK KHUSUS**
   * 1. **Ketidak beradaan eter**

Disub bab sebelumnya kita telah membahas mengenai percobaan Michelson-Morley dan kaitaanya dengan teori relativistik. Huygens, seorang fisikawan yang mempelajari peristiwa cahaya, ia mengemukakan bahwa cahaya merambat seperti halnya gelombang dan karena gelombang membutuhkan medium untuk merambat itu artinya cahaya juga membutuhkan medium untuk merambat yang diibaratkan/diduga Huygens sebagai “eter” kata eter ini digunakan oleh para ilmuan untuk mempermudah penyebutan medium yang digunakan cahaya untuk merambat,gelombang cahaya menjalar seperti ibarat aliran sungai dari hulu kehilir, tetapi pada masa-masa berikutnya michelson-Morley melakukan percobaan yang berhubungan dengan keberadaan eter.

Ternyata selama kurang lebih 100 tahun sejak percobaan pertamanya dilakukan, percobaan dasarnya telah diulangi berkali-kali dengan beragam variasi dan perbaikan kepekaan yang terus ditingkatkan. Namun dalam semua percobaan itu, tidak ada satu pun bukti nyata yang diamati tentang perubahan laju cahaya terhadap arah meskipun kepekaan percobaannya telah ditingkatkan menjadi sepuluh kali lebih teliti daripada kepakaan percobaan semula dengan alat yang kita kenal dengan nama “Interferometer”

Dari percobaan yang dilakukan tidak ditemukan adannya perbedaan waktu untuk laju cahaya dari hulu kehilir dan dari hilir kehulu yang seharusnnya berbeda ini membuktikan bahwa “”eter itu tidak ada”.

Kemudian percobaan yang dilakukan Michelson-Morley dukung oleh postulat kedua einstein yang mengatkan bahwa “laju cahaya memiliki nilai c yang sama dalam semua sistem lembam”.

1. **Pemularan waktu (*time dilation*)**

Pada sub bab sebelumnya kita juga telah mempelajari tentang akibat postulat einstein yang salah satunya mengenai pemularan waktu. Einstein mengemukakan bahwa perbedaan posisi dan keadaan pengamat yang bergerak akan mempengaruhi penilaiannya terhadap waktu. Adapun rumus pemularan/pemekaran waktu seperti dibawah ini:

Seorang pengamat O’yang bergerak dengan laju *u* terhadap pengamat O akan mengukur waktu yang lebih lama dari pada pengamat O yang diam. Semua jam akan berjalan lambat menurut seorang pengamat yang bergerak relatif, termasuk jam biologis, pertumbuhan usia karena efek pemuluran waktu.

Contoh:

Berapa cepatkah muon (partikel elementer) harus bergerak agar mereka masih tetap “hidup” ketika tiba dipermukaan bumi ?

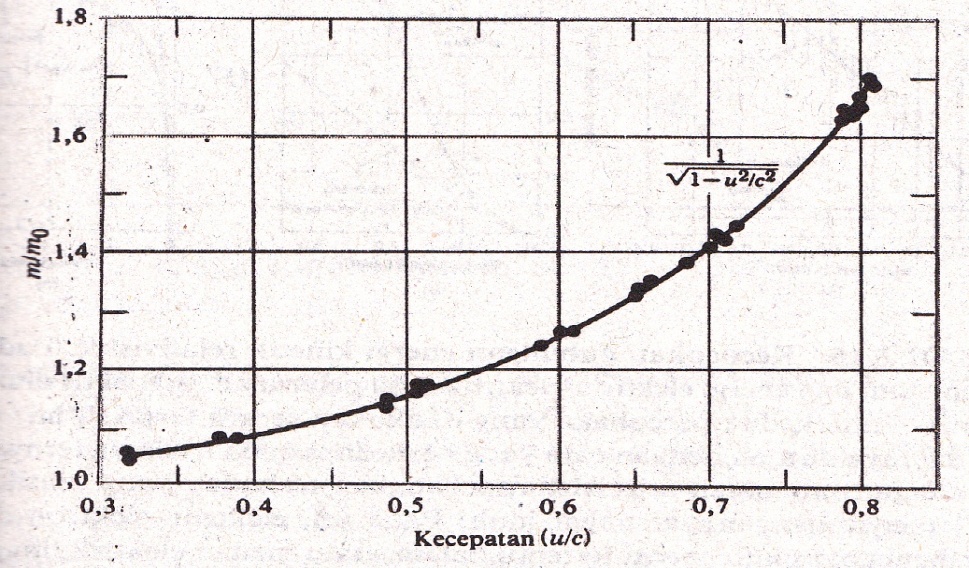
Pemecahan:

Anggaplah muon itu bergerak dengan laju menghampiri c. untuk menempuh jarak 100 km, mereka membutuhkan waktu sekitar ∆t′ = 100 km/(). Dengan nilai ∆t didapat dari pengukuran dilaboratorium.

Jawab:

1. **Massa dan energi relativistis**

Setiap kali seorang fisikawan eksperimen nuklir atau partikel memasuki laboratorium, hampIr selalu ia melakukan percobaan uji langsung atau tidak langsung terhadap hubungan massa-energi teori relativitas khusus. Berikut akan kita bahas secara singkat beberapa percobaan dengan electron yang ditujukan secara khusus untuk menguji kebenaran hubungan energi-massa teori relativitas khusus, beserta contoh lainnya dari fisika nuklir atau partikel.

 Bukti langsung kebenaran ramalan teori relativitas khusus yang pertama diperoleh hanya dalam selang beberapa tahun setelah Einstein menerbitkan makalahnya pada tahun 1905. Pertambahan massa karena bertambahnya kecepatan, yang diramalkan , diuji dengan menggunakan momentum dan kecepatan elektron berenergi tinggi yang dipancarkan dalam beberapa proses peluruhan radioaktif tertentu. Gambar dibawah ini memperlihatkan beberapa hasil pengamatan percobaan yang sangat cocok dengan pertambahan massa yang diperkirakan.

Sebagai contoh tambahan, kita tinjau atom deuterium atau “hydrogen berat”, yang terdiri atas sebuah atom hydrogen biasa dengan satu tambahan neutron pada intinya. Julah massa atom hydrogen dan neutron pada keadaan diam adalah :

kg) + ( 1,67486 x

= 3,34852 x kg

Bila massa deutrum diukur secara langsung, maka hasilnya adalah :

kg

Ini adalah kasus untuk mana massa seluruh inti atom lebih kecil daripada jumlah massa partikel-partikel penyusunnya, dengan beda massa sebesar ∆m = 0,00397 x . Ini setara dengan ∆E = (∆m)c² =2,23 MeV, yang dikenal sebagai energy ikat deuterium. Artinya untuk memisahkan sebuah atom deuterium menjadi sebuah atom hydrogen dan sebuah neutron, kita perlu memasok energy sebesar 2,23 MeV, yang proses pemisahan inti ini terubahkan menjadi massa.

1. **Ketidakubahan laju cahaya**

Jika laju cahaya memang bergantung pada gerak sumber atau pengamat, maka hal ini dapat kita nyatakan sebagai c' = c + ku.

Dimana : c' = laju cahaya diukur dalam kerangka acuan yang bergerak

c = laju cahaya diukur dengan kerangka acuan yang diam

k = bilangan yang dibentuk oleh eksperimen; menurut relativitas khusus k=0, menurut relativitas Galileo k=1

salah satu percobaan dari jenis ini adalah yang tujuannya untuk mempelajari pemancaran sinar X oleh sebuah pulsar suatu system bintang ganda, yaitu suatu sumber sinar X berdenyut cepat yang mengorbit mengelilingi bintang rekannya, sehingga menggerhanakan sang pulsar dalam gerak orbitnya. Jika laju cahaya dalam hal ini adalah sinar X berubah ketika pulsar dalam gerak orbitnya bergerak menuju dan kemudian menjauhi bumi, maka awal dan akhir gerhana akan terjadi pada saat dengan selang waktu berbeda, dihitung terhadap saat gerhana maksimum. Ternyata efek ini tidak teramati dan malahan dari sejumlah pengamat terhadap beberapa system seperti ini,disimpulkan bahwa k < 2 x sesuai dengan ramalan teori relativitas khusus. Semua pengamatan tersebut dilakukan dengan laju cahaya u/c = .

1. **Paradoks Kembar**

Meskipun kita tidak dapat melakukan percobaan untuk menguji paradoks kembar seperti yang telah kita uraikan, kita masih dapat melakukan percobaan yang setara. Kita ambil dua jam identik yang kemudian kita sinkronkan secara berhati-hati dalam laboratorium. Salah satu jam kita tempatkan dalam sebuah pesawat terbang dan kemudian diterbangkan ke mengelilingi Bumi. Ketika jam itu kita kembalikan ke laboratorium dan kita bandingkan dengan jam yang satu lagi, kita memperkirakan bahwa, jika teori relativitas khusus benar, jam yang diterbangkan itu adalah yang “lebih muda” yaitu, bahwa detakmya lambat dan tampak ketinggalan waktu dari jam kembarnya yang diam di laboratorium. Dalam percobaan ini kita gunakan dua jam berketelitian tinggi yang didasarkan pada getaran atom dan atom cesium agar mampu mengukur beda waktu antara pembacaan kedua jam tersebut hingga ketelitian detik. Percobaan ini diperumit lagi oleh beberapa faktor, yang hanya dapat dihitung ketelitian sedang yaitu Bumi yang berputar bukanlah suatu kerangka lembam karena mengalami percepatan sentripetal, jam pada permukaan Bumi dengan demikian juga telah bergerak sebagai akibat perputaran Bumi. Teori relativitas umum juga meramalkan bahwa perubahan dalam kecepatan medan gravitasi, yang dialami jam yang diterbangkan ketika ketinggian pesawat terbang berubah, akan mengubah laju detak jamnya. Dalam percobaan ini, seperti halnya pada percobaan-percobaan lain yang telah kita bahas, hasilnya juga sesuai dengan ramalan teori relativitas khusus.

**SIFAT PARTIKEL RADIASI ELEKTROMAGNETIK**

Dalam bab ini kita akan membahas tiga percobaan awal yang menuntun ke teori kuantum dan membuktikan kebenarannya. Ketiganya membuktikan bahwa cahaya, yang selama ini kita perlakukan sebagai suatu gejala Gelombang, memiliki pula sifat yang biasanya kita kaitkan dengan partikel. Energinya tidak disebar merata pada muka Gelombang, melainkan dilepaskan dalam bentuk buntelan-buntelan seperti partikel.

Sebelum kita membahas bukti percobaan yang mendukung kehadiran foton dan sifat partikrl dari cahaya, kita akan meninjau ulang terlebih dahulu beberapa sifat Gelombang electromagnet.

1. **TINJAUAN ULANG GELOMBANG ELEKTROMAGNET**

Suatu medan elektromagnet dicirikan oleh medan elektrik E dan magnet B. Sebagai contoh, medan elektrik radial yang ditimbulkan sebuah titik q di titik asal adalah :

(3.1)

r adalah vector satuan dalam arah radial. Medan Magnet pada jarak r dari sebuah kawat lurus panjang berarus sejajar sumbu-z adalah :

(3.2)

θ adalah vektor satuan dalam arah dalam system koordinat silinder. Jika muatan elektrik dipercepat, atau jika arus elektrik berubah terhadap waktu, maka dihasilkan gelombang electromagnet. Dalam Gelombang electromagnet ini, E dan B tidak hanya berubah terhadap r tetapi juga terhadap waktu (t). bentuk pernyataan matematik yang melukiskan gelombang ini bermacam – macam, bergantung pada sifat sumber gelombang dan juga sifat zat perantara dalam mana gelombang bidang. Suatu gelombangnya electromagnet bidang yang merambat dalam arah z dilukiskan oleh dua pernyataan berikut :

(3.3)

Bilangan gelombang didapat dari panjang gelombang λ , menurut hubungan , dan frekuensi sudut didapat dari frekuensi . Karena λ dan v juga berkaitan dengan . Polarisasi gelombang dinyatakan oleh vector : bidang polarisasinya ditentukan oleh dan arah rambatnya, dalam hal ini sumbu z. Arah tertentukan oleh syarat bahwa B harus tegak lurus pada E dan pula pada arah rambat,hasil kaLi vector E x B menunjukdalam arah rambat gelombang. Contoh, jika menunjuk dalam arah x ( ǐ, dimana ǐ sebuah vector satuan dalam arah x ), maka haruslah menunjuk dalam arah y (. Maka besar :

(3.4)

Sebuah Gelombang electromagnet menstransmisikan energy dari satu tempat ke tempat lain : fluks energinya ditentukan oleh vector Poynting S :

(3.5)

Untuk Gelombang bidang, vector ini tersederhnakan menjadi :

(3.6)

Marilah kita bayangkan percobaan berikut. Kita tempatkan sebuah detector radiasi elekrtomagnet ( sebuah penerima radio atau mata manusia ) di sebuah titik pada sumbu z, dan kita tentukan daya Gelombang electromagnet yang dilepaskan ke detector . Detector diarahkan sedemikian rupa sehingga permukaan pekanya seluas A tegak lurus sumbu z, agar sinyal yang diterima maksimum. Selanjutnya kita mengabaikan notasi vector dari S dan hanya bekerja data yang diterima adalah :

(3.7)

Dan dengan menggunakan Persamaan :

(3.8)

maka diperoleh:

(3.9)

karena nilai rata – rata dari sin2θ adalah ½.

Sifat yang membuat Gelombang sebagai gejala fisika yang unik adalah prinsip superposisi. Sifat Gelombang yang penting dan istimewa ini mengahasilkan gejala interferensi dan difraksi. Contoh interferensi yang paling sederhana dan telah lazim dikenal adalah percobaan dua-celah Young, suatu Gelombang bidang monokromatik dijatuhkan pada suatu penghang yang mempunyai dua irisan celah.

Gelombang bidang dilenturkan (difraksikan) oleh tiap – tiap celah, sehingga cahaya yang melewati tiap – tiap celah meliput bidang layar yang lebih luas dari pada bayangan geometris celah. Hal ini menyebabkan cahaya dari kedua celah bertumpang – tindih pada layar, sehingga terjadi interferensi. Sebagai contoh , jika kita bergerak menjauhi pusat layar, maka pada suatu jarak terentu, puncak Gelombang cahaya yang dating pada salah satu celah tiba secara bersamaan dengan puncak Gelombang sebelumnya yang dating pada celah lainnya. Apabila hal ini terjadi, intensitas cahaya pada jarak itu maksimum, dan sebagai akibatnya, terjadi bayangan terang di layar pada jarak tersebut.

Ada dua hal penting dari pernyataan ini yang perlu anda catat :

1. Intensitas berbanding lurus dengan Eo2 . ini adalah sifat umum Gelombang : intensitas berbanding lurus dengan kuadrat amplitudo. Akan kita pelajari kemudian bahwa sifat yang sama ini juga mencirikan Gelombang yang memberikan perilaku partikel.
2. Intensitas berfluktuasi terhadap waktu, dengan frekuensi 2v = 2 (/2). Tentu saja fluktuasi ini biasanya kita amati, sebagai contoh: cahaya tampak memiliki frekuensi sekitar 1015 getaran per detik, dank arena mata kita tidak mampu member reaksi secepat itu, maka kita mengamati rata-rata waktu dari sikus yang jumlahnya banyak sekali (mungkin 1013). Jika T adalah waktu pengamatan ,maka daya rata-rata peristiwa interferensi maksimum (konstruktif), yang terjadi pada titik di layar yang selisih jaraknya ke kedua celah sama dengan panjang Gelombang cahaya. Artinya , jika X1 dan X2 adalah jarak titik tersebut ke masing – masing celah, maka syarat bagi terjadinya interferensi maksimum adalah . interferensi maksimum juga akan terjadi apabila sebarang puncak Gelombang dari salah satu celah tiba secara bersamaan dengan celah lainnya, tidak bergantung pada apakah ia merupakan puncak Gelombang urutan kedua, atau keempat, atau keempat puluh tujuh. Syarat umum bagi inerferensi maksimum adalah bahwa selisih X1 dan X2 merupakan kelipatan bulat panjang Gelombang cahaya :

Kemungkinan lain yang juga terjadi adalah bahwa pada suatu jarak tertentu pada layar, puncak Gelombang dari salah satu celah tiba secara bersamaan dengan lembah atau dasar Gelombang ( trough ) dari celah lain . Apabila ha ini teraadi, maka kedua Gelombang tersebut akan saling menghapuskan, dan sebagai akibatnya terjadi daerah gelap pada layar. Ini dikenal sebagai interferensi minimum (destruktif). Interferensi minimum terjadi apabila jarak X1 dan X2 adaah sedemikian rupa sehingga fase Gelombang yang satu berbeda setengah siklus (-p), atau satu setengah siklus, dua setengah siklus dan seterusnya :

Kita dapat mencari tempat – tempat interferensi maksimum pada layar dengan cara berikut . Misalkan d adalah jarak celah satu terhadap yang linnya, dan D jarak kedua celah ke layar. Jika yn adalah jarak pusat layar ke maksimum ke-n, maka dari geometri gambar 3.3 kita daati ( dengan menganggap, X1>X2)

2

2

Dengan mengrangkan, diperoleh :

Dan

Dalam percobaan-percobaan dengan gelombang cahaya, D berorde 1 m dan serta d paling tinggi 1 mm; jadi + = 2D dan dalam hampiran ini

= ( ) (3.10)

Dengan menggunakan Persamaan (3.11) bagi nilai ( ) pada maksimum interferensi, kita peroleh

(3.11)

Piranti lain untuk mengamati interferensi gelombang cahaya adalah kisi difraksi yaitu piranti penghalang bercelah cahaya banyak untuk menghasilkan interferensi gelombang cahaya. Pada gambar 3.4 dilukiskan cara kerja piranti ini; maksimum-maksimum interferensi berkaitan dengan panjang gelombang berbeda yang muncul pada sudut θ yang berbeda menurut hubungan

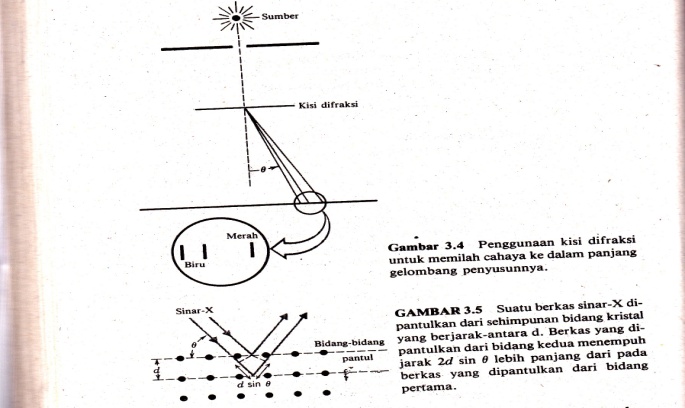
d sin θ = nλ (3.12)

keterangan

d = jarak antar celah

n = bilangan urutan maksimum-maksimum interferensi (n=1,2,3,,,)

Keuntungan kisi difraksi terletak pada keunggulan resolusinya yang memungkinkan kita memperoleh pemisahan sempurna atas panjang-panjang gelombang yang berdekatan. Jadi, piranti ini sangat bermanfaat untuk mengukur panjang gelombang. Tetapi perlu diperhatikan bahwa untuk memperoleh nilai berat dari sudut θ, misalnya sin θ dalam rentang 0.3 hingga 0.5 d haruslah dalam orde beberapa kali panjang gelombang. Untuk cahaya tampak, hal ini tidak sulit diwujudkan, tetapi untuk radiasi dengan panjang gelombang yang sangat pendek, tidaklah mungkin membuat kisi dengan nilai d sekecil itu. Sebagi contoh, bagi sinar X dengan orde panjang gelombang 0.1 nm kita perlu membuat kisi yang jarak antarcelahnya lebih kecil daripada 1 nm. Pemecahan bagi masalah ini telah diketahui sejak percobaan rintisan Laue dan Bragg yang menggunakan atom-atom itu sendiri sebagai suatu kisi difraksi.



Suatu berkas sinar X “melihat” jarak teratur atom-atom dalam sebuah Kristal sebagai semacam kisi difraksi tiga dimensi. Tinjau susunan atom yang diperlihatkan pada gambar 3.5 yang mewakili sebagian kecil irisan dua dimensi Kristal.

2d sin θ = nλ n=1,2,3,…. (3.13)

Hasil ini dikenal sebagai hukum Bragg bagi difraksi sinar X, perhatikan bahwa faktor 2 muncul dalam persamaan (3.19) sedangkan dalam pernyataan serupa dari persamaan (3.18) bagi kisi difraksi biasa, faktor ini tidak muncul.

Contoh 3.1

Sebuah Kristal tunggal garam dapur (NaCl) diradiasi dengan seberkas sinar-X dengan panjang gelombang 0,250 nm dan pantulan Bragg yang pertama teramati pada sudut 26,3⁰. Berapakah jarak antaratom bagi NaCl ?

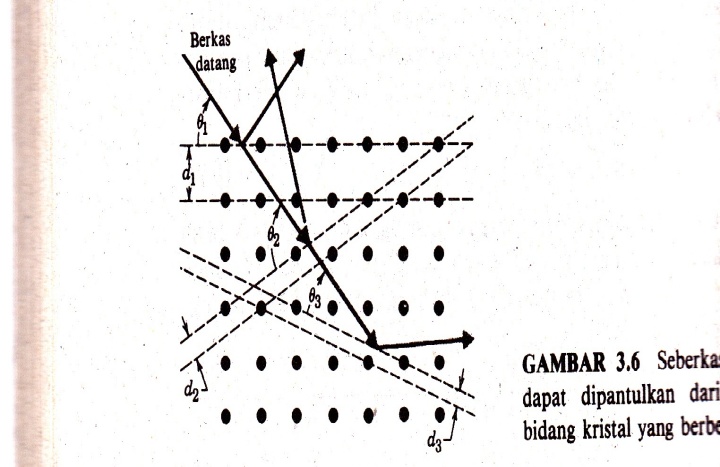
Pemecahan:

Dengan memecahkan hukum Bragg bagi jarak d, kita peroleh

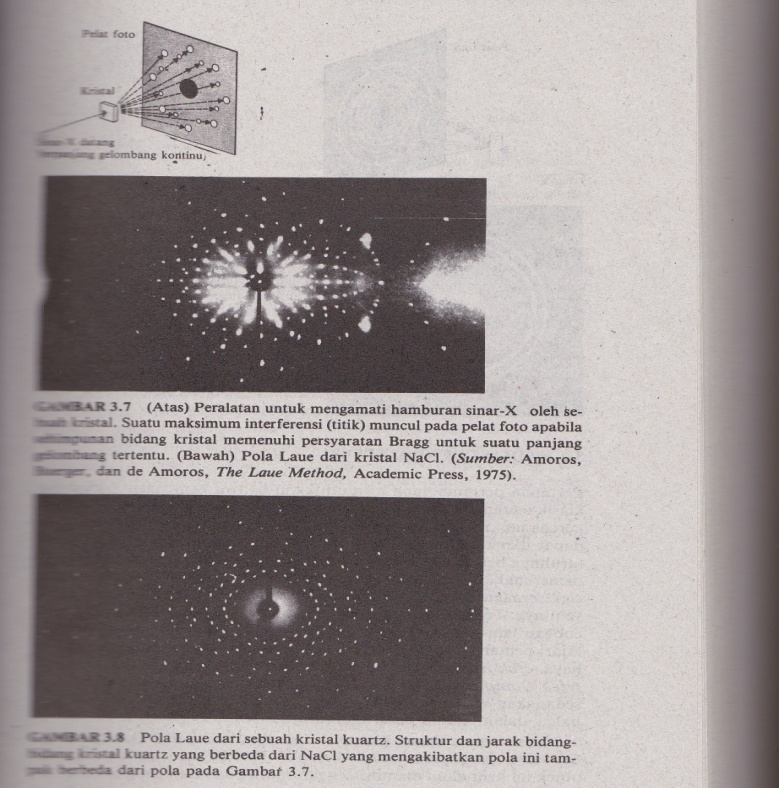
d =

= 0.282 nm

Pilihan kita bagi bidang pantul dalam gambar 3.5 diatas adalah seberang karena tak ada patokan bagi kita untuk menentukan pilihan himmpunan atom yang mana guna menggambarkan bidang-bidang pantul yang melaluinya. Gambar 3.6 memperlihatkan suatu irisan Kristal yang lebih besar. Seperti yang anda lihat, ada banyak bidang pantul yang mungkin untuk dipilih, masing-masing dengan nilai θ dan d yang berbeda. ( tentu saja, karena dan berkaitan, maka masing-masing tidak dapat diubah secara bebas). Jika berkas sinar X yang kita gunakan berpanjang gelombang tunggal, maka agak sulit bagi kita utnuk mendapatkan sudut dan himpunan bidang pantul yang tepat guna mengamati interferensi. Tetapi jika kita menggunakan berkas sinar X dengan rentang dengan panjang gelombang yang kontinu, maka untuk tiap-tiap dan interferensinya akan terjadi suatu pola maksimum interferensi pada sudut-sdut pantul yang berbeda seperti yang diperlihatkan pada gambar 3.6 pola maksimum interferensinya tidaklah bergantung pada panjang gelombang berkas cahaya sinar X yang datang (yang distribusinya kontinu) melainkan pada jarak dan susunan atom dalam Kristal.



Gambar 3.7 dan 3.8 memperlihatkan cuplikan pola-pola difraksi(yang disebut pola Laue) yang diperoleh dari hamburan sinar X dari dua Kristal yang berbeda. Titik titik terang berkaitan dengan maksimum-maksimum interferensi bagi semua panjang gelombang dari rentang panjang gelombang sinar X yang datang yang kebetulan memenuhi persamaan (3.19). tentu saja, pola tiga dimensi lebih rumit daripada gambaran dua dimensi yang disajikan, tetapi titik-titik dari masing-masing panjang gelombang mempunyai tafsiran yang sama.



1. **RADIASI BENDA HITAM**

Pertanda pertama yang menunjukkan bahwa gambaran gelombang klasik tentang radiasi elektromagnet (yang berhasil baik menerangkan percobaan young dan hertz pada abad kesembilan belas dan yang dapat mengnalisis secara tepat dengan persamaan Maxwell) tidak seluruhnya benar, disimpulkan dari kegagalan teori gelombang untuk menerangkan spektrum *radiasi termal* yang diamati jenis radiasi elektromagnet yang dipancarkan berbagai benda semata-mata karena suhunya. Disini kita akan membahas radiasi termal, sebagai contoh zat perantara dispersif (penyebar cahaya) seperti prisma dapat digunakan untuk pengamatan ini karena panjang gelombang yang berbeda yang menembusnya akan teramati pada sudut yang berbeda pula. Dengan menggerakkan detektor radiasi pada suatu panjang gelombang tertentu , karena detektor bukanlah suatu titik geometris ( akan sangat tidak efektif) tetapi mengapit suatu selang sudut d yang sempit, maka yang sebenarnya kita ukur adalah jumlah radiasi dalam selang d pada , atau yang setara dengan ini dalam selang d pada . Besaran ini kita sebut intensitas radian (radian intensity) R, sehingga hasil percobaannya adalah deretan nilai R d sebanyak nilai berbeda yang kita pilih untuk diukur. Dengan mengulangi percobaan ini berkali-kali maka kita simpulkan dua sifat penting radiasi termal berikut:

1. Intensitas rasiant total terhadap seluruh panjang gelombang berbanding lurus suhu T berpangkat empat; karena intensitas rasiant. Maka kita dapat menulis

Dimana persamaan diatas disebut dengan *hukum stefan* dan dikenal sebagai tetapan *stefan-boltzman*. Nilai

1. Panjang gelombang dimana masing-masing kurva mempunyai nilai maksimalnya yang kita sebut (walaupun ia buakanlah suatu panjang gelombang maksimum ), menurun jika suhu pancar dinaikkan ternyata sebanding dengan kenaikan suhu sehingga dari percobaan didapati bahwa nilai tetapan bandingannya adalah:

Hasil ini dikenal dengan *hukum pergeseran Wien.*

Contoh:

1. Pada panjang gelombang berapakah sebuah benda pada suhu ruang (T= 20̊ C) memancarkan radiasi termal?

Dik : T = 20̊ C = 20+273 = 293 K

Dit :.......?

Jwb :

Pada tahap ini kita akan mencoba untuk mengnalisis dan memahami hasil-hasil ini (ketergantungan R pada, stefan dan hukum wien ) berdasarkan teori termodinamika dan elektromagnet. Tetapi kita hanya akan uraian garis besarnya. Kita dapat melihat berbagai benda karena cahaya yang mereka pantulkan. Pada suhu ruang, radiasi termal ini paling banyak terdapat pada spektrum *inframerah* () pada daerah mata kita tidak lagi peka. Jika benda tersebut kita panasi mereka akan mulai memancarkan cahaya tampak. Sebagai contoh sepotong logam yang dipanaskan mula-mula tampak memijar dengan memancarkan warna merah tua dan suhunya terus dinaikkan warnannya berangsur menjadi semakin kuning.

Sayangnya, radiasi yang dipancarkan benda biasa tidak hanya bergantung pada suhu tetapi pada sifat-sifat lainnya seperti rupa benda, sifat permukaannya, bahan pembuatnya. Untuk menghilangkan beberapa hambatan ini kita tidak akan meninjau benda biasa, melainkan benda yang permukaannya sama sekali hitam. Maka cahaya yang jatuh padanya tidak ada yang ia pantulkan sehingga sifat-sifat permukaannya dengan demikian tidak bisa diamati. Namun demikian perluasan ini masih belum cukup menyederhanakan persoalan untuk memungkinkan menghitung spektrum radiasi yang dipancarkan. Karena itu, kita memperluasnya lebih lanjut kesuatu jenis benda hitam istimewa sebuah rongga. Misalnya bagian dalam sebuah kotak logam, dengan sebuah lubang kecil pada salah satu dindingnya. Lubang itu bukan kotaknya yang berperan sebagai benda hitam. Radiasi dari luar yang menembusi lubang ini akan lenyap pada bagian dalam kotak dan kecil kemungkinan untuk keluar kembali dari lubang tersebut. Jadi tidak ada pantulan yang terjadi pada benda hitam (lubang tersebut). Maka pemahaman hakikat radian didalam kotak akan memungkinkan kita untuk memahami radiasi yang keluar melewati lubanag kotak itu.

Perhitungan kelasik bagi energi rasiant yang dipancarkan untuk tiap-tiap panjang gelombang ssekarang terjadi menjadi beberapa tahap perhitungan. Tanpa memperlihatkan pembuktiannya, berikut dikemukakan bagian-bagian penting dari penurunannya. Pertama yang menyangkut perhitungan radiasi (jumlah gelombang) untuk masing-masing panjang gelombang bagi energi total dalam kotak dan terakhir intensitas radian yang berkaitan dengan energi itu.

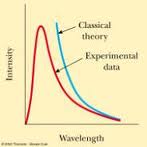
1. *Kotak berisi gelombang-gelombang berdiri elektromagnet.*jika semua dinding kotak adalah logam, maka radiasi dipantulkan bolak-balok dengan simpul (node) medan elektrik terdapat pada tiap-tiap dinding (medan listrik haruslah nol didalam sebuah konduktor).
2. *Jumlah gelombang berdiri dengan panjang gelombang antara dan adalah:*
3. *Tiap-tiap gelombang memberi saham energi kT bagi radiasi didalam kotak.* Hasil ini diperoleh dari termodinamika klasik, radiasi dalam kotak berada dalam keadaan kesetimbangan termal dengan dinding pada suhu T.
4. *Untuk memperoleh intensitas radiant dari kerapatan energi (energi persatuan volume)* kaliakn dengan c/4. Hasil ini juga diperoleh daari teori elektromagnet dan termodinamika klasik.

Dengan menggabungkan unsur unsur diatas maka intensitas radian yang kita perkirakan adalah:

Intensitas rasiant = (jumlah gelombang per satuan volume) x (energi per gelombang) x (energi radiant per rapat energi)

Hasil ini dikenal sebagai *rumus rayleigh-jeans.*

Pada gambar dibawah diperlihaatkan perbandingan hasil perhitungan intensitas radiant dengan menggunkan hukum Rayleigh-jeans terhadap data hasil percobaan



Yang kita bahas didepan intensitas yang dihitung dari gambar kurva tampak menghampiri data percobaan untuk daerah panjang gelombang yang panjang tetapi pada daerah panjang gelombang yang pendek, teori klasik ternyata sama sekali gagal.kegagalan hukum Rayleigh-Jeans telah diuji secara seksama dalam berbagai percobaan dan didapati sangat cocok dengan hasil pengamatan percobaan. Untuk kasus radiasi benda hitam ini, tampak bahwa teori-teori klasik tidak berhasil menjelaskannya sehingga diperlukan suatu teori fisika yang baru.

Fisika baru yang memberi tafsiran benar terhadap radiasi termal inni dikemukakan oleh fisikawan jerman Max Planck. Bencana ultraviolet disebabkan karena intensitas radiant yang diramalkan hukum Rayleigh-Jeans menjadi sangat besar pada daerah panjang gelombang pendek (atau pada frekuensi yang tinggi) yang diperllukan adalah suatu cara untuk membuat R bila atau . Menurut nalar planck, radiasi yang terpantul dari dinding rongga logam berasal dari radiasi yang diserap dan kemudian dipancarkan kembali dengan segera oleh atom-atom dinding rongga, selama selang waktu ini arom-atom bergerak pada pada frekuensi yang sama dengan frekuensi radiasi. Karena energi suatu sistem yang bergetar bergantung pada frekuensinya, maka planck mencoba menemukan suatu cara untuk memperkecil jumlah gelombang berdiri berfrekuensi tingg pada dinding rongga. Ia melakukan ini dengan mengemukakan suatu anggapan berani yang kemudian menjadi landasan dari teori fisika baru, *fisika kuantum*.

Planck mengemukakan bahwa sebuah atom yang bergetar hanya dapat menyerap atau memancarkan energi kembali dalam bentuk buntelan-buntelan energi yang disebut kuanta. Jika energi kuanta berbanding lurus dengan frekuensi radiasi, jika frekuensinya meningkat energinya juga akan menjadi besar. Tetapi karena tidak ada satupun gelombang yang dapat memiliki energi melebihi kT, maka tidak ada gelombang berdiri yang energi kuantumnya lebih besar dari pada kT. Ini secara efektif membatasi intensitas radiant frekuensi tinggi (panjang gelombang pendek) dan dengan demikian memecahkan persoalan bencana ultraviolet.

Dalam teori planck setiap isolator dapat memancarkan atau menyerap energi hanya dalam jumlah yang merupakan kelipatan bulat dari suatu energi dasar .

n = 1,2,3,...

n menyatakan jumlah kuanta, lalu energi setiap kuanta ini ditentukan oleh frekuensi menurut

h adalah suatu tetapan banding yang sekarang dikenal sebagai tetapan planck. Berdasarkan anggapan ini spektru intensitas radiant yang dihitung planck adalah

Lalu penurunan hukum stefan dari rumus planck memberikan hubungan tetapan stefan-boltzman dan tetapan planck berikut

Karena kita mengetahui dari percobaan, maka kita dapat menentukan nilai tetapan planck dari hubungan ini dan hasilnya adalah:

1. **EFEK FOTOELEKTRIK**

Efek fotolistrik adalah pengeluaran [elektron](http://id.wikipedia.org/wiki/Elektron) dari suatu permukaan ( logam) ketika dikenai, dan menyerap, [radiasi elektromagnetik](http://id.wikipedia.org/wiki/Gelombang_elektromagnetik) (seperti [cahaya](http://id.wikipedia.org/wiki/Cahaya) tampak dan radiasi ultraviolet) yang berada di atas frekuensi ambang tergantung pada jenis permukaan.

Pada tahun 1905 Einstein mempostulatkan bahwa elektron/partikel dapat menerima energi gelombang elektromagnetik (berupa cahaya atau foton) hanya dalam bentuk diskrit (kuanta) sebesar :

dimana : h = 6,626 x 10-34 Joule/detik (konstanta Planck)

f = frekuensi cahaya foton.

Einstein melakukan eksperimen dengan menembakkan cahaya pada permukaan logam Natrium (Sodium) dan mengamati partikel-partikel atau elektron-elektron pada permukaan logam terhambur dengan kecepatan tertentu, Elektron-elektron terhambur ini memiliki energi kinetik EK=

Dimana: m = masa elektron

v = kecepatan elektron yang terhambur.

Peristiwa pergerakan elektron dengan kecepatan tertentu ini merupakan sifat dari partikel, sehingga dikatakan bahwa gelombang cahaya dapat berperilaku seperti partikel. Namun hanya cahaya dengan frekuensi/energi tertentu yang mampu menghamburkan elektron-elektron pada permukaan logam Natrium, yaitu energi foton harus sama dengan energi yang diperlukan untuk memindahkan elektron (fungsi kerja logam) ditambah dengan energi kinetik dari elektron yang terhambur :

Dimana φ adalah energi minimum yang diperlukan untuk memindahkan elektron yang terikat di permukaan logam. Atas jasanya dalam menemukan efek fotolistrik, Albert Einstein diberi Hadiah Nobel untuk Fisika pada tahun 1921. Percobaan dari efek fotoelektrik harus dilakukan dalam ruang hampa, agar elektron tidak kehilangan energinya karena bertumbukkan dengan molekul-molekul udara. Dari fakta-fakta didapatkan

1. Laju pemancaran elektron bergantung pada intensitas cahaya
2. Laju pemancaran elektron tak bergantung pada panjang gelombang cahaya dibawah suatu panjang gelombang tertentu. Diatas nilai itu arus berangsur-angsur menurun hingga menjadi nol pada suatu . Panjang gelombang terdapat pada spektrum daerah biru dan ultraviolet.
3. Nilai tidak bergantung pada intensitas sumber cahaya. Tetapi hanya bergantung pada jenis logam yang digunakan sebagai permukaan fotosensitif
4. Energi kinetik maksimum elektron yang dipancarkan tidak bergantung pada intensitas cahaya, tetapi hanya bergantung pada panjang gelombangnya.
5. Apabila sumber cahaya dinyalakan, arus akan segera mengalir dalam selang waktu 10-9 s

Contoh soal

1. a. Berapakah energi dan momentum sebuah foton cahaya merah yang berpanjang gelombang 650 nm?

b. Berapakah panjang gelombang sebuah foton yang berenergi 2,40 eV?

Dik :

Dit : a.) E ..?

Diubah kedalam elektron-volt

hc dalam satuan eV.nm

=

Momentum didapat dengan cara

= 1,91 eV/c

Dit : b.) ...?

1. **EFEK COMPTON**

Cara lain radiasi berinteraksi dengan atom adalah melalui efek Compton, dimana radiasi dihamburkan oleh electron hampir bebas yang terikat lemah pada atomnya. Sebagian energy radiasi diberikan kepada electron, sehingga terlepas dari atom, energy yang sisa diradiasikan kembali sebagai radiasi elektromagnet. Menurut gambaran gelombang,energy radiasi yang dipancarkan itu lebih kecil dari pada energy radiasi yang datang (selisihnya berubah menjadi energy kinetic electron), namun panjang gelombang keduanya tetap sama. Kelak kita akan melihat bahwa konsep foton meramalkan hal yang berbeda bagi radiasi yang dihamburkan.

Proses hamburan ini dianalisis sebagai satu interaksi (“tumbukan” dalam pengertian partikel secara klasik) andan sebuah antara sebuah foton dan sebuah electron. Gambar 8.7 memperlihatkan peristiwa tumbukan ini. Pada keadaan awal, foton memiliki energy *E* yang diberikan oleh

Dan pada momentumnya adalah

Electron pada keadaan diam, memiliki energy diam mec2. Setelah hamburan foton memiliki energy (E’) dan momentum (p’) dan bergerak pada arah yang membuat sudut terhadap arah foton datang. Elektron memiliki energy total Ee dan momentum pe dan bergerak pada arah yang membuat sudut ϕ terhadap foton datang. Dalam interaksi ini berlaku persyaratan kekekalan energy dan momentum, yakni :

*E awal = E akhir*

*E + mec2 = E’ + Ee (3.37a)*

*(px)awal = (px)akhir*

*p = p cos ϕ + p’cos (3.37b)*

*(px)awal = (px)akhir*

*0 = pe sin ϕ – p’ sin (3.37c)*

Kita mempunyai tiga persamaan dengan empat besaran yang tidak dapat di pecahkan untuk memperoleh jawaban tunggal. Tetapi kita dapat menghilangkan (eliminasi) dua dari keempat besaran ini dengan memecahkan persamaannya secara serempak. Jika kita memilih untuk mengukur energy dan arah foton hambur, maka kita mengilangkan Ee dan *ϕ .* sudut *ϕ* dihilangkan dengan menggabungkan persamaan – persamaan momentum :

*Pe cos ϕ = p - p’cos*

*pe sin ϕ = p’sin* θ

Kuadratkan dan kemudian dijumlahkan :

pe2 = p2 – 2pp’ cos θ + p’2 (3.38)

Dengan menggunakan hubungan relavistik antara energy dan momentum menurut Bab 2

Ee2 = c2pe2 + me2c4

Maka dengan menyisipkan Ee dan pe kita peroleh :

(E + mec2 – E’)2 = c2 (p2 – 2pp’ cos θ + p’2) +me2c4 (3.39)

Dan lewat sedikit aljabar, kita peroleh :

(3.40)

Persamaan ini dapat dituliskan sebagai berikut :

(3.41)

λ adalah panjang Gelombang foton datang dan λ’ panjang Gelombang foton hambur. Besaran h / mec dikenal sebagai panjang Gelombang Compton dari electron yang memiliki nilai 0,002426 nm.

Persamaan (3.40) dan (3.41) memberikan perubahan dalam energy atau panjang Gelombang foton, sebagai fungsi dari sudut hamburan θ. Karena besar di ruas kanan tidak pernah negative, maka E’ selalu lebih kecill dari pada E- foton hambur memiliki energy yang lebih kecil dari pada foton datang.

Contoh 3.5

Sinar X dengan panjang Gelombang 0,2400 nm dihamburkan secara Compton dan berkas hamburannya diamati pada sudut 60 relatif terhadap arah berkas datang. Carilah : a) panjang Gelombang sinar X hambur, b) energy foton sinar X hambur, c)energy kinetic electron hambur,.

Pemecahan :



=0,2400 nm + (0,00243 nm)(1 – cos 60)

=0,2412 nm

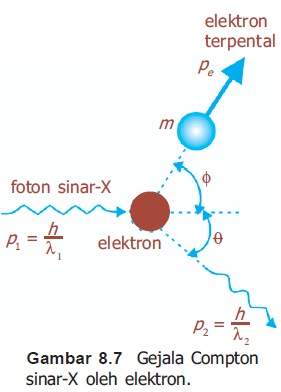
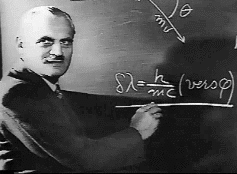
1. Energy E’ dapat diperoleh dari :
2. Dari persamaan (3.37a) bagi kekekalan energy, kita peroleh :

*Ee = (E – E’) + mec2 = Ke +mec2*

*Ke = E – E’*

Energy E dari foton awal adalah hc /λ = 5167 eV, jadi

K = 5167 eV – 5141 ev = 26 eV

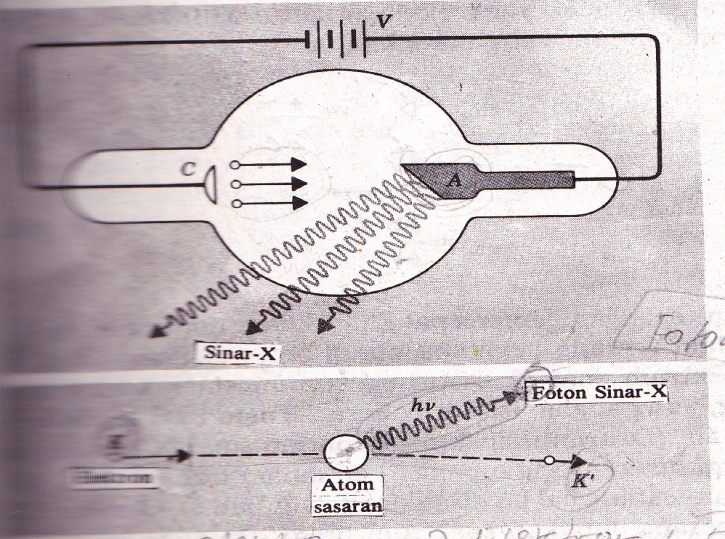
 

1. **PROSES FOTON LAINNYA**

Selain hamburan Compton dan efek fotoelektrik yang memberikan bukti eksperimen paling awal yang mendukung teori foton sebagai kuantum radiasi electromagnet, terdapat pula sejumlah percobaan lain yang hanya dapat ditafsirkan secara benar jika dianggap berlaku kuantisasi (perilaku partikel) radiasi electromagnet. Dalam pasal ini, kita akan membahas beberapa dari proses tersebut, yang kejadiannya tidak dapat dipahami jika kita hanya berpegang pada hakikat gelombang dari radiasi elektromagnetik.

1. Bremsstrahlung dan Produksi Sinar-X

Apabila sebuah muatan electron dipercepat atau diperlambat, maka ia memancarkan energi elektromagnetik, dalam kerangka pemahaman kita sekarang, kita mengatakan bahwa ia memancarkan foton. Bila digambarkan sebagai berikut :



Seberkas electron, yang telah mencapai energy eV setelah dipercepat melalui suatu potensial V ketika menumbuk suatu sasaran, elektronnya diperlambat sehingga pada akhirnya berhenti karena bertumbukan dengan atom-atom materi sasaran. Karena pada tumbukan seperti itu terjadi transfer momentum dari electron ke atom, maka kecepatan electron menjadi berkurang dan electron dengan demikian memancarkan foton. Pengereman itu dalam bahasa Jerman adalah bremsstahlung. Jika energy kinetic sebelum tumbukan adalah K dan setelah tumbukan adalah K’ maka energy foton adalah

hv = K – K’

dikarenakan K’ lebih kecil jadi diabaikan sehingga rumusnya menjadi

hv = K

= eV

Secara perlambangan, proses bramsstrahlung ini dapat ditulis sebagai berikut :

Electron elektron + foton

1. Produksi Pasangan

Proses lain yang dapat terjadi apabila foton menumbuk atom adalah produksi pasangan dimana seluruh energy foton hilang dan dalam proses ini 2 partikel terciptakan yaitu sebuah electron dan sebuah positron. Positron adalah sebuah partikel yang massanya sama dengan massa electron, tetapi memiliki muatan positif antarpartikel. Proses ini merupakan contoh penciptaan energy massa. Elektronnya tidak ada sebelum foton menumbuk atom. Energy foton yang hilang dalam proses ini berubah menjadi energy relativistic positron dan elektron :

hv = +

= ( + ) + ( + )

Karena dan selalu positif, maka foton haruslah memiliki energy sekurang-kurangnya 2 = 1,02 MeV agar proses ini dapat terjadi foton yang berenergi setinggi ini berada dalam daerah sinar gamma inti atom. Secara perlambang,

Foton elektron + positron

Proses diatas, seperti halnya bremsstrahlung, hanya dapat terjadi jika terdapat sebuah atom disekitar elektron yang memasok momentum pental yang diperlukan. Proses kebalikannya :

Elektron + positron foton

Juga terjadi.proses ini dikenal sebagai pemusnahan positron dan dapat terjadi bagi elektron dan positron bebas dengan persyaratan harus tercipta sekurang-kurangnya dua buah foton dalam proses ini. Kekekalan energy mensyaratkan bahwa, jika

Adalah energy masing-masing foton, maka

( + ) + ( + ) =

Karena dan sangat kecil sehingga positron dan elektron dapat diangap diam, maka kekekalan momentum mensyaratkan bahwa kedua foton memiliki energy sama, dan bergerak segaris dengan arah berlawanan.

1. **APAKAH FOTON ITU ?**

Sebelum kita menjelaskan tentang apakah foton itu,terdapat sebuah ilustrasi untuk sedikit menjelaskan tentang foton. Jika kita ditannya apakah pohon itu? Bukan hal yang sulit untuk kita jelaskan, tapi jawabannya akan berbeda-beda tergantung sudut pandang pengamatnya. Misalkan sebagian besar dari kita akan mungkin melukiskan sebatang pohon dengan atribut fisiknya secara jelas berapa ukuran,massa,warna dan sebagainya. Tapi seorang ahli biologi mungkin akan melukiskannya dengan asal mula pohon, bagaimana ia tumbuh dan berkembang. Berbeda lagi dengan ahli kimia, mungkin akan menuliskan susunan kimiannya dan lain sebagainya dari sudut pandang pengmat yang lain.

Situasi ini mirip dengan foton, jawaban atas pertanyaan apakah foton itu? Perlu pula untuk kita pendapat dari berbagai sudut pandang. Kita dapat menjawabnya dengan memberikan suatu daftar dari sifat-sifatnya yang jelas yaitu:

1. ia bergerak dengan laju cahaya
2. ia mempunyai hubungan dengan dan 

Kita juga dapat melukiskannya dari sudut pandang kedudukannya dalam fisika yang mendasar bahwa foton mentranmisikan gaya electromagnet. Dalam sudut pandang ini dua muatan listrik berinteraksi dengan “mempertukarkan” foton (foton dipancarkan oleh salah satu muatan dan diterima oleh muatan yang lainnya). Foton ini adalah foton khayal yang hanya ada dalam rangka matematik rumusan fisika teori.namun mereka mempunyai semua sifat foton nyata.

Pertannyaan yang paling sulit untuk dijawab adalah mengenai apakah foton itu sebuah partikel atau gelombang.apakah hakikat partikelnya dengan sederet sifatnya lebih nyata daripada hakikat gelombang elektromagnetnya dengan sederet sifatnya yang sangat berbeda?

|  |  |
| --- | --- |
| Apakah foton itu? | |
| Partikel | gelombang |
| * dalam sejumlah percobaan lain, memperlihatkan bahwa radisi lektromagnet berinterksi seperti partikel | * Menyangkut efek interferensi dan difraksi memperlihatkan bahwa radiasi electromagnet berinteraksi seperti gelombang |
| * Partikel melepaskan energinya dalam sejumlah paket yang terpusat, | * Sedangkan energi sebuah gelombang tersebar merata dalam seluruh muka gelombangnya. |

Jika gambaran partikel dan gelombang kita anggap valid, tetapi merupakan kemungkinan pilihan yang tidak setara, maka kita harus menganggap bahwa cahaya yang dipancarkan sumber cahaya hanya merambat sebagai gelombang atau partikel.

Tapi pertanyaannya bagaimana sebuah sumber cahaya mengetahui prilaku cahaya yang mana (pertikel atau gelombang)? Andaikan kita menempatkan sebuah peralatan dua celah pada salah satu pihak sumber dan sel fotoelektrik pada pihak yang lai, maka cahaya yang dipancarkan menuju dua celah berprilaku sebagai sebuah gelombang, sedangkan yang menuju sel foto berprilaku sebagai partikel. Bagaimanakah sumber tahu kearah mana ia memancarkan partikel?

Mungkin alam mempunyai semacam “kode rahasia”. Dengan kode ini macam percobaan yang sedang kita lakukan disinyalkan kembali ke sumber sehingga sumber mengetahui mana yang ia pancarkan partikel ataukah gelombang.

Dengan demikian kita terperangkap dalam sebuah kesimpulan yang sama sekali tidak mengenakan: cahaya bukanlah partikel saja atau gelombang saja, entah bagaimana carannya ia adalah partikel dan juga gelombang dan hanya memperlihatkan salah satu aspeknya, bergantung pada macam percobaan yang kita lakukan. Percobaan tipe partikel memperlihatkan hakikat pertikelnya, sedangkan percobaan tipe gelombang memperlihatkan hakikat gelombangnnya. Kegagalan kita mengklasifikasikan cahaya sebagai partikel saja atau gelombang saja tidak berarti bahwa kita gagal memahami hakikat cahaya, karena kegagalan ini semata-mata disebabkan oleh keterbatasan kosakata kita (berdasarkan pada pengalaman kita dengan partikel dan gelombang biasa) untuk melukisakan sebuah gejala sederhana partikel dan gelombang yang kita kenal.

**SIFAT GELOMBANG DARI PARTIKEL**

1. **HIPOTESIS DEBROGLIE**

Ciri perkembangan fisika biasanya ditandai dengan periode panjang pekerjaan eksperimen dan teori tidak memuaskan yang kadang – kadang diselingi oleh cetusan berbagai gagasan mendalam yang menyebabkan perubahan mencolok dalam cara kita memandang alam semesta. Teori relativitas Einstein merupakan salah satu contohnya dan hipotesis si warga Perancis Louis deBroglie adalah contoh lainnya.

Dalam bab sebelumnya kita membahas percobaan interferensi dua – celah (yang hanya dapat dipahami jika cahaya berperilaku sebagai gelombang) dan efek fotoelektrik serta efek compton (yang hanya dapat dipahami jika cahaya berperilaku sebagai partikel). Dalam disertasi doktornya, deBroglie meneliti persamaan , dan persamaan , kita jumpai beberapa kesulitan untuk menerapkan persamaan pertama pada kasus partikel, karena tidak ada kepastian apakah E energi kinetik, energi total, atau energi relativistik total (tentu saja, semuanya tidak ada bedanya bagi cahaya). Untuk persamaan kedua, kesulitan ini tidak kita jumpai. DeBroglie mengusulkan, tanpa dukungan bukti percobaan bagi hipotesisnya, bahwa bagi semua partikel yang bergerak dengan momentum p, terkait suatu gelombang dengan panjang gelombang , yang berhubungan dengan p menurut persamaan

Panjang gelombang sebuah partikel yang dihitung menurut persamaan ini disebut panjang gelombang deBroglie.

Ada dua pertanyaan yang muncul. Pertama, gelombang macam apakah yang memiliki panjang gelombang deBroglie ini? Yakni, apakah yang terukur oleh amplitudo gelombang deBroglie ini? Kita menganggap bahwa, bersamaan dengan partikel yang bergerak, terkait gelombang deBrpglie yang panjang gelombangnya , yang menampakkan dirinya apabila dilakukan percobaan khas gelombang (seperti difraksi) padanya. Hasil percobaan khas gelombang tersebut akan bergantung pada panjang gelombang deBroglie yang bersangkutan.

Pertanyaan kedua yang kemudian muncul adalah : mengapa panjang gelombang ini tidak teramati secara langsung sebelum masa deBroglie. Cara klasik untuk mengamati perilaku gelombang adalah dengan percobaan dua – celah. Jadi, kita tempatkan suatu dinding batas tegak, kemudian melubanginya pada dua tepat sedemikian rupa sehingga memungkinkan sejumlah kelereng kita gelindingkan melalui kedua lubang tersebut, dan diusahakan agar mereka meninggalkan tanda ketika menumbuk sebuah layar di belakang dinding. Dengan percobaan ini kita memperkirakan bahwa bila layarnya kemudian kita periksa, hakikat gelombang dari kelereng akan tersingkap lewat suatu pola interferensi. Namun, bila percobaan ini kita lakukan, sayang tidak ada pola garis interferensi yang teramati. Kegagalan percobaan ini bersumber pada kecilnya nilai tetapan planck. Panjang gelombang deBroglie sebuah kelereng (massa 1 g, laju 1 cm/dt) adalah sekitar 10-28 m, yakni sekitar 1018 kali lebih kecil dari pada sebuah atom tunggal. Jarak antara garis – garis pola interferensinya juga dalam ordo tersebut. Jarak antara garis – garis pola interferensi ini bergantung pada jarak kedua celah kelayar. Jika kita menjauhkan layar, maka jarak tersebut akan bertambah. Tetapi meskipun kita menjauhkan layarnya sejauh satu tahun cahaya, jarak antara garis pola interferensinya masih lebih kecil daripada ukuran sebuah atom. Tidak ada percobaan yang kita lakukan yang dapat memperlihatkan hakikat gelombang dari benda makro (terukur dalam ukuran lazim laboratorium). Hanya jika kita melakukan percobaan dengan partikel ukuran atom atau inti atom, barulah panjang gelombang deBroglie teramati.

Karena interferensi dan difraksi merupakan dua penunjuk khas perilaku Gelombang, maka hakikat Gelombang dari electron hanya dapat disingkap dengan melakukan kedua percobaan ini. Interferensi dua celah telah dibahas dalam bab 3 sedangkan difraksi dibahas secara sederhana dalam berbagai buku fisika dasar.

Atom – atom, yang ukurannya dalam orde 10-10 m, merupakan objek difraksi yang sangat baik bagi gelombang yang panjang gelombangnya juga dalam orde 10-10 m. Sayangnya, kita tidak dapat mempalajari difraksi oleh satu atom saja. Tetapi dalam Bab 3 kita telah membahas dan menyajikan ambar pola interferensi indah yang dihasilkan bila sinar X dijatuhkan pada sebuah Kristal susunan dan jarak yang teratur dari atom – atom Kristal memnyebabkan munculnya maksimum – maksimum interferensi yang mudah dikenali.

Dengan demikian, untuk meneliti hakikat Gelombang dari electron, kita harus mengikuti aturan kerja berikut. Mula – mula kita percepat electron melalui potensial V, hingga mencapai enegi kinetic tidak relastivistik K = eV dan momentum . mekanika Gelombang melukiskan electron – electron ini sebagai suatu Gelombang dengan panjang Gelombang . Gelombang ini menumbuk Kristal dengan cara yang sama seperti berkas sinar X, dan berkas yang terhambur kemudian dipotret.

Perbandingan langsung antara “lingkaran – lingkaran” yang dihasilkan dalam hamburan oleh bahan polikristalin. Hasil perbandingan antara hamburan electron dan hamburan sinar X ini luar biasa mengesankan, yang sekali lagi memberikan bukti kuat bagi kesamaan perlaku Gelombang dari electron dan sinar X.

Perilaku Gelombang dari partikel tidak terbatas pada electron semata – mata, partikel apapun dengan momentum p memiliki pula panjang Gelombang deBroglie . Neutron dihasilkan dalam reactor nuklir dengan energy kinetic yang berhbungan dengan panjang Gelombang sekitar 0,1 nm, ini juga cocok bagi difraksi oleh kristal.

Untuk mempelajari inti atom, diperlukan panjang Gelombang yang lebih pendek, dalam orde 10-15 m . Gambar 4.5 memperlihatkan pola difraksi yang dihasilkan oleh hamburan proton dengan energy kinetic 1 GeV oleh inti oksigen. Maksimum – maksimum dan minimum – minimum pola difraksinya mirip dengan pola difraksi satu celah yang diperlihatkan pada gambar 4.1 (Intensitas pada minimum – minimum tidak menurun ke nol karena inti tidak memiliki batas yang tegas. Penentuan ukuran inti lewat pola difraksi ini akan dibahas dalam Bab 9).

Hasil interferensi dan difraksi pada gambar 4.1 hingga 4.5 tidaklah semata – mata berlaku bagi satu tipe partikel atau satu macam bahan sasaran saja, melainkan adalah contoh gejala umum , yakni perilaku Gelombang bagi semua partikel. Gejala ini tidak teramati sebelum tahun 1920 karena pada masa itu belum ada percobaan memadai yang dilakukan. Hakikat Gelombang dari perilaku digunakan secara lumrah oleh fisikawan atom sebagai alat baku dalam mempelajari sifat atom, oleh fisikawan inti dalam mempelajari sifat inti atom, oleh fisikawan zat padat, kimia – fisikawan, dan ilmuwan material lainnya dalam mempelajari sifat materi , oleh biologiwan dan mikroskop electron, dan oleh astrofisikawan dalam mencoba menjelaskan berbagai objek aneh dalam alam semesta.

Bukti percobaan pertama hakikat Gelombang dari electron (dalam bukti kualitatif dari hubungan deBroglie ) diperoleh segera setelah deBroglie mengemukakan hipotesisnya. Pada tahun 1926, di laboratorium Bell Telephone, Clinton Davisson dan Lester Germer menyelidiki pemantulan berkas electron dari permukaan kriatal nikel. Gambaran skematis peralatan mereka diperlihatkan pada Gambar 4.6 . Dalam percobaan ini, electron dari suatu kawat pijar panas dipercepat melalui suatu beda potensial V. setelah melewati suatu celah kecil, berkas electron ini menumbuk Kristal nikel tunggal. Elektronnya lalu dihamburkan ke segala arah oleh atom Kristal, beberapa menumbuk detector, yang dapat digerakkan ke sembarang sudut relatif terhadap arah berkas datang, yang mengukur intensitas berkas electron yang dihamburkan pada sudut itu.

Jika kita menganggap bahwa setiap atom Kristal dapat bertindak sebagai satu penghambur, maka *gelombang electron* yang terhambu dapar berinterferensi, sehingga kita memperoleh semacam kisi difraksi Kristal bagi Gelombang electron. Sebagai khayal yang memuat sejumlah atom dalam Kristal memiliki pusat – pusat hambur yang tersusun secara teratur sehingga dapat menghasilkan suatu pola interferensi, hamburan dari salah satu himpunan bdang seperti itu diperlihatkan pada gambar 4.7. Sudut hamburan θ, sebagaimana kita mendefinisikannya dalam Bab 3, tidak lain adalah 90° - .

Berkas yang terpantul dengan intensitas maksimum akan teramati pada sudut apabila syarat Bragg bagi interferensi maksimum dipenuhi. Jarak atom a berhubungan dengan jarak d menurut persamaan :

Pada gambar 4.8 dituliskan data yang diperoleh Davisson dan Germer, yang memperlihatkan intensitas berkas hambur pada sudut antara 0 dan 90⁰. Berkas dengan intensitas maksimum pada = 50⁰ terjadi untuk V = 54 volt. Persamaan ( 4.2 ) dan (3.19) dengan demikian member kita nilai panjang gelombang berkas elektron untuk hamburan pada sudut 50⁰, karena dari percobaan diketahui bahwa jarak kisi dari atom-atom nikel adalah = 0,215 nm maka :

⁰ = 0,0909 nm

= 0,165 nm

Berikut kita bandingkan hasil ini dengan yang diperkirakan berdasarkan teori deBroglie, sebuah elektron yang dipercepat melalui suatu beda potensial 54 V memiliki energy kinetic 54 eV dank arena itu momentumnya adalah

Panjang gelombang deBroglie adalah Dengan menggunakan hc = 1240 eV. nm, kita peroleh

Hasil ini luar biasa sesuai dengan yang didapati dari difraksi maksimum di atas, yang memberikan bukti kuat bagi kebenaran teori deBroglie.

Selain percobaan Davison Germer yang memperagakan difraksi berkas elektron, mungkin pula untuk memperagakan hakikat gelombang dari elektron lewat percobaan dua celah Young dengan menggunakan berkas elektron. Percobaan ini dilakukan pada tahun 1961 oleh Clauss Jonsson, yang mempercepat suatu berkas elektron melalui suatu tegangan elektrik 50.000 V dan kemudian melewatkannya melalui dua celah yang berjarak 2,0 x m dan panjang masing-masing celah 0,5 x m. pola interferensi dua celah yang dipotret Jonsson diperlihatkan pada gambar 4.9. Kemirippannya dengan pola interferensi dua-celah yang diperoleh dengan sumber cahay (gambar 3.2) sungguh luar biasa dan sekali lagi memperlihatkan bukti keberlakuan hakikat gelombang dari elektron.

Apabila kita melakukan percobaan dua – celah ini dengan elektron. Kita mungkin tergoda pula untuk ,menetukan celah manakah yang dilewati elektron. Karena sebuah elektron yang bergerak berperilaku seperti suatu elektrik, maka lewatnya suatu elektron melalui bidang lilitan kawat sama halnya dengan mengalirnya suatu arus elektrik yang berubah, dan sebagai akibatnya ia bangkitkan suatu arus elektrik yang berubah, dan sebagi akibatnya ia bangkitkan suatu arus induksi dalam lilitan kawat, yang dapat kita amati pada suatu alat ukur. Dengan peralatan yang demikian, kita dapat (pada prinsipnya, sekurang – kurangnya) mengamati lewatnya sebuah elektron melalui salah satu dari kedua celah tersebut. Jika percobaan ini kita lakukan, kita memang dapat mencatat lewatnya elektron melalui salah satu celah tersebut, tetapi dalam prosesnya akan kita dapati bahwa pola interferensinya malah termusnahkan.

Ternyata dengan cara apa pun kita mencoba untuk menentukan melalui celah manakah sebuah elektron lewat, kita akan mendapati bahwapola interferensinya malah termusnahkan. Jika elektronnya berperilaku sebagai suatu partikel klasik, maka ia haruslah melewati salah satu celah. Sebaliknya, hanya gelombanglah yang dapat melewati kedua celah. Apabila kita mencoba untuk mengamati lewatnya elektron melalui salah satu celah, maka kita sebenarnya sedang menyelidiki aspek partikel dari perilakunya, sehingga dengan demikian kita tidak dapat melihat hakikat gelombnagnya (pola interferensi). Elektron dapat berperilaku sebagai sebuah partikel ataupun gelombang, tetapi kita tidak dapat mengamati keduanya secara serempak. Ini adalah dasar dari asas saling – lengkapi (principle of complementarity), yang mengatakan bahwa gambaran lengkap dari suatu kesatuan fisika seperti sebuah foton atau elektron tidak dapat diungkapkan secara tersendiri dalam perilaku partikel saja atau gelombang saja, tetapi harus ditinjau dari kedua belah aspek. Karena hakikat partikel dan gelombang ini tidak dapat diamati secara serempak, maka perilaku sistem yang kita amati bergantung pada jenis percobaan yang sedang kita lakukan.

1. **HUBUNGAN KETIDAKPASTIAN BAGI GELOMBANG KLASIK**

Dalam hal ini kita menyelidiki perbedaan penting lainnya antara partikel klasik dan gelombang. Mari kita tinjau sebuah gelombang berbentuk , seperti yang diperlihatkan pada gambar.

Ini adalah sebuah gelombang yang terus menerus menggulung bentuknya tanpa akhir, dari hingga , pertannyaannya “dimanakah gelombangnya terletak?”, kita tidak akan bias menjawabnya itu karena gelombangnya terdapat dimana-mana (panjang gelombangnya dipihak lain, tertentukan secara pasti sama dengan )

Jika kita menggunakan sebuah gelombang untuk menyatakan sebuah partikel, maka gelombang itu harus memiliki salah satu sifat penting partikel Berikut:

* Ia harus bersifat setempat (localized),atau dapat dikungung kedalam suatu ruang kecil (misalnya dalam ukuran atom atau inti atom). Gelombang sinus murni tidak dapat digunakan untuk menentukan letak setempat partikel.

Apa yang akan terjadi jika gelombang pertama tadi dipadukan dengan gelombang lain yang panjang gelombannnya agak berbeda (jadi nilai k nya berbada), sehingga . Pola khas yang dihasilkan yang dalam gelombang suara dikenal sebagai “layangan”(beat), perhatikan pada gambar dibawah ini

Polannya yang berulang terus menerus dari hingga , tapi kita sedikit mengetahui dengan “letak” gelombangnya pada nilai –nilai x tertentu dimana zat perantarannya tampak kurang “bergelombang” dari pada tempat lainnya atau sekurang-kurangnya bergerak dengan amplitudo yang lebih kecil. Dari gambar perpaduan gelombang diatas kita akan mengamati getaran pada titik , tetapi tidak pada . Kita sudah sedikit paham mengenai letak, tapi pemaduan dua gelombang dengan panjang gelombang berbeda mengakibatkan kita tidak dapat lagi menentukan secara pasti panjang gelombangnya.

Jika kita lanjutkan dengan menjumlahkan lagi beberapa gelombang dengan panjang gelombang yang berbeda (k berbeda) dengan amplitude dan fase yang dipilih secara tertentu, maka pada akhirnya kita akan mencapai suatu keadaan seperti yang diperlihatkan pada gambar dibawah ini:

Amplitude gelombang seperti itu adalah nol diluar suatu bagian ruang sempit . Untuk mencapai hal ini kita harus memadukan sejumlah besar gelomabang dengan bilangan gelombang k yang berbeda, jadi gelombang paduannya menyatakan suatu rentang bilangan gelombang panjang (panjang gelombang ) yang kita tunukkan dengan . Tampaknya kita mempunyai sutau hubungan perbandingan terbalik antara dan yaitu bila salah satu mengecil, maka yang lain membesar,dan hubungan matematikanya hampir antara dan ini adalah:

Tanda sama gelombang dimasukkan dalam orde besarnya. Karena dan tidak diketahui secara pasti, maka besarnya disini hanya merupakan taksiran sehingga persamaan diatas hanya merupakan petunjuk kasar mengenai hubungan antara keduannya. Lalu persamaan diatas juga menyatakan bahwa hasil kali dari , jarak lebar gelombang, dengan , rentang bilangan gelombang dikandungnya, besarnya dalam orde satuan.

Andaikan kita berupaya untuk mengukur panjang gelombang sebuah gelombang klasik,seperti gelombang air. Ini dapat kita lakukan dengan mengukur jarak antara dua puncak gelombang yang berdekatan. Andaikanlah gelombang itu adalah suatu pulsar yang sangat sempit dengan hanya satu puncak gelombang. Maka pengukuran -nya menjadi sangat sult, dan kita cenderung melakukan kesalahan besar, mungkin dalam orde satu panjang gelombang. Ini berarti apabila perluasan ruang dari gelombang itu adalah , maka (ingat tanda berarti dalam orde ). Maka untuk gelombang ini kita perlu . Andaikanlah gelombang itu kemudian meluas hingga mencapai beberapa panjang gelombang, sehingga sehigga sekarang λ-nya dapat kita tentukan dengan ketelitian yang lebih tinggi.tapi, untuk memecahkan jumlah bilangan gelombangnya dalam , kita masih membuat kesalahan pada orde satu panjang gelombang (mungkin ½ atau 1/3 atau ¼, tetapi masih dalam orde satuan) dibagi N, jika sekarang dan sekali lagi . Hubungan ketidak pastian ini yang mengaitkan ukuran panjang gelombang suatu gelombang dengan ketidakpastian dalam pengukuran panjang gelombang.

Sekarang kita mencoba mengukur frekuensi suatu gelombang (misalnya gelombang suara). Andaikan kita dapat mengamati alat pencacah yang memadai. Jika kita mencacah selama selang waktu 1 detik dan mencacah 100 getaran, maka kita memperoleh frekuensi 100 Hz. Tetapi kita tidak bisa yakin bahwa getaran 100 Hz ini telah kita cacah secara pasti. Oleh karena itu disini kita memperoleh pula hubungan kebalikan seperti yang kita simpulkan sebelum ini. Ketidak pastian dalam frekuensi , berbanding terbalik dengan ketidak pastian dalam selang waktu , masa pengukuran dilakukan dengan menggunakan frekuensi sudut , kita dapat menulis hubungan tersebut sebagai berikut:

Ini adalah hubungan ketidak pastian kedua yang kita peroleh bagi gelombang klasik dan serupa dengan persamaan sebelumnya, ini berarti bahwa ia memberikan suatu hubungan antara taksiran ketidak pastian pengukuran semua besaran yang bersangkutan.

1. **HUBUNGAN KETIDAKPASTIAN HEINSENBERG**

Hubungan ketidakpatian yang dibuat dalam Pasal 4.2 berlaku bagi semua Gelombang, dan karena itu kita seharusnya dapat pula menerapkannya pada Gelombang deBroglie. Dengan menggunakan hubungan mendasar deBroglie bersama dengan pernyataan kita dapati , yang mengaitkan momentum sebuah partikel dengan Gelombang deBroglienya. Mengingat gabungan sering sekali muncul dalam mekanika Gelombang, maka untuknya diberikan lambing khusus ħ (“h coret”)

-34 J.s

-16 eV.s

Dengan menggunakan ħ , maka

(4.1)

Sehingga . Dengan demikian, dari hubungan ketidakpastian 4.3 kita peroleh

x (4.2)

Penulisan tikalas x pada momentum adalah untuk mengingatkan kita bahwa persamaan 4.2 berlaku bagi gerak sepanjang suatu arah tertentu, yang menyatakan ketidakpastian dalam kedudukan dan momentum hanya pada arah tertentu. Hubungan serupa yang tidak bergantungan dapat diterapkan pula pada arah – arah lainnya. Jadi berlaku pula y atau z .

Hubungan deBroglie E = hv dapat dituliskan sebagai E =ħω. Jadi, Δω =ΔE/ħ, sehingga hubungan ketidakpastian 4.4 menjadi:

ΔE = Δt (4.3)

Persamaan 4.2 dan 4.3 dikenal sebagai hubungan ketidakpastian Heisenberg. Asas ini mengatakan bahwa tidak ada satupun percobaan yang dapat dilakukan sedemikian rupa sehingga memberikan ketidakpastian di bawah batas – batas yang diungkapkan dalam persamaan 4.2 dan 4.3.

Hubungan – hubungan ini memberikan suatu taksiran ketidakpastian minimum yang dapat diperoleh dari beraneka percobaan, pengukuran kedudukan dan momentum sebuah partikel akan memberikan sebaran nilai sebaran dan x . Kita mungkin dapat saja melakukan pengukuran yang ketelitiannya menyimpang jauh dari pada yang diberikan,tetapi yang lebih baik dari pada itu tidak dapat kita capai. (Mungkin seringkali anda jumpai bahwa hubungan – hubungan ini ditulis dengan ħ/2 atau h, ketimbang ħ, pada ruas kanan atau juga dengan ketimbang dengan yang memperlihatkan kesamaan. Perbedaan ini tidak terlalu penting, karena 4.2 dan 4.3 hannya memberikan taksiran. Ketidakpastian Δx, distribusi yang lebih rapi memberikan x , sedangkan distribusi lainnya akan memberikan x . Dengan demikian, cukup aman bagi kita untuk menggunakan h sebagai suatu taksiran).

Hubungan – hubungan ini memberi pengaruh yang sangat jauh pada pandangan kita terhadap alam. Dapat diterima bila dikatakan bahwa terdapat ketidakpastian dalam menentukan letak sebuah Gelombang air. Namun permasalahannya menjadi lain bila pernyataan yang sama diterapkan pada Gelombang deBroglie, karena akan tersirat bahwa terdapat pula ketidakpastian dalam menentukan letak partikel. Persamaan 4.2 dan 4.3 mengatakan bahwa alam menetapkan suatu batas ketelitian yang dapat kita gunakan untuk melakukan sejumlah percobaan, tidak perduli sebaik apa pun peralatan ukur kita dirancang, kita tidak dapat melakukan pengukuran yang lebih teliti daripada yang disyaratkan oleh persamaan 4.2 dan 4.3. Untuk menentukan momentum secara teliti, kita harus melakukan pengukuran sepanjang jarak Δx, jika kita bermaksud membatasi sebuah partikel pada suatu bagian ruang (selang) Δx yang kecil, maka kita akan kehilangan kemampuan untuk mengukur momentumnya secara teliti. Untuk mengukur suatu energy dengan ketidakpastian yang kecil, diperlukan selang waktu pengukuran Δt yang lama, jika sebuah partikel yang tercipta hadir (hidup) dalam selang waktu yang singkat, maka ketidakpastiaan energinya akan menjadi besar.

Berikut adalah contoh penerapan dari hubungan ketidakpastiaan ini.

Contoh 4.4

Andaikanlah gerak sebuah partikel bermassa m terbatasi dalam satu dimensi (bayangkan gerak sebuah manic – manic sepanjang sebuah kawat) antara dinding – dinding elastic yang bila ditumbuki partikel menyebabkannya terpantulkan kembali. Mula – mula kita pindahkan kedua dinding pemantul ke dan kita letakkan partikel pada kawat sedemikian rupa ssehingga ia berada dalam keadaan diam.

* 1. Berapakah ketelitian yang mungkin diperoleh dari pengukuran kedudukannya?
  2. Uraikan apa yang terjadi bila kedua dinding tadi saling didekatkan dari

Pemecahan

* 1. Jika partikelnya diam, maka px = 0 sehingga Δpx = 0 . (Kita ketahui momentumnya dengan pasti). Oleh karena itu, menuut persamaan 4.6 Δx = . Jadi, kedudukan partikel sama sekali menjadi tidak pasti! Kita sam sekali tidak tahu apa – apa tentang kedudukan partikelnya. Semua nilai x mempunyai kemungkinan yang sama sebagai hasil pengukuran kedudukan partikel.
  2. Andaikanlah kita debatkan kembali kedua dinding tadi dari sehingga kita sekarang berada pada x = ( terpisah oleh jarak L). dengan demikian, partikelnya tentulah berada di dalam selang sepanjang L ini. Jika tidak ada informasi lain yang kita peroleh tentang kedudukannya, maka ketidakpastian tentang letaknya berada dalam jarak L ini, sehingga . Persamaan 4.6 mensyaratkan bahwa Δpx. Ketidakpastian momentumnya sekarang berada dalam selang momentum ini. Sebelum kita mulai menggerakan kedua dindind tersebut, setiap pengukuran terhadap momentum partikel menghasilkan px = 0 sehingga Δpx = 0 . Sekarang, semua pengukuran berkerumun di sekitar px = 0, tidak semuanya menghasilkan px = 0 secara pasti. Distribusi hasil pengukuran px akan tampak seperti pada gambar 4.15. mula – mula kita yakin terhadap pengukuran momentumnya yatiu nol. Setelah kedua dindingnya didekatkan, rata –rata semua hasil pengukuran px memang nol, tetapi tidak setiap pengukuran memberikan hasil nol, dan bahwa penyebaran Δpx dari distribusi nilai – nilai px menjadi semakin bertambah, bila kedua dinding semakin didekatkan mengikuti hubungan Δp x

Tentu saja, sebuah partikel klasik tidak dapat langsung bergerak dari keadaan diam bila tidak dikenai gaya. Karena itu, bagaimana partikel dapat terjadi memiliki momentum tidak nol ? Dilema kita dsini berangkalan dari perkataan partikel. telah kita lihat bahwa istilah “partikel” dan “Gelombang” tidaklah berdiri sendiri dalam fisika kuantum, yang mengungkapkan bahwa deskripsi yang tepat dari suatu system fisika haruslah melibatkan kedua aspek ini. Perilaku Gelombanglah yang menyebabkan terjadinya penyebarab distribusi momentum bila jarak rang L diperkecil. Untuk menentukan letak sebah partikel, kita harus menentukan amplitude geombang deBroglienya, yang dilakukan dengan menjumlahkan semua macam komponen gelombangnya, semakin kecil L dibuat,maka menurut persamaan 4.3, semakin banyak Gelombang ang harus dijumlahkan. Masing – masing Gelombang yang beraneka panjang Gelombangnya ini, yang pada umumnya merambat melalui zat perantara dengan laju yang berbeda – beda, terpantul bolak – balik anatara kedua dinding pemantul. Ketika kedua dinding berada di, hanya satu Gelombang yang diperlukan, tidak ada disperse atau pantulan yang terjadi, dan perilaku partikel tidak berubah terhadap waktu. Ketika kedua dinding didekatkan, lebih banyak Gelombang yang diperlukan, disperse dan pantulan kini dapat terjadi, dan kadang – kadang hubungan fase dan amplitudo anatara berbagai komponen Gelombang berpadu menghasilkan suatu ketidakseimbangan sesaat antara Gelombang yang bergerak ke kanan dan ke kiri, yang kita amati sebagai suatu nilai px yang tidak nol.

Pengukuran yang banyak akan mungkin memperlihatan bahwa jumlah gerak partikel ke kanan sama banyaknya dengan gerak ke kiri, sehingga momentum rata-rata pav adalah nol, karena momentum yang berlawanan saling menghapuskan. Rata – rata besar momentumnya |p|av tidak nol. Semakin dekat jarak kedua dinding, semakin banyak pantulan yang terjadi, dan semakin besar peluang bagi beberapa komponen momentum berinterferensi secara maksimum sehingga memberikan suatu momentum besar pada suatu arah tertentu. Akibatnya, partikel akan muali “bergerak” semakin cepat meskipun pav masih tetap nol, |p|av menjadi semakin besar. Oleh karena itu,Δp tampaknya berkaitan dengan |p|av, yang berkaitan dengan (p2)av . Definisi yang pasti dari Δp adalah

2

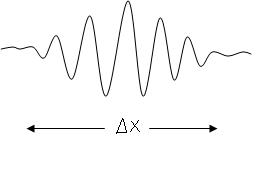
Perhatikan kesamaan definisi ini dengan konsep statistic deviasi standar (standar deviation) dari sebuah besaran x yang memiliki nilai rata – rata x,

2

2

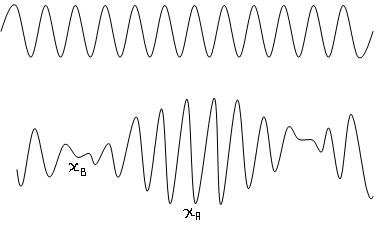
1. **PAKET GELOMBANG**

Kedudukan sebuah gelombang sin atau cos murni sama sekali tidak terbatasi ia meluas dari hingga . Sebaliknya, kedudukan sebuah partikel klasik, terbatasi secara tegas. Tetapi dengan deskripsi kuantum yang mencampuradukkan partikel dan gelombang, kedudukan partikel menjadi tidak lagi terbatasi secara tegas. Sebuah elektron yang terikat pada sebuah atom tertentu misalnya, kedudukannya dapat kita ketahui hingga ketidakpastian dalam orde diameter atom . Tetapi kita sama sekali tidak mengetahui secara pasti dimana ia berada dalam atom. Metode yang dipakai dalam fisika untuk melukiskan situasi seperti itu adalah dengan menggunakan konsep paket gelombang (wave packet). Sebuah paket gelombang dapat dipandang sebagai superposisi sejumlah besar gelombang, yang berinterferensi secara maksimum disekitar partikel, sehingga menghasilkan sebuah gelombang resultan dengan amplitudo yang lebih besar. Sebaliknya, pada tempat yang jauh dari partikel, mereka berinterferensi secara minimum, sehingga gelombang resultannya memiliki amplitudo yang lebih kecil pada tempat dimana partikelnya kita perkirakan tidak ditemukan. Tafsiran yang pasti mengenai amplitudo yang besar dan kecil ini akan dibahas dalam pasal berikut. Kita hanya akan merumuskan uraian matematika dari paket gelombang dan membahas beberapa sifatnya. Sebuah paket gelombang ideal adalah seperti gambar 4.13.



Amplitudonya hampir nol, kecuali pada suatu daerah kecil berukuran . Ini berkaitan dengan sebuah partikel yang kedudukannya terbatasi dalam daerah berukuran . Kita ketahui bahwa dalam situasi seperti itu rentang momentumnya adalah . Seperti yang diberikan oleh persamaan (4.4)

Karena setiap momentum berkaitan dengan satu panjang gelombang deBroglie tertentu, maka rentang momentum setara dengan suatu rentang panjang gelombang sebesar . Dengan demikian kita memperkirakan bahwa deskripsi matematikapaket gelombang akan melibatkan penjumlahan (superposisi) sejumlah gelombang dengan panjang gelombang yang berbeda-beda. Kita akan meninjau sejumlah gelombang sinus berbentuk dimana k adalah bilangan gelombang . kita menganggap bahwa semua gelombang ini memiliki amplitudo yng sama. Umumnya anggapan ini tidak berlaku. Sebuah gelombang dengan bilangan gelombang k1 kemudian menambahkan sebuah gelombang lain yang hampir sama k2=k1+ seperti gambar berikut

**Gambar 4.12** Superposisi dua gelombang sinus dengan panjang gelombang yang hampir sama menghasilkan layangan. Perbedaan panjang gelombang dari kedua gelombang sinus ini adalah 10 persen tetapi kedua amplitudonya sama.

Mengilustrasikan gejala layangan. Komponen-komponen x=0 bergetar dengan fase sama sehingga gelombang resultannya memiliki amplitudo maksimum

(4.5)

Anggap gelombang-gelombang ini sebagai gelombang rambat diperoleh dari persamaan (4.10) dengan mensubsitusikan () pada kx

(4.6)

Superposisi dari hanya dua gelombang saja tampak tidak menyerupai paket gelombang

(4.7)

Jika banyak terdapat bilangan yang berbeda dan jika berdekatan maka jumlah persamaan (4.12)dapat diganti dengan integral

(4.8)

(4.9)

(4.10)

(4.11)

(4.12)

Contoh soal

Gelombang laut tertentu merambat dengan kecepatan fase dimana g adalah percepatan gravitasi. Bagaimanakah bentuk kecepatan grup “paket gelombang” dari gelombang-gelombang ini?nyatakan hasilnya dalam kecepatan fase

Pemecahan

Kecepatan grup diperoleh dari persamaan (4.16). karena k= maka tetapi dengan , kita peroleh jadi dan . oleh karena itu jadi

Jadi sebuah partikel yang terbatasi kedudukannya pada suatu bagian ruang tertentu tidak hanya dinyatakan oleh satu gelombang deBroglie dengan energi dan frekuensi tertentu tetapi oleh sebuah paket gelombang yang merupakan superposisi dari sejumlah besar gelombang.

(4.13)

Kecepatan grup  *bukanlah sifat gelombang komponennya* melainkan sifat *zat perantara* dimana paket gelombang itu bergerak. Kita anggap bahwa tanggapan zat perantara terhadap paket gelombang diberikan oleh dE/dp yang identik dengan tanggapan zat perantara pada bagian partikel

(4.14)

Dalam pernyataan ini untuk energi sebuah partikel hanya energi kinetik K yang bergantung pada momentum, sehingga dE/dp=dK/dp karena K=p2/2m bagi sebuah partikel tidak relativistik., maka dK/dp=p/m yang tidak lain adalah kecepatan partikel. Kita telah memperoleh hasil *kecepatan sebuah materi sama dengan kecepatan grup paket gelombang yang bersangkutan.* Sebuah partikel yang terbatas geraknya dalam suatu bagian ruang dilukiskan oleh sebuah paket gelombang, yang superposisi gelombang-gelombang deBroglie. Paket gelombang bergerak dengan laju yang sama dengan kecepatan grup zat perantarasama dengan laju partikel.

1. **PROBABILITAS DAN KEACAKAN**

Pengukuran sekali terhadap kedudukan atau momentum partikel dapat dilakukan seteliti yang dapat dicapai oleh keterampilan eksperimental kita. Lalu, bagaimanakah perilaku gelombang sebuah partikel dapat kita amati ? bagaimanakah ketidakpastian dalam kedudukan dan momentum mempengaruhi percobaan kita? Prosedur matematika yang demikian memang disediakan teori kuantum, namun disini kita tidak akan membahasnya secara terinci. Walaupun demikian, perlu dicatat bahwa teori mekanika kuantum memungkinkan kita menghitung rata-rata atau hasil pengukuran yang mungkin diperoleh dan didistribusi dari setiap hasil pengukuran sekitar hasil rata-ratanya. Sepintas lalu ini tampaknya tidak menguntungkan, namun sebenarnya tidaklah demikian, karena dalam alam fisika kuantum, kita jarang melakukan pengukuran terhadap misalnya sebuah atom. .

Konsep-konsep statistic ini sebenernya banyak kita terapkan dalam pengalaman kita sehari-hari. Sebagai contoh, apakah yang dimaksudkan dengan perkiraan cuaca siaran TV yang “meramalkan” 50 persen memungkin turun hujan pada esok hari? Apakah 50 persen dari hari esok akan turun hujan ataukah 50 persen kota yang akan dibasahi ?tafsiran yang benar dari prakiraan cuaca ini adalah bahwa dari himpunan keadaan atmosfer yang ada, separuhnya yang berkasus sama akan mengahsilkan hujan. Sebagai contoh, fisika kuantum meramalkan bahwa bagi atom-atom hydrogen yang dipersiapkan secara identik, probabilitas untuk menemukan elektron beredar searah perputaran jam adalah 50 persen. Tentu saja, pengukuran sekali akan memperlihatkan gerak yang searah atau berlawanan perputaran jam saja, bukan gabungan dari keduanya. (begitu pula, salah satu dari antara kedua kejadian ini yang bakal terjadi, hujan atau tidak hujan). Ciri khas matematika mekanika kuantum ini kadang-kadang membingungkan karena kita tidak dapat mengetahui sebelumnya hasil suatu pengukuran, maka deskripsi lengkap suatu system (atom, misalnya) haruslah mencakup semua hasil pengukuran yang mungkin diperoleh.

Tentu saja, seseorang dapat berdalih bahwa pelemparan sebuah mata uang atau dadu bukanlah suatu proses acak, akan tetapi hakikat keacakan hasilnya itu menunjukkan bahwa pengetahuan kita tentang keadaan sistemnyalah yang kurang lengkap. Sebagai contoh, jika kita mengetahui secara pasti bagaimana dadunya dilemparkan ( besar dan arah kecepatan awalnyam orientasi awalnya, dan laju putarannya) dan hukum-hukum yang mengatur tumbukannya pada meja, maka kita seharusnya mampu meramalkan secara pasti bagaimana dadunya akan mendarat pada meja. Begitu pula, jika kita mengetahui lebih banyak tentang fisika atsmosfer, maka kita dapat meramalkan dengan pasti apakah esok hari akan turun hujan ataukah tidak, atau jika kita mengetahui lebih banyak tentang fisiologi. Sebaliknya, apalagi kita menganalisis hasil yang bakal diperoleh berdasarkan probabilitas, maka kita sebenernya mengakui kelemahan kita untuk melakukan analisisnya secara pasti. Ada aliran paham yang mengatakan bahwa hal yang sama terjadi dalam fisika kuantum. Menurut tafsiran aliran ini, kita sebenarnya dapat meramalkan secara pasti perilaku elektron didalam atom, jika kita dapat mengetahui hakikat dari sehimpunan besaran yang disebut “varriabel tersembunyi” yang menentukan geraknya. Tetapi, karena tidak ada bukti yang menguatkan teori tersebut, kita haruslah berkesimpulan bahwa perilaku acak dari sebuah system yang tunduk pada hukum-hukum fisika kuantum adalah suatu aspek alam mendasar, bukanlah hasil dari keterbatasan pengetahuan kita tentang sifat-sifat sistemnya.

1. **AMPLITUDO PROBABILITAS**

Dalam setiap gejala perambatan gelombang suatu besaran fisika seperti perpindahan atau tekanan mengalami perubahan terhadap jarak dan waktu. Lalu, sifat fisika adalah yang mengalami perubahan ketika gelombang deBroglie merambat?

Dalam salah satu pasal didepan, kita membahas pernyataan sebuah partikel yang terbatasi kedudukannya dengan sebuah paket gelombang. Jika partikelnya terbatasi pada suatu bagian ruang berukuran , maka paket gelombang yang menyatakan partikel tersebut hanyalah memiliki amplitudo yang besar dalam daerah yang berukuran itu, sedangkan diluarnya amplitudo paket gelombangnya kecil. Artinnya, amplitude paket gelombang itu besar pada tempat di mana pertikelnya berada dan kecil pada daerah dimana kemungkinan mendapatkan partikel itu kecil. Jadi, amplitude gelombang deBroglie pada sebarang titik berkaitan dengan probabilitas untuk menemukan partikel yang bersangkutan pada titik tersebut. Analogi dalam fisiak klasik, bahwa intensitas sebuah gelombang berbanding lurus dengan kuadrat amplitudonya. Itu artinya probabilitas ini juga berbanding lurus dengan kuadrat amplitude gelomabng deBroglie.

Dalam bab berikut kita akan membahas kerangka matematika untuk menghitung amplitude bagi sebuah partikel yang berada dalam beraneka ragam situasi dan juga membahas definisi probabilitas yang lebih matematis. Kesulitan kita untuk menafsirkan secara tepat amplitude gelombang ini sebagian disebabkan karena amplitude gelomabang adalah suatu besaran kompleks (suatu variable kompleks, amplitudo probabilitas adalah variable yang mengandung suatu bagian imajiner yang berbanding lurus dengan akar kuadrat dari -1 yang dilamabngkan dengan i). karena kita tidak dapat mengungakapkan variable-variabel tersebut dengan system bilangan real. Maka kita tidak dapat menafsirkan atau mengukur langsung amplitudo gelomabagnya.tetapi probabilitas didefinisikan dalam nilai mutlak dari kuadrat amplitude, karena hasilnya selalu merupakan suatu bilangan real, maka kita tidak sulit menafsirkannya.

Meskipun amplitudo gelombang deBroglie tidak mudah ditafsirkan, gelombang deBroglie memiliki semua ciri khas dari sebuah gelombang klasik yang berprilaku baik. Sebagai contoh ia dapat dipantulkan dan dibiaskan. Ia memnuhi asas superposisi dan gelombang-gelombang deBroglie yang merambat dalam arah-arah yang berlawanan dapat berpadu membentuk sebuah gelombang berdiri.

**PERSAMAAN SCHRöDINGER**

Bila keadaan awal sebuah partikel dalam suatu lingkungan klasik (tidak relativistik, tidak kuantum) diketahui, maka dengan menggunakan hukum newton, perilaku selanjutnya dapat diramalkan dengan kepastian mutlak berdasarkan hukum newton. Ini berarti, bila kedudukan awal X0 dan kecepatan awal V0 sebuah partikel yang berada dalam suatu medan gaya F tertentu, yang diturunkan dari suatu potensial V diketahui, maka dengan memecahkan persamaan matematika hukum kedua newton F=dp/dt (suatu persamaan diferensial linear, orde kedua, kita dapat peroleh X(t) dan V(t) untuk seluruh waktu t sesudahnya. Persoalan matematikanya dapat sangat sulit, sehingga pemecahannya dalam bentuk analitis tidak dapat diperoleh (dalam hal ini, pemecahan hampir numerik dapat diperoleh dengan bantuan komputer ). Namun demikian ini hanyalah kesulitan matematika belaka. Fisika dalam persamaan F=dp/dt dan hasil pemecahannya X(t) dan V(t). Contoh lintasan sebuah planet atau satelit yang bergerak dibawah pengaruh gaya gravitasi, setelah melakukan manipulasi matematika yang cukup panjang, berbentuk elips. Medan elektrik dan medan magnet yang berkaitan dengan sebarang distribusi muatan dan arus dapat diperoleh dalam persamaan diferensial parsial orde pertama yang dikenal persamaan maxwell. Fisika dari persoalan ini adalah menuliskan persamaannya dan menafsirkan pemecahannya. Dalam kasus fisika kuantum tak relativistik, persamaan utama yang harus dipecahkan adalah suatu persamaan diferensial parsial orde kedua, yang dikenal sebagai persamaan Schrodinger. Berbeda dari hukum newton, persamaan Schrodinger yang disebut fungsi gelombang memberikan informasi tentang perilaku gelombang dari partikel.

1. **PEMBENARAN PERSAMAAN SCHRöDINGER**

Baik hukum Newton, persamaan Maxwell, maupun persamaan Schrödinger tidak dapat diturunkan dari seperangkat asas dasar, namun pemecahan yang diperoleh darinya ternyata sesuai dengan pengamatan percobaan. Persamaan Schrödinger hanya dapat dipecahkan secara eksak untuk beberapa potensial sederhana tertentu; yang paling sederhana adalah potensial konstan dan potensial osilator harmonik. Kedua kasus sederhana ini memang tidak “fisis”, dalam artian bahwa pemecahannya tidak dapat diperiksa kebenarannya dengan percobaan (tidak ada contoh di alam yang berkaitan dengan gerak sebuah partikel yang terkungkung dalam sebuah kotak satu dimensi, ataupun sebuah osilator harmonik mekanika kuantum ideal (meskipun kasus seperti ini seringkali merupakan hampiran yang cukup baik bagi situasi fisis yang sebenarnya). Namun demikian, berbagai kasus sederhana ini cukup bermanfaat dalam memberikan gambaran tentang teknik umum pemecahan persamaan Schrödinger yang akan dibahas dalam bab ini.

Kita bayangkan sejenak bahwa kita adalah Erwin Schrödinger dan sedang meneliti suatu persamaan diferensial yang akan menghasilkan pemecahan yang sesuai bagi fisika kuantum. Akan kita dapati bahwa kita dihalangi oleh tidak adanya hasil percobaan yang dapat kita gunakan sebagai bahan perbandingan. Oleh karena itu, kita harus merasa puas dengan hal berikut: Kita daftarkan semua sifat yang kita perkirakan akan dimiliki persamaan kita, dan kemudian menguji macam permasalahan macam persamaan manakah yang memenuhi semua kriteria tersebut:

1. Kita tidak boleh melanggar hukum kekekalan energi. Meskipun kita hendak mengorbankan sebagian besar kerangka fisika klasik, hukum kekekalan energi adalah salah satu asas yang kita inginkan tetap berlaku. Oleh karena itu, kita mengambil :

(5.1)

Berturut-turut, *K, V*, dan *E* adalah energi kinetik, potensial, total. (karena kajian kita tentang fifika kuantum ini dibatasi pada keadaan tak relativistik, maka hanyalah menyatakan jumlah energi kinetik dan potensial, bukan energi massa relativistik).

1. Bentuk persamaan diferensial apa pun yang kita tulis, haruslah taat asas terhadap hipotesis deBroglie, jika kita pecahkan persamaan matematikanya bagi sebuah partikel dengan momentum , maka pemecahan yang kita dapati haruslah berbentuk sebuah fungsi gelombang dengan panjang gelombang λ yang sama dengan . Dengan menggunakan persamaan maka energi kinetik dari gelombag deBroglie partikel bebas haruslah
2. Persamaannya haruslah ”berperilaku baik”, dalam pengertian matematika. Kita mengharapkan pemecahannya memberikan informasi kepada kita tentang probabilitas untuk menemukan partikelnya; kita akan terperanjat menemukan bahwa, mislanya, probabilitas tersebut berubah secara tidak kontinu, karena ini berarti bahwa partikelnya menghilang secara tiba-tiba dari satu titik dan muncul kembali pada titik lainnya. Jadi, kita syaratkan bahwa fungsinya haruslah *bernilai tunggal,* artinya, tidak boleh ada dua probabilitas untuk menemukan partikel di satu titik yang sama. Ia harus pula linear, agar gelombangnya memiliki sifat *superposisi* yang kita harapkan sebagai milik gelombang yang berperilaku baik.

Dengan memilih bernalar dalam urutan terbalik, akan kita tinjau terlebih dahulu pemecahan dari persamaan yang sedang kita cari. Anda telah mempelajari di depan tentang gelombang tali, yang memiliki bentuk matematik () = , dan gelombang elektromagnet, yang memiliki pula bentuk serupa dan . Oleh karena itu, kita postulatkan bahwa gelombang deBroglie partikel bebas memiliki pula bentuk matematik yang serupa dengan , yaitu bentuk dasar sebuah gelombang dengan amplitude yang merambat dalam arah positif. Gelombang ini memiliki panjang gelombang λ = dan frekuensi . Untuk sementara, kita akan mengabaikan ketergantungannya pada waktu, dan membicarakan saja keadaan gelombang ini pada suatu saat tertentu, katakanlah . Jadi, dengan mendefinisikan sebagai, maka

(5.2)

Persamaan diferensial, yang pemecahannya adalah **,** dapat mengandung turunan terhadap atau ; tetapi, ia haruslah hanya bergantung pada pangkat satu dari dan turun-turunannya, sehingga suku seperti atau tidak boleh muncul. (Ini sebagai akibat dari anggapan kita tentang sifat linier dan bernilai-tunggal dari persamaan dan pemecahannya). Persamaan kita haruslah mengandung potensial ; jika yang muncul berpangkat satu, maka agar taat asas dengan kekekalan energi harus pula muncul dalam bentuk pangkat satu. Di depan telah kita dapati bahwa , sehingga satu-satunya cara untuk memperoleh suku yang mengandung adalah dengan mengambil turunan kedua dari terhadap .

(5.3)

Perlu ditekankan bahwa yang kita lakukan disini bukanlah suatu penurunan; kita hanya sekedar membentuk suatu persamaan diferensial dengan ketiga sifat berikut : (1) ia taat asas dengan kekekalan energi; (2) ia linier dan bernilai tunggal; (3) ia memberikan pemecahan partikel bebas yang sesuai dengan sebuah gelombang deBroglie tunggal. Persamaan lain dapat dibentuk dengan sifat-sifat yang sama, namun hanya persamaan (1.3) yang lolos pengujian ketat ini sebagai yang *sesuai dengan hasil-hasil percobaan* dalam berbagai situasi fisis. Persamaan (5.3) adalah *persamaan Schrödinger waktu-bebas* satu dimensi. Meskipun gelombang nyata selain tergantung pada koordinat ruang dan juga pada waktu, dan bahwa alam kita bukan berdimensi satu melainkan tiga, kita dapat banyak belajar mengenai matematika dan fisika dari mekanika kuantum dengan mempelajari berbagai pemecahan dari persamaan (5.3). Kelak dalam bab ini kita akan membahas perluasannya ke dalam ruang tiga dimensi dan ketergantungannya pada waktu.

1. **RESEP SCHRöDINGER**

Mengingat teknik untuk memecahkan persamaan 5.3 bagi berbagai bentuk potensial V (yang pada umumnya bergantung pada x), adalah hampir sama, maka kita dapat menyusun saja suatu daftar urutan langkah, seperti di bawah ini, yang perlu diterapkan untuk memperoleh pemecahannya. Anggaplah kita beri suatu potensial V(x) tertentu yang diketahui, dan kita ingin memperoleh fungsi Gelombang dan energi E. Ini adalah contoh persoalan umum yang dikenal sebagai persamaan nilai eigen ( pribadi, baca: aigen ). Akan kita temukan bahwa persamaan ini hanya memperkenalkan pemecahan dengan nilai energi tertentu E saja, yang dikenal sebagai nilai eigen energi.

1. Mulailah dengan menuliskan persamaan 5.3 untuk V(x) yang bersangkutan. Perhatikan bahwa jika potensialnya berubah secara tidak kontinu V(x) mungkin saja dapat tidak kontinu, tetapi tidak boleh, maka untuk daerah x (ruang) yang berbeda perlu kita tuliska pula persamaan yang berbeda. Contoh – contoh kasus seperti ini akan di sajikan dalam Pasal 5.4
2. Dengan menggunakan teknik matematika yang sesuai pada bentuk persamaan yang ditulis, carilah suatu fungsi matematik , sebagai pemecah bagi persamaan diferensial yang bersangkutan. Karena tidak ada teknik khusus yang kami uraikan untuk memecahkan berbagai persamaan diferensial, maka kita hanya akan belajar dari sejumlah contoh mengenai bagaimana mendapatkan pemecahan tersebut.
3. Pada umumnya, kita dapati banyak pemecahan yang memenuhi. Dengan menerapkan syarat – syarat batas, maka beberapa dari antara pemecahan itu dapat dikesampingkan dan semua tetapan (integrasi) yang tidak diketahui dapat ditentukan. Biasanya, penerapan syarat bataslah yang menentukan pemilihan nilai – nilai eigen energinya.
4. Jika anda sedang mencari pemecahan bagi suatu potensial yang berubah secara tidak kontinu, maka anda harus menerapkan persyaratan kekontinuan pada (dan juga pada d ) pada batas anatara daerah – daerah ketidakkontinuannya.
5. Tentukanlah semua tetapan (integrasi) yang belum diketahui, misalnya, tetapan A dalam persamaan 1.2 . Metode penentuan ini akan diuraikan dalam pasal berikut.

Sekarang , marilah kita tinjau salah satu contoh dari fisika klasik yang memerlukan beberapa teknik pemecahan yang sama seperti pada persoalan – persoalan khas fisika kuantum. Persyaratan kekontinuan pada batas antara dua daerah adalah sesuatu yang seringkali diterapkan dalam berbagai persoalan klasik. Untuk mengilustrasikannya, akan kita pelajari persoalan klasik berikut.

Contoh 5.1

Benda bermassa m dijatuhkan dari ketinggian H di atas sebuah tangki air. Ketika memasuki air, ia mengalami gaya apung B yang lebih besar dari pada beratnya. (Kita abaikan gaya viskosita (gesek) oleh air pada benda). Carilah perpindahan dan kecepatan benda, dihitung dari saat dilepaskan hingga ia muncul kembali ke permukaan air.

Pemecahan:

Kita pilih sebuah system koordinat dengan y positif ke atas, dan mengambil y = 0 pada permukaan air. Selama benda jatuh bebas, ia hanya dipengaruhi gaya gravitasi. Maka, dalam daerah 1 (di atas air), hukum kedua Newton memberikan

Yang memiliki pemecahan

v1 (t) = v01 – gt

y1(t) = y01 + v01t – ½ gt2

v01  dan y01 adalah kecepatan dan ketinggian awal pada saat t = 0. Ketika benda memasuki air (daerah 2), gayanya menjadi B- mg, sehingga hukum kedua Newton menjadi

B – mg = m

Yang memiliki pemecahan

v2(t) = v02 + – g t

y2(t) = y02 + v02t – ½ – g t2

Keempat pemecahan ini memiliki empat koefisien tidak tertentukan : v01 , y1 , v02 , dan y02. (perhatikan bahwa y02 dan v02 bukanlah nilai pada saat t = 0 tetapi tetapan yang akan ditentukan kemudian). Kedua tetapan pertama diperoleh dengan menerapkan syarat awal – pada saat t = 0 (ketika benda dilemparkan)y01 = H dan v01 = 0 , karena benda dilepaskan dari keadaan diem . oleh karena itu, pemecahan dalam daerah 1 adalah

v1 (t) = – gt

dan

y1(t) = H – ½ gt2

Persyaratan pertama mengatakan bahwa bendanya tidak lenyap pada suatu saat tertentu dan kemudian muncul kembali di suatu titik lain pada saat berikutnya. Persyatan kedua setara dengan mensyaratkan lajunya berubah secara mulus pada permukaan air. (jika syarat ini tidak dipenuhi, maka v1 (t1 –Δt )≠ v2 (t1 –Δt) meskipun Δt→0, sehingga percepatan akan menjadi tak hingga. Untuk menerapkan syarat batas ini,kita harus terlebih dahulu mencari t1, yang diperoleh dengan mencari waktu t1 ketika y1 menjadi nol.

y1(t1) = H – ½ gt2 = 0

sehingga

t1

dengan demikian, laju benda ketika menyentuh air, ‘v1(t1) adalah

v1(t1)

maka syarat batas memberikan

y2(t1) = y02 + v02t + ½ – g

dan

y2(t1) = v02t + ½ – g =

Kedua persamaan ini dapat dipecahkan secara serempak untuk memperoleh y02 dan v02, yang menghasilkan v02 = (-B/m)dan y02 = H(1 + B/mg). Jadi, pemecahan lengkap dalam daerah 2 adalah:

v1(t) – g t

y2(t) = H + + ½ – gt2

Persamaan bagi v1 , y1 , v2 , dan y2 memberikan perilaku gerak benda dari saat t = 0 hingga ia muncul kembali ke permukaan air.

Hasil – hasil ini dapat kita terapkan untuk menghitung sifat gerak lainnya; sebagai contoh, kita dapat mencari kedalaman maksimum yang dicapai benda , yang terjadi ketika v2 = 0 . Jika kita ambil t2 sebagai waktu pada saat hal ini terjadi, maka:

v1(t) – g t2 = 0

t2 =

Kedalaman D adalah nilai y2 pada saat t2 ini , yaitu:

D = y2(t) = (H + t2 + ½ – gt2

1. **PROBABILITAS dan NORMALISASI**

Fungsi gelombang  *(x)* menyatakan suatu gelombang yang memiliki panjang gelombang dan bergerak dengan kecepatan fase yang jelas. Masalah yang muncul ketika hendak menafsirkan amplitudonya. Apakah yang dinyatakan oleh amplitudo (x) dan variabel fisika apakah yang bergetar? Ini merupakan suatu jenis gelombang yang berbeda, yang nilai mutlaknya memberikan probabilitas untuk menemukan partikelnya pada suatu titik tertentu. Dimana| *(x)|² dx* memberikan probabilitas untuk menemukan partikel dalam selang *dx* di *x*. Rapat probabilitas *P(x)* terhadap  *(x)* menurut persamaan Schrödinger sebagai berikut:

*P(x)dx=*| *(x)|2dx pers (1)*

Tafsiran | *(x)|2* ini membantu memahami persyaratan kontinu  *(x)*, walaupun amplitudonya berubah secara tidak jelas dan kontinu. Probabilitas untuk menemukan partikel antara dan adalah jumlah semua probabilitas *P(x)dx* dalam selang antara dan adalah sebagai berikut:

*pers (2)*

Dari aturan ini, maka probabilitas untuk menemukan partikel disuatu titik sepanjang sumbu *x*, adalah 100 persen, sehingga berlaku:

*pers (3)*

Persamaan (3) dikenal dengan syarat Normalisasi, yang menunjukkkan bagaimana mendapatkan tetapan A. Dimana tetapan A tidak dapat ditentukan dari persamaan Differensialnya. Sebuah fungsi gelombang yang tetapan pengalinya ditentukan dari persamaan (3) disebut ternormalisasikan. Hanyalah fungsi gelombang yang ternomalisasi secara tepat, yang dapat digunakan untuk melakukan semua perhitungan yang mempunyai makna fisika. Jika normalisasinya telah dilakukan secara tepat, maka persamaan (2) akan selalu menghasilkan suatu probabilitas yang terletak antara 0 dan 1.

Setiap pemecahan persamaan Schrödinger yang menghasilkan | *(x)|²* bernilai tak hingga, harus dikesampingkan. Karena tidak pernah terdapat probabilitas tak hingga untuk menemukan partikel pada titik manapun. Maka harus mengesampingkan suatu pemecahan dengan mengembalikan faktor pengalinya sama dengan nol. Sebagai contoh, jika pemecahan matematika bagi persamaan differensial menghasilkan  *(x) = A+ B* bagi seluruh daerah *x > 0* , maka syaratnya *A = 0* agar pemecahannnya mempunyai makna fisika. Jika tidak | *(x)|* akan menjadi tak hingga untuk *x* menuju tak hingga ( Tetapi jika pemecahannya dibatasi dalam selang *0 < x < L,* maka A tidak boleh sama dengan nol). Tetapi jika pemecahannya berlaku pada seluruh daerah negatif sumbu *x < 0*, maka *B = 0.*

Kedudukan suatu partikel tidak dapat dipastikan,dalam hal ini tidak dapat menjamin kepastian hasil suatu kali pengukuran suatu besaran fisika yang bergantung pada kedudukannnya. Namun jika menghitung probabilitas yang berkaitan dengan setiap koordinat, maka ditemukan hasil yang mungkin dari pengukuran satu kali atau rata-rata hasil dari sejumlah besar pengukuran berkali-kali (Eisberg,1970).

1. **BEBERAPA PENERAPAN**

Partikel Bebas yang kita maksudkan dengan sebuah “partikel bebas” adalah sebuah partikel yang bergerak tanpa dipengaruhi gaya apa pun dalam suatu bidang ruang yaitu F=0 sehingga V(x) = tetapan , untuk semua x. Dalam hal ini, kita bebas memilih tetapan potensial sama dengan nol, karena potensial selalu ditentukan dengan tambahan satu tetapan integrasi sebarang (F=-dV/dx dalam satu dimensi).

Berikut kita terapkan resepnya,dengan menuliskan kembali persamaan 3 dengan potensial yang sesuai (V=0):

(2.1)

Atau

(2.2)

Dimana

(2.3)

Persamaan 2.2 adalah bentuk persamaan yang telah lazim dikenal, dengan k2 selalu positif, maka pemecahannya adalah :

Dari persamaan 2.3, kita dapati bahwa nilai energy yang diperkenankan adalah :

Karena pemecahan kita tidak memberikan batasan pada k, maka energy partikel diperkenankan memiliki semua nilai. Perhatikan bahwa persamaan 2.3 tidak lain adalah energy kinetic sebuah partikel dengan momentum atau, setara dengan berdasarkan bahasan 5.1, ini tidak lain dari pada apa yang kita perkirakan, karena kita telah membentuk persamaan shrdinger yang menghasilkan pemecahan bagi partikel bebas yang berkaitan dengan satu Gelombang deBroglie.

Penentuan nilai A dan B disini mengalami beberapa kesulitan, karena integral normalisasi, persamaan 3 tidak dapat dihitung dari - hingga + bagi fungsi Gelombang ini.

Partikel dalam sebuah kotak (satu dimensi) disini kita akan meninjau sebuah partikel yang bergerak bebas dalam sebuah “kotak” satu dimensi yang panjangnya L partikelnya benar – benar terperangkap dalam kotak. Potensial ini dapat dinyatakan sebagai berikut :

Potensialnya diperlihatkan dalam gambar 5.3 dan seringkali dikenal sebagai potensial *sumur persegi takhingga*. Tentu saja, kita bebas memilih sebarang nilai tetapan bagi V dalam daearah , pemilihan nol yang kita lakukan adalah sekedar untuk memudahkan.

Resepnya sekarang harus diterapkan secara terpisah pada daerah di dalam dan di luar kotak. Jika kita terapkan persamaan 5.3 bagi daerah luat kotak, kita dapatkan bahwa satu – satunya cara untuk mempertahankan persamaannya bermakna bila V→ adalah dengan mensyaratkan ,sehingga tidak akan menjadi takhingga. Di pihak lain, kita dapat kembali ke pernyataan pesoalan semulanya. Jika kedua dinding kotak benar – benar tegar, maka partikel akan selalu berada dalam kotak, sehingga probabilitas untuk menemukan partikel di luar kotak tentulah nol. Untuk memuat probabilitasnya nol di luar kotak, kita hatus mengambil di luar kotak. Jadi kita peroleh

To= To=

V=V=0 V=Gambar 5.3

X=0 x=L

Persamaan Schrdinger untuk , bila V(x) = 0, identik dengan persamaan 2.1 , sehingga memiliki pemecahan yang sama yakni :

Dengan

Pemecahan ini belum lengkap,karena kita belum menentukan A dan B, juga belum menghitung nilai energy E yang diperkenankan. Untuk menghitungnya, kita harus menerapkan persyaratan bahwa harus kontinu pada setiap batas dua bagian ruang. Dalam hal ini, kita persyaratkan bahwa pemecahan untuk x < 0 dan x>0 bernilai sama di x = 0 begitu pula, pemecahan untuk x > L dan x < L haruslah bernilai sama di x = L.

Marilah kita mulai di x = 0. Untuk x < 0 , kita dapat jadi kita harus mengambil dari persamaan 5.19 sama dengan nol pada x = 0

Jadi

B = 0

Karena untuk x > L , maka haruslah berlaku

Karena telah kita dapatkan bahwa B = 0, maka haruslah berlaku

Disini ada dua pemecahan, yaitu A = 0 yang memberikan di mana – mana di mana – mana, yang berarti bahwa dalam kotak tidak terdapat partikel (pemecahan yang tidak masuk akal ) atau sin kL = 0 yang hanya benar apabila

Atau

n= 1, 2, 3, …

Karena , kita peroleh ini identik dengan hasil yang diperoleh dalam mekanika (fisika) dasar bagi panjang Gelombang dari gelmbang berdiri dalam sebuah dawai yang panjangnya L dan kedua ujungnya terikat. *Jadi, pemecahan persamaan schrdinger bagi sebuah partikel yang terperangkap dalam suatu daerah linear sepanjang L tidak lain adalah sederetan Gelombang berdiri deBroglie* !. Tidak semua panjang Gelombang diperkenankan tetapi hanyalah sejumlah nilai tertentu yang ditentukan oleh persamaan 5.24 yang dapat terjadi.

Dari persamaan 5.20 kita dapati bahwa, karena hanya nilai – nilai tertentu yang diperkenankan oleh persamaan 5.24 maka hanyalah nilai – nilai tertentu E yang dapat terjadi degan kata lain, *energinya terkuantisasi.*

Untuk memudahkan, ambilah ,yang mana tampak bahwa unit energy ini ditentukan oleh massa partikel dan panjang kotak. Maka , dan dengan demikian partikelnya hanya dapat di temukan dengan E0,4E0, 9E0,16E0 dan seterusnya, tidak prnah dengan 3 atau. Karena dalam kasus ini energinya adalah kinetic semata – mata, maka hasil yang kita peroleh ini menunjukkan bahwa hanya laju tertentu yang diperkenankan dimiliki partikel. ini sangat berbeda dari kasus klasik, misalnya manic – manic dapat diberi sebarang kecepatan awal dan akan bergerak selamanya, bolak- balik, dengan laju tersebut. Dalam kasus kuantum, hal ini tidaklah mungkin , karena hanya laju awal tertentu yang data memberikan keadaan gerak yang tetap keadaan gerak khusus ini disebu keadaan stasioner. Hasil pengukuran energy sebuah partikel dalam sebuah sumur potensial harus berada pada salah satu keadaan stasioner ini hasil yang lain tidaklah mungkin.

Pemecahan bagi belum lengkap, karena kita belum menentukan tetapan A. Untuk menentukannya, kita kembali ke persyaratan normalisasi . Karena , maka (kecuali di dalam kotak ) integralnya tidak nol, sehigga berlaku

Yang memberi kita A =. Dengan demikian, pemecahanlengkap bagi fungsi Gelombang untuk adalah

sin n = 0, 1, 2, 3, …

Dalam Gambar 5.4 dilukiskan berbagai tingkat energy, fungsi Gelombang, dan rapat probabilitas yang mungkin untuk beberapa keadaan terendah. Keadaan energy terendah, yaitu pada n =1, dikenal sebagai keadaan dasar, dan keadaan dengan energy yang berlebih tinggi (n>1) dikenal sebagai keadaan eksitasi.

Contoh

Perlihatkan bahwa nilai rata-rata dari x adalah L/2 dan tidak bergantung pada keadaan kuantum

Pemecahan

Kita gunakan pers (5.10) karena kecuali untuk maka kita gunakan 0 dan L sebagai batas-batas integral , sehingga bentuk ini dapat diintegralkan secara parsial perhatikan bahwa hasil ini tidak bergantung pada n.

1. **Partikel dalam Sebuah Kotak (Dua Dimensi)**

Apabila tinjauan di depan kita perluas ke kasus fisika dua dan tiga dimensi, ciri-ciri utama pemecahannya masih tetap sama, namun ada suatu ciri khas baru penting yang dikenalkan. Dalam pasal ini akan kita perlihatkan bagaimana hal ini terjadi, karena ciri baru ini yang dikenal sebagai degenerasi akan menjadi sangat penting dalam study fisika atom. Persamaan Schrodinger yang sebelumnya adalah versi satu dimensi. Dalam dua dimensi diperoleh

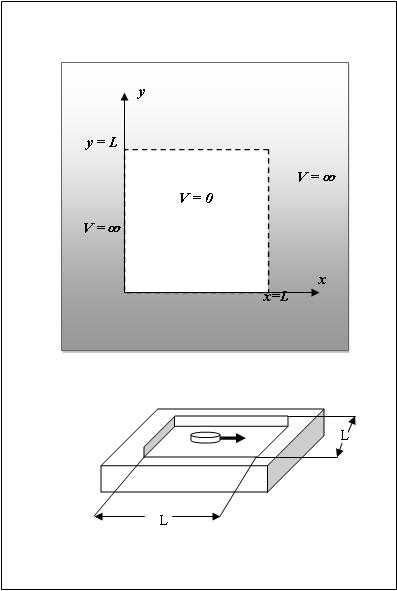
(2.4)

Kedua suku pertama pada ruas kiri melibatkan turunan parsial. Kotak dua dimensi dapat didefinisikan

,

untuk yang lainnya (2.5)

Pemecahan persamaan diferensial parsial memerlukan teknik yang lebih rumit, didalam kotak kita tinjau pemecahan yang terpisahkan artinya fungsi dari x dan y dapat dinyatakan hasil kali sebagai fungsi yang hanya bergantung pada x dengan sebuah fungsi lain yang hanya bergantung pada y

(2.6) 

Bentuk masing-masing fungsi dari f dan g di ruas kanan sama seperti persamaan

(2.7)

Syarat kontinyu pada menghendaki bahwa pemecahan didalam dan diluar kotak bernilai sama pada daerah batas kotak. Semua bilangan bulat ini tidak perlu sama, maka kita sebut dan , jadi diperoleh

(2.8)

Terakhir kita menyisipkan pemecahan ke dalam persamaan (2.8), energi didapat

(2.9)

Bandingkan hasil ini dengan sehingga . Bentuk rapat probabilitas memberikan sedikit informasi kepada kita tentang bilangan kuantum dan juga energi partikel. Jadi jika kita mengukur rapat probabilitas dan menemukan enam buah maksimum, maka dapat disimpulkan partikelnya memiliki energi 13 dengan dan atau dan

Adakalanya dua himpunan bilangan kuantum dan yang berbeda memiliki energi yang tepat sama , dikenal sebagai degenerasi dan tingkat energinya disebut terdegenerasi. Degenerasi pada umumnya terjadi apabila sebuah sistem dilabel dengan dua atau lebih bilangan kuantum, gabungan bilangan kuantum yang berbeda seringkali dapat memberikan nilai energi yang sama. Jumlah bilangan kuantum berbeda yang diperlukan oleh sebuah sistem fisika ternyata persis sama dengan jumlah dimensi dalam mana persoalan dipecahkan. Persoalan satu dimensi hanya memerlukan satu bilangan kuantum, dua dimensi memerlukan dua bilangan kuantum dan seterusnya. Bila kita tiba pada persoalan tiga dimensi, seperti pada beberapa soal dibagian akhir bab ini, dan teristimewa dalam atom hidrogen . kita dapati bahwa efek degenerasi menjadi lebih berarti dalam bidang studi fisika atom permasalahan degenerasi ini merupakan saham utama penyumbang bagi struktur dan sifat berbagai atom.

1. **OSILATOR HARMONIK SEDERHANA**

Persoalan ideal lain yang dapat ditangani secara mudah dengan menggunakan persamaan schrodinger adalah osilator harmonic sederhana satu dimensi. Osilator seperti ini dapat dianalisis dengan menggunakan hukum Newton yang mengungkapkan frekuensi dan periode . Osilator harmonic ini memiliki energy kinetic maksimum di ; energy kinetiknya nol pada titik balik , dimana amplitudo geraknya. Pada titik balik, isolator berhenti sejenak kemudian berbalik arah geraknya. Tentu saja gerakannya terbatasi pada daerah .

Meskipun dalam alam nyata kita tidak pernah menjumpai contoh isolator kuantum satu dimensi, terdapat sebuah sistem yang berprilaku menghampiri system ini, misalnya vibrasi sebuah molekul diatomic. Ternyata, hingga orde hampir terendah setiap system pada daerah minimum sebuah potensial berprilaku seperti sebuah osilator harmonik sederhana.

Sebuah gaya memiliki potensial , jika kita memperoleh persamaan schrodinger:

……………………………………(pers 2.2.1)

Persamaan diferensial ini sulit sekali dipecahkan secara langsung, karena itu kita akan menebak saja pemecahannya. Semua pemecahan persamaan (2.2.1) harus menuju nol bila , dan untuk limit . Prilakunya haruslah seperti ekponensial . Oleh karena itu kita mencoba dengan , dimana A dan a adalah dua tetapan yang ditentukan dengan mengevaluasikan persamaan (2.2.1)bagi pilihan ini. Kita mulai dengan mengevaluasi .

Dan kemudian menyisipkan dan kedalam (2.2.1) untuk melihat apakah piliahan ini memberikan suatu pemecahan.

………..pers (2.2.2)

Pembagian dengan factor sekutu memberikan

…………………………………………….……pers (2.2.3)

Persamaan (2.2.3) bukanlah pesamaan yang harus dipecahkan bagi , karena kita sedang mencari pemecahan yang berlaku bagi semua, bukan hanya bagi nilai tertentu. Agar hal ini berlaku bagi sembarang , maka semua koefisien dari haruslah saling menghapuskan dan semua tetapan yang sisa haruslah sama(missal, tinjau persamaan . Persamaan ini tentu berlaku bagi , tetapi bila kita mengiginkan persamaan ini berlaku bagi sembarang dan semua x, maka persyaratannya dan . Jadi:

……………………………………………………………pers (2.2.4)

Dan ………………………………………………………….….pers (2.2.5)

Yang menghasilkan ……………………………..….…………….pers (2.2.6)

Dan …………………………………………………....………pers (2.2.7)

Pernyataan energy ini dapat pula kita nyatakan dalam frekuensi klasik sebagai:

……………………………………………….………………..pers (2.2.8)

Salah satu ciri pemecahan ini yang mencolok adalah bahwa probabilitas untuk menemukan pertikel di luar titik balik adalah tidak nol. Karena diluar energi potensial lebih besar dari pada energy total E tetap, maka energi kinetiknya menjadi negative, ini adalah adalah hal yang tidak mungkin terjadi dalam kerangka fisika klasik, karena itu partikel klasik tidak memungkinkan ditemukan di . Tetapi sebaliknya dalah mungkin bagi gelombang kuantum untuk merembes kedaerah terlarang klasik ini.

1. **KETERGANTUNGAN PADA WAKTU**

Disini kita tidak akan meninjau metode pemecahannya secara terperinci, tetapi hanya mengutip hasilnya.bila diketahui pemecahan tidak bergantung waktu dari persamaan schrodinger. Untuk energi E maka fungsi gelombang bergantung waktunya didapati menurut rumus

………………………………………………………..pers(2.2.9)

Frekuensi diberikan oleh hubungan deBroglie

……………………………………………………………………….pers(2.2.10)

Sebagaimana disebutkan dalam pasal 4.1 belum jelas apakah energi E dalam hubungan deBroglie diatas harus energi total klasik energi total relativistik karena kita tidak memperoleh petunjuk dari hubungan bagi foton. Kita telah menggunakan hubungan klasik E=V+K dan mengabaikan sumbangan energi diam pada E. Seharusnya menulis (tetapi karena kita hanya meninjau kasus dimana v<<c, maka bentuk klasik ½ mv2 bagi K sudah memadai). Penambahan suku energi diam mengubah persamaan (2.2.9) dengan memperkenalkan faktor . Tetapi karena sifat-sifat terukur dari bergantung pada yakni hasil kali dengan konyugat kompleksnya (complex conjugate) yang diperoleh dengan menggantikan i dengan –i, maka faktor tambahan ini tidak memberi akibat yang teramati, sehingga kita dapat saja mengabaikannya. Untuk melihat bagaimana perkalian dengan memberikan suatu gelombang, kita tinjau bagaimana fungsi gelombang partikel bebas. Persamaan memberikan fungsi gelombang ini menjadi sederhana jika menuliskan kembali dalam bentuk eksponensial kompleks dan bentuknya adalah

…………………………………………………….pers(2.2.11)

Tetapan A’ dan B’ dapat dicari dari tetapan A dan B jadi bagi fungsi gelombang bergantung waktu yang bersangkutan , kita peroleh

………………………………………..pers(2.2.12)

Suku pertama diruas kanan menyatakan suatu fungsi trigonometri dengan fase adalah sebuah gelombang yang bergerak dalam arah x positif , suku kedua menyatakan suatu gelombang yang bergerak dalam arah x negatif. Kuadrat nilai mutlak koefisien-koefisiennya memberikan intensitas masing-masinggelombang ini, jadi gelombang yang bergerak dalam arah x positif memiliki intensitas dan yang bergerak dalam arah x negatif

Andaikanlah kita memiliki seberkas partikel berenergi tunggal yang bergerak dalam arah x positif yang dinyatakan oleh sebuah fungsi gelombang dalam bentuk suku pertama dari persamaan (2.4). Maka probabilitas untuk menentukan letak sebuah partikel diberikan oleh . Ini adalah sebuah tetapan, yang tidak bergantung pada kedudukan x sebuah partikel dapat ditemukan dimana saja pada sumbu x. Jika fungsi gelombangnya mengandung amplitudo yang sama bagi kedua gelombang ini (yakni ), maka terdapat beberapa kedudukan dimana rapat probabilitas sama dengan nol. Terdapat sejumlah titik pada mana probabilitas untuk menemukan partikel adalah nol. Seperti halnya fisika klasik, apabila kita menjumlahkan dua gelombang dengan ampliudo sama yang bergerak dalam arah berlawanan, maka kita memperoleh sebuah gelombang berdiri, yang memiliki beberapa titik tertentu (yang dikenal sebagai “simpul” ) pada mana amplitudo gelombang resultan adalah nol untuk setiap saat.

1. **POTENSIAL TANGGA DAN HALANG**

Dalam jenis persoalan umum berikut, kita akan menganalisis apa yang terjadi apabila sebuah partikel yang sedang bergerak dalam suatu daerah berpotensial tetap tiba – tiba bergerak memasuki suatu daerah berpotensial berbeda yang juga tetap nilainya. Kita tidak akan membahas pemecahan persoalan ini secara terinci, tetapi karena metode pemecahannya sama, kita dapat menentukan secara garis besar langkah – langkah yang perlu di ambil untuk mendapatkan pemecahan tersebut. Dalam bahsan ini kita akan mengambil E sebagai energy total (yang tetap) dari partikel dan V0 sebagai nilai energy potensial tetapnya.

1. Apabila E lebih besar dari pada V0, maka pemecahan persamaan Schrdingernya berbentuk

Dimana

A dab B adalah dua tetapan yang dapat ditentukan dari syarat normalisasi dan kekontinuan. Sebagai contoh, tinjau potensial tangga yang di perlihatkan pada Gambar 5.11

V0

X=0

Gambar 5.11 Potensial tangga dengan tinggi v0

Jika E adalah energy total dan lebih besar dari pada V0, maka kita dengan mudah dapat menuliskan pemecahan persamaan Schrdinger dalam kedua daerah ini sebagai berikut :

Hubungan antara keempat tetapan A,B,C,dan D dapat dicari dengan menerapkan persyaratan bahwa dan haruslah kontinu pada batas kedua daerah, jadi. Pemecahan hanya disketsakan pada gambar 5.12. Perhatikan bahwa penerapan syarat kekontinuan menjamin peralihan mulus dari Gelombang yang satu ke yang lain pada titik batas.

Sekali lagi, kita dapat menggunakan persamaan untuk mentransformasikan kedua pemecahan ini dari bentuk sinus dan kosinus ke dalam bentuk kompleks, yakni :

Apabilla ketergantungan pada waktu dimaksukkan dengan mengalikan masing – masing suku dengan , maka kita dapat menafsirkan masing – masing gelombang ini. Ingatlah bahwa adalah fase Gelombang yang bergerak dalam arah x positif, sedangkan adalah fase Gelombang yang bergerak dalam arah x negative, dan bahwa kuadrat nilai mutlak dari tiap – tiap koefisien memberikan intensitas dari komponen Gelombang yang bersangkutan. Pada daerah , persamaan menyatakan superposisi antara sebuah Gelombang berintensitas yang bergerak dalam arah x positif (dari - menuju 0) dengan sebuah Gelombang berintensitas yang bergerak dalam arah x negative. Andaikanlah kita maksudkan pemecahan ini menyatakan partikel – partikel yang mulanya datang dari bagian sebelah kiri potensial. Maka memberikan intensitas Gelombang datang (atau lebih tepat lagi, gelomabng deBroglie yang menytakan berkas partikel datang yang menyatakan berkas partikel datang ) dan memberikan intensitas Gelombang pantul. Nisbah / memberikan fraksi intensitas Gelombang datang. Dalam daerah , Gelombang dengan intensitas yang bergerak dalam arah negative x tidak dapat hadir jika partikel – partikelnya kita tembakan dari sebelah kiri, jadi untuk situasi percobaan istimewa ini, kita dapat mengambil D’ sama dengan nol. Dengan demikian intensitas Gelombang transmisi ini adalah .

Kita dapat menganalisis semua pemecahan di atas dari sudut pandang energy kinetic. Pada daerah dimana energy kinetic partikel adalah terbesar, momentum linear atau pula menjadi yang terbesar, dan panjang Gelombang deBroglie akan menjadi yang terkecil. Jadi, panjang Gelombang deBroglie dalam daerah lebih kecil dari pada yang di dalam daerah .

1. Apabila E lebih kecil dari pada V0, maka kita peroleh pemecahn berbeda :

Dimana

Jika daerah pemecaan ini meliputi dari + atau -, kita harus menjaga agar tidak menjadi takhingga dengan menggambil A atau B sama dengan nol, jika daerahnya hanya mencakup koordinat x yang berhingga, hal ini tidak perlu dilakukan.

Sebagai salah satu contohnya, jika dalam soal sebelumnya, E lebih kecil dari pada V0, maka pemecahan bagi akan tetap diberikan oleh persamaan 5.52 atau 5.53, tetapi pemecahan menjadi

Sekali lagi, kita harus memastikan bahwa semua pemecahan ini bersambung mulus pada batas – batas daerah berlaku masing – masingnya, penerapan syaratbatas ini dilakukan seperti pada kasus sebelumnya. (Kita mengambil C=0 agar menghindari menjadi takhingga bila ). Salah satu pemecahan yang mungkin adalah seperti yang tampak pada gambar 5.13

Pemecahan ini mengilustrikan suatu perbedaan penting antara mekanika klasik dan kuantum. Secara klasik, partikelnya tidak pernah dapat ditemukan pada daerah , karena energy totalnya tidak cukup untuk melampaui potensial tangga. Tetapi, mekanika kuantum memperkenankan fungsi Gelombang, dank arena itu partikel, untuk menerobos masuk ke dalam daerah terlarang klasik.

Rapat probabilitas dalam daerah adalah , yang menurut persamaan 5.56 adalah sebanding dengan . Jika kita definisikan jarak terobosan sebagai jarak dari hingga ke titik dimana probabilitasnya menurun menjadi 1/e, maka

Agar partikel dapat memasuki daerah , ia harus sekurang – kurangnya mendapat tambahan energy sebesar V0 – E agar dapat melampaui tangga potensial, jadi ia harus memperoleh tambahan energy kinetic jika ia memasuki daerah . Tentu saja, ini melanggar kekekalan energy bila partikel memperoleh sebarang tambahan energy secara tiba – tiba, tetapi menurut hubungan ketidakpastian , kekekalan energy tidak berlaku pada selang waktu yang lebih kecil dari pada kecuai hingga suatu jumlah energy sebesar . Artinya, jika partikel “meminjam” sejumlah energy dan “mengembalikan” dalam selang waktu , maka kita sebagai pengamat tetap percaya bahwa energy adalah kekal. Andaikanlah kita meminjam sejumlah energy tertentu yang cukup untuk menyebabkan partikel memiliki suatu energy kinetic K dalam daerah terlarang. Dengan energy tersebut, berapa jauhkah partikel menembus daerah terlarang ini?

Energy “pinjaman” adalah (V0 - E) + K, suku (V0 – E) mengangkat partikel ke puncak tangga dan suku sisa K memberikan geraknya. Energy harus kita kembaikan dalam selang waktu

Karena partikel bergeraak dengan laju v = , maka jarak yang dapat ditempuhnya adalah

Dalam limit K→0, maka menurut persamaan 5.59 jarak terobos menuju nol, karena partikel memiliki kecepatan nol begitu pula →0 dalam limit K →, karena selang waktu tempuhnya dapat dikatakan nol. Diantara kedua limit ini, harus terdapat suatu nilai maksimum dari untuk suatu nilai K tertentu. Dengan mendiferensiasikan persamaan 5.59, maka nilai maksimum ini dapat kita cari yaitu

Nilai ini identik dengan persamaan 5.57! Hasil ini memperlihatkan bahwa penerobosan ke dalam daerah terlarang yang dibeikan oleh persamaan Schrdnger sesuai dengan hubungan ketidakpastian. Apa yang sebenarnya kita perlihatkan adalah bahwa persamaan Schrdnger memberikan taksiran yang sama seperti yang diberikan oleh hubungan ketidakpastian Heisenberg.

Sekarang marilah kia tinjau potensial haling seperti yang diprrlihatkan pada gambar 5.14.

Partikel dengan energy E yang lebih kecil dari pada V0 datang dari sebelah kiri. Dari penaaman kita di depan, kita terdorong untuk memperkirakan bahwa pemecahannya berbentuk seperti yang diperlihatkan pada gambar 5.15 berbentuk sinus dalam daerah , eksponensial dalam daerah , dan sinus kembali ke dalam daerah . Intensitas Gelombang transmisi dapat dicari dengan menerapkan secara tepat syarat – syarat kontinu, yang tidak akan kita bahas disini, yang mana didapati bergantung pada energy partikel dan tinggi serta lebar potensial haling. Secara klasik, partikel tidak pernah muncul di , karena tidak memiliki energy yang cukup untuk melewati halangan potensial, situasi ini adalah contoh dari efek terobos haling (*barrier penetration*), yang dalam mekanika kuantum seringkali disebut dengan nama efek terowongan (*tunneling*). Partikel memang tidak pernah dapat diamati berada dalam daerah terlarang klasik , tetapi ia dapat “menerowong” melalui daerah tersebut sehingga teramati pada daerah .

Gambar 5.14 V0  x=0 x=a

γₒ=2π/kₒ

γₒ=2π/kₒ

E

Gambar 5.15

Meskipun potensial pada gambar 5.14 adalah semata – mata skematis dan hipotetis, terdapat banyak contoh di alam yang memperlihatkan efek terowongan ini. Berikut kita tinjau tiga contoh nyata efek terowongan ini.

* 1. **Peluruhan alfa** sebuah inti atom (*nucleus*) terdiri atas sejumlah proton dan newton yang berada dalam suatu keadaan gerak tertentu, kedua jenis partikel ini kadang – kadang dapat bergabung membentuk suatu ikatan baru yang terdiri atas dua proton dan neutron, yang disebut partikel alfa. Dalam salah satu bentuk peluruhan radioaktif, inti atom dapat memancarkan suatu partikel alfa, yang dapat diamati dalam laboratorium. Tetapi, untuk dapat keluar dari inti atom, partikel yang tampak pada gambar 5.16. Probabilitas bagi sebuah partikel alfa untuk menembusi potensial haling ini, sehingga teramati dalam laboratorium, bergantung pada tinggi dan tebal potensial halang. Probabilitas peluruhan ini dapat diukur dalam laboratorium dan ternyata didapati sangat sesuai dengan yang diramalkan berdasarkan perhitungan mekanika kuantum terhadap efek penerobosan penghalang.

**potensial tolak Coulomb**

**Energi partikel alfa**

**Energi**

**Permukaan inti**

**petensial tarik inti**

1. **invers amoniak** Gambar 5.17 adalah gambar bangun molekul amoniak NH3. Jika kita mencoba menggerakkan atom nitrogen sepanjang sumbu molekul, menuju bidang yang memuat atom – atom nitrogen, akan kita rasakan adanya tolakan oleh ketiga atom hydrogen, yang menghasilkan suatu potensial seperti yang diperlihatkan pada gambar 5.18. Menurut mekanika klasik, atom nitrogen tidak akan pernah mampu melewati potensial halang dan muncul pada bagian molekul di balik bidang nitrogen, kecuali bila kita memasok energy yang mendekati baginya. Namun, menurut mekanika kuantum, nitrogen dapat menerobosi potensial halang tersebut dan muncul pada bagian molekul yang berlawanan.

Gambar 5.17

1. **Dioda terowong** piranti elektronik yang menggunakan gejala penerowongan ini adalah diode terowong (*tunnel dioda*). Bahasan secara terinci dari sifat piranti semikonduktor ini akan disajikan dalam Bab 14. Potensial yang “dilihat” oleh sebuah electron dalam diode terowong dapat di gambarkan bagan seperti yang diperlihatkan pada gambar 5.19. Arus yang mengalir melallui piranti seperti ini dihasilkan oleh electron – electron yang menerowong ini, dengan demikian arus yang dihasilkannya dapat diatur dengan hanya mengubah tinggi potensial halang,yang dapat dilakukan dengan menggunakan suatu tegangan elektrik. Hal ini dapat dilakukan dengan sangat cepat, sehingga dapat dicapai frekuensi switching sekitar 10Hz. Arus pada diode semikonduktor yang lazim dikenal, bergantung pada difusi electron melalui suatu junction, karena itu, mereka beroperasi pada skala waktu yang lebih lama (frekuensi yang lebih rendah).