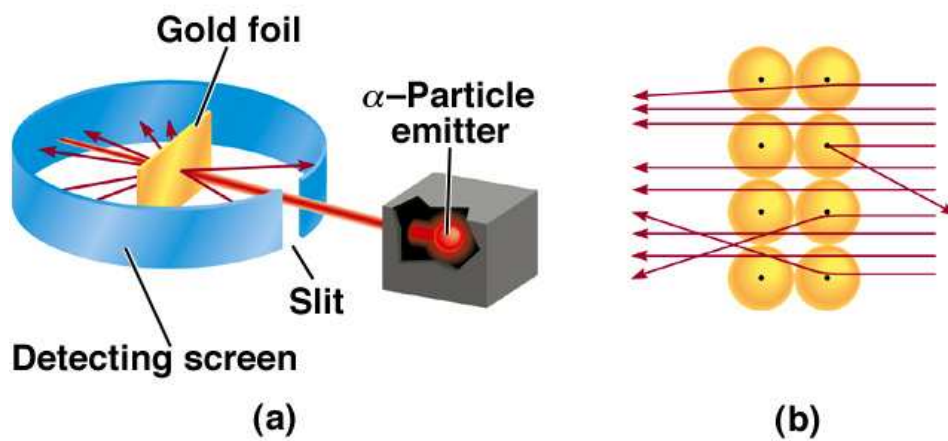


# FISIKA III

## Rutherford's Experimental Design



Oleh  
Drs.P.Sinaga M Si

Jurusan Pendidikan Fisika  
FP MIPA UPI

## **FISIKA III**

### **PENDAHULUAN**

Fisika modern dibagi kedalam 2 kategori besar yaitu :

1. Pendahuluan teori relativitas ,Fisika kuantum dan Fisika statistic
2. Aplikasi teori kuantum elementer pada molekul ,zat padat ,nuklir dan fisika partikel.

Pada akhir abad ke 19 ,para ilmuwan meyakini bahwa mereka telah mempelajari sebagian besar dari apa yang ada yang harus diketahui dari fisika seperti :

- Hukum gerak Newton dan teori gravitasi umum
- Teori Maxwell : penggabungan kelistrikan dan kemagnetan
- Hukum Termodinamika dan teori kinetic

Pada awal abad ke 20 terjadi revolusi besar yang mengejutkan dunia fisika. Tahun 1900 Planck mengusulkan pemikiran mendasar yang mengarah pada formulasi teori kuantum . Tahun 1905 Einstein memformulasikan teori relativitas yang sangat brilian. Kedua pemikiran tersebut telah membawa pengaruh yang besar terhadap pemahaman kita tentang alam.Selama beberapa decade teori teori tersebut telah memberikan inspirasi bagi pengembangan teori teori baru dalam bidang fisika atom ,fisika nuklir dan fisika zat padat. Meskipun fisika modern telah dikembangkan selama abad ini dan telah membawa kemajuan dalam perkembangan teknologi penting namun tidak selesai sampai disitu , penemuan penemuan baru akan berlanjut selama kehidupan kita sehingga akan lebih memperdalam atau memperbaiki kembali pemahaman kita tentang alam dan dunia disekitar kita.

## BAB 1

### RELATIVITAS KHUSUS

#### Pengantar

Gelombang cahaya dan bentuk bentuk lain dari radiasi elektromagnetik merambat melalui ruang hampa dengan kelajuan  $C = 3 \cdot 10^8$  m/s . Kecepatan cahaya tersebut merupakan batas tertinggi dari kecepatan partikel partikel dan gelombang mekanik. Mekanika Newton yang mendeskripsikan gerak benda telah berhasil dalam mendeskripsikan berbagai fenomena. Ternyata mekanika Newton hanya berfungsi dengan baik untuk benda benda yang bergerak dengan kecepatan rendah ,namun menjadi salah (dalam arti antara prediksi teori dan fakta eksperimen tidak bersesuaian ) apabila diterapkan pada kasus gerak benda (partikel) yang kecepatannya mendekati kecepatan cahaya.

Pada Tahun 1905 (pada usia 26 tahun ) A. Einstein mempublikasikan teori relativitas khusus, yang merupakan kontribusi penting bagi sains . Teori relativitas khusus ini merepresentasikan satu dari Greatest Intellectual achievement pada abad ke 20. Dengan teori tersebut dapat dikoreksi prediksi eksperimental dan observasi meliputi seluruh rentang kelajuan dari kecepatan nol hingga kecepatan mendekati kecepatan cahaya. Mekanika Newton yang telah diterima dan digunakan selama 200 tahun ternyata merupakan kasus khusus dari teori relativitas khusus.

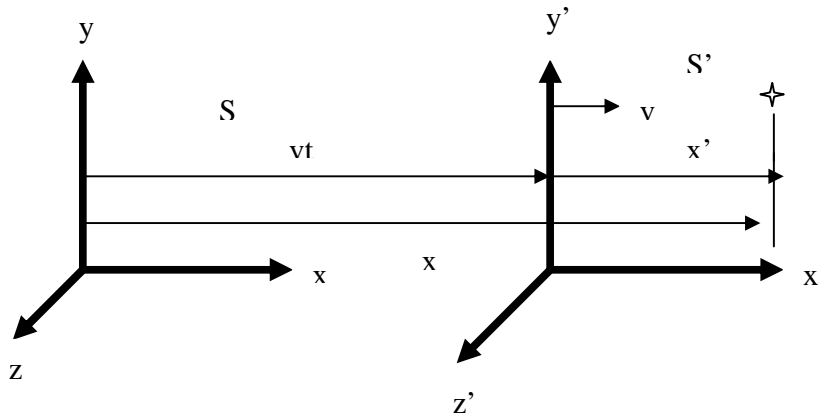
#### Postulat Relativitas Khusus

Dua postulat dasar dari teori relativitas khusus adalah sebagai berikut :

- Hukum hukum fisika haruslah mempunyai bentuk yang sama untuk seluruh pengamat (kerangka referensi ) yang bergerak dengan kecepatan konstan terhadap kerangka referensi lainnya.
- Kecepatan cahaya haruslah sama untuk seluruh pengamat inersial ,tidak bergantung pada gerak relative masing masing.

#### Prinsip Relativitas

Hukum hukum Newton valid dalam seluruh kerangka referensi inersial. Kerangka referensi inersial atau sistem inersial adalah suatu sistim dimana benda bebas tidak mengalami percepatan. Setiap sistem yang bergerak dengan kecepatan konstan terhadap suatu sistem inersial adalah merupakan sistim inersial juga. Menurut principle of Newtonian Relativity bahwa hukum hukum mekanika haruslah sama di seluruh kerangka referensi inersial. Lokasi dan waktu dari suatu kejadian dapat dinyatakan oleh koordinat  $(x,y,z,t)$  . Kita dapat mentransformasi koordinat ruang dan waktu suatu kejadian dari suatu sistim inersial ke sistem lain yang bergerak dengan kecepatan konstan relatif terhadap sistim inersial pertama. Misalkan dua sistim inersial S dan S' ,sistim inersial S dinyatakan oleh koordinat  $(x,y,z,t)$  dan sistim inersial S' dinyatakan oleh koordinat  $(x',y',z',t')$  , dimana pada keadaan awal kedua sistim kerangka referensi berimpit , selanjutnya sistim inersial S' bergerak kekanan searah sumbu x dengan kecepatan konstan v relatif terhadap kerangka S



Maka kedua sistim koordinat dihubungkan oleh persamaan

$$x' = x - vt$$

$$y' = y$$

$$z' = z$$

$$t' = t$$

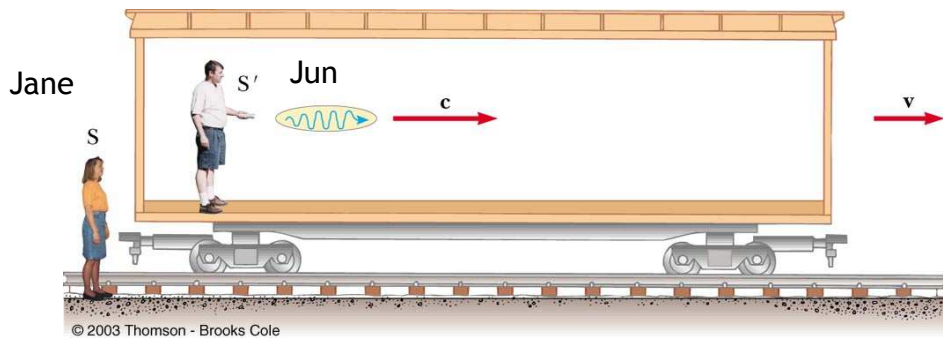
persamaan tersebut dikenal sebagai transformasi koordinat Galilean. Catatan bahwa koordinat keempat yaitu waktu diasumsikan sama dikedua sistim inersial, konsekuensinya ialah interval waktu antara dua kejadian yang berurutan haruslah sama diamati oleh kedua pengamat di kerangka S dan S'. Misalkan dua kejadian diamati oleh pengamat di S jaraknya ialah  $dx$  dan interval waktunya  $dt$ , sedangkan menurut pengamat di kerangka S' perpindahannya ialah  $dx' = dx - vdt$ , karena  $dt = dt'$  maka

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{dx}{dt} - v \quad \text{atau}$$

$$U'_x = U_x - v$$

Dimana  $U_x$  ialah kecepatan benda relatif terhadap kerangka S,  $U'_x$  ialah kecepatan benda relatif terhadap kerangka S'. Persamaan tersebut dinamakan Hukum penjumlahan kecepatan Galilean atau transformasi kecepatan Galilean.

Apakah hukum penjumlahan kecepatan Galilean tersebut berlaku untuk seluruh rentang kecepatan benda?. Misalkan dua orang pengamat jane dan jun sama sama mengamati cepat rambat cahaya



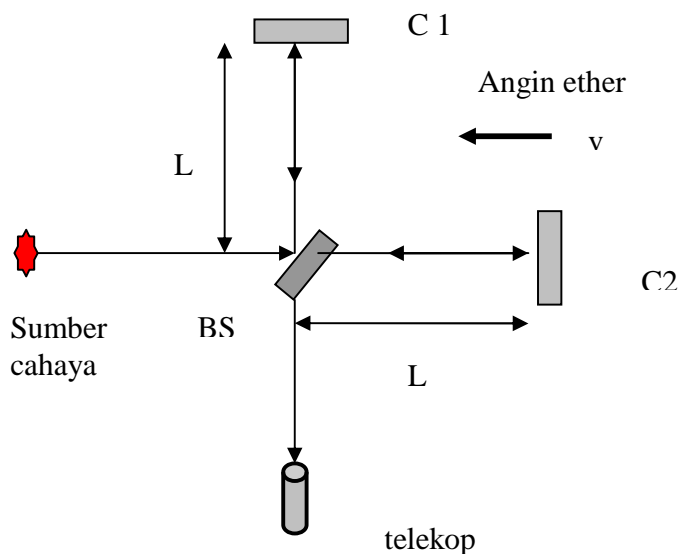
Jun berada gerbong kereta api, dimana kereta api bergerak dengan kecepatan konstan  $v$  relatif terhadap Jane yang ada di pinggir rel kereta api. Jun menyalakan senter dengan arah rambat cahaya searah dengan arah gerak kereta. Menurut Jun cepat rambat cahaya tersebut ialah  $C$ . Berdasarkan hukum penjumlahan kecepatan Galilean berapakah cepat rambat cahaya menurut Jane? Cepat rambat cahaya menurut Jane ialah

$$U_x = U'_x + v = C + v$$

Hal itu berarti  $U_x > C$ , dan ini bertentangan dengan fakta bahwa cepat rambat cahaya diruang hampa adalah kecepatan objek terbesar, dan ini menunjukkan bahwa hukum penjumlahan kecepatan Galilean memiliki keterbatasan keberlakuan yaitu hanya berlaku untuk gerak benda yang kecepataannya jauh lebih kecil dari cepat rambat cahaya, dan menjadi salah bila diterapkan pada kasus gerak benda yang kecepataannya mendekati cepat rambat cahaya

### Ekperimen Michelson-Morley

Para fisikawan pada hingga tahun 1800 berpendapat bahwa gelombang cahaya seperti halnya gelombang bunyi dan gelombang air, memerlukan medium untuk merambatnya. Medium sebagai tempat merambatnya gelombang cahaya seperti sinar matahari merambat kebumi dihipotesiskan berupa medium yang disebut ether. Kecepatan cahaya sebesar  $c$  itu adalah kondisi khusus yaitu ketika kerangka absolutnya berada dalam keadaan diam terhadap ether. Jika diasumsikan matahari relatif diam terhadap ether, bumi bergerak mengitari matahari dengan kelajuan relatif  $v$ , maka menurut pengamat di bumi angin ether bergerak relatif terhadap bumi dengan kecepatan  $v$ . Berdasarkan transformasi kecepatan Galilean maka kelajuan cahaya maksimum ialah  $c+v$  (arah rambat cahaya searah dengan arah kecepatan ether), hal ini bertentangan dengan fakta bahwa kecepatan benda terbesar ialah cepat rambat cahaya dalam vakum yaitu  $c$ . Kelajuan cahaya minimum ialah  $c-v$  (arah kecepatan cahaya dan kecepatan ether berlawanan). Apabila arah rambat cahaya tegak lurus terhadap arah kecepatan ether maka kelajuan cahaya menjadi  $(c^2 - v^2)^{1/2}$ . Ada perubahan kecil dari harga kecepatan cahaya di dalam medium ether. Permasalahannya ialah bagaimana kita dapat mengukur perubahan kecil dari harga  $c$  tersebut? Pada tahun 1887 dua orang ilmuwan Amerika yaitu Alberth A Michelson dan Edward W Morley merancang eksperimen untuk mengukur perubahan kecil dari harga cepat rambat cahaya atau secara langsung membuktikan kebenaran dari hipotesis ether. Alat yang digunakannya dikenal dengan nama interferometer Michelson, diagram percobaannya sebagai berikut



Cahaya yang merambat dalam arah horizontal yaitu dari beam spliter (BS) ke C2 dan dari C2 ke BS memerlukan waktu sebesar

$$t_2 = \frac{L}{c+v} + \frac{L}{c-v} = \frac{2Lc}{c^2 - v^2} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1}$$

Ketika cahaya merambat dalam arah vertikal yaitu arah rambat cahaya tegak lurus dengan arah kecepatan ether, maka waktu yang diperlukan cahaya untuk merambat dari BS ke C2 dan kembali lagi ke BS ialah

$$t_1 = \frac{2L}{(c^2 - v^2)^{1/2}} = \frac{2L}{c} \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

Perbedaan waktu antara berkas cahaya yang merambat horizontal dan yang merambat vertikal ialah

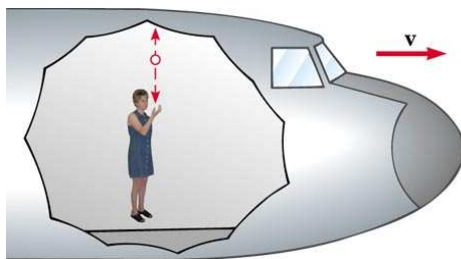
$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2L}{c} \left[ \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1} - \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2} \right]$$

Karena  $v^2/c^2 \ll 1$  maka yang berada dalam tanda kurung diubah kedalam ekspansi binomial maka

$$\Delta t = \frac{Lv^2}{c^3}$$

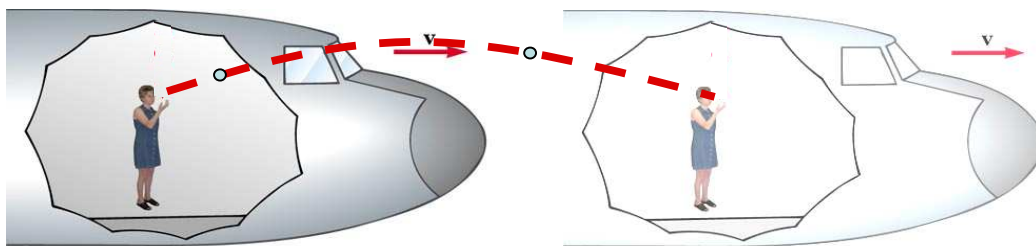
Jadi secara teoritis ada perbedaan waktu antara berkas cahaya yang merambat sejajar dengan ether dan berkas cahaya yang merambat tegak lurus terhadap ether, meskipun jarak yang ditempuhnya (perpindahannya) sama. Namun fakta hasil pengukuran menunjukkan bahwa bahwa kedua berkas cahaya selalu tiba dalam waktu yang sama atau

tidak ada perbedaan waktu. Percobaan diulang ulang dan dilakukan oleh orang yang berbeda dan tempat yang berbeda beda hasilnya selalu sama yaitu tidak ada perbedaan waktu tempuh dari kedua berkas cahaya tersebut. Berdasarkan fakta eksperimen tersebut berarti bahwa medium hipotetis ether itu tidak ada, yang artinya bahwa cahaya (gelombang elektromagnetik) tidak memerlukan medium untuk merambatnya. Konsekuensi dari fakta tersebut ialah tidak ada kerangka acuan universal, yang berarti semua gerak benda bersifat relatif. Sebagai contoh dua orang pengamat sama sama mengamati gerak sebuah bola. Bola tersebut dibawa oleh penumpang pesawat, dimana pesawat bergerak dengan kecepatan  $v$  konstan relatif terhadap bumi. Bola dilemparkan oleh penumpang pesawat dan dia mengamati bahwa gerak bola tersebut merupakan gerak vertikal.



(a)

menurut Pengamat di pesawat bola bergerak secara vertikal



Menurut pengamat di bumi bola itu bergerak dengan lintasan parabola

Menurut pengamatan orang yang ada di bumi, gerak bola tersebut tidak vertikal tetapi merupakan gerak parabola. Pengamatan siapa yang benar ?. Berdasarkan prinsip gerak relatif, kedua hasil pengamatan itu benar sebab masing masing mengacu pada kerangka acuan yang digunakannya. Penumpang pesawat kerangka acuan yang dipakainya ialah

lantai pesawat, sedangkan pengamat di bumi kerangka acuan yang digunakannya ialah bumi.

### Transformasi Lorentz

Apabila persamaan transformasi koordinat Galilean diterapkan pada kasus kecepatan besar yaitu mendekati kecepatan cahaya maka hasilnya menjadi salah (tidak sesuai dengan fakta eksperimen). Bagaimanakah persamaan transformasi yang berlaku untuk gerak benda dengan rentang kecepatan  $0 \leq v < c$  ?.

Untuk kasus kecepatan benda mendekati kecepatan cahaya tersebut maka Transformasinya dikenal dengan nama Transformasi Lorentz, yang dikembangkan oleh Hendrik A Lorentz pada tahun 1890. Transformasi Lorentz berupa suatu set persamaan yang menghubungkan koordinat ruang dan waktu dari dua kerangka referensi inersial S dan S' yang bergerak dengan kecepatan relatif  $v$  konstan terhadap S. Kerangka referensi S dinyatakan oleh koordinat  $(x,y,z,t)$  sedangkan kerangka referensi S' dinyatakan oleh koordinat  $(x',y',z',t')$ . Pada keadaan awal  $t = t' = 0$ , kedua kerangka referensi berimpit. Kemudian kerangka referensi S' bergerak searah sumbu  $x$   $x'$  dengan kecepatan konstan  $v$  relatif terhadap S. Pengamat di kedua kerangka referensi sama sama mengamati suatu kejadian misalnya kilatan dari suatu lampu di titik  $p$  di ruang waktu tersebut. Transformasi Lorentz dari S ke S' ialah

$$\begin{aligned}x' &= \gamma (x - vt) \\y' &= y \\z' &= z \\t' &= \gamma (t - vx/c^2)\end{aligned}$$

Transformasi Lorentz kebalikannya (invers) atau transformasi Lorentz dari S' ke S ialah

$$\begin{aligned}x &= \gamma (x' + vt') \\y &= y' \\z &= z' \\t &= \gamma (t' + vx'/c^2)\end{aligned}$$

dengan

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

Pada persamaan transformasi Lorentz ini  $t$  tidak sama dengan  $t'$  atau waktu tempuh sinar dari titik  $p$  ke masing masing pengamat di kerangka S dan S' tidak sama, hal ini bersesuaian dengan postulat relativitas khusus Einstein ke 2. Pada transformasi Lorentz ini,  $t$  bergantung pada kedua  $t'$  dan  $x'$  dan sebaliknya  $t'$  bergantung pada kedua  $t$  dan  $x$ . Hal itu berbeda dengan transformasi Galilean dimana  $t = t'$ .

Apabila kecepatan benda  $v \ll c$ , maka persamaan transformasi Lorentz akan berubah menjadi transformasi Galilean. Hal itu dapat diperiksa dengan mengambil kasus ketika  $v$  kecil misal cepat rambat bunyi diudara ,maka  $\gamma = 1$ , sehingga persamaan menjadi

$$x' = x - vt \quad y' = y \quad z' = z \quad \text{dan} \quad t' = t$$



### Transformasi kecepatan Lorentz

Misal suatu objek di kerangka acuan S' berpindah sejauh  $dx'$  dalam selang waktu  $dt'$ , maka pengamat di kerangka S' mengukur kelajuan objek itu ialah

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'}$$

Dengan menggunakan persamaan sebelumnya kita peroleh

$$dx' = \gamma(dx - vdt)$$

$$dt' = \gamma\left(dt - \frac{vdx}{c^2}\right)$$

Maka

$$u'_x = \frac{dx'}{dt'} = \frac{dx - vdt}{dt - vdx/c^2} = \frac{(dx/dt) - v}{1 - (v/c^2)(dx/dt)}$$

atau

$$U'_x = \frac{u_x - v}{1 - (u_x v / c^2)}$$

Transformasi kecepatan Lorentz kebalikannya (inversnya) ialah

$$U_x = \frac{u'_x + v}{1 + (u'_x v / c^2)}$$

Apakah benar persamaan transformasi ini berlaku untuk dari kecepatan sangat kecil hingga kecepatan benda mendekati cepat rambat cahaya  $c$ ? Mari kita gunakan persamaan ini untuk menentukan cepat rambat cahaya dari lampu senter menurut jane seperti soal sebelumnya. Dengan menggunakan persamaan transformasi kecepatan Lorentz, maka cepat rambat cahaya menurut jane ialah

$$U_x = \frac{u'_x + v}{1 + (u'_x v / c^2)} = \frac{c + v}{1 + (cv/c^2)} = \frac{c + v}{1 + v/c} = \frac{c(c + v)}{c + v} = c$$

Jadi berdasarkan persamaan transformasi kecepatan Lorentz, cepat rambat cahaya ialah sama  $c$  baik yang diamati oleh pengamat di kereta jun, maupun yang diamati oleh pengamat di pinggir rel kereta jane.

### Contoh 1

Pengendara sepeda motor jet bergerak dengan kelajuan  $0,8c$  relatif terhadap seorang pengamat yang berdiri di pinggir jalan. Sambil mengendarai sepeda motornya dia menembakan senapan dimana peluru yang keluar dari senapan bergerak searah

dengan arah majunya motor dengan kecepatan  $0,4 C$  relatif terhadap pengendara motor. Berapakah kelajuan peluru menurut orang yang berada di pinggir jalan ?

Jawab

$$U_x = \frac{u'_x + v}{1 + (u'_x v / c^2)} = \frac{0,4.C + 0,8.C}{1 + \frac{0,4C \times 0,8C}{C^2}} = \frac{1,2.C}{1,32} = 0,909.C$$

Contoh 2

Dua buah roket A dan B bergerak berlawanan arah di angkasa, roket A bergerak kekanan dan roket B bergerak ke kiri, masing masing kecepatannya  $0,7 C$  dan  $0,6C$  relatif terhadap pengamat yang ada di bumi . Berapakah kecepatan roket A menurut pengamat di roket B

Jawab

$$U'_x = \frac{u_x - v}{1 - (u_x v / c^2)} = \frac{0,7.C - (-0,6.C)}{1 - \frac{(0,7.C) \times (-0,6.C)}{C^2}} = \frac{1,3.C}{1,42} = 0,9155.C$$

Latihan

1. Elektron bergerak kekanan dengan kelajuan  $0,9c$  relative terhadap kerangka laboratorium. Proton bergerak kekanan dengan kelajuan  $0,7c$  relative terhadap electron. Tentukanlah kelajuan proton relative terhadap kerangka laboratorium.
2. Dua pesawat ruang angkasa menurut pengamat di bumi bergerak saling mendekati dengan lintasan saling tegak lurus. Pesawat A bergerak dengan lintasan horizontal sedangkan pesawat B bergerak dengan lintasan vertical . Menurut pengukuran pengamat di bumi kelajuan pesawat  $U_x = 0,9c$  dan kelajuan pesawat B ialah  $U_y = -0,9c$ . Tentukanlah kelajuan pesawat A menurut pilot di pesawat B.

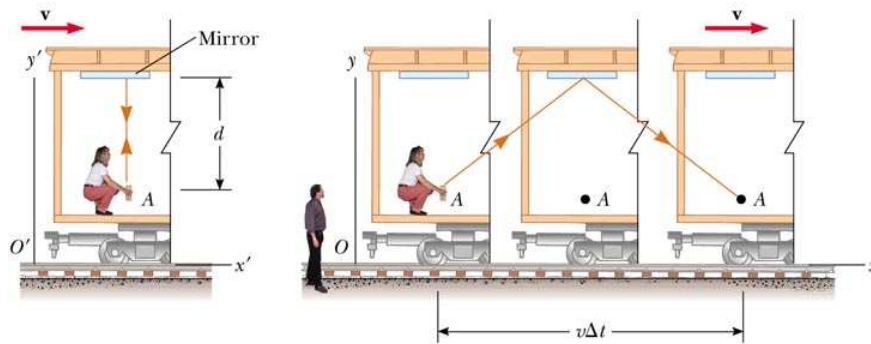
### **Konsekuensi Postulat Relativitas Khusus Einstein**

Beberapa konsekuensi dari teori relativitas khusus adalah sebagai berikut :

- Jam yang bergerak relative terhadap seorang pengamat menjadi diperlambat dengan factor  $\gamma$  , hal itu dinamakan dilatasi waktu  
 $T = T' \gamma$
- Panjang benda dalam keadaan bergerak akan mengalami pemendekan dalam arah yang searah dengan gerak benda dengan factor  $1/\gamma$  . Hal tersebut dinamakan kontraksi panjang.  
 $L = L' / \gamma$
- Massa benda yang dalam keadaan bergerak relatif terhadap seorang pengamat akan membesar dengan factor  $\gamma$ , yaitu  $m = m' \gamma$ .

### **Time dilation (pemuluran waktu)**

Dua orang pengamat  $O'$  dan  $O$  masing masing mengamati waktu tempuh berkas sinar laser



Kerangka referensi dari pengamat  $O'$  di kereta

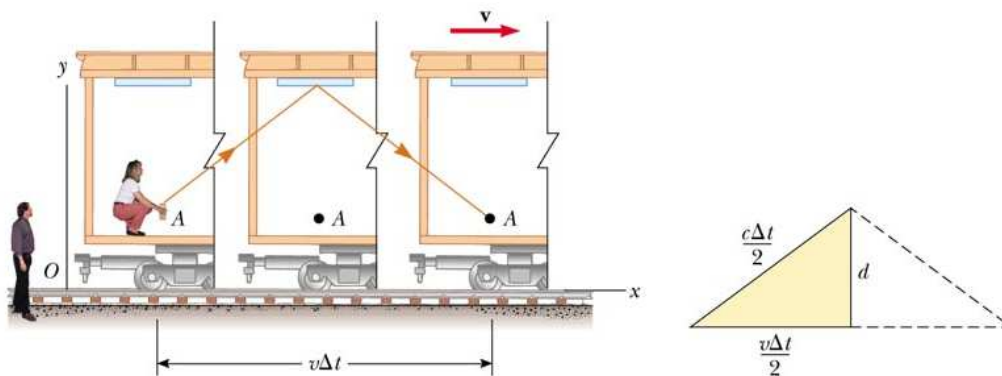
Kerangka Referensi dari pengamat  $O$  di tanah

Sinar laser dipancarkan menuju cermin, dipantulkan oleh cermin dan berkas sinar laser kembali lagi pada sumber laser. Berapakah waktu tempuh sinar laser menurut pengamat  $O'$  (dik kereta yang bergerak dengan kecepatan konstan  $v$  relative terhadap pengamat  $O$  di pinggir rel kereta) dan menurut pengamat  $O$  ?

Menurut pengamat  $O'$  interval waktu sinar laser dari mulai dipancarkan hingga tiba lagi di sumber laser ialah

$$\Delta T' = \frac{2d}{c}$$

Waktu yang diukur oleh  $O'$  ialah waktu sebenarnya (proper time)  
Menurut pengamat  $O$  interval waktu sinar laser ialah



$$\left(\frac{c\Delta T}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta T}{2}\right)^2 + d^2$$

$$\Delta T^2(c^2 - v^2) = (2d)^2$$

$$\Delta T = \frac{2d}{c} \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta T'$$

Karena  $\gamma > 1$  maka berarti  $\Delta T > \Delta T'$  inilah yang disebut time dilation.

Apakah fenomena pemuluran waktu itu benar benar bisa terjadi ?. Time dilation merupakan fenomena nyata dan telah dibuktikan melalui berbagai eksperimen. Sebagai contoh adalah pengukuran waktu hidup partikel muon. Muon adalah partikel elementer yang tidak stabil, muatannya sama dengan muatan elektron dan massanya 207 kali massa elektron. Muon ini dapat dihasilkan melalui tumbukan radiasi kosmik dengan atom atom di atmosfer. Waktu hidup muon  $2,2 \mu s$  bila diukur dikerangka yang diam terhadap muon. Bila diasumsikan  $2,2 \mu s$  adalah rata rata waktu hidup muon dan kelajuan muon hampir sama dengan  $c$ , maka partikel ini dapat menempuh jarak 650 m sebelum partikel ini meluruh menjadi partikel lain. Bila partikel ini masuk ke bumi maka tidak akan sampai di bumi. Namun pengamatan eksperimen membuktikan bahwa banyak partikel muon yang sampai di bumi. Fenomena tersebut dapat dijelaskan dengan time dilation sebagai berikut: relatif terhadap pengamat di bumi muon memiliki waktu hidup  $\gamma T$  dengan  $T = 2,2 \mu s$  adalah waktu hidup dikerangka referensi yang bergerak bersama muon. Misalkan kecepatan muon ialah  $0,99c$  maka  $\gamma = 7,1$  dan  $\gamma T = 16 \mu s$ . Jarak tempuh rata rata muon diukur oleh pengamat di bumi ialah  $0,99 \times 3.10^8 \times 16 \times 10^{-6} = 4700 m$ . Jadi dengan demikian muon yang bergerak dengan kelajuan mendekati kecepatan cahaya memiliki waktu hidup lebih panjang dari pada muon yang diam.

Bagaimana bila fenomena itu diterapkan pada organisme, misalnya orang pergi keluar angkasa dengan pesawat yang kecepatannya mendekati kecepatan cahaya, apakah ketika ia balik lagi ke bumi usianya menjadi lebih muda dari teman seangkatannya di bumi ?. Fenomena tersebut disering disebut paradok anak kembar



Dua teman sebaya dina dan doni, dina pergi keluar angkasa dengan pesawat luar angkasa. Doni tinggal di bumi. Ketika dina pulang lagi ke bumi doni melihat bahwa dina menjadi lebih muda dibandingkan dirinya. Apakah fenomena ini sungguh bisa terjadi ?. Sayangnya belum bisa dibuktikan, karena umat manusia belum mampu membuat pesawat yang kecepatannya bisa mendekati kecepatan cahaya, namun tidak mustahil.

### Contoh 1

Pesawat ruang angkasa, ketika diam di bumi diukur panjangnya 100 m. Kemudian pesawat pergi meninggalkan bumi dengan kelajuan  $0,99c$  relatif terhadap bumi. A). Berapakah panjang pesawat menurut pengamat di bumi. B) bila pesawat itu bergerak meninggalkan bumi dengan kelajuan  $0,01c$ , berapakah panjang pesawat menurut pengamat di bumi?

Jawab

- a.  $L = L'(1 - v^2/c^2)^{1/2} = 100 \text{ m} \{1 - (0,99c)^2/c^2\}^{1/2} = 14 \text{ m}$
- b.  $L = L'(1 - v^2/c^2)^{1/2} = 100 \text{ m} \{1 - (0,01c)^2/c^2\}^{1/2} = 99,99 \text{ m}$

### Contoh 2

Seorang astronot ketika diam di bumi rata-rata detak jantungnya diukur dan diperoleh sebesar 70 denyut/menit. Berapakah rata-rata detak jantung astronot tersebut ketika dia terbang menggunakan pesawat ruang angkasa dengan kelajuan  $0,9c$  relatif terhadap bumi, menurut a) temannya yang ada di pesawat, b) menurut pengamat yang diam di bumi

Jawab

- a. Temannya yang ada di pesawat relatif diam terhadap si astronot sehingga rata-rata detak jantung si astronot sama dengan ketika diam di bumi yaitu 70 denyut/menit.

- b.  $T = T'\gamma = T' \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 70 \text{ denyut / menit} \sqrt{1 - \frac{(0,9c)^2}{c^2}} = 30,5 \text{ denyut / menit}$

Menurut pengamat di bumi denyut jantung si astronot itu sangat lambat.

### Latihan

1. Waktu hidup rata-rata partikel pi meson pada kerangka acuannya ialah 26 ns. Jika partikel itu bergerak dengan kelajuan  $0,95c$ , berapakah a. waktu hidup rata-rata partikel pi meson menurut pengamat di bumi, b. jarak yang ditempuh partikel menurut pengamat di bumi sebelum partikel meluruh jadi partikel lain.
2. Berapakah kecepatan batang meteran relative terhadap bumi, bila pengamat di bumi mengukur bahwa panjang batang meteran itu 0,5 m.
3. Pesawat ruang angkasa bergerak dengan kelajuan  $0,9c$  relative terhadap bumi. Awak pesawat mengukur bahwa panjang pesawat tersebut ialah  $L$ , berapakah panjang pesawat menurut pengamat di bumi ?

### Momentum dan Energi Relativistik.

Pernyataan relativistic untuk momentum dari partikel yang bergerak dengan kecepatan  $u$  adalah

$$\mathbf{P} = \gamma m \mathbf{u}$$

dengan

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (u^2 / v^2)}}$$

Pernyataan relativistic untuk energi kinetik dari suatu partikel ialah

$$K = \gamma mc^2 - mc^2$$

Dimana  $mc^2$  adalah energi partikel dalam keadaan diam  $E_0$  (kesetaraan massa – energi dari Einstein) sedangkan  $\gamma mc^2$  adalah energi total partikel  $E$  atau  $E = \gamma E_0$ , dengan demikian pernyataan untuk energi relativistik dapat dituliskan sebagai berikut

$$K = (\gamma - 1)E_0$$

Relasi antara momentum relativistic dengan energi total dari suatu partikel dinyatakan oleh persamaan

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2$$

Contoh

Elektron bergerak kekanan dengan kelajuan  $0,75c$  relatif terhadap kerangka laboratorium. Tentukanlah:

- kelajuan proton yang energi kinetiknya sama dengan energi kinetik elektron.
- kelajuan proton yang memiliki momentum yang sama dengan elektron
- massa proton dan massa elektron ketika bergerak (dari soal a)
- bila proton pada soal b bergerak kekanan relatif terhadap kerangka laboratorium, berapakan kelajuan proton relatif terhadap elektron.

Jawab

a) Kecepatan proton

Energi kinetik elektron

$$K_e = (\gamma - 1)m_e c^2 = \left( \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,75c)^2}{c^2}}} - 1 \right) \times 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$= \left( \frac{1}{\sqrt{1 - 0,5625}} - 1 \right) \cdot 81,9 \times 10^{-15} \text{ joule} = 41,92 \times 10^{-15} \text{ joule}$$

Energi kinetik proton = Energi kinetik Elektron

$$(\gamma_p - 1)m_p c^2 = 41,92 \times 10^{-15} \text{ joule}$$

$$\gamma_p = \frac{41,92 \times 10^{-15} \text{ joule}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg} \cdot (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})^2} + 1 = 1,0002798$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_p^2}{c^2}}} = 1,0002798$$

$$v_p = 0,0236 \cdot c = 7,08 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

b) Kecepatan proton yang memiliki momentum yang sama dengan momentum elektron

Momentum elektron

$$P_e = \gamma m_e v = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v_e^2}{c^2}}} m_e v = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{(0,75c)^2}{c^2}}} \cdot 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} \cdot 0,75 \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$$= 30,9553 \cdot 10^{-23} \text{ kgm/s}$$

Momentum proton = momentum elektron

$$\gamma m_p v_p = 30,9553 \cdot 10^{-23} \text{ kg.m/s}$$

$$\gamma v_p = \frac{30,9553 \cdot 10^{-23} \text{ kg.m/s}}{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}} = 18,536 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

$$\frac{v_p}{\sqrt{1 - \frac{v_p^2}{c^2}}} = 18,536 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

$$v_p^2 = \left(1 - \frac{v_p^2}{c^2}\right) (18,536 \cdot 10^4 \text{ m/s})^2$$

$$v_p = 2,9 \cdot 10^4 \text{ m/s}$$

- c) Masa elektron dan massa proton dalam keadaan bergerak  
Masa elektron

$$m'_e = \gamma m_e = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{(0,75 \cdot c)^2}{c^2}}} = 13,7579 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$$

Masa proton

$$m'_p = \gamma m_p = \frac{1,67 \cdot 10^{-27} \text{ kg}}{\sqrt{1 - \frac{(0,0236 \cdot c)^2}{c^2}}} = 1,6704678 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

- d) Kelajuan proton relatif terhadap elektron

$$U'_x = \frac{U_x - v}{1 - \frac{U_x v}{c^2}} = \frac{2,9 \cdot 10^4 - 0,75 \cdot 3 \cdot 10^8}{1 - \frac{2,9 \cdot 10^4 \cdot 0,75 \cdot 3 \cdot 10^8}{(3 \cdot 10^8)^2}} = \frac{-2,24971 \cdot 10^8}{0,9993475} = 0,7504 \cdot c$$

Latihan

1. Proton dalam alat pemercepat partikel bergerak dengan kecepatan 300 Km/detik, tentukanlah (a).energi diam proton, (b).Energi total proton, (c).Energi kinetik proton.
2. Dalam alat pemercepat partikel elektron dipercepat hingga energi kinetiknya 10.MeV, tentukanlah, (a).Kelajuan elektron, (b).Energi total elektron

3. Sebuah proton memiliki energi total 300 MeV. Tentukanlah (a) momentum proton, (b).Kelajuan proton



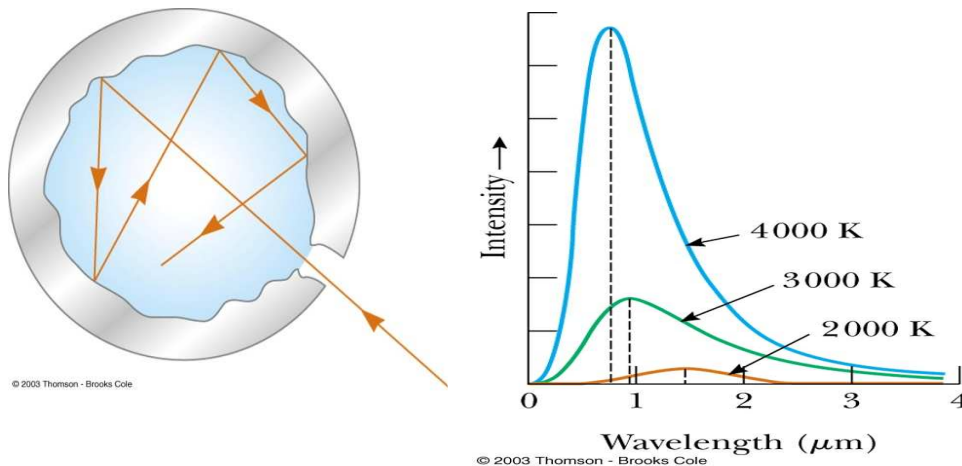
## BAB 2 SIFAT PARTIKEL DARI CAHAYA

### Pendahuluan

Pada akhir abad 18 para ilmuwan menganggap bahwa semua fenomena alam fisika seluruhnya dapat dijelaskan dengan dua pilar hukum fisika yaitu Mekanika Newton dan Teori Gelombang elektromagnet Maxwell serta ditambah dengan Termodinamika dan teori kinetik. Penemuan fenomena baru seperti radiasi benda hitam, efek foto listrik, sinar x, efek Compton telah menyadarkan para fisikawan bahwa fisika klasik tidak mampu menjelaskan secara teoritis dengan benar atau ada keterbatasan keberlakuan dari teori dan hukum fisika yang saat itu sudah ada. Temuan fenomena fisika baru tersebut menantang para ilmuwan untuk membangun konsep dan teori-teori baru. Pada bab ini kita akan mempelajari sejauh mana keberlakuan fisika klasik apabila diterapkan pada benda-benda mikroskopis setingkat atomik dan sub atomik serta konsep dan teori baru apakah yang pada akhirnya dapat menjelaskan secara teoritis terhadap temuan fenomena fisika baru tersebut.

### Radiasi Benda Hitam

Hasil pekerjaan Maxwell dan Hertz telah menunjukkan kesimpulan bahwa cahaya, radiasi panas, dan gelombang radio seluruhnya adalah gelombang elektromagnetik yang berbeda hanya frekuensi dan panjang gelombangnya. Namun berikutnya para ilmuwan menemukan bahwa distribusi spektral radiasi dari rongga panas tidak dapat dijelaskan dengan menggunakan teori gelombang klasik.



Gb. Kiri menunjukkan idealisasi benda hitam sempurna, cahaya datang dengan membawa energi diserap seluruhnya oleh benda. Gb. Kanan menunjukkan grafik hubungan intensitas terhadap panjang gelombang untuk berbagai temperature permukaan benda

Max Planck telah memperkenalkan konsep kuantum energi dalam upayanya untuk mengoreksi persamaan distribusi spectral radiasi benda hitam. Menurut Planck osilator atomik yang berhubungan dengan radiasi benda hitam hanya dapat memiliki energi diskrit atau terkuantisasi, yang diungkapkan oleh

$$E = nhf \tag{1}$$

Dengan  $n$  adalah integer,  $h$  adalah konstanta Planck dan  $f$  adalah frekuensi alami osilator. Dengan menggunakan argument termodinamika umum Planck telah membuktikan bahwa  $u(f,T)$ , energi radiasi benda hitam persatuan volume dengan frekuensi antara  $f$  dan  $f+df$ , dapat dinyatakan sebagai perkalian dari jumlah oscillator persatuan volume dalam rentang frekuensi tersebut,  $N(f)df$ , dan energi rata-rata yang dipancarkan tiap oscillator  $E$ , maka

$$U(f,T) df = E N(f) df \tag{2}$$

Maka persamaan radiasi benda hitam menurut Planck adalah sebagai berikut

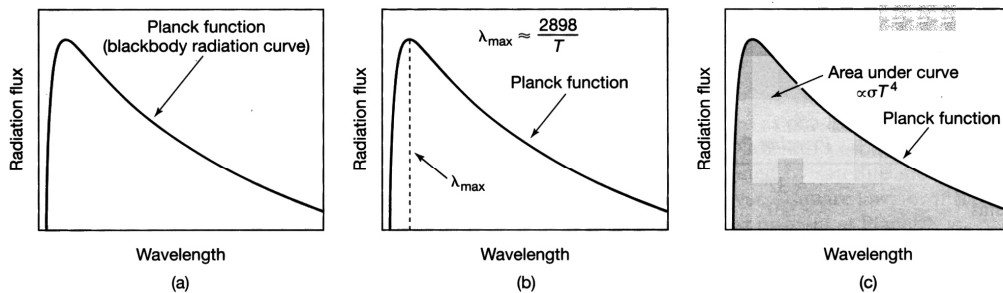
$$U(f,T) df = \frac{8\pi f^2}{c^3} \left( \frac{hf}{e^{hf/k_b T} - 1} \right) df \tag{3}$$

Dengan menggunakan persamaan tersebut Planck dapat menjelaskan secara teoritis Hukum Stefan Boltzmann yang diperoleh secara eksperimen

$$R = a\sigma T^4 \tag{4}$$

Dapat menjelaskan secara teoritis Hukum pergeseran Wien

$$\lambda_{\max} T = \text{konstan} \tag{5}$$



Gb.a. Kurva radiasi benda hitam atau fungsi Planck, b. Hukum Wien  
c. Hukum Stefan Boltzman yaitu sama dengan luas area dibawah kurva

**Contoh**

Perkirakanlah temperature permukaan matahari, bila daya persatuan luas (pada seluruh frekuensinya) dari matahari yang diukur di bumi ialah 1400 W untuk tiap meter persegi.

Jarak rata rata matahari bumi ialah  $1,5 \times 10^{11} m$  dan jari jari matahari ialah  $7 \times 10^8 m$  ,  
 asumsika matahari berupa benda hitam sempurna.

Solusi

Untuk benda hitam sempurna  $a = 1$  sehingga persamaan 4 menjadi  $e(R_s) = \sigma T^4$

Menurut hukum kekekalan energi bahwa energi yang dipancarkan matahari  $e(R_s)$  sama dengan energi yang diterima bumi  $e(R_b)$

$$e(R_s)4\pi R_s^2 = e(R_b)4\pi R_b^2$$

$$e(R_s) = e(R_b) \frac{R_b^2}{R_s^2} \quad \text{maka}$$

$$T = \left[ \frac{e(R_b)R_b^2}{\sigma R_s^2} \right]^{1/4} = \left[ \frac{(1400 W / m^2)(1,5 \times 10^{11} m)^2}{(5,67 \times 10^{-8} W / m^2 K^4)(7 \times 10^8 m)^2} \right]^{1/4} = 5800 K$$

Jadi temperature permukaan matahari diperkirakan 5800 K

### Latihan

1. Temperatur permukaan kulit kita ialah sekitar  $36 \text{ }^\circ C$ , berapakah panjang gelombang pada puncak radiasi yang dipancarkan dari kulit kita ?
2. a) Hitunglah daya radiasi total persatuan luas yang dipancarkan oleh filament tungsten yang temperaturnya 3000 K. (asumsi bahwa filament adalah ideal radiator). b) Jika filament Tungsten pada bola lampu daya rata ratanya 75 W, berapakah lus permukaan filament ?

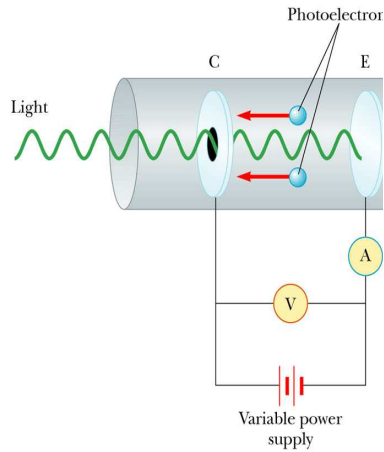
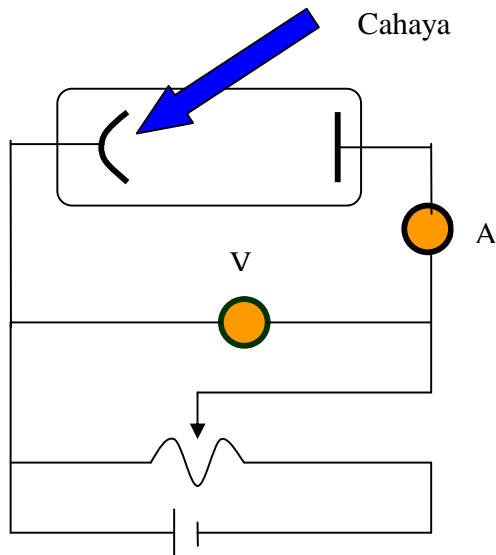
### Effek Photo Listrik

Planck mengkuantisasi energi dari osilator osilator atomic, tetapi Einstein mengembangkan konsep dari kuantisasi dari cahaya itu sendiri. Dalam pemikiran Einstein , cahaya yang frekuensinya  $f$  terdiri dari foton foton , tiap foton memiliki energi  $E = hf$  . Effek photo listrik adalah suatu proses dimana electron akan keluar dari permukaan logam ketika cahaya dengan frekuensi yang cukup tinggi datang pada permukaan logam tersebut. Fenomena efek foto listrik pertama kali ditemukan oleh Hertz ,yaitu bahwa permukaan logam yang bersih ketika disinari oleh cahaya ultra violet akan memancarkan partikel bermuatan listrik.

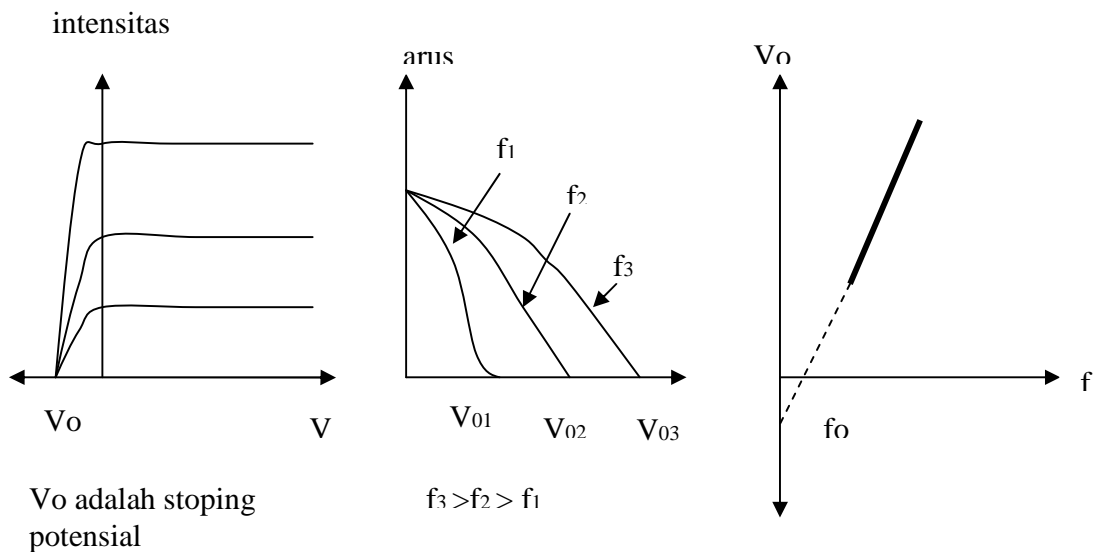


Hertz

Penelitian lebih mendalam tentang fenomena efek foto listrik dilakukan oleh Philip Lenar. Hasil percobaan efek photo listrik yang dilakukan oleh Philip Lenard(1902)



1. Energi kinetic rata rata electron foto tidak bergantung pada intensitas cahaya yang digunakan  $K = eV_0$ , dengan  $V_0$  adalah stopping potensial. Memperbesar intensitas hanya menyebabkan makin banyaknya electron foto yang dihasilkan atau arus yang terukur oleh amperemeter makin besar, namun energi kinetic elektronfoto tetap sama.
2. Energi kinetic electron foto akan makin besar bila frekuensi cahaya yang digunakan untuk menyinari permukaan logam bertambah besar
3. Tiap jenis logam memiliki cut off frekuensi (frekuensi ambang) yang berbeda beda, bila cahaya yang datang pada permukaan logam frekuensinya lebih kecil dari frekuensi ambangnya maka tidak akan terjadi efek foto listrik meskipun intensitas cahayanya cukup besar.



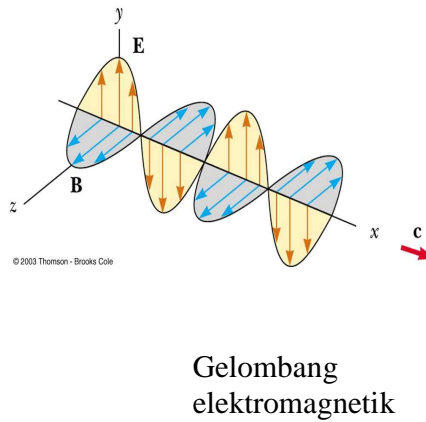
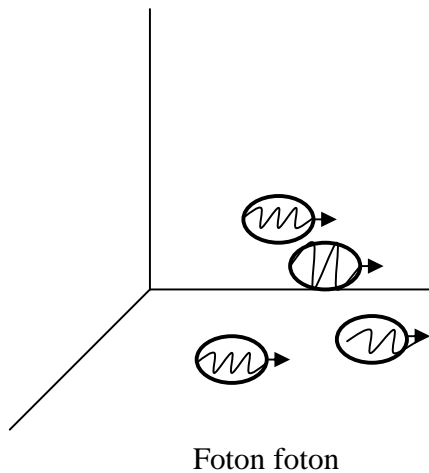
Fakta fakta eksperimen tersebut, tidak bisa dijelaskan secara benar dengan menggunakan fisika klasik (teori gelombang elektromagnetik), yaitu penjelasan teoritis tidak sesuai dengan fakta eksperimen, hal itu berarti ada keterbatasan kemampuan teori teori fisika klasik ketika diterapkan pada fenomena efek foto listrik.

Einstein (1905) mengemukakan teorinya untuk menjelaskan fenomena efek foto listrik, dia berasumsi bahwa pada peristiwa efek fotolistrik cahaya yang datang pada permukaan logam tidak berbentuk gelombang elektromagnetik, tetapi berbentuk partikel partikel yang disebut foton. Tiap foton bervibrasi dengan frekuensi  $f$  dan tiap foton memiliki energi  $E = nhf$ . Foton bergerak dengan kecepatan sama dengan cepat rambat cahaya dan memiliki momentum linier  $P = E/c$ .

Berbeda dengan gelombang elektromagnetik, ketika foton bergerak dalam ruang dia tidak menyebar namun tetap terkonsentrasi dalam paket paket kecil.



Alberth Einstein



Ketika foton foton jatuh pada permukaan logam, maka energi sebuah foton  $hf$  akan diserap oleh sebuah electron sehingga electron dapat loncat keluar dari permukaan logam. Jumlah energi yang diperlukan electron untuk loncat keluar logam atau untuk membebaskan diri dari energi ikat terhadap intinya disebut fungsi kerja (work function)  $W$ . Bila energinya masih ada sisa maka energi tersebut akan digunakan oleh electron foto untuk bergerak (energi kinetik  $K$ ) ke keping kolektor. Berdasarkan hukum kekekalan energi maka

$$hf = W + K_{\max}$$

6

dimana  $W$  adalah fungsi kerja dari logam,  $W = hf_0$ , sehingga

$$K_{\max} = h(f - f_0)$$

Yang menyatakan bahwa energi kinetic electron foto hanya bergantung pada frekuensi cahaya yang digunakan, dan sama sekali tidak bergantung pada intensitas cahaya (sesuai dengan fakta eksperimen).

Contoh

Tiga buah logam yaitu Lithium, Berilium dan Merkuri masing masing fungsi kerjanya 2,3eV; 3,9eV dan 4,5eV. Jika cahaya dengan panjang gelombang 300 nm dan intensitasnya  $100 \text{ Watt}/m^2$  disinarkan pada ketiga logam tersebut

- Logam mana yang akan terjadi efek photo listrik dan mana yang tidak
- Berapakah energi kinetik maksimum elektron foto pada logam yang terjadi EFL.
- Jika cahaya datang tersebut intensitasnya dinaikan menjadi  $300 \text{ Watt}/m^2$  sedangkan panjang gelombangnya sama, manakah logam yang akan terjadi efek foto listrik dan manakah yang tidak akan terjadi.
- Jika cahaya datang panjang gelombang diperkecil menjadi 200 nm sedangkan intensitasnya tetap, manakah logam yang akan terjadi EFL dan mana yang tidak.

- e. pada soal d tentukanlah stoping potensial masing elektron foto yang dipancarkan oleh logam yang terjadi EFL.

Jawab

1. a) Energi foton datang ialah

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ js})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{300 \times 10^{-9} \text{ m}} = 6,63 \times 10^{-19} \text{ J} = 4,1386 \text{ eV}$$

Energi foton datang ini ternyata lebih besar dari fungsi kerja logam litium dan berilium namun lebih kecil dari fungsi kerja logam merkuri maka akan terjadi EFL pada logam Lithium dan berilium sedangkan pada logam merkuri tidak terjadi EFL.

- b) Energi kinetik elektron foto pada Lithium

$$K = E - W_0 = 4,1386 \text{ eV} - 2,3 \text{ eV} = 1,8386 \text{ eV} \\ = 2,945 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

Energi kinetik elektron foto pada Berilium

$$K = E - W_0 = 4,1386 \text{ eV} - 3,9 \text{ eV} = 0,2386 \text{ eV}$$

- c) Intensitas cahaya tidak mempengaruhi terjadinya efek foto listrik, sehingga meskipun intensitas diperbesar dari intensitas semula tapi panjang gelombang foton datang tetap sama, maka EFL terjadi pada logam Berilium dan Lithium sedangkan pada logam Merkuri tetap tidak terjadi EFL.

- d) Energi foton datang yang yang panjang gelombangnya 200 nm ialah

$$E = \frac{hc}{\lambda} = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ js})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{200 \times 10^{-9} \text{ m}} = 9,945 \times 10^{-19} \text{ J} \\ = 6,2078 \text{ eV}$$

Energi foton datang ini lebih besar dari fungsi kerja ke tiga jenis logam ,maka EFL akan terjadi pada ketiga logam tersebut.

- e) Ketika logam disinari oleh foton yang panjang gelombangnya 200 nm maka stopping potensial ketiga jenis logam ialah

$$V_0 = \frac{E_{\text{foton}} - W_0}{e}$$

Stopping potensial logam Lithium

$$V_0 = \frac{6,2078 \text{ eV} - 2,3 \text{ eV}}{e} = 3,91 \text{ volt}$$

Stopping potensial logam Berilium

$$V_0 = \frac{6,2078 \text{ eV} - 3,9 \text{ eV}}{e} = 2,31 \text{ volt}$$

Stopping potensial logam merkuri

$$V_0 = \frac{6,2078 \text{ eV} - 4,5 \text{ eV}}{e} = 1,71 \text{ volt}$$

## Tugas

Kerjakanlah soal soal Latihan berikut

1. Tentukanlah energi photon yang frekuensinya  $5 \times 10^{14} \text{ Hz}$  dalam satuan electron volt.
2. Daya rata rata yang dihasilkan oleh matahari ialah  $3,74 \times 10^{26} \text{ W}$  . Dengan asumsi bahwa rata rata panjang gelombang yang dipancarkan matahari ialah 500 nm, tentukanlah jumlah photon yang dipancarkan matahari dalam satu detik.
3. Pada percobaan efek foto listrik, permukaan logam disinari cahaya yang panjang gelombangnya 250 nm, bila arus pada amperemeter menunjukkan nol ketika beda potensial perlambatannya 2,92 V, tentukanlah fungsi kerja dari material logam.
4. Molibdenum mempunyai fungsi kerja 4,2 eV, tentukanlah (a) panjang gelombang ambang dan frekuensi ambang untuk efek foto listrik. (b) tentukanlah stopping potensial jika logam disinari dengan cahaya yang panjang gelombangnya 200 nm
5. Cahaya dengan panjang gelombang 500 nm datang pada permukaan logam. Jika stopping potensialnya 0,45 V, tentukanlah (a) energi kinetik maksimum dari elektron foto, (b) fungsi kerja dan (c) cut off panjang gelombang

## Sinar- X

Keberhasilan teori foton yang dikemukakan Einstein dalam menjelaskan efek foto listrik ternyata dapat digunakan juga untuk menjelaskan bagaimana proses terjadinya sinar X yang jauh sebelumnya telah ditemukan oleh W Rontgen (1895).



Wilhelm Rontgen

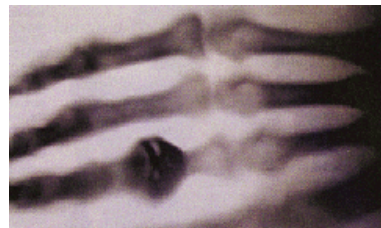


Photo sinar-x dari tangan

Ternyata bahwa proses terjadinya sinar X merupakan kebalikan dari fenomena efek foto listrik. Pada efek foto listrik, foton datang pada permukaan logam lalu dari permukaan logam dikeluarkan electron foto. X-rays dapat dijelaskan sebagai berikut : elektron energetik menumbuk permukaan logam ,dan dari permukaan logam dipancarkan sinar-x atau foton foton. Energi kinetik elektron diubah seluruhnya menjadi energi foton

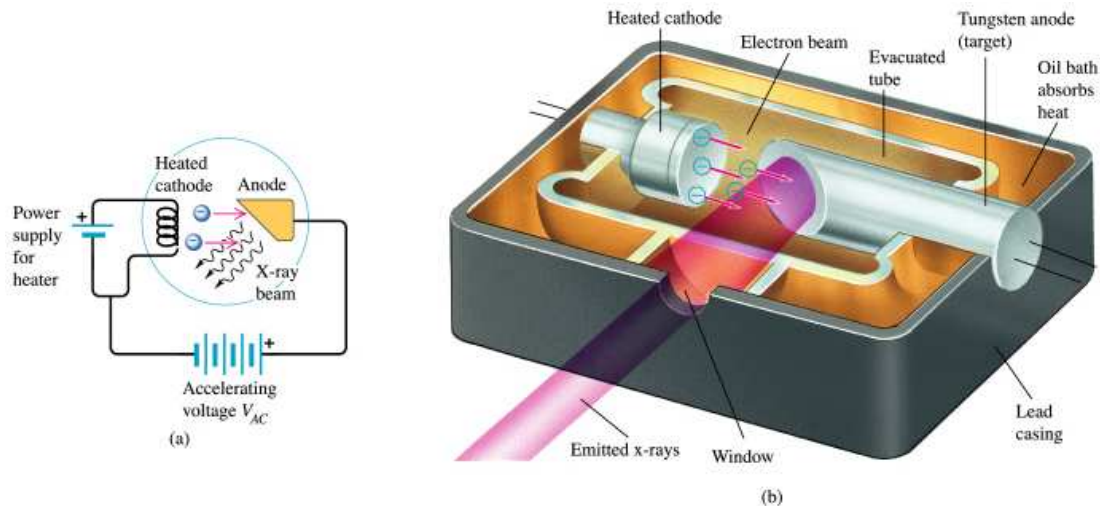


$$eV = hf = hc/\lambda_{\min}$$

$$\lambda_{\min} = \frac{hc}{eV} = \frac{1,24 \times 10^{-6} \text{ vm}}{V}$$

dengan V adalah beda potensial pemercepat

Panjang gelombang sinar x yang dipancarkan bermacam macam namun harganya tidak akan lebih kecil dari  $\lambda_{\min}$ .

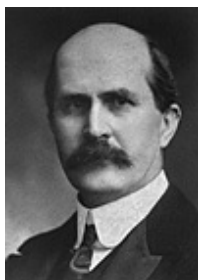


Copyright © Addison Wesley Longman, Inc.

### Gb. Lampu Rontgen

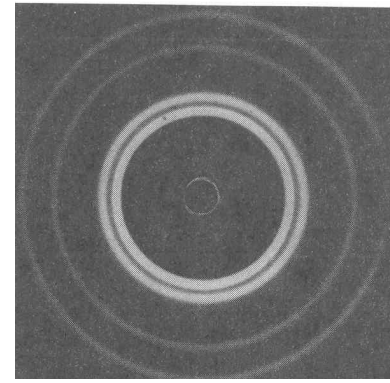
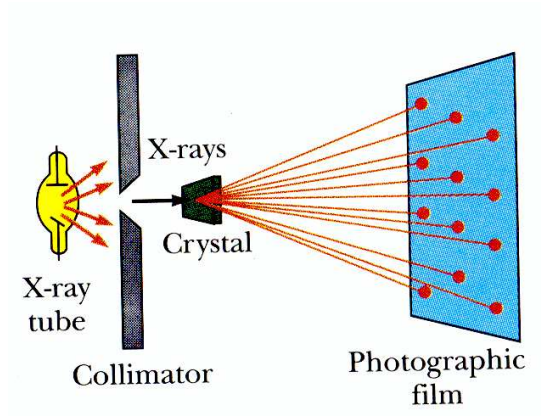
Spectrum sinar x berada pada daerah cahaya tidak tampak (invisible), dengan panjang gelombang sangat pendek (orde angstrom) atau memiliki frekuensi yang sangat tinggi, sehingga sinar x memiliki daya tembus tinggi. Bagaimanakah caranya supaya dapat mengukur panjang gelombang dari spectrum sinar x yang panjang gelombangnya sangat kecil tersebut ?.

Seorang ilmuwan bernama W.L.Bragg (1912) mengusulkan untuk menggunakan Kristal sebagai kisi untuk mendifraksikan sinar x.

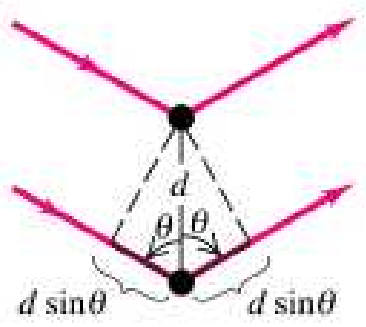
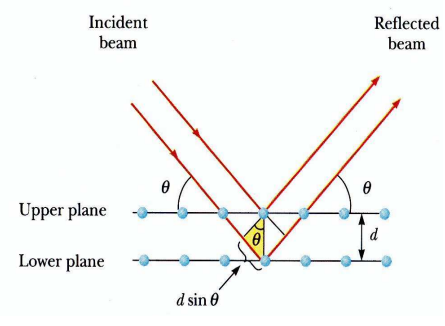
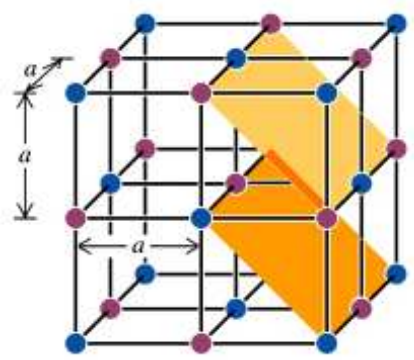


**William Bragg**  
(Quain Professor of  
Physics, UCL, 1915-  
1923)

Jarak antar atom yang berdekatan dalam Kristal dimanfaatkan sebagai lebar celah karena jaraknya hampir sama dengan panjang gelombang sinar x.



Pola Difraksi Sinar- x



Difraksi maksimum  

$$2d \sin \theta = m\lambda$$

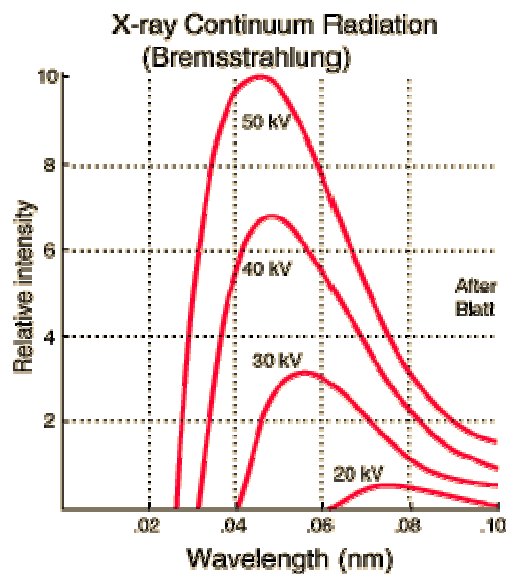
**Berdasarkan** persamaan difraksi Bragg tersebut panjang gelombang sinar x akan diketahui apabila jarak antar atom d kristalnya diketahui, sebaliknya bila sinar x panjang gelombangnya diketahui maka dapat digunakan untuk mengetahui struktur Kristal.

### Produksi Sinar-X

Munculnya sinar  $\gamma$  ketika permukaan logam ditembak oleh electron electron energetic secara mikroskopis dapat dijelaskan sebagai berikut:

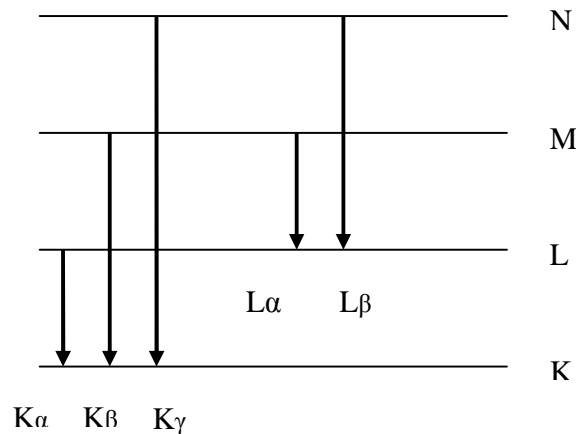
c. Efek Pengereman

Ketika electron cepat (energetic) masuk kedalam material logam, electron akan berinteraksi (bertumbukan ,bersinggungan) dengan atom atom penyusun material logam tersebut. Akibat interaksi tersebut kecepatan electron menjadi berkurang (seperti direm). Hal itu berarti ada energi kinetic electron yang hilang, energi kinetic yang hilang inilah yang muncul dalam bentuk sinar-x.



b. Eksitasi Transisi Atom Logam

Ketika atom atom logam bertumbukan dengan electron, electron akan menyerahkan sebagian atau seluruh energinya pada atom. Hal itu terjadi karena atom jauh lebih massif dibandingkan dengan electron. Energi yang diserap atom mengakibatkan electron electron dalam atom akan tereksitasi ke tingkat energi yang lebih tinggi. Elektron yang berada dalam keadaan eksitasi dengan segera bertransisi kembali. Pada saat electron bertransisi itulah dipancarkan foton berupa sinar-x.



Ketika electron bertransisi dari keadaan awal  $n_i$  ke keadaan akhir  $n_f$  maka akan dipancarkan sinar-x dengan frekuensi

$$f = cR(Z-1)^2 \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

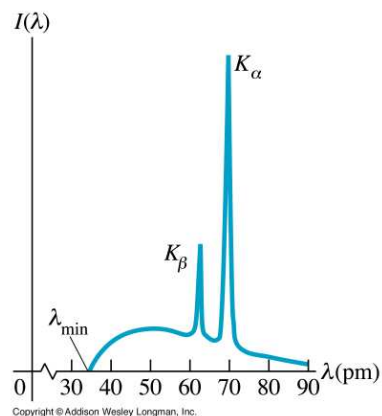
Frekuensi sinar-x  $K\alpha$  hasil dari transisi kulit L ( $n_i = 2$ ) ke kulit K ( $n_f = 1$ )

$$f = \frac{3}{4} cR(Z-1)^2$$

dengan  $Z$  ialah nomor atom logam target,  $R$  ialah konstanta Ridberg =  $1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  dan  $c$  ialah cepat rambat cahaya.

Energi sinar-x  $K\alpha$  ialah

$$E(K_\alpha) = 10,2 eV x (Z-1)^2$$



### Contoh

**1. Sinar x** yang panjang gelombangnya 0,64 Å digunakan untuk menyinari kristal. Jika sinar terhambur dideteksi pada sudut 45 derajat, tentukanlah jarak antar bidang Bragg dari kristal tersebut.

Jawab

$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

$$d = \frac{\lambda}{2 \sin \theta} = \frac{0,64 \text{ \AA}}{2 \sin 45} = 0,4525 \text{ \AA} = 0,045 \text{ nm}$$

2. Pada mesin sinar x beda potensial pemercepatnya diatur pada 50 KV, tentukanlah panjang gelombang minimum dari spectrum sinar x yang dipancarkan.

Jawab

$$\lambda_{\min} = \frac{1,24 \times 10^{-6} \text{ Vm}}{50.000 \text{ V}} = 2,48 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

3 Tentukanlah frekuensi dan panjang gelombang sinar-x  $K\alpha$ ,  $K\beta$ , apabila logam target pada mesin sinar x berupa logam Cu

Jawab

$$f = cR(Z-1)^2 \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

$K\alpha$  yaitu  $n_i = 2$  dan  $n_f = 1$

$$f_{\alpha} = (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})(1,097 \cdot 10^7 / \text{m})(29-1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 1,935 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$$

$$\lambda_{\alpha} = \frac{c}{f_{\alpha}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{1,935 \cdot 10^{18} \text{ Hz}} = 1,55 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

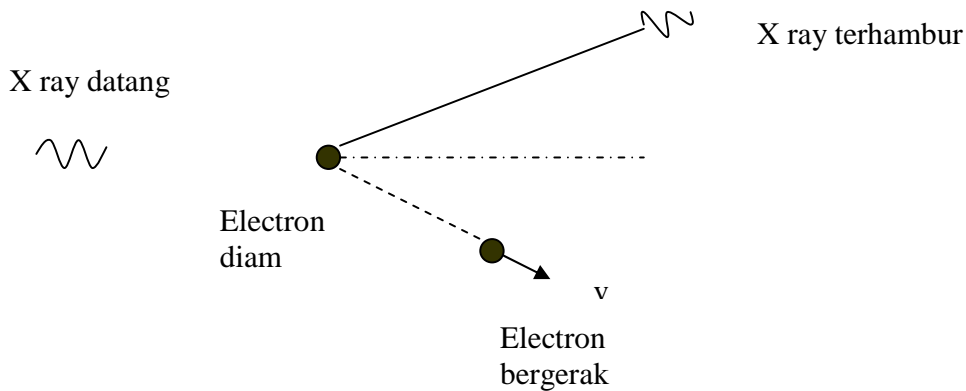
$K\beta$  yaitu  $n_i = 3$  dan  $n_f = 1$

$$f_{\beta} = (3 \cdot 10^8 \text{ m/s})(1,097 \cdot 10^7 / \text{m})(29-1)^2 \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 2,293 \cdot 10^{18} \text{ Hz}$$

$$\lambda_{\beta} = \frac{c}{f_{\beta}} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{2,293 \cdot 10^{18} \text{ Hz}} = 1,31 \cdot 10^{-10} \text{ m}$$

### Effek Compton

Meskipun pemikiran bahwa cahaya terdiri dari foton foton dengan energi hf telah dikemukakan pada tahun 1905, namun pemikiran bahwa foton foton itu juga membawa momentum belum bisa dibuktikan secara eksperimen hingga tahun 1923. Pada tahun 1923 ditemukan bahwa sinar-x dihamburkan oleh electron bebas dimana panjang gelombang sinar x hamburan lebih panjang dari sinar x sebelum berinteraksi dengan electron bebas tersebut, peristiwa tersebut dinamakan pergerseran Compton.



Gb. Hamburan Compton

Ketika sinar  $\gamma$  yang frekuensinya  $f$  dipandang sebagai partikel dengan energi  $hf$  dan momentum liniernya  $hf/c$ , maka persamaan pergeseran Compton dapat dihasilkan

$$\Delta\lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \theta) \quad 7$$

dimana  $m$  adalah massa electron dan  $\theta$  adalah sudut hamburan sinar-x. Persamaan tersebut dapat dijelaskan sebagai berikut :

Berdasarkan hukum kekekalan energi diperoleh

$$E + m_e c^2 = E' + E_e \quad 8$$

Dengan  $E$  ialah energi foton datang,  $m_e c^2$  adalah energi electron diam,  $E'$  adalah energi foton terhambur, dan  $E_e$  adalah energi total elektron relativistic setelah tumbukan. Berdasarkan hukum kekekalan momentum

$$\begin{aligned} p &= p' \cos \theta + p_e \cos \phi \\ p' \sin \theta &= p_e \sin \phi \end{aligned} \quad 9a \text{ dan } 9b$$

Dengan  $p$  adalah momentum foton datang,  $p'$  adalah momentum foton hamburan, dan  $p_e$  adalah momentum electron setelah tumbukan,  $\theta$  adalah sudut hamburan foton, dan  $\phi$  adalah sudut hamburan electron.

Dari persamaan 9a dan 9b eliminir sudut  $\phi$  maka diperoleh

$$p_e^2 = (p')^2 + p^2 - 2pp' \cos \theta \quad 10$$

Energi foton  $E = hf$  dan momentum foton  $p = hf/c$  masing masing substitusikan ke persamaan 8 dan 10 maka diperoleh

$$E_e = hf - hf' + m_e c^2 \quad 11$$

$$p_e^2 = \left(\frac{hf'}{c}\right)^2 + \left(\frac{hf}{c}\right)^2 - \frac{2h^2 ff'}{c^2} \cos \theta \quad 12$$

Energi total electron relativistic ialah

$$E_e^2 = p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4$$

Substitusi pers. 11 dan pers 12 kedalam persamaan 13 maka diperoleh

$$\Delta\lambda = \lambda' - \lambda_o = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos \theta)$$



Arthur Holly Compton

Keberhasilan teori foton dalam menjelaskan interaksi antara cahaya dan electron , secara tajam kontras dengan keberhasilan teori gelombang klasik dalam menjelaskan polarisasi, refleksi dan polarisasi dari cahaya. Hal tersebut tentu menimbulkan pertanyaan apakah cahaya itu gelombang atau partikel ? namun sekarang telah diterima bahwa cahaya dan partikel bersifat dualisme

Contoh

Photon yang awalnya memiliki energi 0,1 MeV mengalami hamburan Compton dan hamburannya dideteksi pada sudut 60 derajat terhadap arah gerak semula.

- Energi foton terhambur
- Energi kinetik recoil elektron
- Sudut hamburan elektron
- energi foton yang diserap elektron

Jawab

- Energi foton terhambur  
pergeseran panjang gelombang

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc} (1 - \cos \theta) = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ js}}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg} \cdot 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}} (1 - \cos 60)$$

$$= 1,2 \times 10^{-12} \text{ m}$$

Panjang gelombang foton datang yang energinya 0,1 MeV

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\lambda = \frac{hc}{E} = \frac{(6,63 \times 10^{-34} \text{ js})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{0,1 \times 10^6 \times 1,602 \cdot 10^{-19} \text{ j}} = 12,4157 \times 10^{-12} \text{ m}$$

Panjang gelombang foton terhambur

$$\lambda' = \lambda + 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 12,4157 \cdot 10^{-12} \text{ m} + 1,2 \cdot 10^{-12} \text{ m} = 13,6157 \times 10^{-12} \text{ m}$$

Energi foton terhambur ialah

$$E' = \frac{hc}{\lambda'} = \frac{(6,63 \cdot 10^{-34} \text{ js})(3 \cdot 10^8 \text{ m/s})}{13,6157 \cdot 10^{-12} \text{ m}}$$

$$= 1,4608 \cdot 10^{-14} \text{ Joule}$$

b) Energi recoiling elektron

$$E_f + m_e c^2 = E_e + E_f'$$

$$E_e = E_f + m_e c^2 - E_f' = 1,602 \cdot 10^{-14} \text{ J} + (9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(3 \cdot 10^8)^2 - 1,4608 \cdot 10^{-14} \text{ J}$$

$$= 8,33 \cdot 10^{-14} \text{ Joule}$$

c) sudut hamburan elektron

Momentum elektron terhambur

$$P_e^2 = \left(\frac{E_f'}{c}\right)^2 + \left(\frac{E_f}{c}\right)^2 - 2\left(\frac{E_f}{c}\right)\left(\frac{E_f'}{c}\right)\cos\theta$$

$$\left(\frac{1,4608 \cdot 10^{-14} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}\right)^2 + \left(\frac{1,602 \cdot 10^{-14} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}\right)^2 - 2\left(\frac{1,602 \cdot 10^{-14} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}\right)\left(\frac{1,4608 \cdot 10^{-14} \text{ J}}{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}\right)\cos 60$$

$$= 0,262238 \cdot 10^{-44}$$

$$P_e = 0,5121 \cdot 10^{-22} \text{ kgm/s}$$

Sudut hamburan elektron

$$\sin\phi = \frac{0,4809 \cdot 10^{-22}}{0,5121 \cdot 10^{-22}} = 0,951$$

$$\phi = 72^\circ$$

d) Energi foton yang diserap elektron

$$E_{\text{serap}} = E_e - m_e c^2 = 8,33 \cdot 10^{-14} \text{ J} - 8,19 \cdot 10^{-14} \text{ J} = 1,412 \cdot 10^{-15} \text{ J}$$

atau

$$E_{\text{serap}} = E_f' - E_f$$

Tugas

Kerjakanlah soal soal Latihan berikut

1. sinar x dengan energi 300 keV mengalami hamburan Compton oleh target. Jika sinar x terhambur dideteksi pada sudut 30 derajat dari arah sinar datang ,tentukanlah (a) pergeseran Compton, (b) energi berkas sinar x yang dihamburkan ,(c) energi recoiling electron.
2. Sinar-x dengan panjang gelombang 0,15 nm menumbuk electron diam , sinar-x terhambur dan hamburannya dideteksi pada sudut 45 derajat dari arah semula. Tentukanlah frekuensi sinar-x yang terhambur



## BAB 3

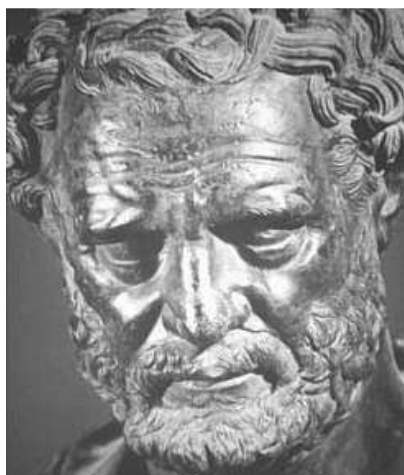
### STRUKTUR ATOM

#### Pendahuluan

**Pada** bab sebelumnya kita sudah membahas tentang dualisme gelombang partikel dari cahaya. Beberapa fenomena fisika tentang interaksi cahaya dengan materi tidak dapat dijelaskan secara teoritis dengan benar dengan menggunakan fisika klasik yaitu bahwa cahaya adalah gelombang elektromagnetik yang energinya kontinu. Upaya mencari penjelasan secara rasional tentang fenomena baru fisika tersebut telah melahirkan ide-ide yang revolusioner dari beberapa fisikawan. Ide Planck yang sangat brilian yaitu bahwa energi radiasi yang dipancarkan benda hitam merupakan kelipatan dari frekuensi osilator dikalikan konstanta adalah gagasan yang sama sekali baru yaitu kuantisasi energi. Ide kuantisasi energi ini telah dikembangkan oleh Einstein dalam upayanya menjelaskan secara teoritis tentang fenomena efek photo listrik dengan menganggap bahwa cahaya yang datang pada permukaan logam merupakan foton-foton (materi). Foton ini memiliki momentum linier. Selanjutnya Compton berhasil membuktikan secara eksperimen kebenaran pernyataan Einstein tentang eksistensi foton sebagai partikel (materi) yang memiliki momentum linier. Pada bab ini kita akan membahas apa sesungguhnya bahan penyusun dari materi/benda-benda. Akan dipelajari gagasan/pemikiran para ilmuwan tentang bagian terkecil dari benda dari mulai gagasan Democritus hingga model atom Niels Bohr.

#### **Democritus (460 BC)**

Material dalam mangkuk bila digerus secara terus menerus, maka akhirnya akan sampai pada suatu ukuran yang tidak bisa dipecah lagi yang disebut ATOMA



## John Dalton (1808)



Mengusulkan bahwa seluruh materi terbuat dari bola bola kecil yang dapat dipantulkan kesekitarnya dengan elastisitas sempurna dan bola bola kecil itu disebut ATOM

### Teori Atom Dalton

1. Seluruh materi terbuat dari partikel partikel kecil yang tidak dapat dibagi lagi yang disebut atom.
2. Atom atom dari unsur yang sama adalah identik(ukuran ,massa ,sifat kimia). Atom atom dari suatu unsur berbeda dengan atom atom dari unsur lain.
3. Atom atom dari unsur berbeda dapat bergabung satu sama lain membentuk senyawa dimana perbandingan jumlah atom relatif dari tiap unsur dalam senyawa yang terbentuk selalu sama dan angkanya sederhana.
4. Reaksi kimia terjadi ketika atom atom dalam keadaan terpisah bergabung atau hanya pengaturan kembali atom atom,namun atom dari suatu unsur tidak dapat berubah menjadi atom lainnya(atom tidak dapat diciptakan atau dimusnahkan) melalui reaksi kimia biasa.

Penentuan komposisi dari atom yang lebih modern dibangun oleh 4 eksperimen klasik sebagai berikut :

- Hukum elektrolisis Faraday

$$m = \frac{(q)(massamolar)}{(96500.C)(valensi)}$$

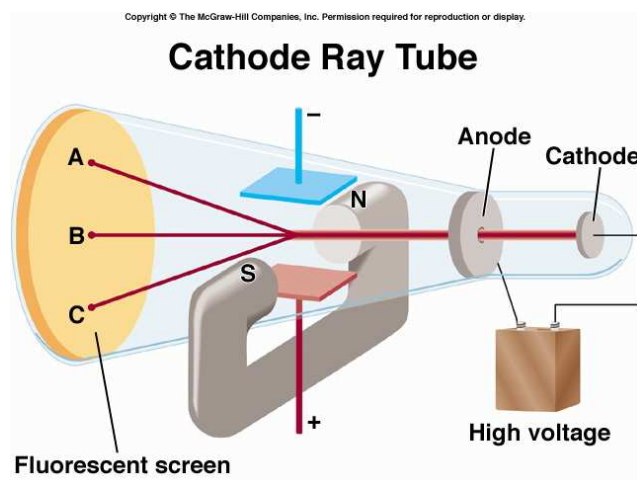
Hukum Faraday menunjukkan bahwa atom atom tersusun oleh muatan positif dan negative dan muatan atom selalu terdiri dari kelipatan beberapa unit muatan.

- J.J Thomson (1896)

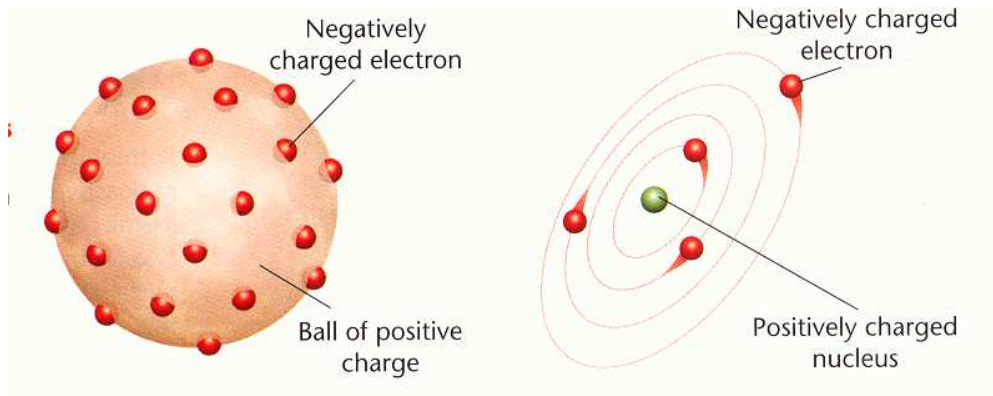


Menemukan bahwa atom atom  
sesekali dapat melepaskan partikel  
negatif yang jauh lebih kecil dari  
atom yang disebut  
ELEKTRON

Berdasarkan pengukuran rasio antara muatan electron terhadap massa electron untuk berbagai elemen , Thomson mengemukakan pemikirannya bahwa atom seperti bola materi bermuatan positif serbasama yang mengandung electron. Model atom yang dikemukakan Thomson dikenal dengan model atom Plum Puding

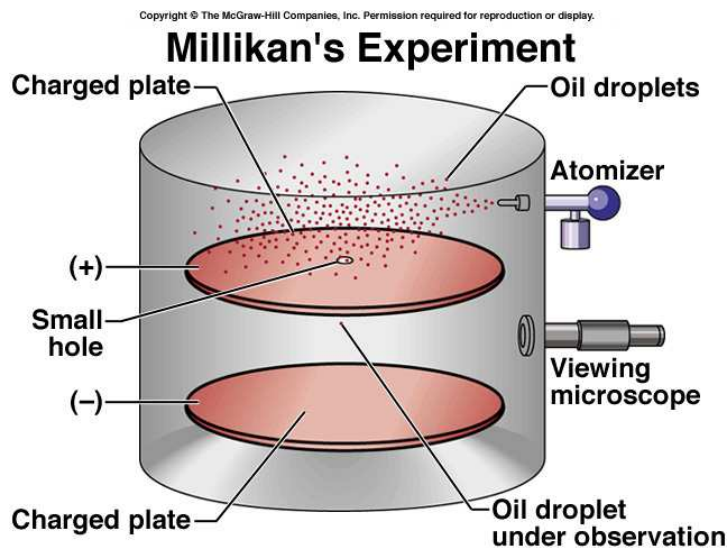


Eksperimen sinar Katoda  
oleh J.J.Thomson  
 $e/m = -1,76 \times 10^8 C / Kg$



Model atom Plum Puding dari J.J.Thomson

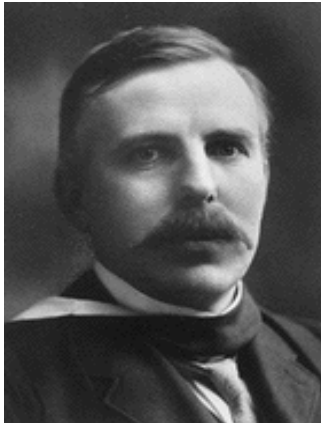
- Penentuan /pengukuran muatan electron oleh R.A.Millikan



R.A.Millikan

Dari eksperimen tersebut Millikan mendapatkan bahwa muatan electron ialah  $1,6 \times 10^{-19} C$  , dengan menggunakan hasil percobaan Thomson maka massa electron dapat ditentukan yaitu sebesar  $9,1 \times 10^{-31} Kg$

- Hamburan partikel alfa dari lempeng emas oleh Rutherford(1910).



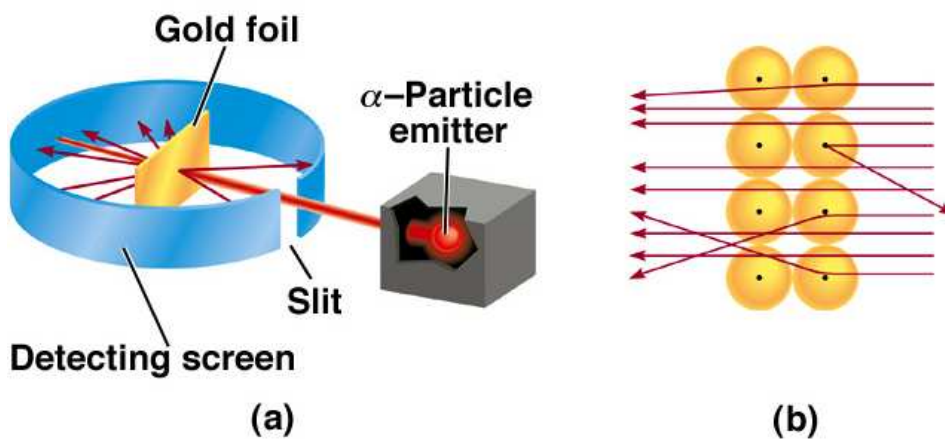
E.Rutherford

van  
sden

atom  
) pada  
ebalnya

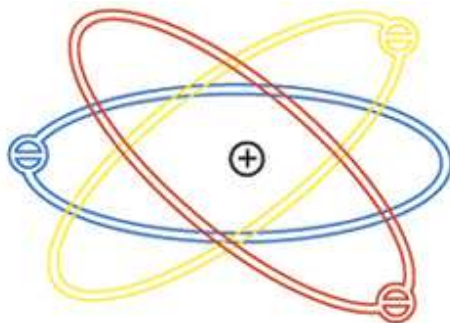
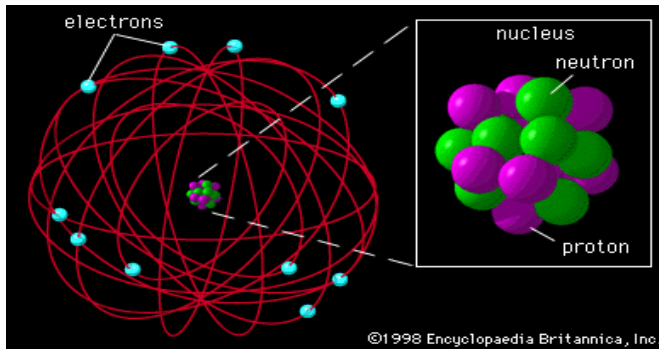
### PERCOBAAN HAMBURAN ALFA

1



Gb.a skema diagram percobaan dan Gb.b. analisis Rutherford

Dengan mengukur rata rata partikel alfa yang dihamburkan pada sudut  $\theta$  , Rutherford telah dapat menjelaskan bahwa sebagian besar massa atom dan seluruh muatan positif dari atom(disebut inti atom ) terkonsentrasi di tengah tengah dari atom yang jari jarinya sekitar  $10^{-14}$ m . Rutherford mengemukakan pemikirannya tentang atom yang dikenal dengan model tata surya yaitu bahwa atom terdiri dari inti dan electron elektronnya bergerak mengelilingi inti dengan lintasan melingkar pada jarak yang cukup jauh dari inti (lihat ilustrasi pada gambar berikut)



Model atom tata surya (solar sel) dari Rutherford

Model atom yang dikemukakan Rutherford mengandung beberapa kelemahan dimana kajian teoritis yang dihasilkan tidak sesuai dengan fakta eksperimen, seperti eksperimen yang dilakukan oleh Balmer dan kawan-kawan yang menyimpulkan bahwa spectrum atom itu diskrit.

#### Pengukuran Spektrum Atom Hidrogen

Dengan menggunakan alat spectrometer Balmer dan kawan-kawan melakukan pengukuran spectrum yang dipancarkan atom Hidrogen. Balmer mengukur spectrum pada daerah cahaya tampak sedangkan Lyman mengukur spectrum atom Hidrogen pada daerah ultraviolet. Tiga orang lainnya yaitu Paschen, Brackett dan Pfund mengukur spectrum atom hydrogen pada daerah inframerah (IR) dan far infra red (FIR). Contoh spectrum atom Hidrogen dan spectrum atom Hg pada daerah cahaya tampak dapat dilihat pada gambar berikut ini. Harga harga panjang gelombang spectrum atom Hidrogen tersebut baik pada daerah cahaya tampak maupun lainnya menunjukkan adanya keteraturan, sehingga dapat dibentuk formulasi matematis sebagai berikut:

#### Rumus Balmer

$$\lambda(cm) = C_2 \left( \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \right) \text{ dengan } n = 3, 4, 5 \dots$$

$C_2 = 3645,6 \times 10^{-8}$  cm adalah konstanta yang disebut batas konvergensi

Spektrum pada daerah lainnya bentuk formulasi matematisnya diusulkan Balmer sebagai berikut

$$\lambda(cm) = C_3 \left( \frac{n^2}{n^2 - 3^2} \right) \text{ dengan } n = 4, 5, 6 \dots$$

$$\lambda(cm) = C_4 \left( \frac{n^2}{n^2 - 4^2} \right) \text{ dengan } n = 5, 6, 7 \dots$$

Sebagaimana kita ketahui sekarang prediksi Bohr tersebut benar, dan sekarang notasi seluruh deret tersebut dinyatakan oleh persamaan tunggal

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

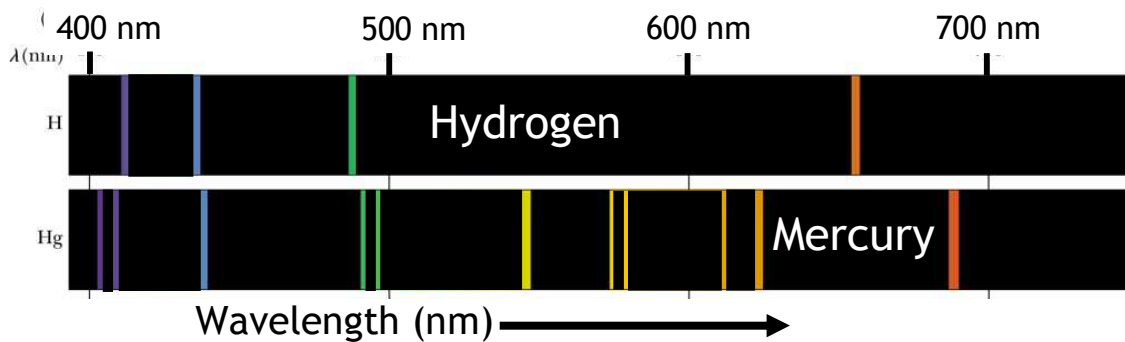
Deret Lyman  $n_f = 1$  dan  $n_i = 2, 3, 4, 5, \dots$

Deret Balmer  $n_f = 2$  dan  $n_i = 3, 4, 5, \dots$

Deret Paschen  $n_f = 3$  dan  $n_i = 4, 5, 6, \dots$

Deret Brackett  $n_f = 4$  dan  $n_i = 5, 6, 7, \dots$

Deret Pfund  $n_f = 5$  dan  $n_i = 6, 7, 8, \dots$



**Kelemahan Model Atom Rutherford.**

Menurut teori gelombang elektromagnetik bahwa setiap partikel bermuatan yang bergerak akan memancarkan energy dalam bentuk radiasi elektromagnetik. Elektron pada atom menurut Rutherford bergerak mengelilingi inti dibawah pengaruh medan listrik yang ditimbulkan inti. Pada setiap saat electron akan kehilangan energinya dan pada saat yang bersamaan pada electron bekerja gaya tarik Coulomb yang arahnya menuju inti. Sehingga lintasan electron makin lama makin kecil dan akhirnya akan jatuh ke inti. Pada kenyataannya tidak ada electron dalam atom yang jatuh keinti. Rutherford tidak bisa menjelaskan apa yang mencegah sehingga electron dalam atom tidak jatuh ke inti. Hal lainnya seandainya lintasan electron itu makin mengecil maka seharusnya atom akan memancarkan spectrum kontinyu. Hasil percobaan Balmer dkk menyimpulkan bahwa spectrum atom adalah diskrit

### **Model Atom Niels Bohr**

Penjelasan gerak electron didalam atom dan penjelasan spectrum garis yang dipancarkan atom dikemukakan oleh Bohr.



Niels Bohr

Bohr memperbaiki gagasan Rutherford dengan menambahkan bahwa elektron elektron berada pada orbit orbitnya. Seperti planet planet mengorbit matahari. Dimana tiap orbit hanya mungkin diisi oleh sejumlah elektron.

Teori Bohr sebagian didasarkan pada mekanika klasik dan sebagian lagi pada pemikiran baru yaitu kuantum. Teori Bohr dinyatakan dalam bentuk postulat sebagai berikut :

- Elektron electron bergerak disekitar inti dalam orbit orbit melingkar yang ditentukan oleh hukum Coulomb dan hukum Newton.
- Hanya orbit tertentu yang stabil. Elektron electron tidak memancarkan energi elektromagnetik dalam orbit ini, dan karena energi konstan terhadap waktu maka ini disebut keadaan stasioner.
- Spektrum garis dengan frekuensi  $f$  dipancarkan ketika electron loncat dari orbit mula mula dengan energi  $E_i$  ke orbit akhir dengan energi  $E_f$  dimana
$$hf = E_i - E_f$$
- Ukuran kesetabilan orbit electron ditentukan oleh momentum angular electron sama dengan kelipatan integral dari  $h$ 
$$m_e v r = n \hbar \quad \text{dengan } n = 1, 2, 3, \dots$$

### Penerapan postulat Bohr pada kasus atom Hidrogen

**Atom** Hidrogen adalah atom yang paling sederhana dimana inti terdiri dari satu proton dan satu electron bergerak mengelilingi inti. Antara electron dan proton terjadi interaksi tarik menarik berupa gaya tarik Coulomb. Energi total electron tersebut ialah

**$E = \text{Energi kinetik} + \text{Energi potensial}$**

$$E = \frac{1}{2} m v^2 - k \frac{e^2}{r}$$

Pada saat electron bergerak mengelilingi inti maka gaya Coulomb sama dengan gaya sentripetal

$$\frac{k e^2}{r^2} = \frac{m v^2}{r}$$

Dari persamaan tersebut dapat dicari energi kinetic electron yaitu

$$\frac{1}{2} m v^2 = \frac{k e^2}{2 r}$$

Maka Energi total electron pada atom hydrogen ialah



$$E = -\frac{ke^2}{2r}$$

Berdasarkan postulat Bohr yang ke empat, kecepatan linier elektron ialah

$$v = \frac{nh}{2\pi mr}$$

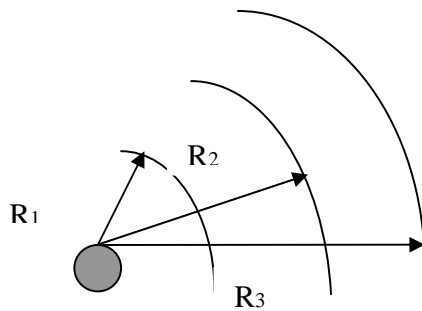
Substitusikan ke persamaan      maka diperoleh

$$\frac{1}{2} m \left( \frac{nh}{2\pi mr} \right)^2 = \frac{ke^2}{2r}$$

Atau

$$r_n = \frac{n^2 h^2}{4\pi^2 m k e^2} = 0,5292 A^\circ n^2 = a_0 n^2$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa radius orbit elektron pada atom hidrogen terkuantisasi, dengan  $a_0$  adalah jari jari Bohr 0,5292 Angstrum



Kecepatan linier elektron pada lintasan ke n ialah

$$v_n = \frac{1}{n} \frac{h}{2\pi m a_0}$$

Energi total elektron yang berada pada lintasan ke n ialah

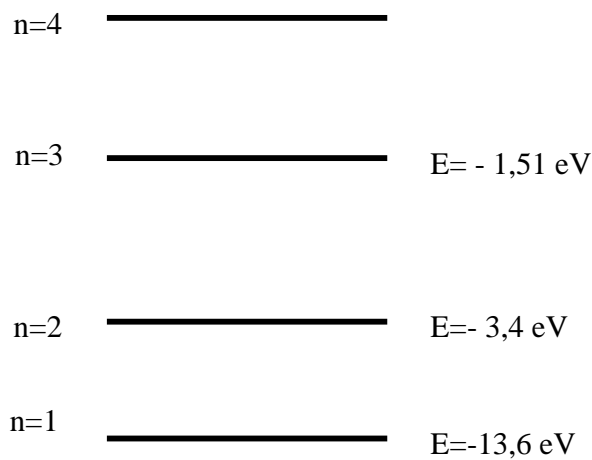
$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{ke^2}{2a_0} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2}$$

Persamaan tersebut menyatakan bahwa energi total elektron pada atom hidrogen terkuantisasi atau energinya bertingkat tingkat.

$$E_1 = -13,6 \text{ eV}$$

$$E_2 = -3,4 \text{ eV}$$

$$E_3 = -1,51 \text{ eV}$$



Gb. Tingkat tingkat energi

Berdasarkan postulat ke tiga yaitu atom akan memancarkan energi apabila ada elektron loncat (bertransisi) dari tingkat energi tinggi ke tingkat energi yang lebih rendah, besar energi yang dipancarkan ialah

$$\Delta E = E_i - E_f$$

Frekuensi radiasi gelombang elektromagnetik yang dipancarkan ialah

$$f = \frac{E_i - E_f}{h}$$

Energi total elektron di masing masing tingkat ialah

$$E_i = -\frac{1}{n_i^2} \frac{ke^2}{2a_0} \quad \text{dan} \quad E_f = -\frac{1}{n_f^2} \frac{ke^2}{2a_0}$$

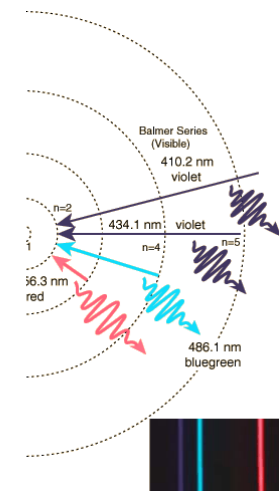
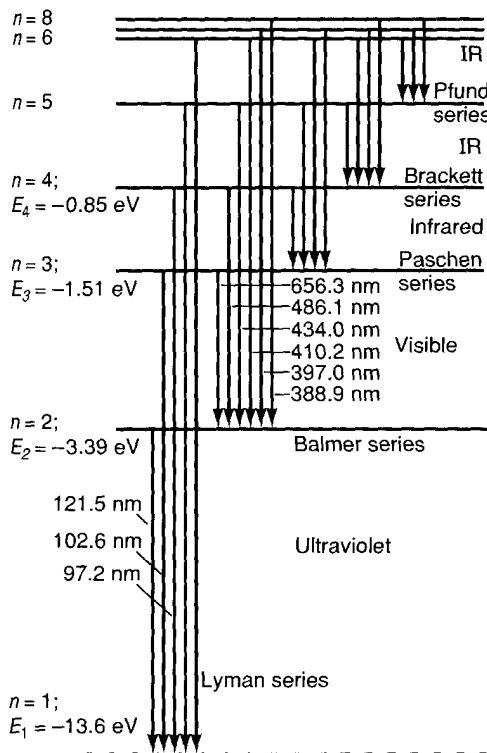
Maka

$$f = \frac{ke^2}{2a_0 h} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Atau

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{ke^2}{2ca_0 h} \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

Dengan  $R = 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$  yang disebut konstanta Rydberg Spektrum diskrit atom Hidrogen yang diukur oleh Balmer dan kawan kawan berdasarkan model atom Bohr dapat dijelaskan sebagai berikut

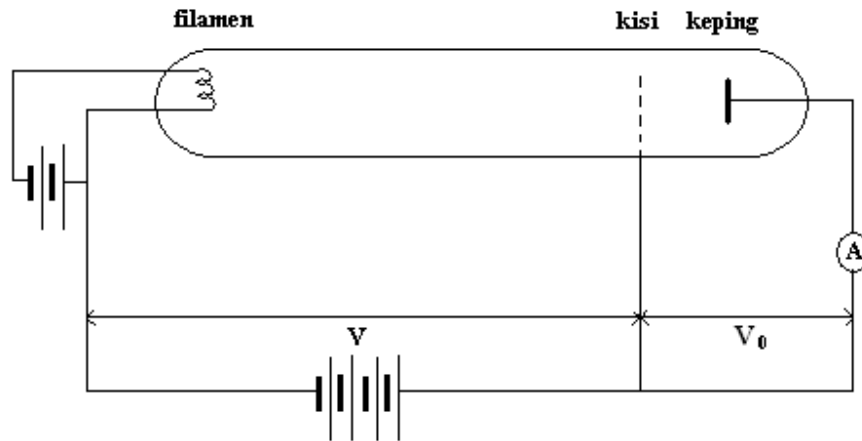


- *Eksperimen Franck – Hertz*

Model atom Niels Bohr menyatakan bahwa electron dalam atom berada pada tingkat-tingkat energy dimana energy tiap tingkatannya ialah  $E_n = -13.6\text{eV}/n^2$ . Spektrum yang dipancarkan suatu atom misalnya spectrum atom Hidrogen adalah sebagai hasil dari loncatan electron dari suatu tingkat energy ke tingkat energy dibawahnya. Apakah benar bahwa electron dalam atom berada pada tingkat-tingkat energy tertentu ?. Tentu hal itu baru diketahui kebenarannya apabila berhasil ditunjukkan melalui suatu eksperimen. Sederetan eksperimen yang berdasarkan kepada tumbukan dilakukan oleh Frank – Hertz yang dimulai pada tahun 1914. Eksperimen ini menunjukkan secara langsung bahwa tingkat energi atomik memang ada dan tingkat-tingkat itu sama dengan tingkat-tingkat yang terdapat pada spektrum garis.

Frank – Hertz menembaki uap berbagai unsur dengan elektron yang energi kinetiknya diketahui dengan memakai alat yang terlihat pada gambar dibawah ini. perbedaan potensial kecil  $V_0$  dipasang diantara kisi keping dan pengumpul, sehingga setiap elektron yang mempunyai energi lebih besar dari harga maksimum tertentu

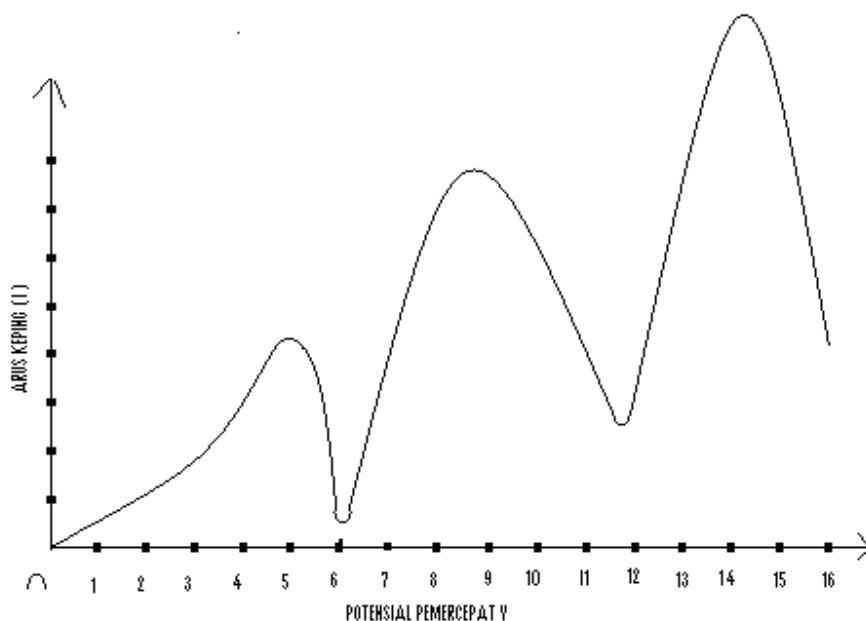
memberi kontribusi pada arus  $I$  yang melalui amperemeter. Ketika potensial pemercepat  $V$  bertambah maka elektron yang datang pada keping bertambah banyak dan arus  $I$  naik.



**Alat untuk eksperimen Frank - Hertz**

Pada percobaannya Franck dan Hertz mengisi tabungnya dengan uap raksa, sehingga ketika electron dari filament bergerak dipercepat menuju keping pengumpul terdapat peluang untuk bertumbukan. Karena atom Hg jauh lebih masiv dari electron maka ketika terjadi tumbukan ,tumbuhannya kan terjadi secara tak lenting. Elektron akan menyerahkan sebagian atau seluruh energinya pada atom. Ketika atom menyerap energy dari electron maka energy yang diserap tersebut digunakan untuk mengeksitasi electron dalam atom tersebut kekeadaan eksitasi. Menurut Bohr energy electron dalam atom itu terkuantisasi maka seharusnya atom hanya menyerap energy electron pada saat bertumbukan yang besarnya tertentu saja .

Pada percobaan tersebut energy kinetic electron eV dapat divariasikan dengan cara memvariasikan beda potensial antara katoda dan grid. Untuk setiap harga energy kinetic electron dicatat berapa arus yang terbaca pada amperemeter, kemmudian data pengukuran di plot kedalam grafik hubungan antara arus listrik  $I$  dengan beda potensial atau energy kinetiknya. Grafiknya dalah sebagai berikut



Energi kinetik elektron pada saat arusnya berharga maksimum menunjukkan besar energi yang diserap oleh atom. Bagaimana kita tahu hal tersebut ? yaitu dari besar arus yang menurun secara tajam, yang menunjukkan banyak elektron yang tidak sampai ke keping kolektor karena elektron itu sudah kehilangan energinya. Pada percobaan yang dilakukan Franck Hertz, berhasil ditunjukkan bahwa energi elektron yang diserap oleh atom Hg ialah 4,9 eV : 9,8 eV dan 14,7 eV. Hal itu menunjukkan bahwa elektron dalam atom Hg menempati tingkat-tingkat energi tersebut. Berdasarkan fakta eksperimen tersebut maka disimpulkan bahwa apa yang dinyatakan oleh Franck dan Hertz dalam model atomnya adalah benar.

### **Kuantisasi Panjang Orbit Elektron**

Model atom Bohr dalam dipublikasikan tahun 1913 yaitu sepuluh tahun sebelum de Broglie memperkenalkan konsep gelombang materi, namun terdapat kesesuaian yang luar biasa ketika diterapkan pada kasus penentuan panjang lintasan elektron dalam atom.

Marilah kita mulai dengan memeriksa perilaku elektron dalam orbit sekitar inti atom hidrogen. Panjang gelombang de Broglie untuk elektron yang bergerak pada orbit ke  $n$  ialah

$$\lambda = \frac{h}{mv_n}$$

Dengan  $v_n$  menyatakan kecepatan linier elektron pada orbit ke  $n$  yaitu

$$v_n = \frac{e}{\sqrt{4\pi\epsilon_0 m r_n}}$$

Jadi

### Panjang gelombang elektron orbital

$$\lambda = \frac{h}{e} \sqrt{\frac{4\pi\epsilon_0 r_n}{m}}$$

Dengan  $r_n$  adalah jari jari orbit ke  $n$  yaitu  $r_n = n^2 \times 0,529 \text{ \AA}$  ,untuk  $n = 1$  (jari jari orbit pertama atau kulit K ) maka jari jarinya ialah  $5,3 \times 10^{-11} \text{ m}$  . Panjang gelombang de Broglie untuk electron yang berada pada  $n = 1$  ialah

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s}}{1,6 \times 10^{-19} \text{ C}} \sqrt{\frac{4\pi(8,85 \times 10^{-12} \text{ F/m})(5,3 \times 10^{-11} \text{ m})}{9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}}} = 33 \times 10^{-11} \text{ m}$$

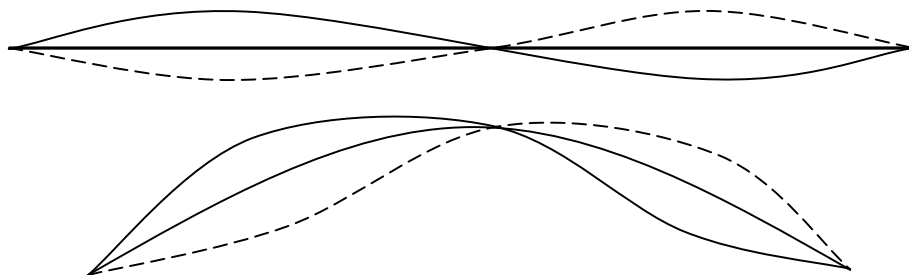
Berapakah keliling orbit electron pada  $n = 1$  ? Panjang lintas edar atau keliling electron pada orbit ke  $n = 1$  atau pada kulit K ialah

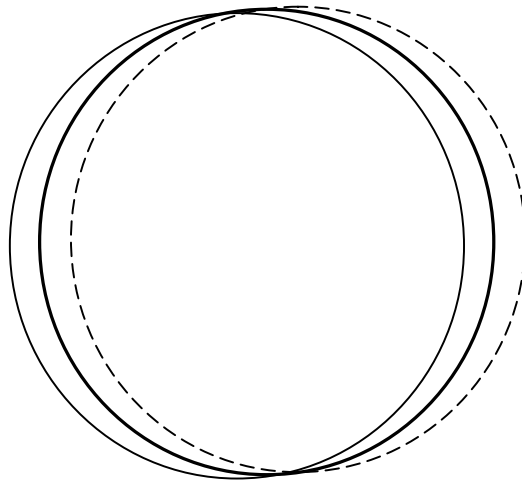
$$2\pi r = 33 \times 10^{-11} \text{ m}$$

Jadi untuk electron yang berada pada keadaan  $n = 1$  ,panjang gelombang de Broglienya sama dengan keliling orbitnya. Untuk electron yang berada pada keadaan  $n = 2$  (kulit L), jari jarinya ialah  $r_2 = 2,116 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Panjang gelombang de Broglienya ialah  $\lambda = 6,644 \times 10^{-10} \text{ m}$ . Bila kita hitung keliling orbit electron pada keadaan  $n = 2$  ialah  $13,288 \times 10^{-10} \text{ m}$  . Berdasarkan hasil perhitungan tersebut ternyata keliling orbit electron pada  $n = 2$  sama dengan 2 kali panjang gelombangnya. Dengan demikian dapat disimpulkan bahwa

“keliling orbit electron sama dengan kelipatan dari panjang gelombang de Broglienya”

$$2\pi r_n = n\lambda$$





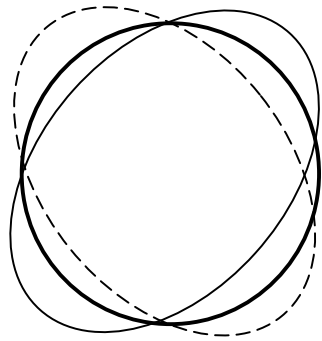
Gambar 4.17

Orbit elektron dalam atom hidrogen sesuai dengan satu gelombang elektron yang titik ujung-pangkalnya dihubungkan

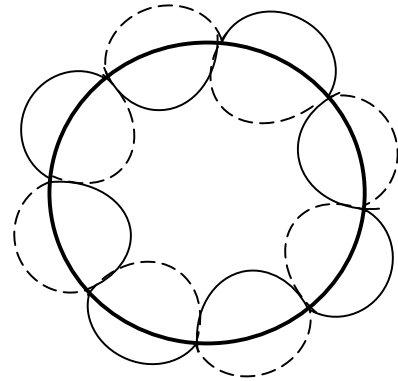
Kenyataan bahwa orbit elektron dalam atom hidrogen ialah satu panjang gelombang elektron merupakan petunjuk yang diperlukan untuk membangun teori alam. Jika kita tinjau vibrasi (getaran) sebuah sosok kawat (Gambar 4.18), kita dapatkan bahwa kelilingnya tepat sama dengan bilangan bulat kali panjang gelombang, sehingga setiap gelombang tersambung secara malar dengan gelombang berikutnya. Jika kawatnya elastic sempurna vibrasi gelombang ini akan berlangsung terus-menerus. Mengapa hanya vibrasi seperti itu yang mungkin terjadi dalam sosok kawat? Jika bilangan pecahan kali panjang gelombang terdapat dalam sosok itu seperti dalam Gambar 4.19, interferensi destruktif akan terjadi ketika gelombang menjalar ke sekeliling sosok itu, dan vibrasinya akan mati dengan cepat.

- *Gelombang berdiri dalam atom*

Dengan menganggap perilaku gelombang elektron dalam atom hidrogen serupa dengan vibrasi sosok kawat, kita dapat mengambil **postulat bahwa sebuah elektron dapat mengelilingi inti hanya dalam orbit yang mengandung bilangan bulat kali panjang gelombang de Broglie.**



Keliling = 2 panjang gelombang  
gelombang



Keliling = 4 panjang  
gelombang

Gambar .Kuantisasi panjang orbit elektron

Postulat ini menggabungkan sifat gelombang dan sifat partikel elektron dalam satu pertanyaan tunggal, karena panjang gelombang elektronnya diturunkan dari kecepatan orbital yang diperlukan untuk mengimbangi tarikan inti. Walaupun kita tidak pernah mampu untuk mengamati sifat yang antithesis ini secara serentak, sifat itu tak dapat dipisahkan secara alamiah.

Menurut postulat Bohr ke tiga bahwa electron berada pada orbit yang momentum sudut elektronnya merupakan kelipatan dari konstanta Planck dibagi  $2\pi$

$$L_n = n\hbar \quad \text{dengan } \hbar = h/2\pi$$

$$mvr = nh/2\pi$$

$$2\pi r_n = nh/mv = nh/p = n\lambda$$

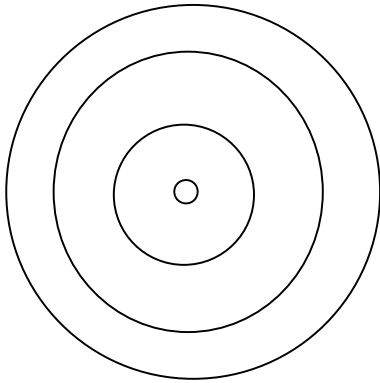
Ternyata menghasilkan formulasi yang sama

Model atom Bohr masih mengandung beberapa kelemahan yaitu:

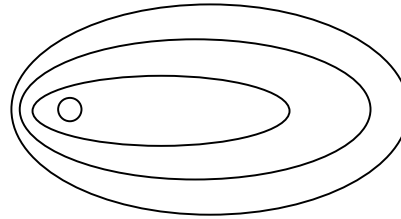
1. Hanya akurat bila diterapkan pada kasus atom berelektron tunggal atau atom yang menyerupai atom hidrogen (hydrogen like), namun tidak akurat bila diterapkan pada sistim (atom )berelektron banyak.
2. Prediksi Bohr, bahwa ketika elektron loncat dari suatu tingkat energi ke tingkat energi dibawahnya akan dipancarkan gelombang elektromagnetik dengan panjang gelombang tunggal (1 garis tunggal) ternyata berdasarkan pengamatan spektroskopi tidak berupa garis tunggal tetapi berupa dua buah garis yang



- letaknya sangat berdekatan namun masih bisa dipisahkan (dua garis yang panjang gelombangnya berbeda sedikit )
3. Lintas edar elektron dalam atom yang menurut Bohr berupa lingkaran ,ternyata berbentuk ellips seperti dinyatakan oleh Sommerfeld



Bohr



Sommerfeld

#### Contoh

1. Elektron pada atom Hidrogen diketahui berada pada keadaan  $n = 2$  (eksitasi pertama) Tentukanlah (a). Jari jari lintasan elektron ,(b).Kecepatan linier elektron pada lintasannya, (c).Energi total elektron, (d).momentum sudut elektron.

Jawab

- a) jari jari lintasan elektron

$$r_n = 0,52928 A^o n^2 = 0,5292 x 2^2 A = 2,116 A$$

- b) Kecepatan linier elektron

$$v_n = \frac{1}{n} \frac{h}{2\pi m a_0} = \frac{1}{2} \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \text{ js}}{2 \cdot 3,14 \cdot (9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}) \cdot 0,5292 \cdot 10^{-10} \text{ m}}$$

$$= 1,096 x 10^6 \text{ m/s}$$

- c) Energi total elektron

$$E_n = -\frac{13,6 \text{ eV}}{n^2} = -\frac{13,6 \text{ eV}}{2^2} = -3,4 \text{ eV}$$

Atau

$$E_n = -\frac{1}{n^2} \frac{k e^2}{2 a_0} = -\frac{1}{2^2} \frac{8,988 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2 \cdot (1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{2 \cdot 0,5292 \cdot 10^{-10} \text{ m}}$$

$$= -5,4485 \cdot 10^{-19} \text{ Joule}$$

$$= -3,4 \text{ eV}$$

- d) Momentum sudut elektron

$$L_n = mv_n r_n$$

$$L_2 = mv_2 r_2 = (9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})(1,096 \cdot 10^6 \text{ m/s})(2,116 \cdot 10^{-10} \text{ m}) \\ = 2,1104 \cdot 10^{-34} \text{ kgm}^2 / \text{s}$$

Atau

$$L_n = n\hbar$$

$$L_2 = 2 \cdot 1,055 \cdot 10^{-34} \text{ js} = 2,11 \cdot 10^{-34} \text{ kgm}^2 / \text{s}$$

Contoh

2. Tentukanlah panjang gelombang terbesar pada spektrum atom hidrogen untuk deret (a).Lyman , (b).Balmer, (c).Paschen.

Jawab

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right)$$

- a) Panjang gelombang terbesar pada deret Lyman diperoleh ketika  $n_i = 2$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \left( \frac{1}{1^2} - \frac{1}{2^2} \right) = 8,227 \cdot 10^6 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 1,2155 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

- b) Panjang gelombang terbesar pada deret Balmer diperoleh ketika  $n_i = 3$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \left( \frac{1}{2^2} - \frac{1}{3^2} \right) = 0,15236 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 6,5634 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

- c) Panjang gelombang terbesar pada deret Paschen diperoleh ketika  $n_i = 4$

$$\frac{1}{\lambda} = R \left( \frac{1}{n_f^2} - \frac{1}{n_i^2} \right) = 1,097 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1} \left( \frac{1}{3^2} - \frac{1}{4^2} \right) = 0,0533 \cdot 10^7 \text{ m}^{-1}$$

$$\lambda = 18,76 \cdot 10^{-7} \text{ m}$$

TUGAS

Kerjakan latihan soal soal berikut ini

- Elektron pada atom hidrogen berada pada keadaan eksitasi ke 2 ( $n = 3$ ). (a).Foton dengan frekuensi berapakah harus diserap oleh atom supaya elektron dapat tereksitasi ke keadaan eksitasi ke 4. (b). Ketika elektron dari keadaan eksitasi ke 2 bertransisi ke keadaan dasar (ground state), berapakah panjang gelombang foton yang dipancarkan atom.

2. Elektron pada atom Hidrogen berada pada keadaan eksitasi pertama, foton dengan frekuensi berapakah harus diserap atom agar elektron dapat loncat keluar atom
3. Tentukanlah panjang gelombang terbesar yang dipancarkan atom Hidrogen untuk:
  - a).deret Lyman
  - b).deret Balmer
  - c).deret Paschen
  - d).deret Bracket
  - e).deret Pfund
4. Elektron pada atom Hidrogen berada pada keadaan dasar, tentukanlah :
  - a). Jari jari orbit elektron
  - b). Kecepatan linier elektron pada orbitnya
  - c). Energi kinetik elektron
  - d).Energi total elektron
  - e). Momentum sudut elektron
5. Spektrum atom Hidrogen pada deret Lyman panjang gelombangnya 102,6 nm. Tentukanlah pada kulit manakah keadaan elektron awal sebelum bertransisi ke keadaan dasar,

## BAB 4 GELOMBANG MATERI

### Pendahuluan

Pada bab sebelumnya kita sudah membahas beberapa temuan penting dan konsep konsep teoritis tentang partikel penyusun benda(materi). Pada bab ini akan dibahas pemikiran atau ide ide brilian lainnya terutama yang dikemukakan oleh Count Louis de Broglie yaitu bagaimana representasi elektron sebagai gelombang atau sifat gelombang dari materi. Selain itu juga akan dibahas eksperimen difraksi elektron oleh davisson – Germer yang merupakan konfirmasi hypotesis de Broglie. Bagian akhir akan dibahas prinsip ketidak pastian Heisenbergh yang juga merupakan salah satu pilar Fisika yang berkaitan dengan benda benda mikroskopik setingkat ato,ik atau sub atomik.

### Postulat de Broglie

Tahap pertama menuju ke mekanika baru dari sistim atom digulirkan oleh Louis Victor de Broglie pada tahun 1923. Dalam disertasi doktoralnya dia mempostulatkan bahwa”karena foton memiliki karakteristik partikel dan gelombang maka seluruh bentuk materi juga memiliki karakteristik gelombang selain sebagai partikel”. Ide de broglie ini sangat radikal dan tanpa ada pembuktian secara eksperimen pada saat itu. Menurut de broglie partikel (seperti elektron) bermassa  $m$  dan momentum  $p$  memiliki sifat gelombang dengan panjang gelombang dinyatakan oleh relasi de Broglie

$$\lambda = h/p ,$$

dimana  $h$  ialah konstanta Planck dan  $P$  adalah momentum relativistik  $p = \gamma mv$  ,kecepatan partikel ialah  $v$  ,frekuensi gelombang tersebut ialah  $f = E/h$  ,dan hubungan energi total partikel dengan momentumnya ialah

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

dengan menerapkan teori gelombang materi ini pada elektron electron didalam atom , de Broglie dapat menjelaskan kuantisasi panjang orbit electron dalam atom yaitu sebagai konsekuensi alami dari interferensi gelombang gelombang electron.



Victor Louis de Broglie

### Contoh

1. Tentukanlah panjang gelombang dari bola baseball yang massanya 140 gram dan bergerak dengan kelajuan 27 m/s.

Jawab

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}}{(140 \times 10^{-3} \text{ kg}) \left( \frac{27 \text{ m}}{\text{s}} \right)} = 1,7 \times 10^{-34} \text{ m}$$

Apakah bola baseball tersebut pada saat bergerak menampilkan diri sebagai gelombang atau sebagai benda(materi)?. Untuk itu kita bandingkan antara panjang gelombang de Broglie dengan dimensi dari bendanya. Bila dimensi dari benda jauh lebih besar dari panjang gelombangnya maka benda tetap akan menampilkan diri sebagai materi tetapi sebaliknya bila dimensi benda jauh lebih kecil dari panjang gelombang de Broglie maka pada saat bergerak benda akan menampilkan diri sebagai gelombang, pada contoh soal tersebut misalkan diameter dari bola baseball itu 6 cm atau 0,06 m maka jelas bahwa dimensi benda jauh lebih besar dari panjang gelombangnya sehingga pada saat bola baseball itu bergerak tetap akan berwujud sebagai benda(materi).

- Elektron pada alat pemercepat partikel bergerak dengan kecepatan  $5 \times 10^5 \text{ m/s}$ , tentukanlah panjang gelombang de Broglie.

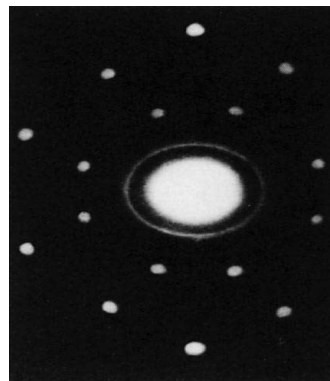
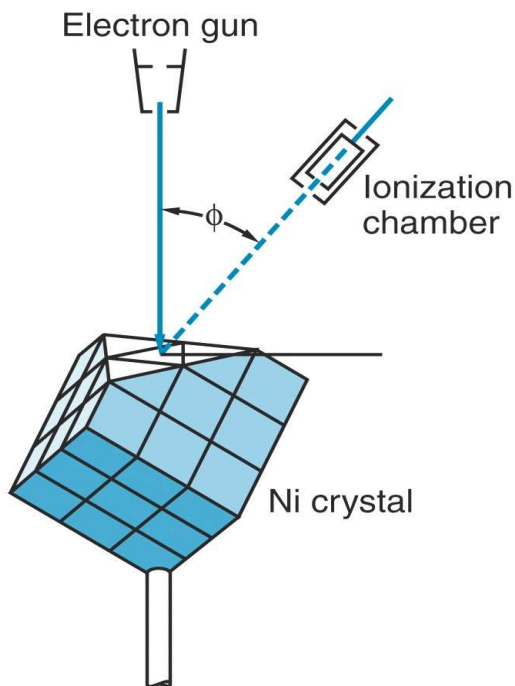
Jawab

Karena kecepatannya jauh dibawah cepat rambat cahaya maka kita gunakan momentum klasik

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ Js}}{(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg}) \left( \frac{5 \times 10^5 \text{ m}}{\text{s}} \right)} = 1,46 \times 10^{-9} \text{ m}$$

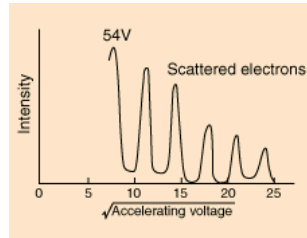
Kalau kita bandingkan dengan dimensi elektron, diameternya lebih kecil dari  $10^{-19} \text{ m}$  maka panjang gelombang elektron jauh lebih besar dari dimensinya sehingga pada saat elektron bergerak, elektron akan menampilkan diri sebagai gelombang.

Pada tahun 1927 ,Davisson dan Germer mendemonstrasikan secara langsung sifat gelombang dari electron dengan menunjukkan bahwa electron energi rendah didifraksikan oleh kristal tunggal nikel.



Gb. Skema diagram Difraksi elektron

Gb. Pola difraksi



Davisson

Pada eksperimennya Davisson dan Germer menembakan berkas electron pada kiral nikel. Berkas electron ditempatkan dalam medan potensial sehingga electron akan bergerak dipercepat sebagai hasil perubahan dari energi potensial listrik menjadi energi kinetic. Kecepatan electron dapat ditentukan sebagai berikut

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

maka kecepatan electron tersebut ialah

$$v = (2eV/m)^{1/2}$$

Panjang gelombang electron ditentukan dengan cara dihitung dengan menggunakan persamaan de Broglie dan juga diukur dengan menggunakan difraksi Bragg. Panjang gelombang menurut persamaan de Broglie ialah

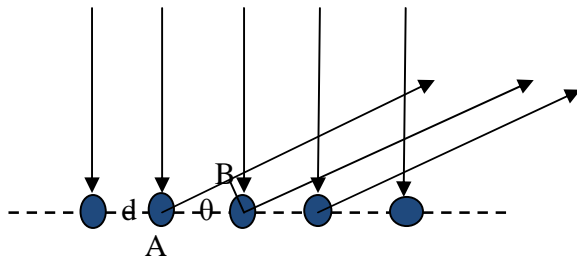
$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{2eV/m}} = \frac{h}{\sqrt{2meV}}$$

Pada percobaannya tersebut beda potensial pemercepat yang digunakan ialah 54 volt dan electron terhambur dengan sudut hamburan  $50^\circ$ .

Panjang gelombang electron hasil perhitungan dengan menggunakan persamaan de Broglie ialah

$$\begin{aligned} \lambda &= \frac{h}{\sqrt{2meV}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ js}}{\sqrt{2(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(1,602 \times 10^{-19} \text{ C})(54 \text{ V})}} \\ &= 1,67 \times 10^{-10} \text{ m} = 1,67 \text{ \AA} \end{aligned}$$

Berikutnya panjang gelombang diukur dengan percobaan difraksi Bragg. Energi berkas electron jauh lebih kecil dari sinar x sehingga ketika berkas electron ditembakkan pada kristal nikel maka akandihamburkanoleh atom atom pada lapisan atas bidang Bragg, berkas electron tidak mampu menembus ke lapisan yang lebih dalam



Beda lintasan optik dua berkas electron terhambur ialah

$$AB = d \sin\theta \quad \text{dengan } d \text{ ialah jarak dua atom yang berdekatan pada kristal nikel}$$

Kedua berkas sinar tersebut akan berinterferensi maksimum bila beda lintasan optiknya merupakan kelipatan dari panjang gelombang

$$d \sin\theta = n\lambda$$

Jarak antar dua atom yang berdekatan pada kristal nikel diukur dengan mendifraksikan sinar x yang panjang gelombangnya diketahui pada kristal nikel, dan diperoleh harga  $d$  ialah 2,15 Å. Dengan demikian panjang gelombang berkas electron (gelombang de Broglie) ialah

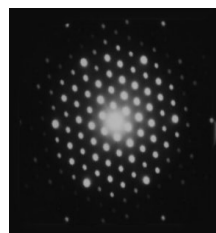
$$\lambda = d \sin\theta = 2,15 \text{ Å} \sin 50 = 1,65 \text{ Å}$$

Berdasarkan data tersebut terdapat kesesuaian antara prediksi teoritis De Broglie dengan hasil pengukuran secara eksperimen, dengan demikian postulat de Broglie terbukti kebenarannya secara eksperimen.

Eksperimen serupa dilakukan oleh G.P.Thomson



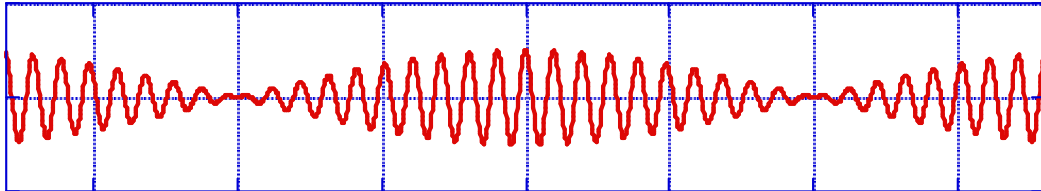
Melakukan eksperimen interferensi dengan menggunakan film tipis sample



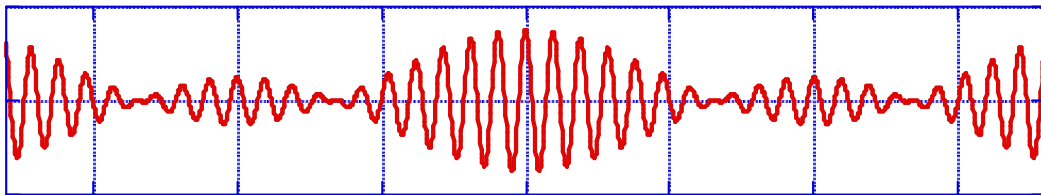
Meskipun panjang gelombang dari gelombang materi secara eksperimen dapat ditentukan, penting untuk dipahami bahwa tidak seperti gelombang lainnya karena frekuensinya dan kecepatan phase tidak diukur secara langsung. Bahwa kecepatan phase suatu individu gelombang materi lebih besar dari kecepatan cahaya dan bervariasi dengan panjang gelombang atau bilangan gelombang. Untuk merepresentasikan, superposisi dari gelombang materi dengan perbedaan panjang gelombang, amplitude dan phase, harus dipilih yang berinterferensi secara konstruktif di area terbatas dalam ruang. Hasilnya

berupa gelombang paket atau group gelombang yang bergerak dengan kelajuan yang sama seperti partikel klasik.

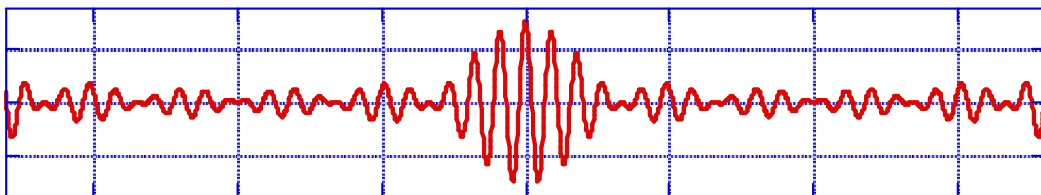
Grup gelombang atau gelombang paket dapat dianalogikan dengan superposisi dua gelombang atau lebih yang frekuensinya berbeda sedikit yaitu pada peristiwa layangan (beat). Contoh superposisi dua gelombang yang frekuensinya 440 Hz dan 439 Hz



Superposisi tiga gelombang yang frekuensinya masing masing 440 Hz, 439 Hz dan 438 Hz



Superposisi 5 gelombang yang masing masing frekuensinya 440 Hz, 439 Hz, 438 Hz, 437 Hz dan 436 Hz



$$\leftarrow \Delta x \rightarrow$$

Sebaran ruang dari gelombang paket tersebut ialah  $\Delta x$ .

Latihan

1. Tentukanlah panjang gelombang de Broglie dari sebuah proton yang bergerak dengan kecepatan  $10^6$  m/s.
2. Hitunglah panjang gelombang de Broglie dari sebuah electron yang memiliki energi kinetic : a) 50 eV , b). 50 keV



3. Tentukanlah panjang gelombang de Broglie dari seorang pelari cepat yang massanya 60 kg dan berlari dengan kelajuan 5 m/s
4. Proton dan electron memiliki energi kinetic yang sama 50 keV, tentukanlah panjang gelombang de Broglie masing masing
5. Panjang gelombang de Broglie dari sebuah electron dalam alat pemercepat partikel ialah 1 Å , tentukanlah beda potensial pemercepat yang dipasang pada alat tersebut.

### Mikroskop Elektron

Mikroskop electron adalah penemuan teknologi yang sangat penting dalam perkembangan teknologi mikroskop sebagai aplikasi dari sifat partikel sebagai gelombang. Daya urai (pisah) dan panjang gelombang terpendek yang sangat berguna untuk pekerjaan optic ialah kira kira 200 nm. Elektron yang dipercepat dengan beda potensial pemercepat 60 kV akan mempunyai panjang gelombang 0,0055 nm. Secara teoritis harga panjang gelombang dari electron tersebut merupakan daya pisah dari electron mikroskop.

Pada prakteknya electron electron harus difokuskan dengan menggunakan medan listrik dan medan magnet. Medan magnet dan medan listrik ini bertindak sebagai lensa bagi gelombang materi. Proses tersebut akan membatasi daya urai sampai kira kira menjadi 0,2 nm. Akan tetapi dengan daya urai sebesar itu mikroskop electron masih 1000 kali lebih baik daripada mikroskop optic. Maka dengan mikroskop electron dimungkinkan untuk melakukan pengkajian bahan pembentuk selular yang kecil juga molekul.

Ada dua jenis mikroskop electron yang sudah lazim digunakan ialah mikroskop transmisi electron dan mikroskop electron pemayaran (scanning electron microscope /SEM). Pada mikroskop electron transmisi dalam penggunaannya harus menggunakan sample (bahan contoh) yang tebalnya kurang dari 100 nm. Jika sample terlalu tebal maka energi yang hilang oleh electron di luar sumbu adalah jauh lebih besar dari pada energi yang hilang oleh electron yang langsung masuk kedalam sample itu. Maka panjang gelombang akan berubah sehingga electron electron tidak dapat semuanya difokuskan secara serempak. Walaupun daya pisah mikroskop ini sangat baik namun kesulitan dalam mempersiapkan sample penggunaannya menjadi tidak praktis juga kedalaman medannya sangat kecil sehingga struktur tiga dimensi dari sample tidak akan dapat difokuskan dengan baik.

Ketidakpraktisan serta kekurangan lainnya dari mikroskop transmisi electron dapat diatasi oleh mikroskop electron pemayaran. Sample tidak perlu diperispkan secara khusus bahkan sample berupa organisme hidup dapat digunakan ,dan hasilnya memperlihatkan struktur tiga dimensi yang baik dan jelas. Pada mikroskop electron pemayaran, electron difokuskan ke sebuah titik kecil yang disapu keseluruhan permukaan bahan contoh. Bayangan dibentuk dengan memantau electron sekunder yang loncat keluar dari sample sebagai akibat penyinaran sinar utama. Elektron electron sekunder itu dikumpulkan dan dipercepat didalam tabung CRT. Berkas sinar katoda itu disapukan keseluruhan permukaan layar pada kecepatan yang sama dengan kecepatan sapuan sinar utama pada sampel. Banyaknya ewlektron sekunder berubah seiring dengan perubahan komposisi dan orientasi dari permukaan sampel, dan terangnya jejak elektron pada layar tabung sinar katoda berubah sesuai dengan perubahan banyak sedikitnya elektron sekunder.

## PRINSIP KETIDAKPASTIAN HEISENBERGH

Suatu gelombang paket yang terlokalisasi di suatu daerah  $\Delta x$  mengandung rentang dari bilangan gelombang  $\Delta k$ , dimana  $\Delta x \Delta k \geq 1/2$ . Karena  $P_x = \hbar k$  hal ini membawa implikasi bahwa terdapat suatu prinsip ketidakpastian untuk posisi dan momentum

$$\Delta p_x \Delta x \geq \hbar/2$$

dengan cara serupa dapat ditunjukkan relasi ketidakpastian energi –waktu yang dinyatakan sebagai berikut

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar/2$$

Pemikiran tersebut dikemukakan oleh W.Heisenberg (1927) dan dikenal dengan nama prinsip ketidakpastian Heisenbergh. Pada papernya yang terkenal, Heisenberg menyatakan bahwa “tidak mungkin menentukan posisi dan momentum suatu partikel secara simultan dengan ketelitian tak hingga”. Dengan kata lain “jika pengukuran posisi dibuat dengan ketelitian  $\Delta x$  dan secara simultan mengukur momentum yang searah sumbu x dengan ketelitian  $\Delta p$ , maka perkalian kedua ketidakpastian tersebut tidak pernah lebih kecil dari  $\hbar/4\pi$ , atau  $\Delta x \cdot \Delta p \geq \hbar/2$

Arti mendasar dari prinsip ketidakpastian tersebut ialah bila kita dengan suatu cara dapat mengupayakan untuk mengetahui posisi partikel secara tepat (ketidakpastian posisinya nol), maka ketidakpastian momentum dari partikel itu menjadi sangat besar sekali, yang artinya kita sama sekali tidak dapat mengetahui berapa momentum dari partikel tersebut, dan sebaliknya.



Werner Heisenberg

### Contoh

Misalkan kecepatan electron dan kecepatan peluru senapan yang massanya 0,03 kg masing masing diukur dengan ketidakpastian kecepatan  $\Delta v = 10^{-3}$  m/s. Berapakah ketidakpastian posisi dari electron dan peluru tersebut ?

Jawab

$$\Delta x \Delta P_x = \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta x m \Delta v = \frac{h}{2\pi}$$

$$\Delta x = \frac{h}{2\pi m \Delta v}$$

Untuk electron ketidakpastian posisinya ialah

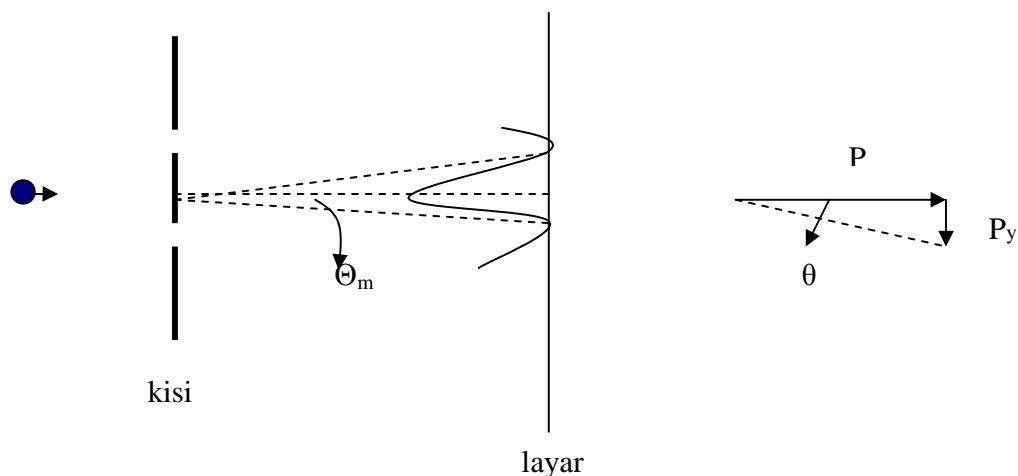
$$\Delta x = \frac{h}{2\pi m \Delta v} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ js}}{2(3,14)(9,1 \times 10^{-31} \text{ kg})(10^{-3} \text{ m/s})} = 0,116 \text{ m}$$

Untuk peluru senapan ketidakpastian posisinya ialah

$$\Delta x = \frac{h}{2\pi m \Delta v} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \text{ js}}{2(3,14)(0,03 \text{ kg})(10^{-3} \text{ m/s})} = 3,5 \times 10^{-30} \text{ m}$$

Berdasarkan contoh tersebut, untuk benda benda makroskopik seperti peluru senapan prinsip ketidak pastian tidak mengharuskan suatu batas efektif pada pengukuran eksperimental karena kesalahan pengukuran kedudukan (dalam eksperimen) selalu jauh lebih besar dari  $10^{-30}$  m. Bagaimana untuk benda benda mikroskopik seperti atom atau sub atomic ?. Elektron jauh lebih kecil dari atom . Dalam suatu Kristal jarak antar dua atom yang berdekatan kira kira sejauh  $10^{-10}$  m, maka pengukuran posisi electron dengan ketidak pastian 0,1 m membuat informasi keberadaan electron dalam Kristal tersebut menjadi tidak jelas (kabur) ,electron bisa berada dimana saja diantara bermilyar milyar atom dalam suatu Kristal

Prinsip ketidak pastian ini menuju ke kesimpulan bahwa didalam setiap eksperimen kita tidak dapat mengamati secara serentak sifat partikel dan sifat gelombang dari cahaya atau sifat partikel dan sifat gelombang dari materi. Tinjaulah eksperimen interferensi celah ganda dimana sumber cahaya diganti dengan berkas electron



**Kisi** celah ganda dengan jarak antar celah  $d$  dan lebar celah  $d/4$ , sedangkan jarak antar kisi ke layar ialah  $D$ . Berkas electron monoenergetik yang momentum liniernya  $P$  datang pada kisi celah ganda, maka menurut postulat de Broglie electron akan berperilaku sebagai gelombang dengan panjang gelombang  $\lambda = h/P$ . Pada layar akan tampak pola interferensi berupa garis terang (intensitas maksimum) dan garis gelap (intensitas minimum). Jarak antar garis terang atau garis gelap ke terang pusat dinyatakan oleh persamaan

$$n\lambda = 2d \sin\theta$$

Intensitas maksimum terjadi pada saat  $\theta = 0$  dan minimum (gelap) pertama terjadi pada  $\sin\theta = \lambda/2d$ . Apabila harga  $\lambda/2d$  sangat kecil maka  $\sin\theta \sim \theta$ , sehingga minimum pertama terjadi pada  $\theta_m = \lambda/2d$ . Jadi pengamatan  $\theta_m$  dapat digunakan untuk menentukan panjang gelombang  $\lambda$ . Harga panjang gelombang yang diperoleh dapat dibandingkan dengan harga panjang gelombang menurut postulat de Broglie.

Bagaimana kalau pada peristiwa difraksi celah ganda tersebut kita anggap elektron sebagai partikel atau materi? Bila pada saat tersebut kita anggap elektronnya sebagai materi, maka seharusnya kita dapat menentukan celah mana yang akan dilewati oleh elektron tersebut, apakah celah atas atau celah bawah. Hal itu dapat dilakukan dengan melewatkan foton pada celah, ketika elektron melewati celah maka elektron akan bertumbukan dengan foton sehingga foton akan terhambur sedangkan elektronnya terus bergerak menuju layar. Hamburan foton dapat dideteksi dan tempat terjadinya tumbukan dapat ditentukan. Sebagai contoh jika tumbukan itu berlangsung di sebelah garis pusat maka berarti elektron bergerak melewati celah atas, dan ketidakpastian kedudukan elektron pada saat melewati celah maksimum ialah sebesar  $\Delta y = d/4$ . Menurut prinsip ketidakpastian Heisenberg perkalian ketidakpastian posisi dan momentum ialah

$$\Delta y \cdot \Delta P_y = h/2\pi$$

$$\Delta P_y = \frac{h}{2\pi\Delta y} = \frac{h}{2\pi \frac{d}{4}} = \frac{2h}{\pi d}$$

Maka sudut simpangan elektron itu ialah

$$\theta = \frac{\Delta P_y}{P} = \frac{2h/\pi d}{h/\lambda} = \frac{2\lambda}{\pi d}$$

Dengan demikian  $\theta > \theta_m$ , hal itu berarti bahwa pola interferensi akan menjadi tidak jelas sebab kita tidak tahu dimana elektron akan jatuh dilayar. Berdasarkan hal tersebut maka prinsip ketidakpastian ialah caranya alam untuk menjamin bahwa sifat gelombang dan sifat partikel dari suatu materi tidak akan dapat diamati secara serentak.

#### Latihan

1. Sebuah elektron yang sedang bergerak diketahui berada dikawasan sepanjang 0,1 m. Berapakah ketidakpastian kecepatannya.
2. Berapakah energi kinetik minimum dari sebuah partikel yang massanya  $10^{-20}$  kg, jika ketidakpastian kedudukannya ialah  $10^{-10}$  m.

## BAB 5 STRUKTUR INTI

### Pendahuluan

Pada tahun 1896 adalah tahun yang menandai lahirnya fisika inti. Fisikawan Prancis Henri Becquerel menemukan keradioaktifan dalam senyawa uranium. Sejak itu para ilmuwan lainnya mengadakan penelitian untuk memahami fenomena alami terpancarnya radiasi oleh inti radioaktif.

Pionir pekerjaan ini adalah Ernest Rutherford, yang menunjukkan bahwa radiasi yang dipancarkan dari unsur radioaktif terdiri dari tiga tipe yang disebut sinar alfa, sinar beta dan sinar gama. Rutherford mengklasifikasikan sinar-sinar tersebut menurut muatan alami yang dimilikinya, kemampuan menembus materi (daya tembus) dan kemampuan mengionisasi udara atau atom-atom lain dalam medium yang dilewatinya. Eksperimen selanjutnya menunjukkan bahwa sinar alfa adalah inti atom helium, sinar beta adalah berupa elektron, dan sinar gama adalah foton energi tinggi.

Tahun 1911 Rutherford dan murid-muridnya Geiger dan Marsden melakukan sejumlah eksperimen penting yaitu eksperimen hamburan partikel alfa oleh atom-atom emas. Kesimpulan dari eksperimennya ialah bahwa atom dapat dipandang sebagai massa titik dan muatan titik dimana sebagian besar massa atomik terkonsentrasi ditengah-tengah atom yang dinamakan inti atom.

Selanjutnya didalam inti ada tipe gaya yang tidak diketahui yang disebut gaya inti. Gaya inti ini dominan ketika jarak partikel sekitar 10 femtometer, dan akan menjadi nol ketika jaraknya lebih besar dari itu, gaya ini merupakan gaya berjangkauan pendek.

Perkembangan lainnya ialah

- Pengamatan dari reaksi inti pada tahun 1930 oleh Cockroft dan Walton dengan menggunakan pemercepat partikel buatan.
- Ditemukannya neutron tahun 1932 oleh Chadwick dan menyimpulkan bahwa setengah dari inti diisi oleh neutron.
- Ditemukannya radioaktivitas buatan oleh Joliot dan Irene Curie.
- Penemuan reaksi fisi nuklir tahun 1938 oleh Meitner, Hahn, dan Strassmann.
- Pengembangan reaktor fisi terkendali tahun 1942 oleh Fermi dan kawan-kawan.

### INTI ATOM

Inti dapat direpresentasikan oleh  $X_Z^A$  dengan X adalah nama unsur, A adalah nomor massa yaitu jumlah total nucleon dalam inti, dan Z adalah nomor atom yaitu jumlah total proton dalam inti. Jumlah Neutron total dalam inti dinyatakan dengan nomor neutron N dimana  $A = N + Z$  sehingga  $N = A - Z$ . Unsur-unsur yang memiliki Z sama tetapi berbeda harga A dan N disebut isotop. Contoh isotop misalnya Hidrogen H, Deuterium dan Tritium, ketiga unsur tersebut mempunyai nomor atom yang sama yaitu 1 dan nomor massanya berbeda masing-masing 1, 2 dan 3. Beberapa contoh lainnya dapat dilihat pada tabel dibawah ini

**Tabel. Beberapa contoh isotop**

Z	Isotope	Mass Number	Atomic Mass of Isotope	Abundance [%]	Atomic Mass of Element
1	H	1	1.0078250321	99.9885	1.00794
	D	2	2.0141017780	0.0115	
	T	3	3.0160492675		
2	He	3	3.016029309 7	0.000137	4.002602
		4	4.0026032497	99.999863	
3	Li	6	6.015122 3	7.59	6.941
		7	7.016004 0	92.41	
4	Be	9	9.012182	100	9.012182
5	B	10	10.012937	19.9	10.811
		11	11.0093055	80.1	
6	C	12	12.0000000	98.93	12.0107
		13	13.0033548378	1.07	
		14	14.003241988		
7	N	14	14.003 0740052	99.632	14.0067
		15	15.0001088984	0.368	
8	O	16	15.9949146221	99.757	15.9994
		17	16.99913150	0.038	
		18	17.9991604	0.205	

### Massa dan Muatan

Inti dibangun oleh proton dan neutron , muatan proton ialah  $q_p = 1,6021773 \times 10^{-19} C$  sedangkan Neutron tidak bermuatan listrik atau netral. Massa proton dan massa neutron sangat kecil sekali bila dinyatakan dalam satuan SI oleh karena itu dibuat satuan massa lain yang disebut atomic mass unit (amu) dan diberi notasi u. Satu amu didefinisikan sebagai seperduabelas massa isotop carbon yang nomor massanya 12. Massa  $C^{12}$  tepat 12 u dimana  $1 u = 1,660540 \times 10^{-27} kg$ . Hal itu dapat ditentukan sebagai berikut : Kita tahu bahwa tepat 12 gram dari  $C^{12}$  mengandung atom sejumlah bilangan Avogadro yaitu  $6,02 \times 10^{23}$  atom/mol. Maka massa satu atom karbon ialah

$$\text{Massa 1 atom } C^{12} = \frac{0.012 kg}{6,02 \times 10^{23} \text{ atom}} = 1,99 \times 10^{-26} kg$$

$$1 u = 1/12 \text{ dari massa 1 atom } C^{12}$$

$$= \frac{1,99 \times 10^{-26} kg}{12} = 1,66 \times 10^{-27} kg$$

Karena energi dari partikel diam dinyatakan oleh  $E = mc^2$  ,massa atomik sering dinyatakan dalam term equivalen energi diam. Massa satu satuan massa atom bila dinyatakan dalam satuan energi ialah

$$E = mc^2 = (1,660540 \times 10^{-27} kg)(2,9979246 \times 10^8 \text{ m/s})^2$$

$$= 14,924189 \times 10^{-11} J$$

$$= 931,494 \text{ MeV}$$

Jadi massa satu U ialah

$$1 u = 931,494 \text{ MeV}/c^2.$$

Maka dalam satuan sma dan satuan energi diam massa untuk partikel partikel berikut

**Proton** =  $1,672623 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,007276 \text{ u} = 938,2723 \text{ MeV}/c^2$   
**Neutron** =  $1,674929 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1,008665 \text{ u} = 939,5656 \text{ MeV}/c^2$   
**Elektron** =  $9,10939 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0,00054857 \text{ u} = 0,5109991 \text{ MeV}/c^2$

### Dimensi Inti

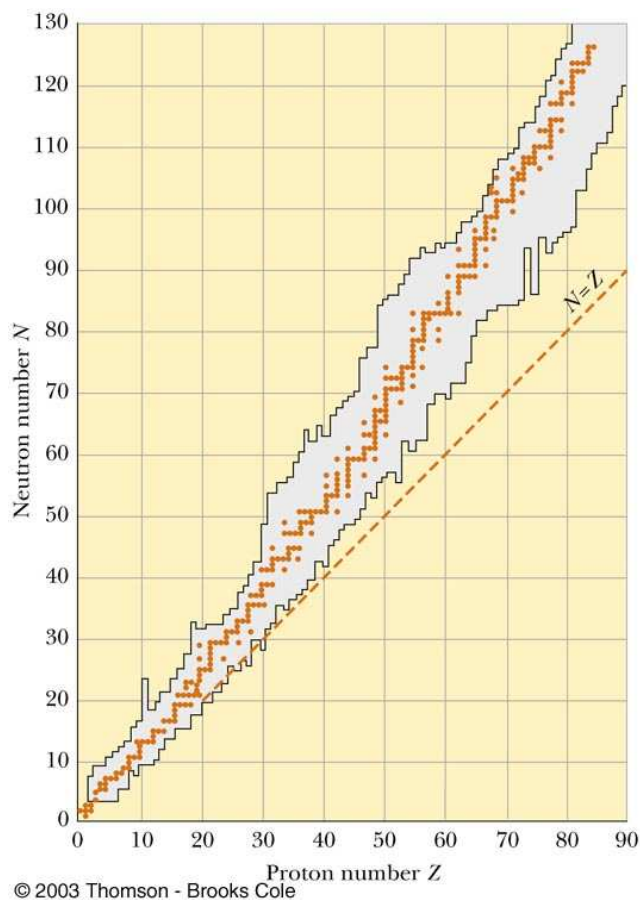
Inti diasumsikan berbentuk bola dengan jari jari

$$r = r_0 A^{1/3}$$

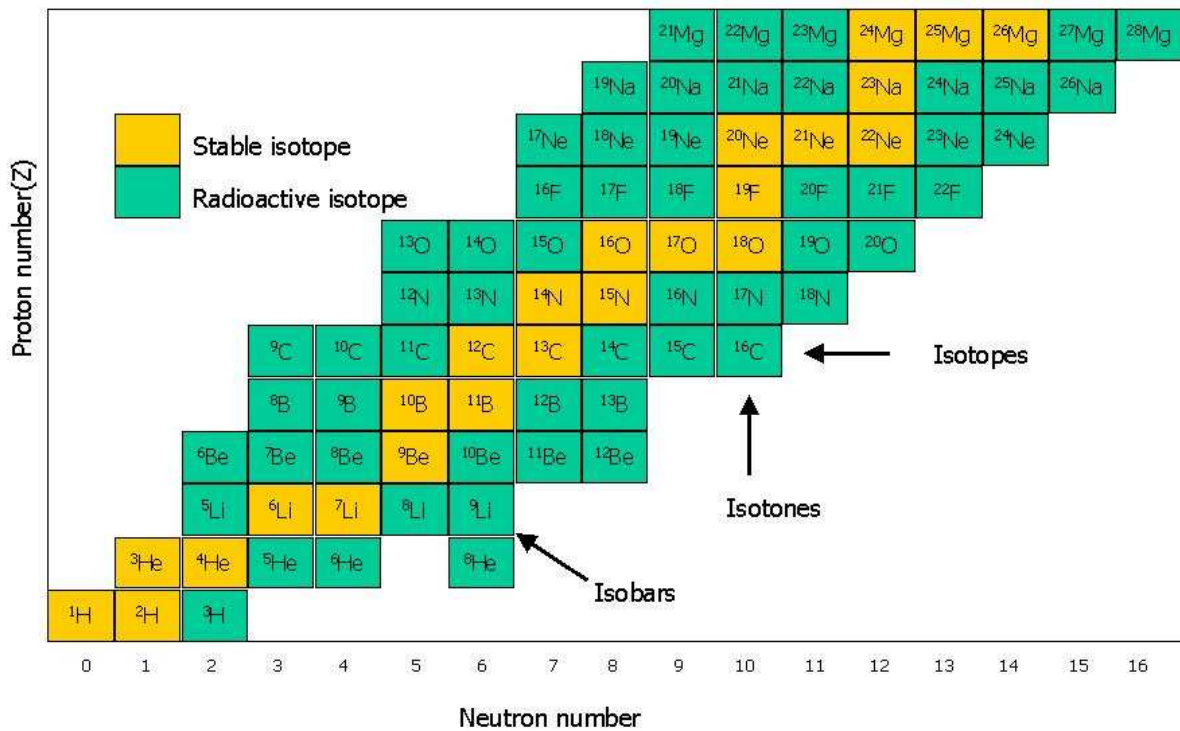
dengan  $r_0 = 1,2 \text{ fm}$  dimana 1 femtometer =  $10^{-15} \text{ m}$  dan A ialah nomor massa dengan demikian volume kubus berbanding lurus dengan A (total jumlah nucleon). Inti dibangun oleh partikel partikel penyusun inti yaitu proton dan neutron maka dengan demikian dimensi dari partikel penyusun inti jauh lebih kecil dari  $10^{-15} \text{ m}$ .

### Stabilitas Inti

Inti stabil karena adanya gaya inti antar nucleon-nukleon. Gaya inti merupakan gaya berjangkauan (rentang)pendek dan mendominasi gaya tarik coulomb pada jarak lebih kecil dari 2 fm dan tidak bergantung pada jenis muatan. Inti ringan akan stabil bila jumlah neutron sama dengan jumlah proton.



Inti akan lebih stabil apabila memiliki harga Z atau N dari 2,8,20,28,50, 82 dan 126 dsb disebut Magic Number.



Gb. Beberapa inti stabil dan tak stabil

Inti memiliki momentum orbital total besarnya  $\sqrt{I(I+1)} \hbar$

Dengan I disebut bilangan kuantum spin inti

Momen magnetic inti diukur dalam term magneton inti

$$\mu_n = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5,05 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

Bilamana momen magnet inti ditempatkan dalam suatu medan magnet luar, maka momen magnet inti akan berpresisi disekitar medan magnet luar dengan frekuensi sebanding dengan medan .



### Energi Ikat Inti

Perbedaan antara jumlah massa nucleon dalam keadaan terpisah dengan massa inti bilamana dikalikan dengan  $C^2$  menghasilkan Energi ikat  $E_b$  dari inti. Energi ikat suatu inti dapat juga diartikan sebagai besarnya energi yang diperlukan untuk memecah inti menjadi komponen komponennya. Berdasarkan hukum kekekalan energy dan equivalensi massa – energy dari Einstein energy ikat dari inti yang massanya  $M(x_z^A)$  adalah

$$E_b \text{ (MeV)} = \{ (Z M(\text{H}) + NM_n - M(x_z^A)) \} \times 931,494 \text{ MeV/u}$$

Energi ikat pernukleon ialah

$$E_b / A$$

Contoh

Tentukanlah energy ikat dari deuterion yang massanya ialah 2,014102 dan energy ikat pernukleon ?

Jawab

Deuterion nomor atomnya 1 dan nomor massanya 2 sehingga dalam inti terdapat 1 proton dan 1 neutron. Energi ikatnya ialah

$$\begin{aligned} E_b &= [(1 \times 1,007825 + 1 \times 1,008665) - 2,014192] \times 931,49 \text{ MeV} \\ &= 2,224 \text{ MeV} \end{aligned}$$

Energi ikat pernukleon ialah

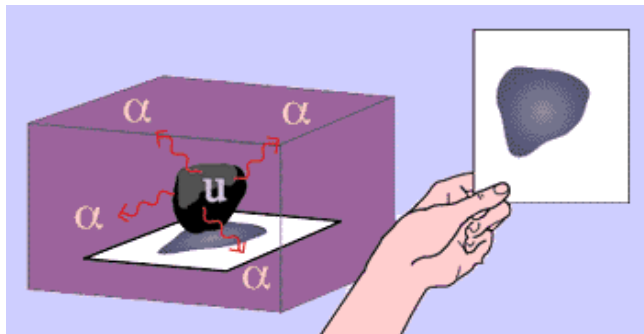
$$E_b/A = 2,224 \text{ MeV} / 2 = 1,112 \text{ MeV}$$

Latihan

1. Tentukanlah energy ikat pernukleon dari inti inti berikut
  - a).  ${}_{10}^{20}\text{Ne}$  , massa atomnya 19,992436
  - b).  ${}_{20}^{40}\text{Ca}$  , massa atomnya 39,962591
2. Dari isotop isotop berikut : Hidrogen , Deuterium dan Tritium manakah yang memiliki energy ikat pernukleon paling besar.

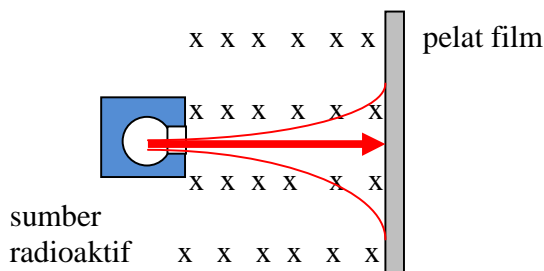
### Radioaktivitas

Henri Becquerel pada tahun 1896 secara tidak sengaja menemukan Kristal uranium potassium sulfat yang memancarkan radiasi pada daerah cahaya tidak tampak (invisible) dimana radiasi yang dipancarkannya dapat menghitamkan pelat film. Setelah melakukan beberapa kali eksperimen dia menyimpulkan bahwa emisi radiasi yang dipancarkan oleh



Kristal uranium merupakan radiasi jenis baru. Proses emisi radiasi dari Kristal tersebut terjadi secara spontan dan fenomena tersebut dinamakan radioaktivitas. Unsur atau material yang menunjukkan gejala radioaktivitas disebut unsur radioaktif. Selanjutnya Marie dan Piere Curie menemukan dua unsur baru yang menunjukkan gejala radioaktivitas yang kemudian dinamakan unsur radioaktif Polonium dan Radium.

Untuk mempelajari lebih jauh tentang radiasi tipe baru tersebut Rutherford melakukan serangkaian eksperimen yaitu menempatkan unsur radioaktif dalam suatu wadah kemudian di atasnya dibentangkan plat film, dan set alat tersebut ditempatkan dalam daerah medan magnetic (tanda x menunjukkan arah medan magnetic menembus bidang gambar menjauhi pengamat) dan juga disimpan diruang gelap.



Setelah plat film diproses maka disimpulkan ada tiga jenis sinar yang dipancarkan oleh suatu unsur radioaktif, Sinar yang disimpangkan keatas dinamakan sinar alpha, sinar yang lurus tidak mengalami penyimpangan oleh medan magnet disebut sinar gamma dan sinar yang disimpangkan ke bawah oleh medan magnet disebut sinar beta. Pada proses emisi radiasinya ketiga sinar tersebut tidak dipancarkan sekaligus tapi satu satu missal sinar beta saja, atau sinar gamma saja atau sinar alpha saja. Penelitian lebih lanjut akhirnya dapat diketahui bahwa sinar alpha itu berupa inti atom helium bermuatan +2, sinar gamma adalah berupa gelombang elektromagneti frekuensi tinggi dan sinar beta ialah berupa partikel bermuatan negative yang sama dengan electron. Perbandingan daya tembus dari ketiga sinar tersebut ialah

$$\alpha < \beta < \gamma$$

Sinar gamma memiliki daya tembus terbesar dan sinar alpha daya tembusnya paling kecil. Perbandingan daya ionisasinya ialah

$$\alpha > \beta > \gamma$$

Sinar alpha memiliki daya ionisasi paling besar sedangkan sinar gamma daya ionisasinya paling kecil

Unsur radioaktif akan memancarkan sinar radioaktif secara spontan untuk mencapai kesetabilannya, peristiwa tersebut dinamakan peluruhan (decay). jika material radioaktif pada  $t=0$  mengandung  $N_0$  inti radioaktif, jumlah inti sisa setelah meluruh selama  $t$  adalah

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$\lambda$  = konstanta peluruhan . Probabilitas peluruhan persatuan waktu. bahwa suatu inti akan meluruh disebut aktivitas, laju peluruhan atau aktivitas.

$$R = \left| \frac{dN}{dt} \right| = R_0 e^{-\lambda t}$$

Dengan  $R_0 = \lambda N_0$  yaitu aktivitas mula mula

Satuan aktivitas(sistim SI ) ialah Bq (Becquerel) satuan lainnya Ci (Currie)

$$1 \text{ Ci} = 3,7 \times 10^{10} \text{ Bq}$$

1 Bq = 1 pancaran/detik

Waktu yang diperlukan oleh suatu sample radioaktif untuk meluruh sehingga jumlah inti sisa yang belum meluruh tinggal setengahnya dari jumlah inti mula mula disebut waktu paruh (half life ) dan diberi notasi  $T_{1/2}$

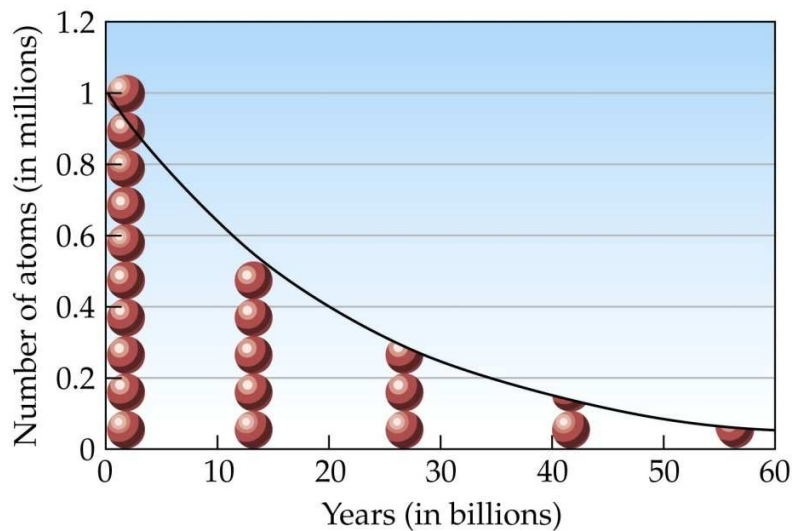
Pada  $t = T_{1/2}$  maka  $N = \frac{1}{2} N_0$

Maka

$$\frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

Sehingga

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda}$$



● Represents 0.10 million atoms

**Contoh**

Suatu sampel isotop radioaktif yang masih baru memiliki aktivitas 0,6 Ci , setelah meluruh selama 2 tahun aktivitasnya tinggal 3 mCi, tentukanlah:

- konstanta peluruhan dan waktu paruh
- aktivitas sampel setelah meluruh selama 8 tahun
- Jumlah inti pada sampel yang masih baru
- Berapa lamakah isotop radioaktif tersebut meluruh sehingga aktivitas sisanya tinggal 6 Bq

Jawab

a) konstanta peluruhan

$$A = A_0 e^{-\lambda t} \text{ atau}$$

$$\lambda = \frac{1}{t} \ln \frac{A_0}{A} = \frac{1}{2 \text{ tahun}} \ln \frac{0,6 \text{ Ci}}{3 \text{ mCi}} = \frac{\ln 200}{2 \text{ Tahun}} = 8,3709 \times 10^{-8} \text{ s}^{-1} = 2,649 / \text{tahun}$$

Waktu paruh

$$T_{1/2} = 0,693/\lambda = 0,693/2,649/\text{tahun} = 0,3648 \text{ Tahun} = 8,27 \times 10^6 \text{ s}$$

b). Aktivitas sample setelah meluruh selama 8 tahun

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ &= 0,6 \text{ Ci} e^{-2,649/\text{Th} \times 8 \text{ th}} \\ &= 4,63 \times 10^{-10} \text{ Ci} = 17,13 \text{ Bq} \end{aligned}$$

c). Jumlah inti pada sampel yang masih baru

$$\begin{aligned} N_0 &= R_0/\lambda = (0,6 \times 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq}) / (8,37 \times 10^{-8} / \text{s}) \\ &= 2,65 \times 10^{17} \text{ partikel} \end{aligned}$$

d) lama peluruhan supaya aktivitasnya tinggal 6 Bq

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-\lambda t} \\ t &= (1/\lambda) \ln (A_0/A) \\ &= (1/2,649 \text{ th}) \ln (0,6 \times 3,7 \cdot 10^{10} \text{ Bq} / 6 \text{ Bq}) \\ &= 8,4 \text{ tahun} \\ &= 2,65441 \times 10^8 \text{ s} \end{aligned}$$

### Latihan

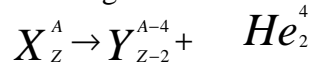
- Suatu sampel radioaktif aktivitasnya 0,2  $\mu\text{Ci}$  dan waktu paruhnya 8,1 hari, tentukanlah jumlah inti atom pada sampel radioaktif tersebut.
- Tritium waktu paruhnya 12,33 tahun, berapakah prosentasi inti yang sudah meluruh setelah sampel meluruh selama 5 tahun.
- Waktu paruh isotop Yodium ialah 8,04 jam, tentukanlah
  - konstanta peluruhan
  - jumlah inti isotop Yodium supaya sampel memiliki aktivitas 0,5  $\mu\text{Ci}$
- Sampel yang masih baru dari unsur radioaktif tertentu aktivitasnya ialah 10  $\mu\text{Ci}$ , setelah meluruh selama 4 jam aktivitasnya tinggal 8  $\mu\text{Ci}$ ,
  - Tentukanlah konstanta peluruhan dan waktu paruhnya
  - berapakah aktivitasnya setelah meluruh selama 30 jam
- Isotop radioaktif  $A_u$  memiliki waktu paruh 64,8 jam, bila aktivitas mula mulanya 40  $\mu\text{Ci}$ , tentukanlah

- a. konstanta peluruhan
- b. aktivitasnya setelah meluruh selama 150 jam
- c. jumlah inti mula mula dalam sampel tersebut.

**Proses Peluruhan**

1. Peluruhan alfa.

Suatu inti yang meluruh dengan memancarkan partikel  $\alpha$  nomor massanya berkurang 4 dan muatan atau nomor atomnya berkurang 2



dengan X disebut inti induk dan Y disebut inti anak energi disintergrasi

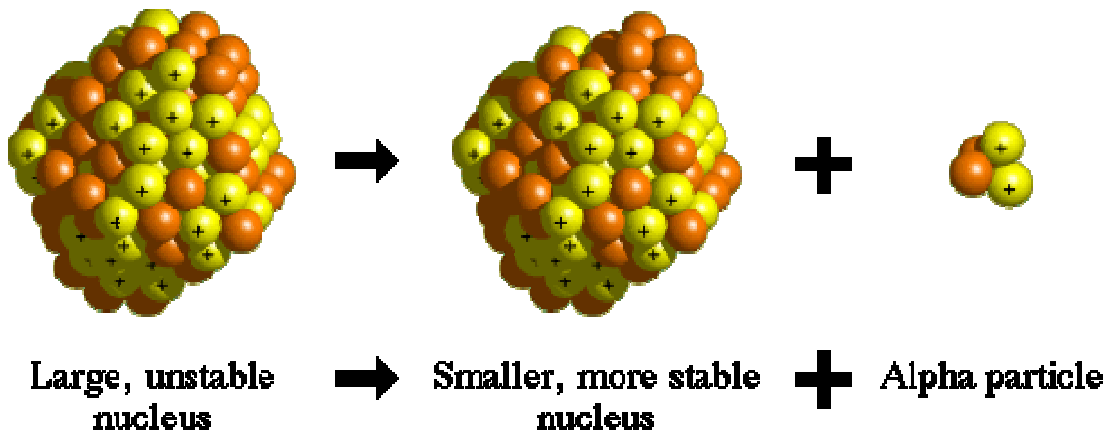
$$Q = (M_x - M_y - M_\alpha) 931,49 \text{ MeV/u}$$

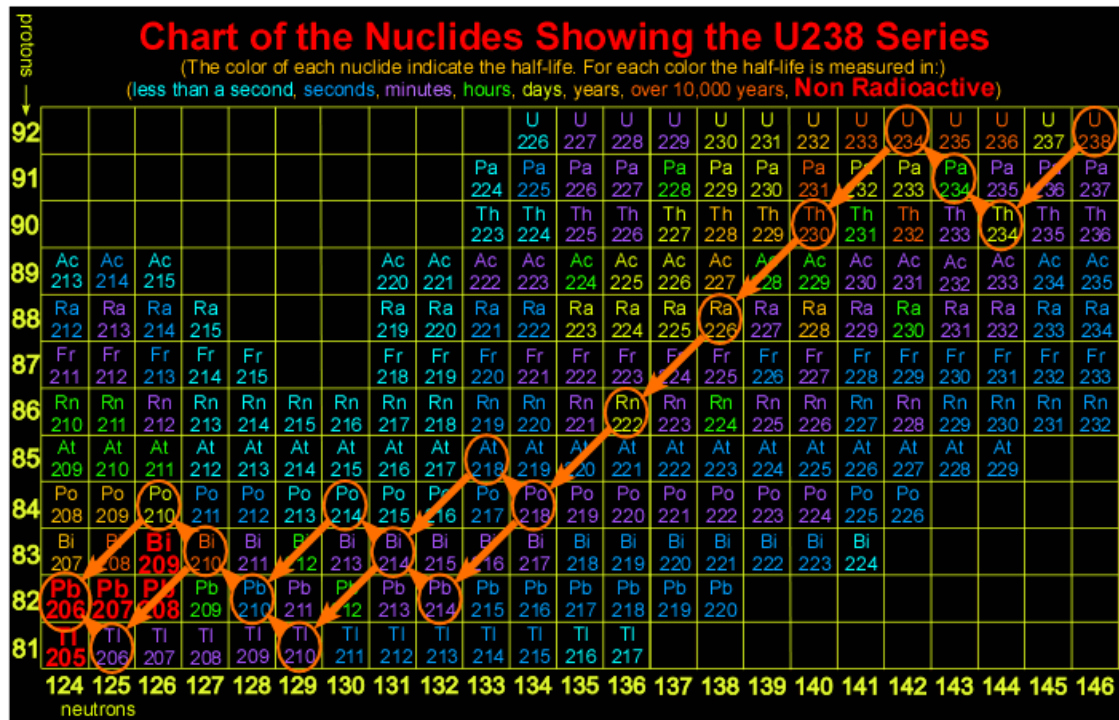
Energi diintegrasikan muncul dalam bentuk energi kinetic dari inti anak dan partikel Alfa.

$$Q = K_y + K_\alpha$$

Besarnya energi kinetic partikel alfa ialah

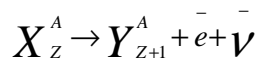
$$K_\alpha = \frac{mY}{mY + m\alpha} \cdot Q$$



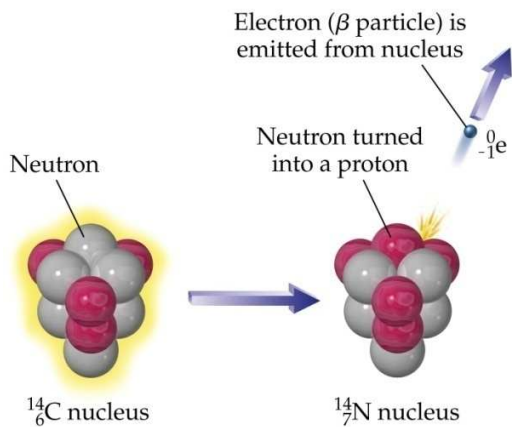


## 2 Peluruhan Beta

Peluruhan beta terdiri dari peluruhan beta electron dan peluruhan beta positron. Suatu inti yang meluruh memancarkan partikel berupa elektron juga sekaligus dipancarkan partikel antineutrino. Inti anak nomor massanya tidak berubah sedangkan muatan atau nomor atomnya bertambah satu. Apabila inti radioaktif tersebut meluruh memancarkan partikel beta berupa positron maka sekaligus juga akan dipancarkan partikel neutrino. Inti anak nomor massanya tetap sedangkan muatan atau nomor atomnya berkurang satu.

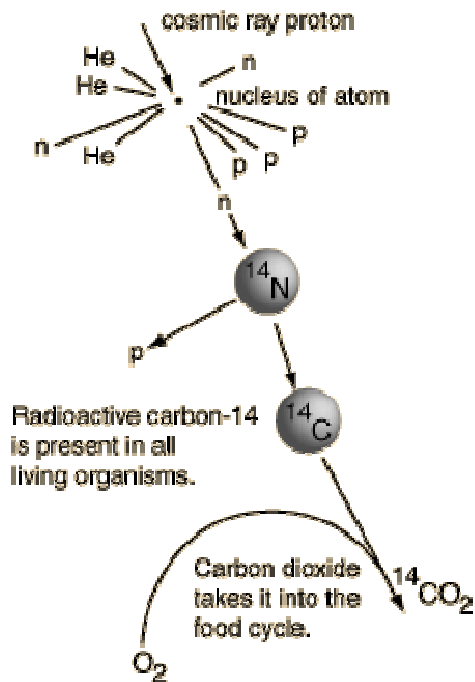


Positron adalah anti partikel dari electron, massanya sama tapi muatannya berlawanan dengan electron yaitu  $+1,602 \cdot 10^{-19} C$ . Neutrino anti partikelnya ialah antineutrino. Neutrino ialah partikel yang sangat kecil, massanya lebih kecil dari  $7 \text{ eV}/c^2$ , tidak bermuatan listrik dan interaksinya sangat lemah sehingga sukar dideteksi.

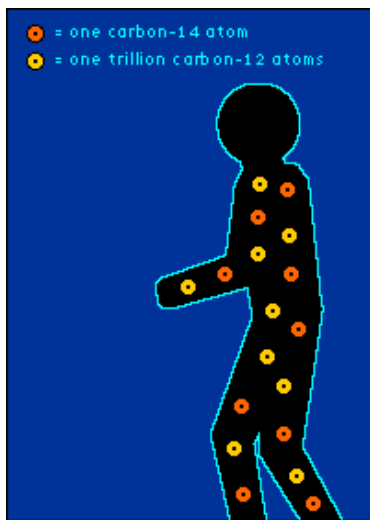


### Penerapan peluruhan beta

Peluruhan beta dari unsur  $\text{C}^{14}$  umumnya digunakan untuk menentukan umur fosil sample organic.  $\text{C}^{14}$  setiap saat diproduksi diatmofir kita. Rasio antara  $\text{C}^{14}$  terhadap  $\text{C}^{12}$  dalam molekul karbondioksida diatmofir kita harganya konstan  $1,3 \cdot 10^{-12}$ . seluruh organisme hidup mempunyai rasio  $\text{C}^{14}$  terhadap  $\text{C}^{12}$  yang sama karena secara terus menerus terjadi pertukaran  $\text{CO}_2$  dengan udara.



Ketika organisme itu mati maka rasio  $C^{14}$  terhadap  $C^{12}$  akan menurun hal itu disebabkan karena  $C^{14}$  meluruh dengan memancarkan sinar beta. Waktu paruh dari  $C^{14}$  ialah 5730 tahun. Dengan teknik ini dapat menentukan umur fosil organisme yang usianya antara 1000 – 25000 tahun yang lalu.



pertukaran  
berubah

lup,  
rgan  
k berubah

#### Contoh

Direruntuhan kota tua ditemukan sepotong batu bara muda yang massanya 25 gram, ketika diukur aktivitas unsur  $C^{14}$  dalam batu bara itu ialah 4,17 Bq. Tentukanlah berapa tahun umur batu bara tersebut terhitung sejak matinya pohon asal batu bara tersebut.

Jawab

Jumlah inti atom  $C^{12}$  dalam 25 gram bagian kayu asal batu bara itu ketika pohonnya masih hidup ialah

$$N(C^{12}) = \frac{25 \text{ gram}}{12 \text{ gram/mol}} \cdot 6,02 \times 10^{23} \text{ partikel/mol} \\ = 1,26 \times 10^{24} \text{ inti}$$

Jumlah inti atom  $C^{14}$  dalam 25 gram bagian kayu asal batubara ketika pohonnya masih hidup ialah

$$N(C^{14})/N(C^{12}) = 1,3 \times 10^{-12} \\ N(C^{14}) = 1,3 \times 10^{-12} \cdot N(C^{12}) = 1,3 \times 10^{-12} \cdot 1,26 \times 10^{24} \text{ inti} \\ = 1,6 \times 10^{12} \text{ inti}$$



Aktivitas mula mula sampel ialah

$$R_0 = N\lambda$$

Dengan  $\lambda = 0.693/5730 \text{ tahun} = 3,83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$

Maka

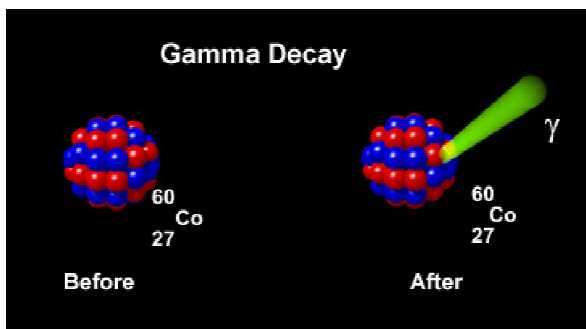
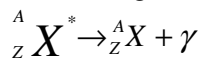
$$R_0 = 1,6 \times 10^{12} \text{ inti} \cdot 3,83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1} = 6,13 \text{ Bq}$$

Umur fosil batu bara tersebut ialah

$$R = R_0 e^{-\lambda t}$$

$$t = (\ln R_0/R) / \lambda = (\ln 6,13/4,17) / 3,83 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1} = 1 \times 10^{11} \text{ s} = 3200 \text{ tahun}$$

### 3 Peluruhan gama



### Radioaktivitas Alami

**Inti** radioaktif secara umum dapat dikelompokkan kedalam dua kelompok yaitu: 1) inti tak stabil yang ditemukan di alam yang disebut radioaktivitas alami, 2) inti radioaktif yang dibuat di pabrik melalui reaksi inti yang disebut radioaktivitas buatan. Setiap unsur radioaktif akan meluruh hingga akhirnya berubah menjadi inti yang stabil. Table berikut adalah 4 deret radioaktif

Deret	Isotop mula mula	Waktu paruh (tahun)	Produk akhir yang stabil
Uranium	$U_{92}^{238}$	$4,47 \times 10^9$	$Pb_{82}^{206}$
Aktinium	$U_{92}^{235}$	$7,04 \times 10^8$	$Pb_{82}^{207}$
Thorium	$Th_{90}^{232}$	$1,41 \times 10^{10}$	$Pb_{82}^{208}$
Neptunium	$Np_{93}^{237}$	$2,14 \times 10^6$	$Bi_{83}^{209}$

## BAB 6 REAKSI INTI

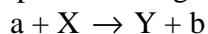
### Pendahuluan

Pada bab ini secara khusus kita akan mempelajari reaksi inti yaitu bertumbuhkannya suatu partikel dengan inti dan inti berubah menjadi inti yang baru. Akan dipelajari dua tipe reaksi inti yaitu reaksi fisi nuklir dan reaksi fusi nuklir beserta pemanfaatannya untuk kesejahteraan umat manusia dalam wujud pembangkit listrik tenaga nuklir dan lainnya. Selain itu juga akan dipelajari bagaimana reaksi berantai pada fisi nuklir telah dimanfaatkan orang untuk membuat senjata pemusnah massal yaitu bom atom.

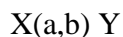
### Reaksi Inti

Dimungkinkan untuk mengubah struktur suatu inti dengan cara membombardir inti tersebut dengan partikel energetik. Proses tumbukan seperti itu yang mampu mengubah identitas inti target disebut reaksi inti. Reaksi inti pertama kali diamati oleh Rutherford pada tahun 1919. Sejak saat itu ribuan reaksi nuklir telah diamati terutama setelah ditemukannya alat pemercepat partikel pada tahun 1930.

Reaksi inti dapat terjadi ketika inti target X yang dalam keadaan diam dibombardir oleh partikel energetik a hingga dihasilkan inti baru Y dan partikel baru b



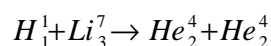
atau



Pada reaksi inti ini berlaku hukum kekekalan yaitu :

- Hukum kekekalan nomor massa : jumlah nucleon total sebelum dan sesudah reaksi sama.
- Hukum kekekalan muatan atau nomor atom : jumlah muatan sebelum dan sesudah reaksi sama
- Hukum kekekalan energi , momentum linier dan momentum orbital.

Contoh pada reaksi Cockroft Walton yang pertama kali reaksi ini diamati tahun 1932



Jumlah nomor massa sebelum reaksi  $1 + 7 = 8$  sama dengan jumlah nomor massa setelah reaksi  $4 + 4 = 8$ . Jumlah muatan sebelum reaksi  $1 + 3 = 4$  sama dengan jumlah muatan setelah reaksi  $2 + 2 = 4$ .

Energi yang dihasilkan atau diserap dari reaksi seperti itu disebut energi reaksi Q yaitu

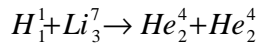
$$Q = (M_x + M_a - M_y - M_b) \cdot 931,49 \text{ MeV}$$

Apabila reaksi inti tersebut membebaskan sejumlah energi atau Q positif maka disebut reaksi eksotermik. Energi reaksi sebagai hasil dari perubahan massa inti menjadi energi kinetik dari partikel produk Y dan b. Apabila pada reaksi tersebut harga Q negative maka diperlukan energi kinetik input minimum pada proses pembombardiran partikel supaya reaksi bisa berlangsung. Reaksi seperti itu dinamakan reaksi endotermik. Pada reaksi endotermik partikel datang harus memiliki harga energi kinetik minimum (energi kinetik ambang) tertentu supaya reaksi inti bisa berlangsung. Besar energi kinetik ambang ialah

$$K_{th} = -Q \left( 1 + \frac{M_a}{M_x} \right)$$

Contoh 1

Pada reaksi Cockroft Walton berikut

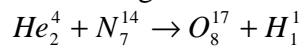


Tentukanlah a).Energi reaksi , b). Apakah reaksi tersebut eksotermik atau endotermik, ng  
Jawab

- a).  $Q = (M_x + M_a - M_y - M_b) \cdot 931,49 \text{ MeV}$   
 $= (7,016003 + 1,007825 - 4,002603 - 4,002603) \times 931,49 \text{ MeV}$   
 $= 17,3 \text{ MeV}$
- b) karena Q positif berarti reaksinya Eksotermik

Contoh 2

Tentukanlah energi kinetik ambang dari partikel alfa pada reaksi inti berikut



Jawab

Energi reaksi  $Q = (M_x + M_a - M_y - M_b) \cdot 931,49 \text{ MeV}$   
 $= (14,003074 + 4,002603 - 17,014915 - 1,007828) \times 931,49 \text{ MeV}$   
 $= -15,8968 \text{ MeV}$

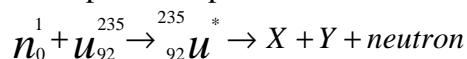
Energi kinetik ambang partikel alfa

$$K_{th} = -Q \left( 1 + \frac{M_a}{M_x} \right) = 15,8968 \left( 1 + \frac{4,002603}{14,003074} \right) \text{ MeV}$$

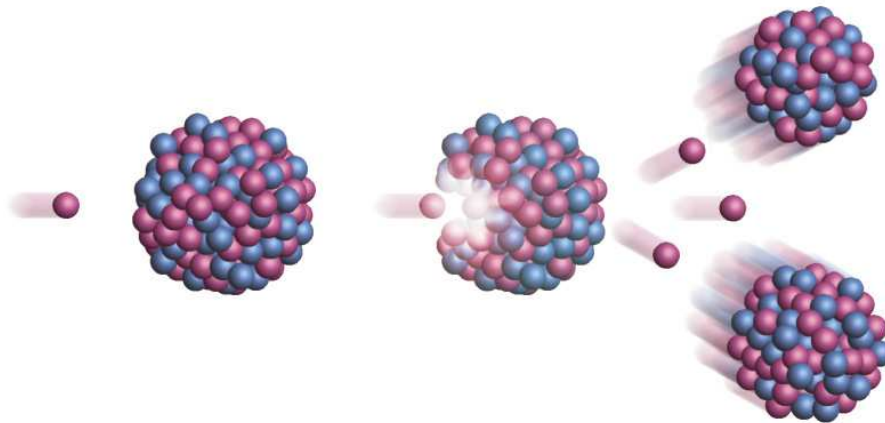
$$= 20,4407 \text{ MeV}$$

## Fisi Nuklir

Fisi nuklir terjadi ketika inti yang sangat berat seperti  $U^{235}$  pecah menjadi dua fragmen yang lebih kecil dengan masing masing massanya hampir sama. Proses fisi nuklir pertama kali diamati oleh Otto Hahn dan Fritz Strassmann pada tahun 1939 Neutron termal dapat menciptakan fisi dalam  $U^{235}$  seperti berikut

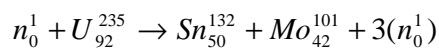
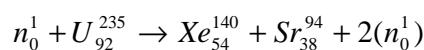
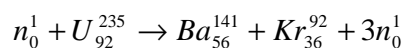


dimana X dan Y adalah dua inti baru yang massanya tidak berbeda jauh. Pada setiap fisi akan dihasilkan 2 atau 3 neutron baru atau rata ratanya 2,5. Neutron baru ini memiliki energi kinetic besar. Inti inti baru yang terbentuk selanjutnya melakukan serangkaian peluruhan gama dan beta hingga pada akhirnya menjadi berbagai macam isotop. Energi yang dihasilkan untuk setiap fisi dari  $U^{235}$  adalah sekitar 200 MeV. Proses fisi nuklir digambarkan pada gambar berikut ini

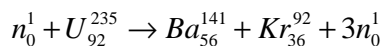


Gb. Fisi nuklir

Neutron thermal menembak suatu inti atom, inti atom tereksitasi sehingga terjadi ketidakseimbangan, inti atom bervibrasi dan makin lama getarannya makin kuat sehingga akhirnya inti pecah menjadi dua inti baru disertai beberapa neutron baru. Contoh reaksi fisi nuklir ialah



Contoh: Pada reaksi Fisi nuklir berikut



- tentukanlah jumlah energi yang dihasilkan bila massa  $n = 1,008665 \text{ u}$ , massa  $U = 235,043915 \text{ u}$ , massa  $Ba = 140,9139$  dan massa  $Kr = 91,8973 \text{ u}$
- Hitunglah jumlah energi yang dibebaskan jika 1 Kg Uranium tersebut melakukan fisi lengkap.
- Bila energi pada soal b) seluruhnya dikonversi menjadi energi listrik berapa KWH jumlah energi listrik yang dihasilkan ( $1\text{MeV} = 4,14 \times 10^{-20} \text{KWH}$ )

Jawab

- a). Energi yang dihasilkan ketika 1 buah inti atom Uranium melakukan fisi ialah

$$\begin{aligned} Q &= \{(235,043915 + 1,008665) - (140,9139 + 91,8973 + 3 \times 1,008665)\} \times 931,49 \text{ MeV} \\ &= (236,05257 - 235,83719) \times 931,49 \text{ MeV} \\ &= 200,6 \text{ MeV} \end{aligned}$$

- b). Jumlah inti uranium dalam 1 Kg sample uranium ialah

$$N = \frac{1000 \text{ gram}}{235 \text{ gram / Mol}} \times 6,02 \cdot 10^{23} \text{ partikel / mol} = 2,56 \times 10^{24} \text{ inti}$$

Energi yang dibebaskan dari 1 inti ketika melakukan fisi ialah 200,6 MeV

Maka jumlah energi total yang dibebaskan ialah

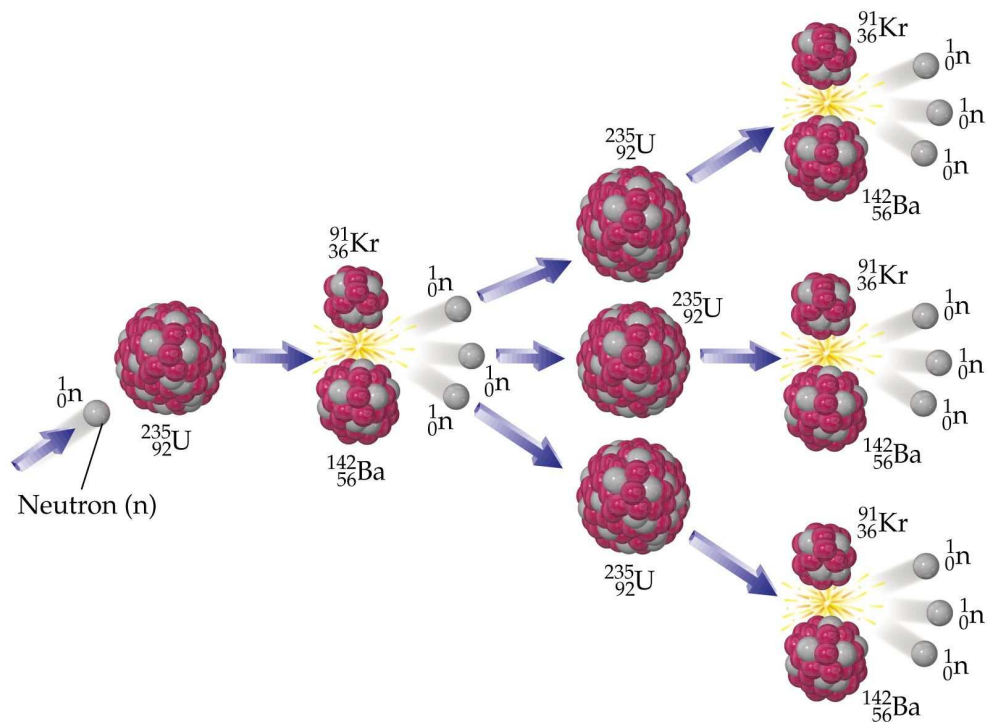
$$\begin{aligned} E &= NQ = 2,56 \cdot 10^{24} \text{ partikel} \times 200,6 \text{ MeV / partikel} \\ &= 5,13536 \times 10^{26} \text{ MeV} \end{aligned}$$

- d) Jumlah energi listrik yang dihasilkan ialah

$$\begin{aligned}
 E &= 5,13536 \times 10^{26} \text{ MeV} \times 4,14 \cdot 10^{-20} \text{ KWH/MeV} \\
 &= 2,126 \times 10^7 \text{ KWH} \\
 &= 21,26 \text{ GWH}
 \end{aligned}$$

### Reaksi Berantai

Bila neutron baru yang dihasilkan itu menembak inti inti lainnya maka akan terjadi reaksi berantai



Gb. Reaksi berantai

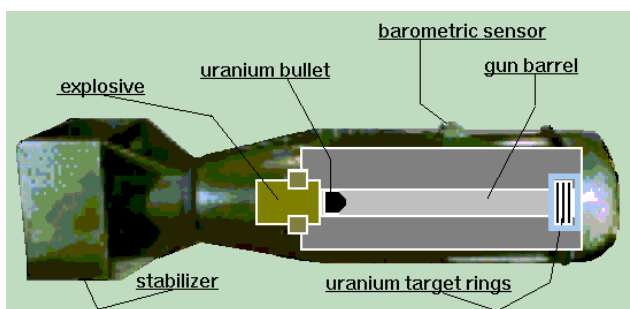
Contoh reaksi berantai ialah pada bom atom

### Reaktor Fisi Nuklir

Reaksi fisi berantai adalah reaksi fisi yang tidak terkendali. Setiap neutron baru yang dihasilkan dari reaksi fisi sebelumnya menyebabkan terjadinya fisi baru pada inti inti atom lain yang belum melakukan fisi. Reaksi fisi tak terkendali inilah yang dijadikan konsep dasar dalam pembuatan bom atom. Berikut ini adalah gambar bom atom yang diberi nama Little Boy yang dijatuhkan oleh USA di Jepang pada perang dunia ke 2

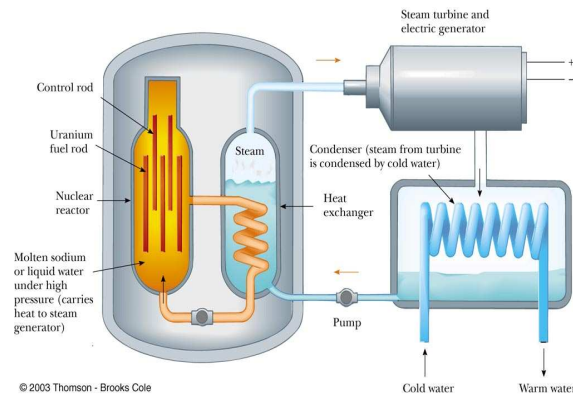
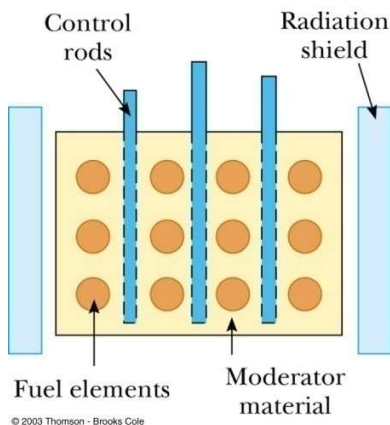


**Name: Little Boy**  
**Type: Uranium gun-type fission**  
**Weight: 9,700lb (4400 kg)**  
**Length: 10 ft, 6 in (3.2m)**  
**Diameter: 29 in (0.737m)**  
**Explosive Yield: 15,000 tons of TNT**



Uranium 'bullet'  
 ditembakkan ke  
 Uranium target  
 Terjadi Critical mass  
 , dihasilkan reaksi  
 berantai fisi tak  
 terkendali

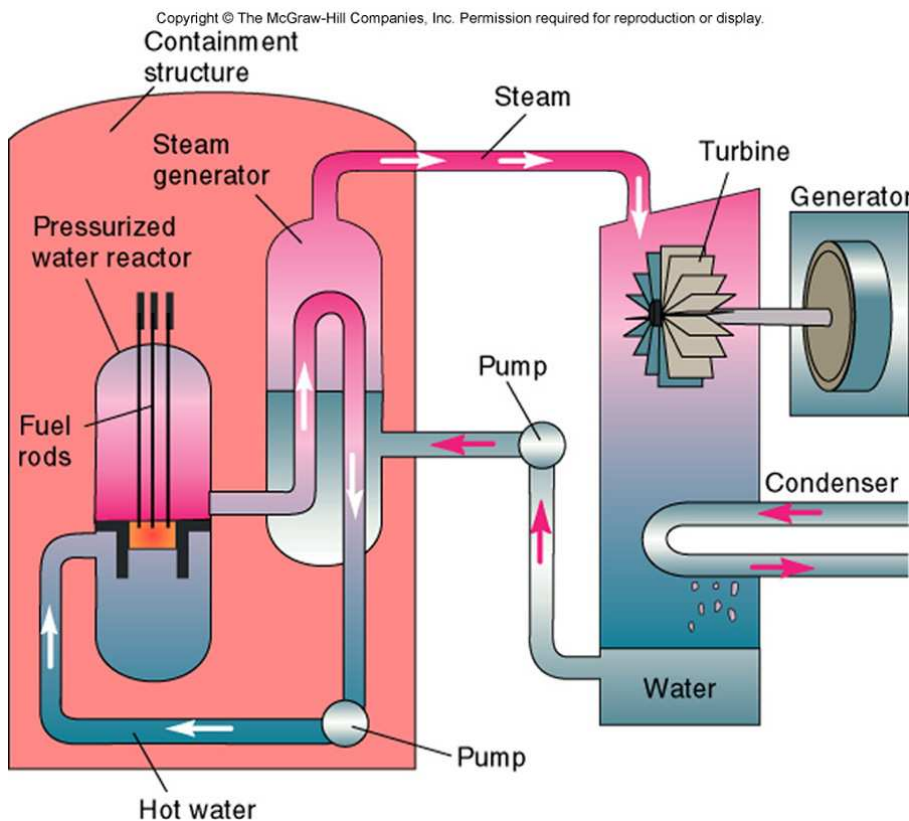
Pada reactor fisi nuklir jumlah neutron yang diijinkan untuk menembak inti lainnya yang belum melakukan fisi jumlahnya dikendalikan



- Reaktor dalam nuclear power plant serupa dengan boiler pada fossil fuel plant – Sebagai penghasil panas.
- Bagian bagian dasar reaktor:
  - Core (berisi material fisi atau bahan bakar untuk reaksi fisi)
  - Moderator (*slows neutrons down to enhance capture*)
  - Control rods (mengontrol penyerapan neutron)

- Coolant (memindahkan panas dari core ke mesin PLTU untuk menghasilkan listrik)
- Shielding (menahan radiasi supaya tidak keluar dari reaktor)

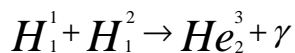
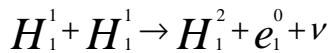
Konstanta reproduksi  $K$  adalah jumlah rata rata neutron yang dihasilkan dari setiap kejadian fisi yang masih menyebabkan terjadi reaksi fisi berikutnya. Pada reactor nuklir diperlukan pengaturan supaya  $K$  harganya sedikit lebih besar dari 1 supaya reaksi terus berlangsung . Harga  $K = 1$  disebut keadaan kritis, dan bila  $K$  lebih kecil dari 1 maka reactor ada dalam keadaan subkritis dan reactor akan mati. Harga  $K$  dipengaruhi oleh beberapa factor diantaranya : geometri reactor , rata rata energi neutron ,dan peluang penangkapan neutron. Energi neutron diregulasi dengan material moderator yaitu untuk memperlambat neutron energetic dan selanjutnya meningkatkan peluang penangkapan neutron oleh inti  $U^{235}$  lainnya. Level daya reactor diatur dengan batang kendali (control rod) yang terbuat dari material yang dapat menyerap neutron dengan efisien. Harga  $K$  dapat diatur dengan memasukan batang kendali kedalan inti reactor pada berbagai kedalaman.



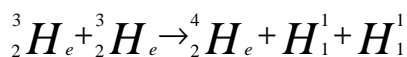
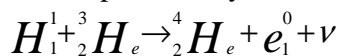
Gb. Bagian bagian dari PLTN

## Fusi Nuklir

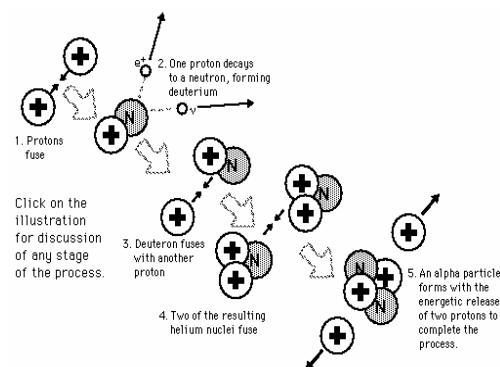
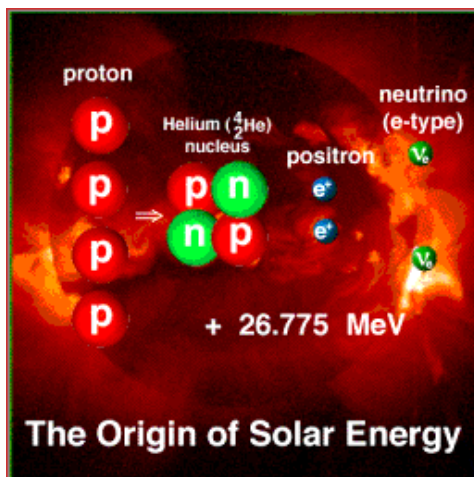
Fusi nuklir adalah suatu proses dimana dua inti ringan bergabung (fusi) membentuk inti yang lebih berat. Pada proses ini sejumlah energi yang cukup harus disuplai pada partikel partikel untuk dapat mengatasi gaya tolak coulomb (coulomb barrier). Temperatur yang dibutuhkan untuk menghasilkan fusi adalah dalam orde  $10^8$  K<sup>o</sup> dimana pada temperature ini seluruh materi berubah menjadi plasma. Contoh reaksi fusi yang terjadi pada matahari dimana energi yang dihasilkannya menjamin kelangsungan hidup organisme yang ada dibumi ini



reaksi tahap berikutnya



pada setiap tahap reaksi tersebut akan dibebaskan sejumlah energi. Selanjutnya proton proton yang dihasilkan akan kembali melakukan fusi seperti pada tahap pertama sehingga membentuk siklus proton proton.

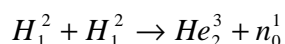


Gb.Rantai Fusi proton proton

Reaksi fusi nuklir merupakan sumber energi masa depan , sumber atau bahan untuk fusi seperti deuterion melimpah ruah dibumi kita , dari 1 galon air dapat diekstrak untuk menghasilkan 0,12 gram deuterion. Bila dua partikel deuterion melakukan fusi akan dihasilkan energi sebesar 3,27 MeV – 4,03 MeV. Energi 1 MeV bila dikonversi menjadi energi listrik akan dihasilkan  $4,14 \cdot 10^{-20}$  KWh.

Contoh

Dua buah inti deuterium melakukan fusi nuklir



a).Hitunglah jumlah energi yang dibebaskan pada reaksi fusi tersebut. Diketahui massa Deuterium =2,014102 u ,massa isotop helium =3,016029 dan massa neutron =1,008665 u



- b) bila 1 kg inti deuterium melakukan fusi lengkap berapa jumlah energi listrik yang dihasilkan.
- c) Bila total energi fusi pada soal b) dikonversi menjadi energi listrik berapa KWH energi listrik yang dihasilkan.
- d) bila 1 kg deuterium tersebut diperoleh dengan cara mengekstrak air , berapa galon air yang diperlukan .

Jawab

- a) Energi yang dihasilkan dari dua buah deuterium melakukan fusi nuklir

$$Q = [(2,014102 + 2,014102) - (3,016029 + 1,008665)] \times 931,49 \text{ MeV} \\ = 3,27 \text{ MeV}$$

- b) Banyaknya inti Deuterium dalam 1 kg sampel deuterium

$$N = \frac{1000 \text{ gram}}{2 \text{ gram/mol}} \cdot 6,02 \times 10^{23} \text{ partikel/mol} \\ = 3,01 \times 10^{26} \text{ inti}$$

Jumlah energi total yang dihasilkan bila 1 kg deuterium melakukan fusi lengkap ialah

$$E = (N/2)Q = (3,01 \times 10^{26} \text{ partikel}/2)(3,27 \text{ MeV/partikel}) \\ = 4,92135 \times 10^{26} \text{ MeV}$$

- c). Bila energi total dari 1 kg deuterium dikonversi menjadi energi listrik maka jumlah energi listrik yang dihasilkan ialah

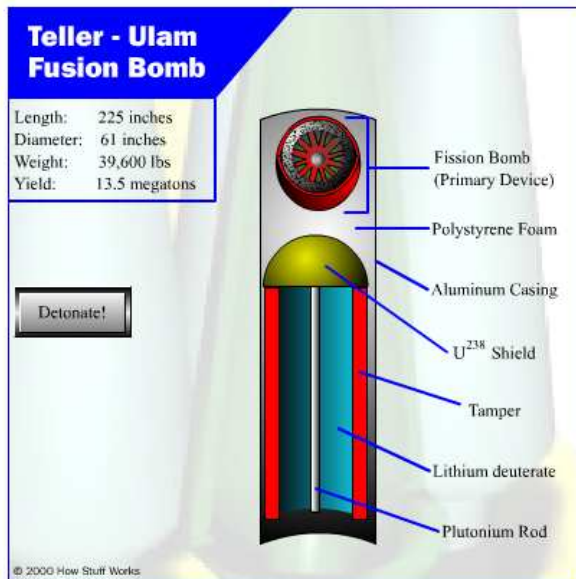
$$E = 4,92135 \times 10^{26} \text{ MeV} \times 4,14 \cdot 10^{-20} \text{ KWH/MeV} \\ = 2,0374 \times 10^7 \text{ KWH}$$

- d).Banyaknya air yang harus diekstrak untuk menghasilkan 1 kg deuterium ialah

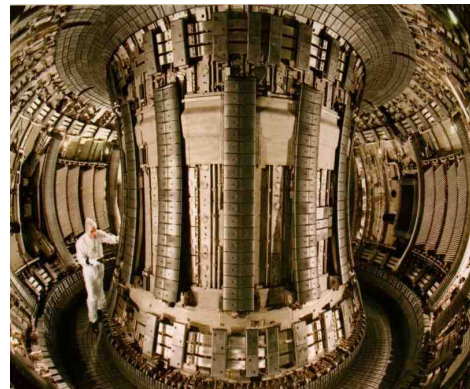
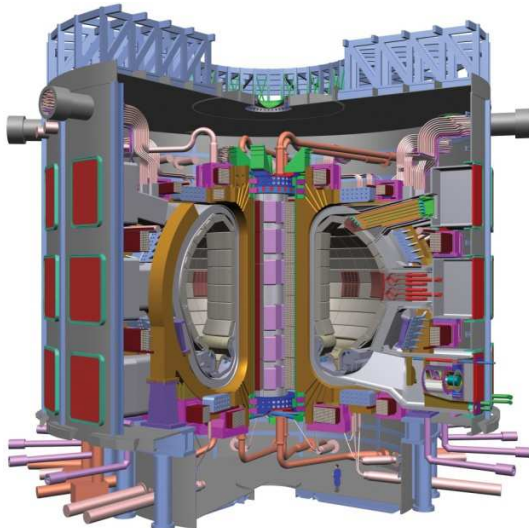
$$(1 \text{ kg}) / (0,12 \text{ gram/galon air}) = 8333,3 \text{ galon air}$$

Reaksi Fusi nuklir tak terkendali dan Reaktor Fusi Nuklir

Reaksi fusi nuklir tak terkendali selain terjadi di matahari juga pernah dilakukan pada pembuatan bom Hidrogen. Berikut ini adalah gambar bom Hidrogen dan reactor fusi nuklir



### Reaktor Fusi Nuklir



Gb. Proposed ITER fusion test reactor

### Intraksi Partikel dengan Materi

Ketika partikel energetic berinteraksi dengan medium , partikel akan kehilangan energinya yang disebabkan oleh beberapa proses. Partikel berat seperti partikel alfa ,ketika berinteraksi dengan medium akan kehilangan sebagian besar energinya karena

mengionisasi dan mengeksitasi atom atom yang berada disekitarnya dalam medium. Partikel memiliki rentang terbatas dalam medium yang tergantung pada energi, massa dan muatan partikelnya. Elektron energetic yang bergerak dalam suatu medium juga akan kehilangan energinya karena mengionisasi dan mengeksitasi atom atom yang berinteraksi dengannya dalam medium. Photon atau sinar gama dapat diserap oleh medium melalui beberapa proses : efek foto listrik , hamburan Compton dan produksi pasangan.

Jika seberkas foton dengan intensitas  $I_0$  masuk kedalam suatu medium ,maka intensitas berkas foton itu akan menurun secara eksponensial seiring dengan makin dalamnya sinar masuk kedalam medium,

$$I(x) = I_0 e^{-\mu x}$$

Dengan  $x$  adalah jarak yang dilalui dalam medium ,  $I(x)$  adalah intensitas berkas foton setelah melalui jarak  $x$  dalam medium , dan  $\mu$  adalah koefisien absorpsi linier dari medium.

