

II. TINJAUAN PUSTAKA.

II.1. RADIOAKTIVITAS

Radioaktivitas adalah peristiwa meluruhnya inti yang tak stabil untuk memperoleh konfigurasi baru yang stabil.

Apabila kita menyelidiki lebih jauh ke dalam atom, kita dapati bahwa pada pusatnya terdapat inti atom (sering disebut inti saja). Inti atomlah yang menghasilkan gaya tarik listrik yang menghimpun atom menjadi satu kesatuan. Bila gaya tarik coulomb oleh inti atom tidak ada, gaya tolak menolak antara elektron akan memisahkan kesatuan atom tadi. Tetapi gaya apakah yang mengatasi gaya tolak antara muatan positif pada permukaan inti atom yang menderita gaya tolak listrik dari inti atom yang memberikannya energi potensial sekitar 100 Mev. Karena itu, untuk dapat mempertahankan muatan positif tersebut di dalam inti atom, gaya inti harus memberikan jumlah energi ikat yang melebihi 100 Mev. (Kenneth S. Krane translated by Hans J. Wospakrik., 1992. Fisika Modern. Jakarta: UI Press, hal. 343)

Terdapat persamaan antara struktur atom dan struktur inti atom, yang memudahkan kita melengkapi berbagai sifat inti atom. Perilaku inti atom tunduk pada hukum - hukum fisika kuantum. Mereka memiliki keadaan dasar dan eksitasi serta memancarkan foton (yang dikenal sebagai sinar gamma) sewaktu melakukan transisi antara berbagai keadaan eksitasinya. Seperti halnya keadaan atom, keadaan inti

atom juga ditandai oleh momentum sudut totalnya.

Tetapi juga terdapat perbedaan utama antara kajian struktur atom dan struktur inti atom. Dalam fisika atom, elektron merasakan gaya yang ditimbulkan inti, tak ada campur tangan gaya dari luar. Partikel-partikel penyusun inti atom bergerak kesana kemari dibawah pengaruh gaya yang mereka timbulkan sendiri. Interaksi timbal balik antar elektron memang mempengaruhi skema tingkat energi atom, tetapi sahamnya relatif kecil. Sebagian besar struktur atom dapat kita pahami semata-mata berdasarkan pada kajian interaksi antara elektron dan inti atom, efek elektron - elektron lainnya kita perlakukan sebagai suatu gangguan kecil. Dalam fisika inti, interaksi timbal balik antara partikel penyusunnya lah yang memberikan gaya inti, sehingga kita tidak boleh memperlakukan persoalan benda banyak ini sebagai suatu gangguan.

II.1.1. RADIOAKTIVITAS ALAM.

Semua unsur setelah unsur paling ringan (Hidrogen dan Helium) diciptakan melalui radiasi inti pada bagian dalam bintang. Reaksi ini tidak hanya menghasilkan unsur - unsur stabil, tetapi juga yang bersifat radioaktif. Sebagian besar unsur radioaktif memiliki usia paruh dalam orde hari atau tahun, yang masih jauh lebih kecil dari pada usia bumi ($\pm 4,5 \cdot 10^9$ tahun). Oleh karena itu, unsur - unsur yang mungkin tercipta saat bumi terbentuk telah meluruh ke unsur - unsur stabil. Tetapi beberapa unsur radioaktif yang diciptakan dahulu kala memiliki usia

1

paruh yang berorde sama dengan usia bumi, sehingga sekarang masih tetap ada dan masih dapat diamati mengalami peluruhan radioaktif. Unsur - unsur ini adalah sebagian dari latar belakang radioaktif alam (natural radioaktif) yang hingga kini masih teramati.

Proses radioaktif mengubah nomor masa A sebuah inti atom sebanyak empat satuan (peluruhan alfa) atau sama sekali tidak mengubah A (peluruhan beta atau gamma). Suatu proses peluruhan radioaktif dapat merupakan bagian dari suatu urutan atau deretan peluruhan jika suatu unsur radioaktif dengan nomor masa A meluruh ke suatu unsur radioaktif lain dengan nomor massa A atau $A - 4$. Deretan proses seperti ini akan terus berlangsung hingga tercapai suatu unsur stabil.

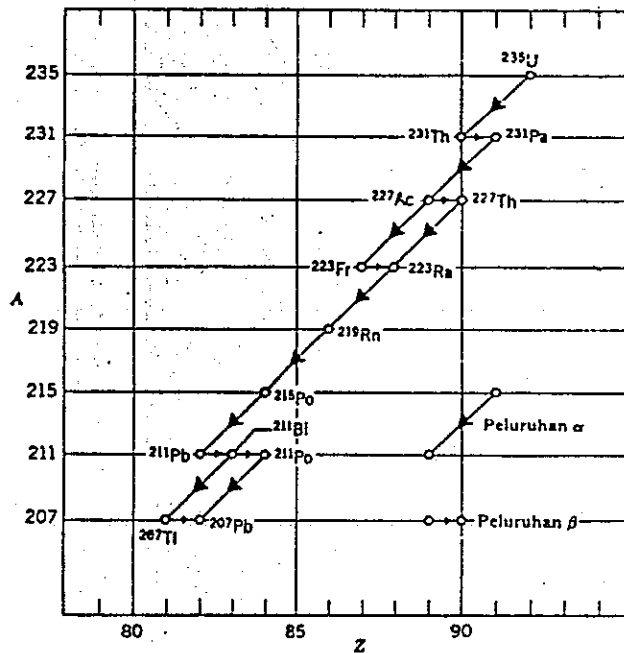
Nilai - nilai A dari anggota rantai peluruhan seperti itu berbeda sebesar faktor kelipatan empat (termasuk nol sebagai suatu kelipatan yang mungkin). Dengan demikian, kita memperkirakan ada empat rantai peluruhan yang mungkin, dengan masing - masing nilai A-nya dapat dinyatakan sebagai $4n$, $4n+1$, $4n+2$, $4n+3$ dengan n sebuah bilangan bulat. Salah satu dari keempat deret radioaktif alam ini dilukiskan dalam gambar II.1. Tiap deret dimulai dengan suatu anggota berusia panjang, yang kemudian meluruh melalui sejumlah peluruhan alfa dan beta, yang mungkin memiliki usia paruh yang sangat singkat, dan pada akhirnya berakhir dengan suatu isotop stabil. Ada tiga deret yang dimulai dengan isotop - isotop yang berusia paruh kurang lebih sama dengan usia bumi, sehingga

masih teramati sampai sekarang. Deret Neptunium ($4n+1$) dimulai dengan ^{237}Np yang mempunyai usia hidup hanya $2,1 \cdot 10^6$ tahun, jauh lebih kecil dibanding dengan usia bumi. Jadi, semua ^{237}Np yang semula ada telah lama habis meluruh ke ^{209}Bi .

Ini mungkin tampak seperti laju pelepasan energi yang sangat kecil. Tetapi jika energi ini muncul sebagai energi panas dan tak ada yang hilang (dissipation) lewat beberapa cara (radiasi atau konduksi ke bahan lain, misalnya), maka tiap tahun 1 gram cuplikan ^{238}U akan mengalami kenaikan suhu 25 derajat celcius dan akan melebur serta menguap dalam orde satu abad. Perhitungan ini menyerankan bahwa panas bagian dalam planet mungkin sebagian disebabkan oleh proses radioaktif alam. (Kenneth S. Krane translated by Hans J. Wospakrik. 1992. Fisika Modern. Jakarta: UI Press, hal. 380).

Ada sejumlah isotop radioaktif alam lain yang tidak termasuk dalam rantai peluruhan unsur - unsur besar. Daftar sebagiannya diberikan dalam tabel II.1, beberapa diantaranya dapat digunakan sebagai penentuan usia secara radioaktif.

Beberapa unsur radioaktif lain dihasilkan secara kontinu dalam atmosfer bumi sehingga hasil reaksi inti antara molekul udara dengan partikel berenergi tinggi yang dikenal sebagai *sinar kosmik*. Yang paling dikenal dan bermanfaat dari semuanya ini adalah ^{14}C , yang mengalami peluruhan beta dengan usia paruh 5730 tahun.



Gambar II.1. Rantai Peluruhan ^{235}U

ISOTOP	$T_{1/2}$ (Th)
^{40}K	$1,28 \cdot 10^{10}$
^{87}Rb	$4,8 \cdot 10^{10}$
^{92}Nb	$3,2 \cdot 10^7$
^{113}Cd	$9,0 \cdot 10^{15}$
^{115}In	$5,1 \cdot 10^{14}$
^{138}La	$1,1 \cdot 10^{11}$
^{176}Lu	$3,6 \cdot 10^{10}$
^{187}Re	$4,0 \cdot 10^{10}$

Tabel II.1 : Beberapa Isotop Radioaktif Alam.

II.1.2. HUKUM PELURUHAN RADIOAKTIF.

Sampel yang mempunyai nomor yang sangat besar dari radionuklida, yang jenisnya sama dan dianggap bahwa semua

peluruhan inti prosesnya sama, apakah dengan emisi alfa, beta, atau gamma. Proses ini adalah proses statistik, berarti bahwa saat satu inti (nuklida) meluruh, itu tidak dapat mengulangi lagi. Diasumsikan bahwa sampel pada waktu t dan N inti yang belum meluruh. Jumlah peluruhan selama interval waktu dari t ke $t+dt$ harus sebanding dengan dt . Ini dapat ditulis sebagai :

$$-dN = \lambda N dt$$

koefisien kesebandingan λ disebut konstanta peluruhan dan ditulis sebagai :

$$\lambda = - \frac{1}{N} \frac{dN}{dt} \dots\dots\dots(II.1)$$

Konstanta peluruhan sama untuk fraksi inti dalam sampel yang diberikan yang meluruh persatuan waktu, atau untuk inti tunggal itu adalah merupakan kebolehjadian untuk meluruh tiap satuan waktu. Dengan pengintegralan persamaan (II.1) didapatkan:

$$N = N_0 e^{-\lambda t} \dots\dots\dots(II.2)$$

N adalah jumlah total inti radioaktif pada waktu $t=0$. Dengan derivatif persamaan (II.2), kita dapatkan :

$$- \frac{dN}{dt} = \lambda N = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = - \left(\frac{dN}{dt} \right)_0 e^{-\lambda t} \dots(II.3)$$

Waktu paruh inti radioaktif ($t_{1/2}$) dinyatakan sebagai waktu selama jumlah inti berubah dalam satu waktu paruh dari harga sebelumnya. Dengan menggunakan persamaan

(II.2) kita ambil $1/2 = e^{-\lambda t}$ yang memberikan

$$t_{\frac{1}{2}} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0,693}{\lambda} \dots\dots\dots(II.4)$$

Umur rata - rata dari inti radioaktif diberikan dengan

$$\tau = \frac{1}{N} \int_0^{\infty} t (-dN) = \int_0^{\infty} t \lambda e^{-\lambda t} dt = \frac{1}{\lambda} \dots\dots\dots(II.5)$$

Konstanta peluruhan λ , bersama dengan type peluruhan dengan energi peluruhan, merupakan sifat inti radioaktif dan dapat dipandang sebagai sesuatu yang menandakannya.

II.1.3. HUKUM - HUKUM KEKALKAN DALAM PELURUHAN RADIOAKTIF.

Kajian tentang berbagai peluruhan radioaktif dan reaksi inti memperlihatkan alam tidak memiliki sembarang hasil peluruhan atau reaksi yang terjadi, melainkan terdapat beberapa hukum tertentu yang membatasi hasil yang mungkin terjadi. Hukum - hukum ini kita sebut hukum kekekalan yang memberikan wawasan penting terhadap perilaku dasar alam. Beberapa hukum kekekalan ini, yang diterapkan pada proses peluruhan adalah :

1. Kekekalan energi.

Adalah hal yang paling penting dari semua hukum kekekalan. Hukum ini memberitahu kita mengenai peluruhan mana yang paling mungkin terjadi dan pula memungkinkan kita menghitung energi diam atau energi kinetik dari hasil peluruhan. Sebagai contoh, sebuah inti X hanya dapat meluruh menjadi inti X' yang lebih ringan. Selain itu ia

memancarkan pula satu atau lebih partikel yang secara bersama kita sebut x . Jika massa diam X lebih besar dari pada massa total $X'+x$. Kelebihan energi massa ini kita sebut nilai Q peluruhan

$$m_0(X) c^2 = m_0(X') c^2 + m_0(x) c^2 + Q$$

$$Q = (m_0(X) - m_0(X') - m_0(x)) c^2 \dots\dots(II.6)$$

m_0 adalah massa diam inti (nucleos). Jelas, peluruhan ini hanya dapat terjadi jika Q bernilai positif. Kelebihan energi Q ini muncul sebagai energi kinetik partikel - partikel hasil peluruhan (dengan anggapan X mula - mula diam) :

$$Q = K_{X'} + K_x \dots\dots\dots(II.7)$$

2. Kekekalan momentum linear.

Jika inti yang meluruh pada awalnya diam, maka momentum total semua partikel hasil peluruhannya haruslah nol,

$$P_{X'} + P_x = 0 \dots\dots\dots(II.8)$$

Biasanya, massa partikel atau partikel - partikel x yang dipancarkan lebih kecil dari pada massa inti sisa X' , sehingga momentum partikel P_x , menghasilkan energi kinetik K_x yang kecil.

3. Kekekalan momentum sudut.

Ada dua jenis momentum sudut : momentum sudut spin s dan momentum sudut gerak atau orbital l . Dalam kerangka diam

dari inti X, momentum sudut total sebelum peluruhan adalah S_X . Setelah peluruhan, kita mempunyai sejumlah spin dari inti X' dan partikel - partikel x, dan juga sejumlah momentum sudut $l = r \times p$ dari x dan X', yang bergerak relatif terhadap titik dalam ruang yang semula ditempati oleh inti X. Dengan demikian hukum ini mensyaratkan bahwa

$$S_X = S_{X'} + S_x + l_{X'} + l_x \dots\dots\dots(II.9)$$

Spin intrinsik S adalah sifat partikel atau inti. Bahwa elektron mempunyai $S = 1/2$, dan inti - inti atom juga mempunyai spin, yang berasal dari proton dan neutro penyusunnya. Spin intrinsik sebuah inti memiliki nilai yang dapat berupa kelipatan bulat atau setengah pecahan dari h, bergantung apakah A genap atau ganjil. Momentum sudut l selalu terkwantisasikan dalam kelipatan bulat dari h.

4. Kekekalan muatan listrik (electric).

Hukum ini merupakan bagian mendasar dalam seluruh proses peluruhan proses dan reaksi. Hukum ini mensyaratkan bahwa muatan listrik total sebelum dan sesudah peluruhan adalah tidak berubah atau sama besar.

5. Kekekalan nomor massa.

Dalam beberapa proses peluruhan kita dapat menciptakan beberapa partikel (foton atau elektron, misalnya) yang tidak hadir sebelum terjadi peluruhan. (Ini tentu saja dapat terjadi bila energi inti awal lebih besar dari pada energi partikel yang diciptakan, untuk menciptakan

elektron, misalnya, nilainya adalah 0,511 Mev). Tetapi alam tidak memperkenankan kita untuk menciptakan atau memusnahkan proton dan neutron. Dengan demikian berlakulah jumlah nomor massa A tidak berubah dalam proses peluruhan atau reaksi. Dalam beberapa proses peluruhan, A tetap tidak berubah karena baik Z maupun N kedua-duanya berubah sedemikian rupa sehingga mempertahankan jumlah keduanya tetap.

II.1.4. DERET RADIOAKTIF

Kebanyakan unsur radioaktif yang didapatkan di alam merupakan anggota dari empat deret radioaktif, masing - masing deret terdiri dari urutan produk nuklida anak yang semuanya dapat diturunkan dari nuklida induk tunggal. Penyebab terdapatnya empat deret semacam itu dapat diturunkan dari fakta bahwa peluruhan alfa (α) mereduksi nomor massa sebuah inti dengan 4. Jadi nuklida yang nomor massanya memenuhi :

$$A = 4n \dots\dots\dots(II.10)$$

dengan n bilangan bulat, dapat meluruh menjadi yang lainnya dalam urutan yang menurun dari nomor massa. Nuklida radioaktif yang nomor massanya memenuhi persamaan (II.10) dikatakan merupakan anggota dari deret $4n$. Anggota dari deret $4n + 1$ memiliki nomor massa yang memenuhi $A = 4n + 1$, dan anggota deret $4n + 2$ dan $4n+3$ memiliki nomor massa yang memenuhi berturut - turut :

$$A = 4n + 2 \text{ dan } A = 4n + 3$$

Anggota masing - masing deret ini, juga dapat meluruh

menjadi yang lain dalam orde yang menurun dari nomor massa.

Empat deret radioaktif tersebut adalah :

Nomor massa	Deret	Induk	$T_{\frac{1}{2}}$ (Th)	Produk Akhir
4n	Thorium	${}_{90}\text{Th}^{232}$	$1,39 \cdot 10^{10}$	${}_{82}\text{Pb}^{208}$
4n+1	Neptunium	${}_{93}\text{Np}^{237}$	$2,25 \cdot 10^6$	${}_{83}\text{Bi}^{209}$
4n+2	Uranium	${}_{92}\text{U}^{238}$	$4,51 \cdot 10^9$	${}_{82}\text{Pb}^{206}$
4n+3	Aktinium	${}_{92}\text{U}^{235}$	$7,07 \cdot 10^8$	${}_{82}\text{Pb}^{207}$

II. 2. PELURUHAN ALFA (α)

Dalam peluruhan alfa, sebuah inti yang tidak stabil meluruh menjadi dua buah inti ringan dan sebuah partikel alfa (inti ${}^4_2\text{He}$) menurut reaksi :



X dan Y menyatakan jenis inti yang berbeda.

Jenis peluruhan seperti ini membebaskan energi, karena inti hasil peluruhan terikat lebih erat dari pada inti semula. Energi yang terbebaskan, yang muncul sebagai energi kinetik partikel alfa dan inti anak (Y) dapat dihitung :

$$Q = [m(X) - m(Y) - m(\alpha)] \dots\dots\dots (\text{II.12})$$

Karena energi yang terbebaskan muncul sebagai energi kinetik maka:

$$Q = K_Y + K_\alpha \dots\dots\dots(II.13)$$

Momentum linear juga kekal dalam proses ini, sehingga :

$$P_\alpha = P_Y \dots\dots\dots(II.14)$$

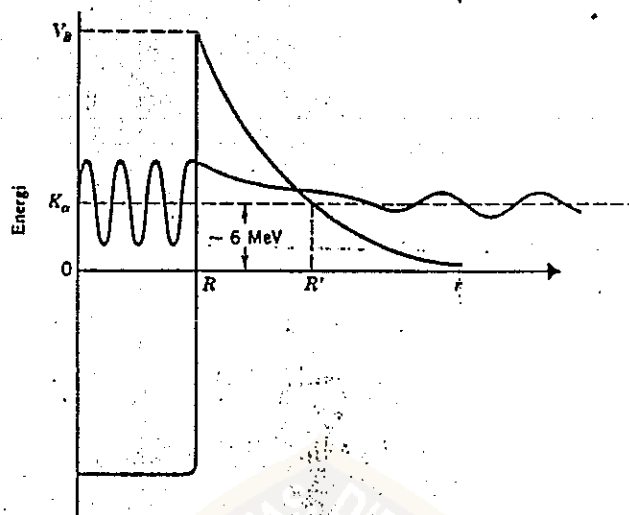
Karena energi khas peluruhan partikel alfa adalah beberapa Mev, maka energi kinetik alfa dan inti anak kecil sekali dibandingkan dengan energi diam masing - masingnya. Jika digunakan mekanika relativistik untuk menghitung energi kinetik partikel alfa yang memberikan hasil :

$$K_\alpha = \frac{A - 4}{A} Q \dots\dots\dots(II.15)$$

Peluruhan alfa merupakan salah satu contoh dari efek terobos halang. Bila ada dua proton dan dua neutron yang berada didalam sebuah inti atom untuk membentuk sebuah partikel alfa. Partikel alfa terikat dalam inti oleh gaya inti. Begitu ia bergerak melewati jari - jari inti R, ia merasakan tolakan coulomb dari inti anak. Tinggi potensial halang dalam inti berat adalah 30 hingga 40 Mev. Partikel alfa memiliki energi 4 hingga 8 Mev. Jadi tidaklah mungkin bagi partikel alfa untuk melewati penghalang ini, satu - satunya cara partikel alfa dapat muncul keluar adalah dengan menerowong penghalang.

Probabilitas per satuan waktu λ bagi partikel alfa untuk muncul di laboratorium adalah probabilitas menerobos potensial halang dikalikan dengan banyaknya partikel alfa

menumbuk penghalang per detik dalam usahanya untuk keluar. Jika partikel alfa bergerak dengan laju v di dalam sebuah inti berjari - jari R , maka selang waktu yang diperlukan untuk menumbuk penghalang bolak - balik di dalam inti adalah $\frac{2R}{v}$.



Gambar II.2. : Peristiwa terobosan halang oleh partikel alfa.

Probabilitas P untuk menerobos penghalang setinggi V_0 berbanding lurus dengan e yaitu $P \sim e^{-2kL}$, dengan L adalah jarak terobos, dan $k = \sqrt{(2m/h) (V_0 - E)}$. Walaupun penghalang datar dengan ketinggian V_0 hampiran baik bagi penghalang (lihat gambar 11.2) kita dapat mempelajari efektinggi dan tebal penghalang dengan meninjau transmisi melalui penghalang datar. Kita memperkirakan bahwa probabilitas transmisi akan bergantung pada tebal penghalang dan perbedaan antara tinggi penghalang dan energi partikel. Tinggi maksimum penghalang V_0 adalah energi coulomb partikel alfa pada permukaan inti atom,

$$V_b = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} \frac{2 (Z - 2) e^2}{R} \dots\dots\dots(II.16)$$

R adalah jari - jari inti dan faktor 2 pada pembilang datangnya dari muatan listrik partikel alfa. Faktor (Z-2) terjadi karena inti sisa yang bertanggung jawab bagi gaya elektrostatik. Selisih antara tinggi penghalang dan energi potensial partikel bervariasi dari $V_b - K\alpha$ pada permukaan inti atom hingga 0 pada jari - jari R' . Karena pada jarak R' partikel alfa meninggalkan penghalang, maka kita akan mengambil nilai rata - rata $1/2 (V_b - K\alpha)$ sebagai nilai wakil dari $(V_0 - E)$, yaitu tinggi penghalang datar di atas energi kinetik partikel. Bagi ketebalan efektif L, kita akan pula mengambil rata - rata $1/2 (R' - R)$. R adalah jari - jari inti $(= R_0 A^{1/3})$ sedangkan R' koordinat radial. Karena pada jarak R' energi potensial $V = \frac{1}{4\pi \epsilon_0} [2 (Z - 2) e^2 / R']$ sama dengan energi kinetik partikel alfa, $K\alpha$, ketika ia berada jauh sekali dari inti atom, maka

$$R' = \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0} \frac{2 (Z - 2)}{K\alpha} \dots\dots\dots(II.17)$$

Dengan demikian, taksiran kasar bagi probabilitas peluruhan alfa :

$$\lambda = \frac{V}{2R} e^{-2k (R' - R)} \dots\dots\dots(II.18)$$

dengan $k = \sqrt{ (2m / h^2) 1/2 (V_b - K\alpha) }$

II.2.1. Stabilitas inti berat terhadap pemisahan / pembelahan.

Alasan bahwa banyak inti berat yang tidak stabil untuk pembelahan partikel alfa adalah berikut ini. Energi ikat total partikel alfa adalah 28,3 Mev. Jika dalam inti berat energi ikat dari empat nukleon yang terakhir (2 proton dan dua neutron) rata - rata 7 Mev, kemudian membutuhkan 28 Mev untuk memindahkannya dari inti. Jika 4 nukleon setelah menggabung membentuk partikel alfa, energi ikat partikel alfa (28,3 Mev) akan terlepas. Dalam proses yang lengkap, jumlah pengeluaran energi yang sedikit akan sangat menguntungkan. Peluruhan alfa secara energi adalah mungkin. Kita memikirkan proses yang menggabungkan 4 nukleon pada permukaan inti dari partikel alfa yang meninggalkan inti adalah 28,3 Mev lebih kecil dari jumlah energi ikat dari dua proton dan dua neutron. (Harald A. Enge. 1972. Introduction to Nuclear Physics. fifth printing. California: Addison-Wisley Publishing, hal. 274).

Nuklida U^{232} adalah stabil terhadap pembelahan proton dan neutron, juga stabil terhadap pembelahan beta. Dan dapat membebaskan sekitar 5,42 Mev dalam bentuk energi kinetik dalam pembelahan alfa.

II.2.2. Konstanta - konstanta peluruhan eksperimental; Hukum Geiger - Nuttal.

Waktu paruh dari pemancaran alfa secara alamiah mempunyai harga 0,3 μ s sampai sekitar 10^{17} tahun; ada

beberapa sebab bahwa pemancar alfa dengan umur paruh lebih panjang, bagaimanapun aktivitas yang lemah menjadi sangat sulit untuk dideteksi.

Waktu hidup terpanjang diukur dengan mencacah jumlah total disintergrasi per detik dari nomor sampel yang diketahui dari inti. Sebagai contoh, kita akan membicarakan tentang pengukuran dari Bread dan Weidenbeck dari umur paruh Sm^{147} . Sampel adalah lapisan dari Samarium klorida, tebal sekitar $100 \mu \text{ gram} / \text{cm}^2$ dalam lapisan tipis dari Zapon Lacquer. Sampel disusun di dalam pencacah gas melewati partikel alfa (α) diemisi dalam beberapa arah dan akan direkam di dalam pencacah (counter). Jumlah cacah tiap satuan waktu diukur, dan jumlah total Samarium dalam sampel ditentukan dengan metode spektroskopi setelah pengamatan pencacahan. Aktivitas didapatkan $719 \pm 3,6$ cacah per detik per gram Sm^{147} . Dari sini kita mendapatkan konstanta peluruhan :

$$\lambda = \left| - \frac{dN/dt}{N} \right| = \frac{719 \times 147}{6,025 \cdot 10^{23}} = 1,75 \cdot 10^{-19} \text{ sec}^{-1}.$$

(Harald A. Enge. 1972. Introduction to Nuclear Physics. Fifth Printing. California: Addison-Wisley Publishing, hal.280).

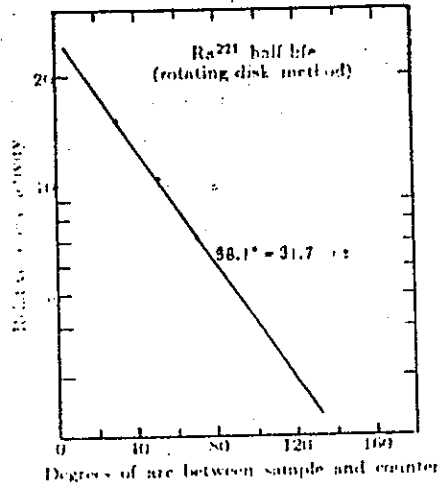
Ini sesuai dengan umur paruh ($1,25 \pm 0,06$) 10^{11} tahun.

Jika nuklida merupakan anggota dari deret radioaktif, pengamatan pencacahan harus didahului dengan pemisahan secara kimia dari produk induk dan anak. Saat pemisahan diperlukan , memungkinkan kita untuk menggunakan metode

ini untuk pengukuran umur paruh yang lebih kecil dari pada sekitar 1 menit.

Nuklida dengan umur paruh lebih pendek kadang - kadang dapat dipisahkan secara mekanik dari induknya. Sebagai contoh kita bicarakan metode yang digunakan oleh Meinke, Ghiorso, dan Seaberg untuk pengukuran half - minute activity dari Ra^{221} . Inti induk (Th^{225}) ditempatkan secara terbuka pada permukaan sebelah luar (tempat) perputaran dengan diameter 13 inc. Ketika Th^{225} meluruh, partikel alfa mungkin dipancarkan ke dalam sampel. Itu terjadi ketika dikumpulkan oleh cakram pemutar. Selama pemancaran karena lapisan tipis dan bahan padat juga oleh pergeseran sampai udara atom Ra^{221} biasanya kehilangan elektron. Cakram pemutar (rotating disk) karena bermuatan negatif dengan respect ke sampel untuk membantu ion positif Ra^{221} sampai udara. Pencacah adalah lingkaran yang berhadapan dengan tempat dimana sampel dikumpulkan. Jarak anguler ke pencacah divariasikan, ketika menggambarkan keterlambatan variasi waktu dari untuk observasi.

Gambar II.3 menunjukkan harga pencacahan Vs pemindahan anguler untuk eksperimen Ra^{221} . Penambahan pemindahan harga pencacahan $38,1^\circ$ dengan faktor dua. Karena kecepatan anguler adalah $1,20^\circ/\text{sec}$, umur paruh terukur adalah : $38.1 / 1,20 = 31,7 \text{ sec}$.



Gambar 11.3. Penentuan umur paruh Ra^{221} dengan metoda rotating-disk recoil.

Waktu hidup alfa yang sangat pendek dapat diukur dengan cara delay coincidence. Cara ini untuk mengukur umur paruh alfa terpendek yang diketahui untuk peluruhan keadaan dasar (ground state) : 3×10^{-7} detik (P^{212}). (Harald A. Ege, 1972. Introduction to Nuclear Physics. Fifth Printing. California: Addison-Wisley Publishing, hal. 281).

Teori peluruhan alfa disusun Geiger dan Nuttall memperhatikan ketergantungan yang mengolah umur paruh dalam energi partikel alfa. Hubungan secara empiris dapat ditunjukkan sebagai berikut :

$$\log \lambda = C - D / E_{\alpha} \dots \dots \dots (11.19)$$

E_{α} diukur dalam Mev dan C, D adalah fungsi - fungsi variasi dengan lambat dari Z, tetapi tak tergantung dari jumlah neutron N. Untuk $Z \geq 90$, parameter - parameter ini adalah $C \approx 52$ dan $D \approx 140$.

II.3. Peluruhan Beta.

Pembacaan tabel nuklida menyatakan bahwa diantara inti tertentu yang ditemukan di alam ada yang mempunyai nomor inti A yang serupa. Ada beberapa yang secara alamiah terjadi isobar - isobar tetangga, atau pasangan dari type $^{115}_{50}\text{Sn}$ dan $^{115}_{49}\text{In}$, dimana Z berbeda oleh hanya satu satuan. Di dalam hal ini adanya berpasangan, satu anggota benar-benar tidak stabil, tetapi mungkin mempunyai umur hidup yang panjang sekali.

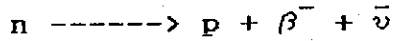
Sebaliknya untuk isobar - isobar tetangga terdapat suatu kelimpahan yang tampaknya merupakan isobar stabil yang dipisahkan oleh satu satuan Z dan N. Pengamatan antara dua isobar tetangga yang salah satunya mempunyai massa atom yang lebih besar akan meluruh melalui proses beta menjadi unsur yang lebih ringan tetapi tampaknya tak ada proses yang dapat mengubah muatan inti menjadi dua satuan.

Dalam proses peluruhan beta, positron atau elektron diemisikan dari inti atau juga elektron orbital ditangkap oleh inti. Dalam semua kasus neutrino atau anti neutrino keduanya sama - sama diemisikan.

Elektron dan positron merupakan partikel saling berlawanan, sebagai contoh mereka dapat meleburkan satu sama lain sewaktu ditempaykan pada tempat yang tertutup. Sehubungan dengan hal tersebut ada dua jenis neutrino yang terlibat dalam peluruhan beta yaitu neutrino yang diemisikan dalam peluruhan β^+ dan anti neutrino yang diemisikan dalam peluruhan β^- . Keempatnya termasuk dalam

golongan partikel lepton.

Neutrino dan anti neutrino yang dipostulatkan oleh *Pauli* (1931) digunakan untuk menjelaskan kehilangan energi dan momentum anguler dalam proses peluruhan β . Misal dari peluruhan suatu neutron bebas :



Neutron mempunyai jumlah kuantum spin 1/2 sehingga proton sama dengan elektron tanpa antineutrino pada ruas kanan dari persamaan tersebut, momentum anguler tak dapat dikonservasikan selama momentum anguler orbital dari elektron relatif terhadap proton mempunyai jumlah kuantum integer.

Untuk proses β yang berlangsung harus tersedia energi untuk pembentukan lepton, proses dasarnya adalah :



Dalam proses tersebut diatas muatan dan jumlah lepton keduanya dikonservasikan. β^- digunakan untuk menggambarkan elektron yang dihasilkan oleh peluruhan β dan simbol e^- digunakan untuk elektron orbital atom. Proses II.20 secara energetik mungkin untuk elektron bebas yang mempunyai $E=0,78$ Mev dan waktu paruh 12 bulan. (Harald A. Enge. 1972. Introduction to Nuclear Physics. Fifth Printing. California: Addison-Wisley Publishing, hal. 304). Proses II.21 dan II.22 tidak mungkin berlangsung tanpa energi

tambahan yang dapat menimbulkan medan nukleon lain kedalam inti. Energi kinetik maksimum yang tersedia untuk hasil peluruhan dalam proses β dapat diturunkan dari keseimbangan di bawah ini antara energi atomik dari dua pasang isobar :

Proses	Sebelum	Sesudah
β^-	$zM^A C^2$	$z+1M^{A+} C^2$ (ion +) + $m_0 C^2$ + Q_{β^-}
β^+	$z+1M^A C^2$	$zM^{A-} C^2$ (ion -) + $m_0 C^2$ + Q_{β^+}
EC	$z+1M^A C^2$	$zM^{A*} C^2$ (tereksitasi) + $m_0 C^2$ + Q_{EC}

Energi Q yang dilepaskan dalam proses tersebut berupa energi kinetik dari hasil peluruhan yang harus sebanding dengan pengurangan energi bebas. Proses β^- menaikkan muatan inti satu satuan tetapi meninggalkan jumlah elektron atom yang tidak berubah, sehingga energi dari atom netral adalah :

$$z+1M^A C^2 = z+1M^{A+} C^2 + m_0 C^2 - I$$

I adalah energi ikat dari elektron atom terakhir, kita peroleh :

$$Q_{\beta^-} = zM^A C^2 - z+1M^A C^2 - I \dots\dots\dots(II.23)$$

Energi ikat I harganya terlalu kecil hingga dapat diabaikan.

Proses β^+ menurunkan muatan inti satu satuan dan meninggalkan ion negatif. Energi bebas dari ion negatif ini ditulis sebagai :

$$zM^{A-} C^2 = zM^A C^2 + m_0 C^2 - I$$

Dari lembar kesetimbangan kita peroleh :

$$Q_{\beta^+} = z+1M^A C^2 - zM^A C^2 - 2m_0 C^2 + I \dots\dots(II.24)$$

Proses penangkapan elektron mengurangi jumlah muatan dengan satu satuan dan pada waktu yang sama juga menghilangkan satu elektron dari salah satu kulit atom, biasanya kulit yang paling dalam (misal K). Suatu proses yang menghasilkan atom tereksitasi dan foton pada umumnya akan mengikuti penangkapan. Energi penetaan ulang sebanding dengan energi ikat, E_b , dari elektron yang tertangkap dikurangi energi ikat I dari elektron pada orbit yang paling rendah tak diperoleh ketika atom tersebut dalam keadaan dasarnya (ground state). Dari lembar kesetimbangan kita peroleh :

$$Q_{EC} = z+1M^A C^2 - zM^A C^2 - E_b + I \dots\dots\dots(II.25)$$

Jika $z+1M^A > zM^A$ maka akan terjadi penangkapan elektron. Persamaan II.23 dan II.25 menunjukkan bahwa antara dua isobar tetangga, yang salah satunya mempunyai energi yang cukup untuk meluruh. Untuk peluruhan β^+ menunjukkan bahwa kelebihan energi $2m_0 C^2$ sama dengan 1,022 Mev harus tersedia agar proses berlangsung. Massa - massa yang dimasukkan kedalam persamaan II.23 dan II.25 adalah massa atom, untuk species netral baik untuk inti maupun atom dalam keadaan dasar. Seringkali peluruhan β meninggalkan inti dalam keadaan tereksitasi. Energi kinetik hasil -

hasil disintegrasi adalah sebagai berikut :

$$T = Q - E_{\alpha} \dots\dots\dots(II.26)$$

Dalam peluruhan β parameter yang paling penting yang dapat ditentukan secara eksperimental adalah waktu paruh atau konstanta peluruhan dan energi radiasi. Dalam peluruhan β^+ dan β^- titik akhir spektrum energi kontinu menggambarkan energi yang dilepaskan dalam proses tersebut.

II.4. Radioaktivitas lingkungan sangat rendah.

Beberapa parameter penting yang perlu diperhatikan pada pengukuran radioaktivitas tingkat rendah adalah cacah latar belakang, efisiensi, figure of merit (FOM) dan batas deteksi terendah (LLD) atau " minimum detectable Activity " (MDA).

II.4.1. Cacah Latar Belakang.

Radiasi yang memberi kontribusi besar pada cacah latar belakang adalah berasal dari radionuklida alam yang terkandung di dalam bahan detektor serta bahan penunjang lainnya, seperti bahan penahan radiasi, bahan tempat contoh, radiasi sumber sekelilingnya (dalam ruangan) misal : bahan bangunan, udara, benda - benda pemancar radiasi dekat detektor dari sinar kosmis. Disamping itu derau listrik (noise) dari peralatan elektronik, misal kabel listrik terlalu panjang, sambungan kabel kurang

baik, ground yang kurang memadai dan tegangan listrik yang tak stabil.

Menurunkan pengaruh cacah latar belakang sangat diperlukan pada pengukuran contoh dengan aktivitas rendah, karena akan memperbesar FOM, beberapa cara yang dapat dilakukan, antara lain :

- a. Komponen mekanik dan elektronik dipilih yang kualitasnya memenuhi kriteria untuk pencacah berlatar belakang rendah.
- b. Alat ukur sebaiknya diletakkan dalam ruang cacah di bawah tanah.
- c. Detektor dikelilingi oleh penahan radiasi yang kandungan radionuklida alamnya sangat rendah, biasanya dipilih timbal yang sudah tua dengan kandungan Pb - 210 sangat rendah.
- d. Biasanya penahan radiasi pada bagian dalam dilengkapi dengan lapisan tembaga (Cu), Kadmium (Cd) dan Akrilik.
- e. Menggunakan sistem antikoinsidensi.

II.4.2. Efisiensi Pencacahan.

Pencacah berlatar belakang sangat rendah sistem α/β dipakai untuk mengukur aktivitas contoh baik yang mengandung partikel α maupun β atau kedua-duanya, sedangkan radiasi γ dapat pula tercacah hanya sekitar 2 % saja. Alat cacah ini mempunyai detektor dengan geometri 2π sehingga efisiensi pencacahan yang diperoleh $\leq 40\%$.

Efisiensi pencacahan dapat diperoleh dari perbandingan antara laju cacah (cpm) dan laju cacah peluruhan (dpm) dari suatu sumber radioaktif yang

diukur. Secara matematik dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{Efisiensi Pencacahan} = E = \frac{C_s}{A_{st} \cdot I} \times 100 \% \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

dengan C_s menyatakan cacah bersih atau cacah contoh standart radioaktif (laju cacah total - laju cacah latar belakang) dalam satuan cpm. A_{st} menyatakan aktivitas sumber standart (dpm) yang sudah diketahui aktivitasnya, dan I menyatakan intensitas (%).

Yang dimaksud laju cacah adalah jumlah cacah yang teramati dibagi dengan waktu cacah yang digunakan selama pengukuran berlangsung dalam hal ini digunakan satuan cacah per menit (cpm) atau cps.

II.4.3. Figure of Merit (FOM) dan Minimum Detectable Activity (MDA) .

Figure of merit adalah salah satu besaran untuk memperlihatkan kemampuan alat ukur radioaktivitas. Secara matemati FOM dapat ditulis sebagai berikut :

$$\text{FOM} = \frac{E^2}{C_b} \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

C_b adalah laju cacah latar belakang (cpm) dan E adalah efisiensi pencacahan (%).

Batas deteksi terendah atau Law Limit of Detection (LLD) adalah suatu besaran yang dipakai untuk menilai kemampuan dari suatu sistem pengukuran pada kondisi tertentu. Untuk menentukan aktivitas terendah yang dapat

dideteksi dengan selang kepercayaan 95 % digunakan persamaan berikut :

$$LLD = \frac{4,66 S_b}{I \cdot E} \dots\dots\dots(II.29)$$

dimana : $S_b = \sqrt{C_b/t_b}$ adalah standart deviasi; cpm.
 C_b adalah laju cacah latar belakang; cpm, t_b adalah waktu cacah latar belakang ; menit, I menyatakan kelimpahan tenaga; fraksi, menyatakan efisiensi pencacahan. Maka batas deteksi terendah dapat dinyatakan dalam satuan dpm.

Pada pengukuran radioaktivitas lingkungan biasanya digunakan besaran konsentrasi, yaitu satuan Bq/l atau Bq/kg. Oleh karena itu persamaan (II.29) kadang - kadang diasosiasikan sebagai konsentrasi rendah yang dapat dideteksi / minimum detectable konsentrasi (MDC) sebagai berikut :

$$MDC = \frac{4,66 \cdot S_b}{E \cdot I \cdot W} \dots\dots\dots(II.30)$$

dalam hal ini, W menyatakan berat atau volume atau luas contoh. MDC mempunyai satuan Bq/l, Bq/kg, atau Bq/m².

Pada pengukuran contoh lingkungan yang aktivitasnya sangat rendah dalam orde mBq diperlukan batas deteksi yang rendah. Suatu cara untuk mendapatkan batas deteksi yang rendah dapat dilakukan dengan waktu cacah yang panjang dan jumlah contoh yang dianalisis banyak.

Suatu alat cacah dikatagorikan baik, jika alat cacah tersebut memiliki harga MDA serendah mungkin, akan tetapi

memiliki harga FOM setinggi mungkin. Syarat untuk dapat tercapainya kedua hal tersebut maka harus dipenuhi efisiensi pencacahan yang tinggi, laju cacah latar belakang harus rendah, dan waktu cacah ditentukan secara optimum artinya cukup (lama).

