

Mengenal Fisika Nuklir

Imam Fachruddin

(Departemen Fisika, Universitas Indonesia)

Daftar Pustaka:

- P. E. Hodgson, E. Gadioli, E. Gadioli Erba, **Introductory Nuclear Physics** (Oxford U. P., New York, 2000)
- J. M. Blatt & V. F. Weisskopf, **Theoretical Nuclear Physics** (Dover Publications, Inc., New York, 1991)
- W. E. Meyerhof, **Elements of Nuclear Physics** (McGraw-Hill Book Co., Singapore, 1989)

Isi

- pendahuluan
 - sifat-sifat inti
 - ketidakstabilan inti
 - radioaktivitas ←
 - model inti
 - gaya nuklir / interaksi kuat
 - fisika partikel
 - astrofisika nuklir
 - akselerator dan detektor
 - reaktor nuklir
-

Radioaktivitas

Radioaktivitas yaitu fenomena mengenai sebuah inti tidak stabil secara spontan memancarkan partikel, sinar- γ atau menangkap sebuah elektron orbital.

Tiga proses radiaktivitas:

- peluruhan α (partikel α dipancarkan)
- peluruhan β^- (e^- dipancarkan)
- peluruhan β^+ (e^+ dipancarkan atau e^- orbital ditangkap inti)

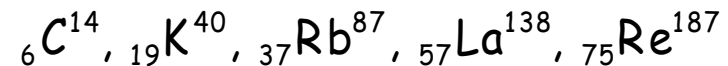
Pemancaran sinar- γ tidak berlangsung secara sendiri, melainkan bersama proses-proses di atas. Sinar- γ dipancarkan apabila peluruhan menghasilkan inti dalam keadaan tereksitasi, yang kemudian turun ke ground state sambil memancarkan sinar- γ .

Inti Radioaktif Alamiah

Inti radioaktif alamiah paling banyak merupakan inti unsur-unsur berat, yang terbagi dalam 3 deret (radioaktivitas beruntun):

- deret Th^{232} : berawal dengan ${}_{90}\text{Th}^{232}$, berakhir dengan ${}_{82}\text{Pb}^{208}$
- deret U^{238} : berawal dengan ${}_{92}\text{U}^{238}$, berakhir dengan ${}_{82}\text{Pb}^{206}$
- deret U^{235} : berawal dengan ${}_{92}\text{U}^{235}$, berakhir dengan ${}_{82}\text{Pb}^{207}$

Selain isotop-isotop radioaktif alamiah anggota tiga deret di atas ada juga beberapa isotop radioaktif alamiah lain, yang relatif lebih ringan dari yang termasuk dalam tiga deret di atas. Contoh:



Isotop radioaktif disebut dengan **radioisotop**.

Perhitungan Radioaktivitas

Anggap jumlah atom suatu bahan radioaktif pada suatu waktu t yaitu $N(t)$.

Inti atom bahan itu meluruh, berubah menjadi inti lain. Pengurangan jumlah atom bahan itu tiap waktu menunjukkan banyaknya peluruhan yang terjadi tiap waktu. Ini disebut sebagai **aktivitas** bahan radioaktif itu, yang juga bergantung pada waktu:

$$\text{aktivitas} = A(t) = -\frac{dN(t)}{dt}$$

Peluang terjadinya peluruhan tiap waktu, disebut sebagai **kecepatan peluruhan** (**decay rate**), sama dengan pengurangan jumlah atom bahan radioaktif itu tiap waktu relatif terhadap jumlah atomnya pada waktu itu. Didapatkan bahwa kecepatan peluruhan suatu bahan radioaktif tetap:

$$\text{kecepatan peluruhan} = \lambda = -\frac{1}{N(t)} \frac{dN(t)}{dt} = \frac{A(t)}{N(t)}$$

Jika terdapat lebih dari satu modus peluruhan (lebih dari satu jenis partikel yang dipancarkan), maka kecepatan peluruhan total yaitu:

$$\lambda = \sum_i \lambda_i \quad (\lambda_i = \text{kecepatan peluruhan tiap modus peluruhan})$$

Jika pada waktu t_0 jumlah atom N_0 dan aktivitas A_0 , maka pada waktu t jumlah atom $N(t)$ dan aktivitas $A(t)$:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad A(t) = A_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \quad A_0 = \lambda N_0$$

Waktu hidup rata-rata (mean-life) τ bahan radioaktif diperoleh sebagai:

$$\tau = \frac{\int_{t_0}^{\infty} t N(t) dt}{\int_{t_0}^{\infty} N(t) dt} = \frac{1}{\lambda}$$

Waktu yang berlalu sampai suatu bahan radioaktif berkurang menjadi separuhnya disebut **waktu paruh (half-life) $T_{1/2}$** :

$$N(T_{1/2} + t_0) = \frac{1}{2} N_0 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}} \longrightarrow T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \tau \ln 2$$

Satuan Radioaktivitas

Aktivitas : jumlah peluruhan yang terjadi per satuan waktu

- $C = \text{Curie}$: $1C = 3,7 \times 10^{10}$ peluruhan/ detik
 \approx aktivitas 1g Ra^{226}
- $\text{Bq} = \text{Becquerel (SI)}$: $1\text{Bq} = 1$ peluruhan/ detik
 $\longrightarrow 1C = 3,7 \times 10^{10} \text{Bq}$

Paparan / Exposure (untuk radiasi sinar γ dan sinar X): muatan total ion positif yang dihasilkan oleh radiasi per satuan massa udara pada 0°C dan 1 atm

- $R = \text{Roentgen}$: $1R = 2,58 \times 10^{-4} \text{C/kg}$

Dosis Serap / Absorbed Dose : energi yang diberikan oleh suatu radiasi (baik sinar maupun partikel) per satuan massa bahan yang dilewatinya

- rad: $1\text{rad} = 100 \text{erg/g}$
- $\text{Gy} = \text{Gray (SI)}$: $1\text{Gy} = 1\text{J/kg} = 100\text{rad}$

Faktor Bobot Radiasi (w_R) menunjukkan resiko jangka panjang akan timbulnya kanker dan leukemia akibat paparan kronis (berlangsung untuk waktu yang lama) tingkat rendah.

Contoh: radiasi sinar γ , sinar X, elektron, muon untuk semua energi: $w_R = 1$
radiasi proton berenergi > 2 MeV: $w_R = 5$
radiasi neutron berenergi 2-20 MeV: $w_R = 10$
radiasi α : $w_R = 20$

Dosis Ekuivalen (untuk kerusakan biologis): dosis (dosis serap) dikalikan dengan faktor bobot radiasi

- rem: $1\text{rem} = 1\text{rad} \times w_R$
- Sv = Sievert (SI): $1\text{Sv} = 1\text{Gy} \times w_R = 100\text{rem}$

"Sekedar gambaran, resiko akibat radiasi 1 milirem kurang lebih setara dengan 1/(8 juta) resiko meninggal akibat kanker. Radiasi 1 milirem diterima akibat, contoh, menonton TV dalam setahun, tinggal di sebelah PLTN selama setahun."

(<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>)

Penentuan Umur Secara Radioaktif

Radioisotop meluruh dengan kecepatan tetap. Hal ini memudahkan orang menilai umur suatu obyek dengan mengukur kandungan / aktivitas radioisotop di dalamnya, baik itu obyek geologis (batuan, bumi) maupun obyek organik (benda-benda yang pernah hidup atau mengandung bahan organik).

Obyek Geologis:

Prinsip dasar, jika jumlah bahan radioaktif semula dan sekarang diketahui maka umur obyek tersebut dapat dihitung:

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda(t-t_0)} \longrightarrow \Delta t = t - t_0 = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{N_0}{N(t)} \right) \quad N_0 = ?$$

Anggap inti X meluruh dan proses peluruhan berakhir pada inti Y. Inti X disebut inti **ortu (parent)** dan inti Y disebut inti **anak (daughter)**. Pada saat awal (t_0) terdapat $N_p(t_0)$ inti ortu, pada waktu kini (t) terdapat $N_p(t)$ inti ortu sisa dan $N_d(t)$ inti anak. Maka:

$$N_p(t_0) = N_p(t) + N_d(t)$$

sehingga:

$$\Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_d(t)}{N_p(t)} \right)$$

Prolem: Apakah semua inti Y dalam obyek tersebut berasal dari peluruhan inti X? Bagaimana jika pada saat awal sudah terdapat sejumlah $N_b(t_0)$ inti Y?

$$N_p(t_0) + N_b(t_0) = N_p(t) + N_b(t) \longrightarrow \Delta t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(1 + \frac{N_b(t) - N_b(t_0)}{N_p(t)} \right) \quad N_b(t_0) = ?$$

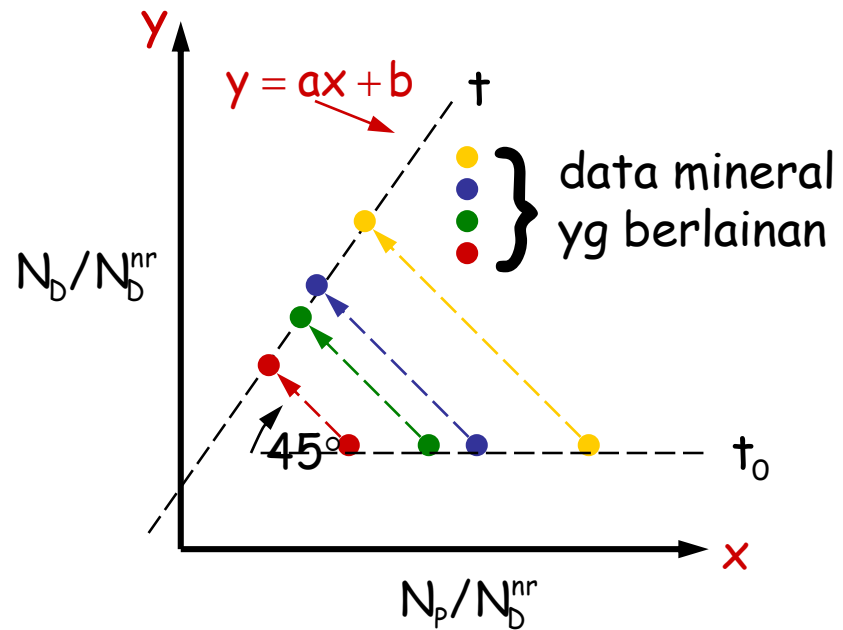
Inti Y hadir di alam dalam beberapa isotop (Z sama, N berbeda). Isotop Y yang merupakan anak radioisotop X disebut **radiogenik**, karena dapat dilahirkan melalui proses radioaktif. Sementara itu, mungkin saja terdapat isotop Y lain yang **non-radiogenik**, yaitu yang tidak dapat dihasilkan melalui proses radioaktif.

Andai ketika obyek (batuan) itu terbentuk terdapat radioisotop X, isotop radiogenik Y dan isotop non-radiogenik Y, yang selama proses peluruhan radioisotop X menjadi isotop radiogenik Y jumlahnya tetap. Bahan-bahan itu terdistribusi dalam mineral-mineral yang terbentuk dalam obyek itu.

Jika untuk satu mineral, $N_p(t_0)$ jumlah radioisotop X, $N_b(t_0)$ jumlah isotop radiogenik Y dan N_b^{nr} jumlah isotop non-radiogenik Y, maka mineral-mineral yang terbentuk memiliki rasio $N_b(t_0)/N_b^{nr}$ sama tetapi rasio $N_p(t_0)/N_b^{nr}$ berbeda.

Hal ini dikarenakan, baik isotop Y yang radiogenik maupun yang non-radiogenik memiliki sifat kimia yang sama, sehingga ketika terdistribusi dalam mineral-mineral perbandingan jumlahnya tetap sama sesuai yang terdapat dalam bahan asal mineral-mineral itu. Sedangkan isotop X berbeda secara kimia dari isotop Y, sehingga perbandingan jumlahnya pada mineral-mineral tidak sama.

Dengan berjalannya waktu, radioisotop X meluruh, tiap satu inti X berubah menjadi satu isotop radiogenik Y, sementara jumlah isotop non-radiogenik Y tetap. Sesuai sifat kecepatan peluruhan yang konstan, mineral dengan kandungan radioisotop X lebih banyak akan menghasilkan isotop radiogenik Y lebih banyak (aktivitas lebih besar).



plot data dari beberapa mineral:
(grafik di atas)

Jumlah inti dalam satu mineral terhadap N_B^{nr} pada saat awal dan saat kini:

$$\frac{N_P(t_0) + N_D(t_0)}{N_B^{nr}} = \frac{N_P(t) + N_D(t)}{N_B^{nr}}$$



$$\frac{N_D(t)}{N_B^{nr}} = \frac{N_P(t)}{N_B^{nr}} (e^{\lambda(t-t_0)} - 1) + \frac{N_D(t_0)}{N_B^{nr}}$$

$$y = x + a + b$$

Dari grafik tersebut (**isochron**) diperoleh umur obyek itu:

$$\Delta t = \frac{\ln(1+a)}{\lambda}$$

Contoh penentuan umur obyek geologis yaitu berdasarkan proses peluruhan radioisotop Rb^{87} menghasilkan isotop radiogenik Sr^{87} (rubidium-stronsium), yang waktu paruhnya 50 milyar (5×10^{10}) tahun. Sebagai isotop stronsium yang non-radiogenik yaitu Sr^{86} . Contoh material yang diukur umurnya, batuan metamorfik.

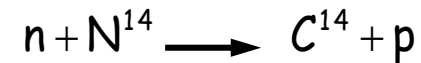
Contoh proses lain yang juga dipakai yaitu peluruhan U^{235} menghasilkan Pb^{207} dan peluruhan U^{238} menghasilkan Pb^{206} (uranium-timbal). Waktu paruh untuk proses pertama 0,7 milyar tahun dan yang kedua 4,5 milyar tahun. Sebagai isotop non-radiogenik timbal yaitu Pb^{204} . Contoh material yang diukur umurnya, zircon, bijih uranium.

Proses lain lagi yang dipakai untuk menentukan umur obyek geologis yaitu peluruhan K^{40} menghasilkan Ar^{40} (kalium-argon), yang waktu paruhnya 1,3 milyar tahun. Sifat argon yang tidak bereaksi kimia memberikan kepastian bahwa argon yang ditemukan dalam suatu obyek dihasilkan dari peluruhan tersebut. Contoh material yang diukur umurnya, batuan vulkanik.

Obyek Organik:

Benda-benda yang pernah hidup atau mengandung bahan-bahan organik dapat diperkirakan waktu matinya berdasarkan pengukuran aktivitas radioisotop C^{14} yang terdapat padanya. Radioisotop C^{14} meluruh menghasilkan isotop N^{14} sambil memancarkan elektron (proses ketidakstabilan beta).

Radioisotop C^{14} terbentuk di atmosfer melalui reaksi



Pada reaksi itu, neutron berasal dari reaksi **sinar kosmik** proton dan partikel-partikel di atmosfer atas, sementara N^{14} merupakan isotop terbanyak di atmosfer. Setiap saat sinar kosmik menghujani bumi, sehingga radioisotop C^{14} terus menerus terbentuk. Didapatkan bahwa kecepatan produksi C^{14} tetap.

Radioisotop C^{14} mempunyai waktu paruh yang cukup panjang (5730 tahun), sehingga menjadi bagian dari unsur karbon di bumi, bersama isotop karbon lain yaitu C^{12} yang stabil. Rasio jumlah C^{14} terhadap C^{12} sangat kecil, yaitu kurang lebih $1 : 10^{12}$, sehingga bahan karbon menunjukkan aktivitas yang lemah, kurang lebih 0,25 Bq atau 15 peluruhan tiap menit untuk 1 gram karbon.

Setiap makhluk hidup menyerap karbon, maka setiap makhluk hidup menyimpan sedikit radioisotop C^{14} dalam jumlah seperti ditunjukkan rasio di atas, serta menunjukkan aktivitas per gram karbon seperti di atas.

Setelah makhluk hidup itu mati, maka dia berhenti menyerap karbon, sehingga jumlah radioisotop C^{14} yang dikandungnya berkurang akibat peluruhan. Pengurangan ini mengakibatkan juga penurunan aktivitas karbon.

Dengan mengukur aktivitas C^{14} yang tersisa dapat diketahui kapan obyek organik itu mati.

Pengukuran waktu mati obyek organik dengan C^{14} hanya berlaku untuk rentang waktu 50 ribu tahun ke belakang dikarenakan aktivitas C^{14} yang lemah.