



Radioaktivitas

Radioaktivitas; Sejarah

- **1896:** Becquerel secara tak sengaja menemukan kristal uranil mengemisikan radiasi pada plat fotoe.
- **1898:** Marie and Pierre Curie menemukan polonium ($Z=84$) dan radium ($Z = 88$), Dua unsur baru radioaktif
- **1903:** Becquerel and the Curie's menerima Nobel prize fisika dalam hal mempelajari radioaktivitas.
- **1911:** Marie Curie menerima Nobel prize (kedua) kimia untuk penemuan polonium dan radium.
- **1938:** Hahn (1944 Nobel prize) and Strassmann menemukan fissi inti - Lisa Meitner memerankan peranan penting
- **1938:** Enrico Fermi menerima Nobel prize fisika dalam hal memproduksi unsur radioaktif baru melalui irradiation neutron, dan bekerja dengan reaksi inti

Radioaktivitas

- *Radioaktivitas* adalah emisi radiasi secara spontan
- Eksperimen menunjukkan bahwa radioaktivitas merupakan hasil peluruhan atau desintegrasi inti yang tidak stabil
- Tiga jenis radiasi yang dapat diemisikan
 - **Partikel Alpha**
 - Merupakan inti ${}^4\text{He}$
 - **Partikel Beta**
 - Partikel dapat berupa elektron atau positron
 - Sebuah positron adalah *antipartikel* dari elektron
 - Sama seperti elektron kecuali muatannya $+e$
 - **Sinar Gamma**
 - Merupakan foton energi tinggi

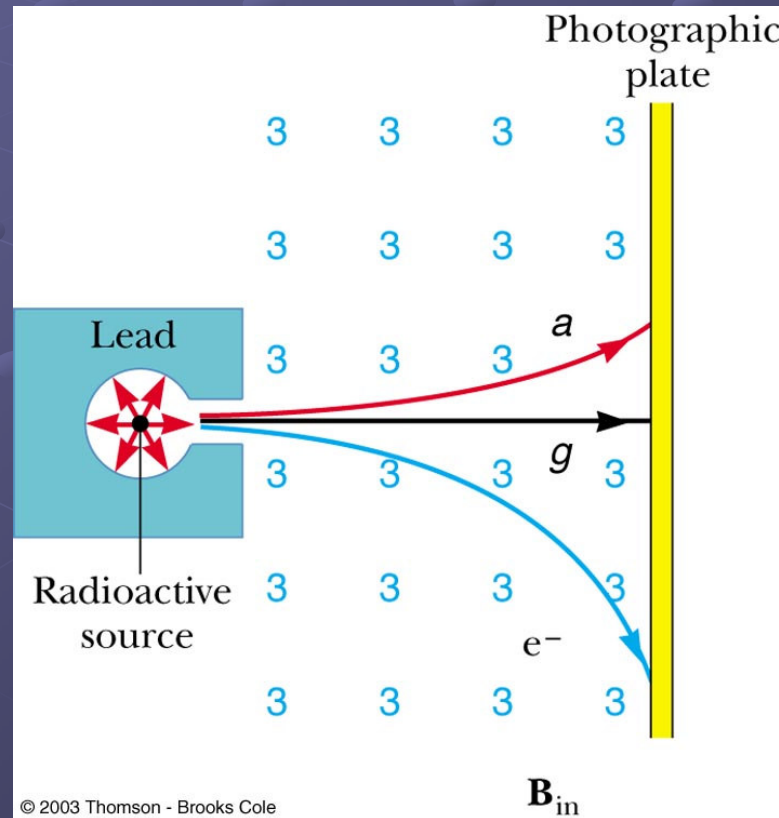
Perbedaan Jenis Radiasi

Jenis Radiasi

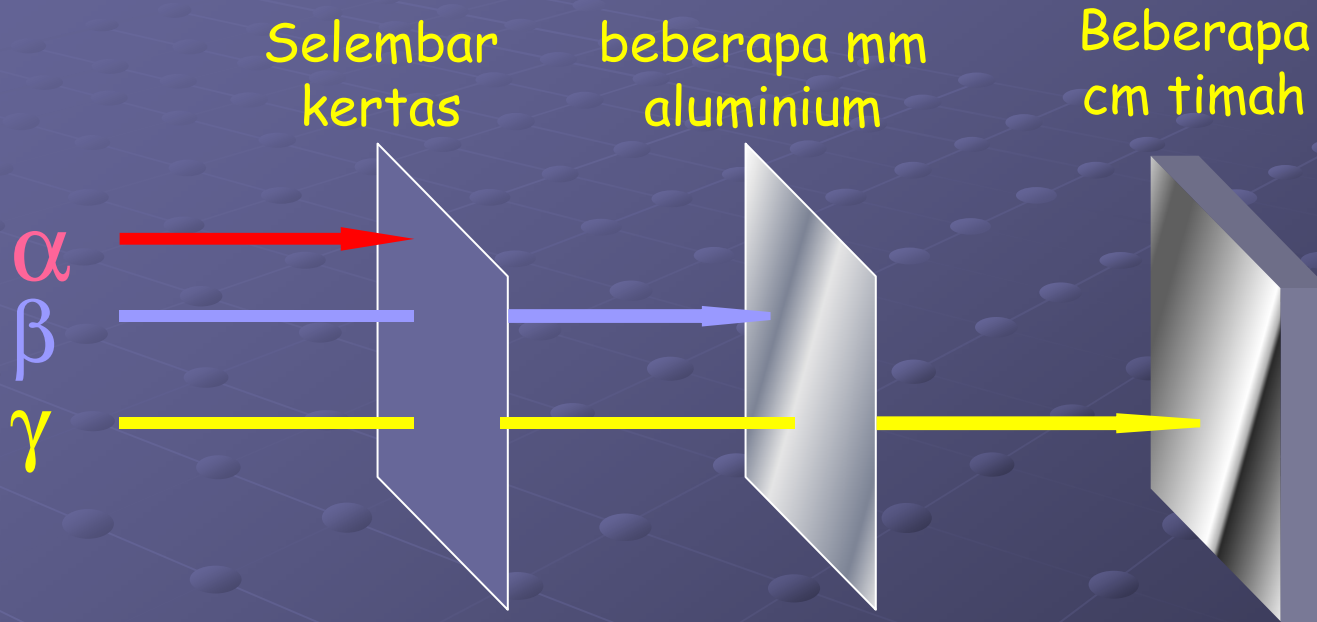
- alfa α = Inti He (2p + 2n)
- beta β = elektron atau positron
- gama γ = foton berenergi tinggi

Muatan/Massa

+2q/4m_p
-q/m_e atau +q/m_e
tidak bermuatan



Kemampuan Daya Tembus

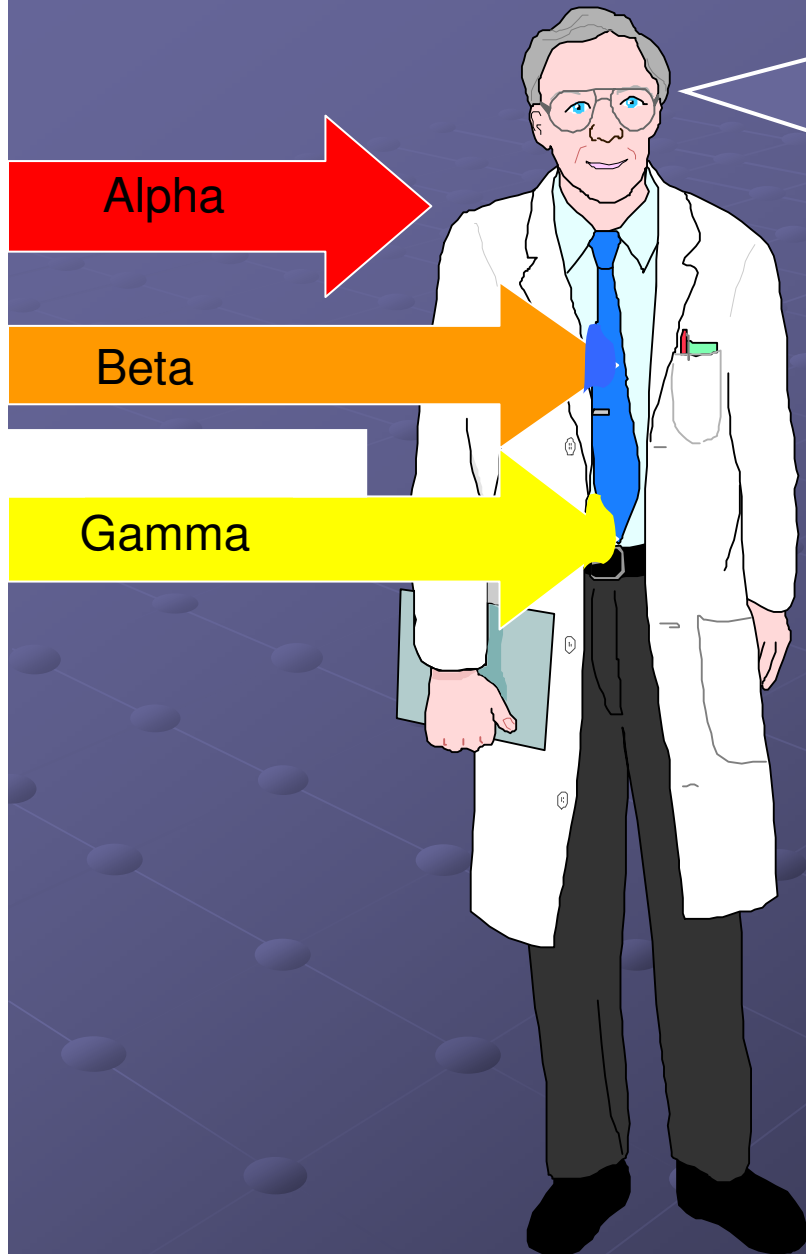


Partikel α tidak dapat melalui kertas

Partikel β tidak dapat melalui aluminium

Partikel γ tidak dapat melalui timah

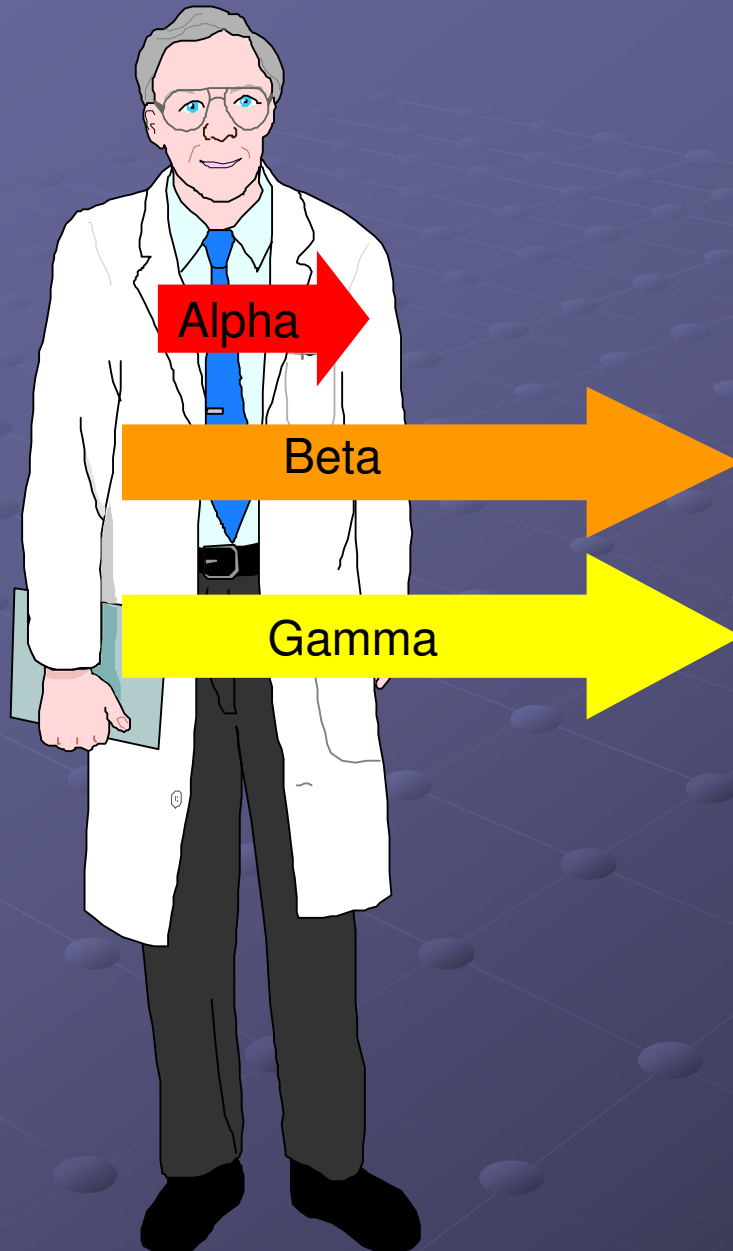
Bahaya Radioaktif – Diluar Tubuh



Radiasi akan mengionisasi atom dalam sel hidup - ini dapat merusak sel dan menyebabkan kanker atau leukaemia

Diluar Tubuh, β dan γ lebih berbahaya karena dapat menembus kulit dan masuk ke organ tubuh

Bahaya Radioaktif – Didalam Tubuh



Didalam tubuh, radiasi α lebih berbahaya karena tidak punya cukup energi untuk keluar dari tubuh dan memiliki daya ionisasi paling besar untuk merusak sel

β dan γ kurang berbahaya dibanding α karena memiliki energi yang cukup untuk keluar dari tubuh

Proses Radiasi: Peluruhan Alpha



- Inti Induk meluruh menjadi inti anak plus sebuah partikel alpha
- Terjadi karena inti terlalu besar, peluruhan alfa dapat mereduksi ukuran inti
- Energi disintegrasi Q muncul sebagai energi kinetik (= energi ikat negatif)
 - Partikel α paling ringan membawa energi kinetik paling besar
 - Mengapa? Kekekalan momentum!

$${}^A_Z X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2} D + {}^4_2 He$$
$$Q = \left[M \left({}^A_Z X \right) - M \left({}^{A-4}_{Z-2} D \right) - M \left({}^4_2 He \right) \right] c^2$$

dimana $m_{He} = 4.002603 \text{ u}$

Proses Radiasi: Peluruhan β^- (Emisi e^-)

- Inti Induk meluruh menjadi inti anak plus elektron dan anti-neutrino
 - Anti-neutrino adalah partikel ke 3 yang menjelaskan range energi kinetik elektron
- Jika atom (Z) memiliki massa lebih besar dari pada atom tetangganya (Z+1), maka peluruhan β^- mungkin terjadi
- Neutron bebas dapat meluruh menjadi sebuah proton.
 - $t_{1/2} = 10.8$ menit, $Q = 939.57 - (938.28 + 0.511) = 0.78$ MeV

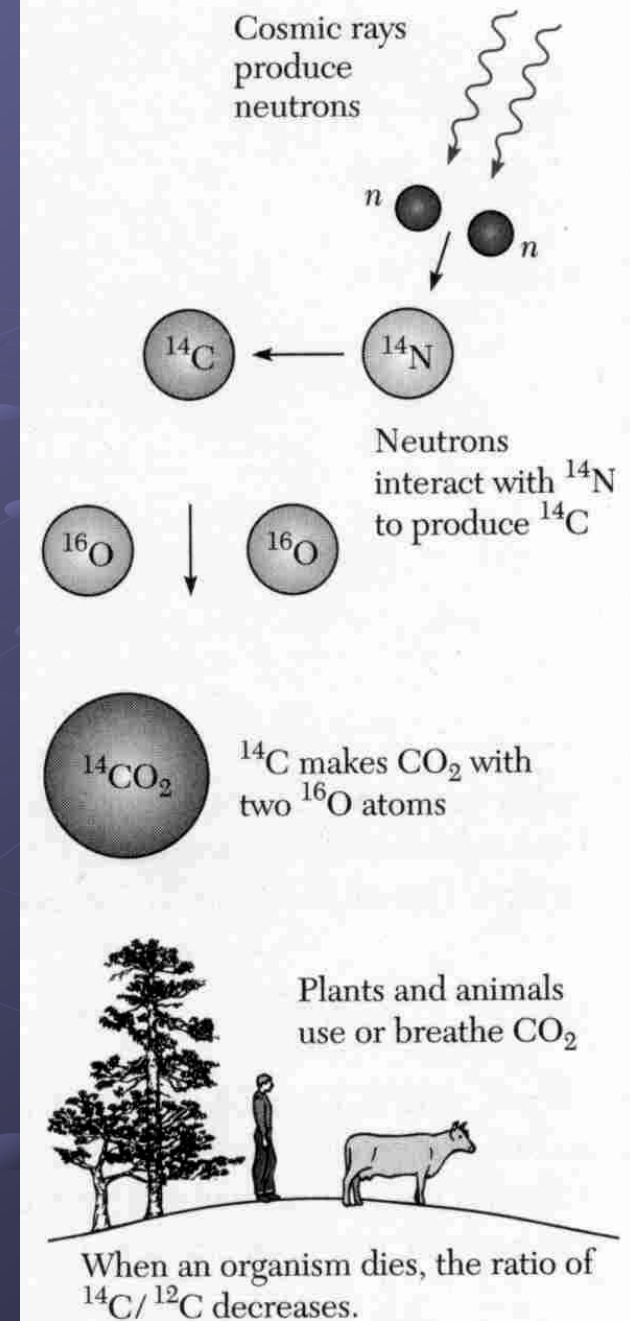


$$Q \text{ (MeV)} = \left[\text{Mass} \left({}^A_Z X \right) - \text{Mass} \left({}^A_{Z+1} D \right) \right] c^2$$

*electron mass included in daughter nucleus

Proses Radiasi : Peluruhan β^- untuk Carbon Dating

- Peluruhan β^- dari ^{14}C digunakan untuk menentukan umur suatu bahan organik
 - $^{14}\text{C} \rightarrow ^{14}\text{N} + e^- + \nu_e$
- Ketika organisme hidup, sinar cosmic menghasilkan ^{14}C di atmosfer yang memberikan nilai perbandingan $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ konstan dalam gas CO_2
 - $^{14}\text{C} / ^{12}\text{C} = 1.2 \times 10^{-12}$ dalam organisme hidup
- Ketika organisme tsb meninggal, ^{14}C tidak lagi diabsorpsi, akibatnya nilai perbandingan $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ menurun terhadap waktu
 - Waktu paruh $t_{1/2}$ dari $^{14}\text{C} = 5760$ tahun
- Pengukuran umur dari bahan dengan mencari aktivitas per satuan massa dari ^{14}C
 - Sangat efektif untuk 1,000 sampai 25,000 tahun lalu



Proses Radiasi: Peluruhan β^+ (Emisi Positron)

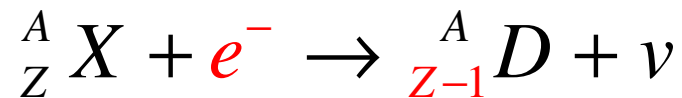
- Inti Induk meluruh menjadi inti anak plus positron dan neutrino.
- Proton bebas tidak dapat meluruh menjadi sebuah neutron melalui emisi positron
 - Neutron bebas meluruh menjadi sebuah proton
- Proton terikat dalam inti kadang kadang dapat mengemisikan sebuah positron karena efek energi ikat inti

$${}^A_Z X \rightarrow {}^A_{Z-1} D + e^+ + \nu$$
$$Q (MeV) = \left[Mass \left({}^A_Z X \right) - Mass \left({}^A_{Z-1} D \right) - 2m_e \right] c^2$$

*explicitly add electron/positron masses

Proses Radiasi: Penangkapan Elektron

- Inti induk menangkap elektron dari orbitalnya sendiri dan mengubah sebuah proton inti menjadi sebuah neutron
- Jika atom (Z) memiliki massa yang lebih besar dari tetangganya, maka penangkapan elektron memungkinkan terjadi
 - Catatan: Jika perbedaan massa antara atom (Z) dan tetangganya ($Z-1$) lebih besar dari $2m_e$, maka peluruhan positron juga mungkin terjadi

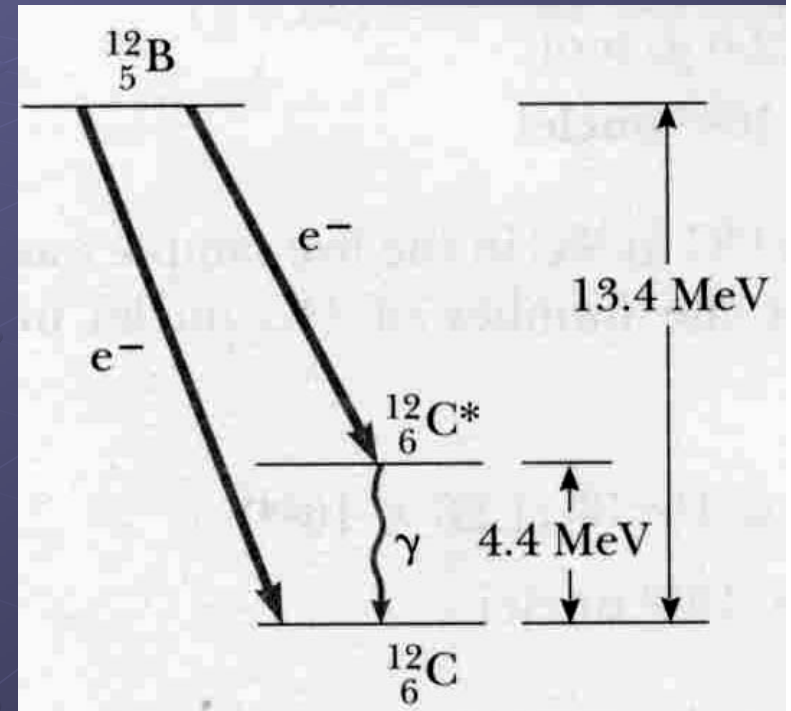


$$Q (MeV) = \left[Mass \left({}^A_Z X \right) - Mass \left({}^A_{Z-1} D \right) \right] c^2$$

*added electrons on both sides cancel

Proses Radiasi: Peluruhan Gama

- Dalam peluruhan gama, sebuah keadaan tereksitasi inti meluruh ke sebuah keadaan yang energinya lebih rendah melalui emisi foton
- Transisi inti seperti ini analog dengan transisi atom, tetapi dengan energi foton yang lebih tinggi
 $\lambda = 1240 \text{ eV nm} / \text{MeV} = 10^{-3} \text{ nm}$.
- Emisi sinar γ biasanya mengikuti peluruhan beta atau alfa (lihat gambar)
- Waktu hidup rata-ratanya sangat singkat
 $\tau = h_{\text{bar}} / \Delta E = 10^{-10} \text{ s}$



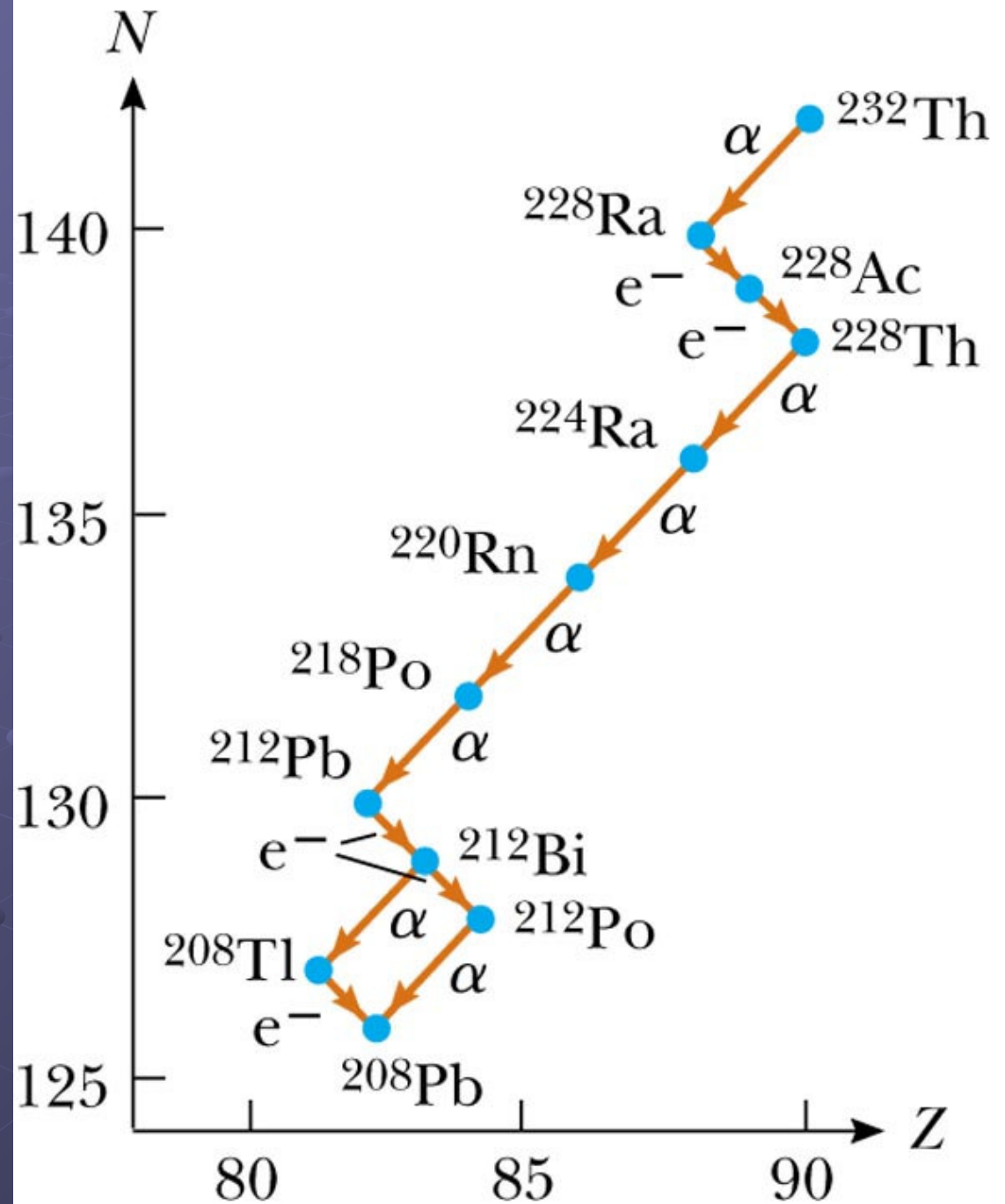
Proses Radiasi: Radioaktif Alam

- Tiga deret inti radioaktif terjadi secara alami
- Dimulai dengan isotop radioaktif (U, Th) dan berakhir pada isotop Pb.
- Deret keempat dimulai dengan sebuah unsur yang tidak ditemukan di alam (^{237}Np).
- Isotop radioaktif lain yang meluruh secara alami ^{14}C , ^{40}K

Series	Starting Isotope	Half-Life (years)	Stable End Product
Uranium	$^{238}_{92}\text{U}$	4.47×10^9	$^{206}_{82}\text{Pb}$
Actinium (natural)	$^{235}_{92}\text{U}$	7.04×10^8	$^{207}_{82}\text{Pb}$
Thorium	$^{232}_{90}\text{Th}$	1.41×10^{10}	$^{208}_{82}\text{Pb}$
Neptunium	$^{237}_{93}\text{Np}$	2.14×10^6	$^{209}_{83}\text{Bi}$

Deret Peluruhan ^{232}Th

- Deret dimulai dari ^{232}Th
- Prosesnya melalui peluruhan alfa dan beta
- Berakhir pada isotop stabil ^{208}Pb



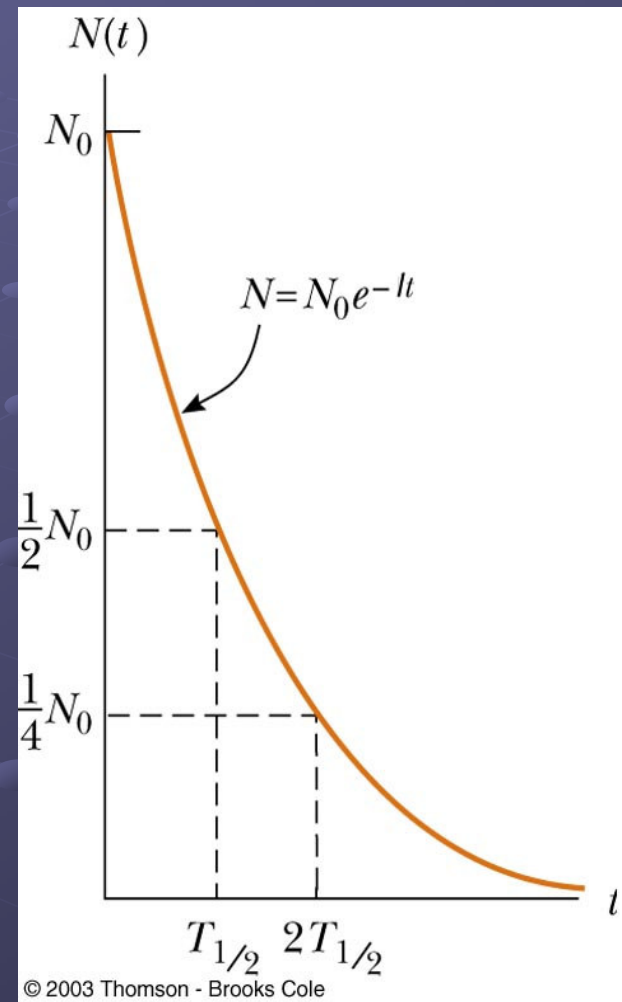
Kurva Peluruhan

- Kurva Peluruhan memenuhi persamaan

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

- Waktu paruh juga merupakan parameter yang penting
- Waktu paruh definisikan sebagai waktu yang dibutuhkan inti sehingga jumlahnya menjadi separuhnya

$$T_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$



QUICK QUIZ

What fraction of a radioactive sample has decayed after two half-lives have elapsed?

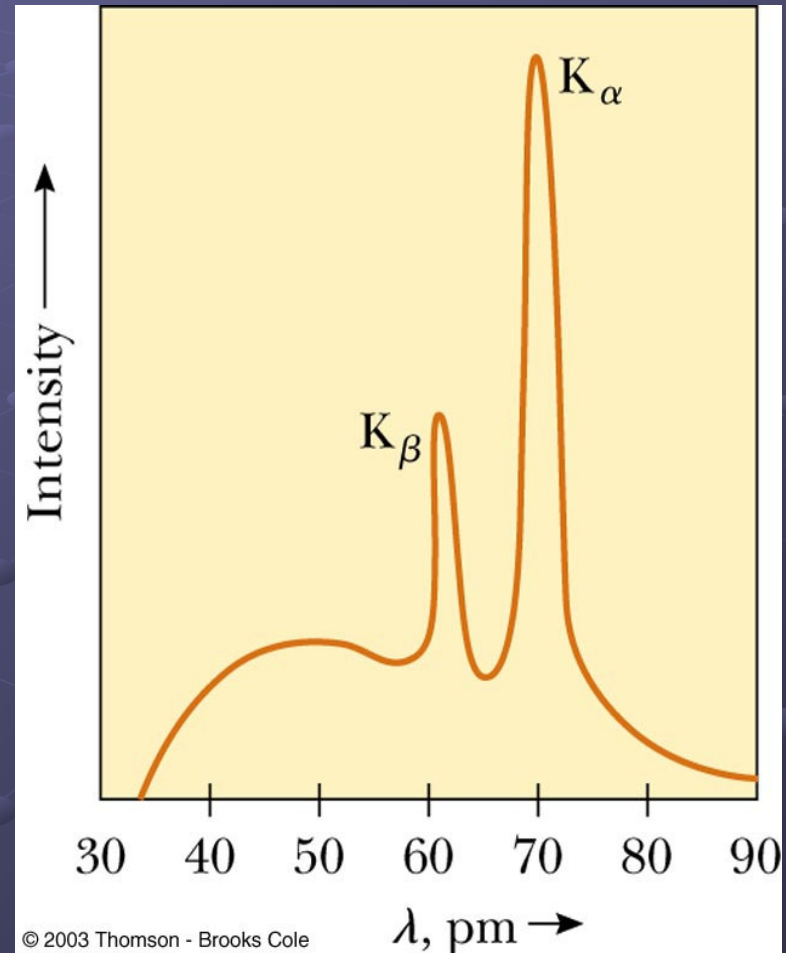
- (a) 1/4 (b) 1/2 (c) 3/4
(d) not enough information to say

(c). At the end of the first half-life interval, half of the original sample has decayed and half remains. During the second half-life interval, half of the remaining portion of the sample decays. The total fraction of the sample that has decayed during the two half-lives is:

$$\frac{1}{2} + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{2} \right) = \frac{3}{4}$$

Karakteristik Sinar-X

- Ketika sebuah logam ditembaki oleh elektron – elektron berenergi tinggi, sinar-x diemisikan
- Spektrum sinar-x terdiri dari spektrum kontinu yang lebar dan **deretan garis tajam**
 - Garis-garis yang muncul bergantung pada logam
 - Garis-garis tersebut dinamakan **karakteristik sinar-x**



Penjelasan Karakteristik Sinar-X

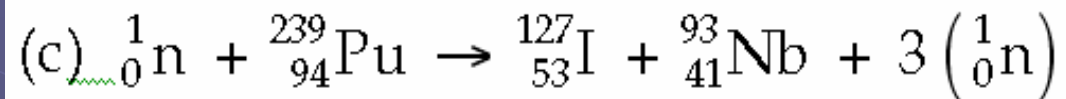
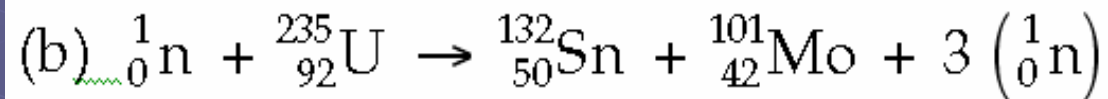
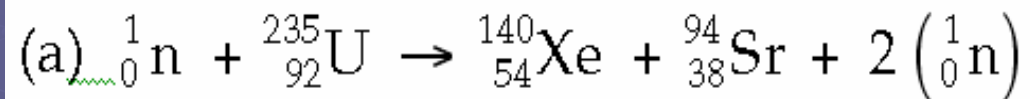
- Tinjauan struktur atom lebih detail dapat digunakan untuk menjelaskan karakteristik sinar x
 - Elektron penembak menumbuk elektron dalam logam target yang berada di kulit dalam
 - Jika energinya cukup, elektron akan dipindahkan dari atom target
 - Kekosongan yang tercipta akibat elektron yang hilang diisi oleh elektron yang berasal dari tingkat energi lebih tinggi
 - Proses transisi yang terjadi disertai emisi foton yang energinya sama dengan perbedaan dua tingkat energi tersebut

Reaksi Inti

- Struktur inti dapat berubah oleh penembakan dengan partikel yang energetik
 - Perubahannya dinamakan *reaksi inti*
- Sama seperti peluruhan inti, nomor atom dan nomor massa harus sama dikedua ruas persamaan

Problem

Which of the following are possible reactions?



(a) and (b). Reactions (a) and (b) both conserve total charge and total mass number as required. Reaction (c) violates conservation of mass number with the sum of the mass numbers being 240 before reaction and being only 223 after reaction.

Nilai Q

- Energi juga harus kekal dalam reaksi inti
- Energi yang dibutuhkan untuk menyeimbangkan sebuah reaksi inti dinamakan nilai *Q dari reaksi*
 - Reaksi *exothermic*
 - Terjadi pengurangan massa dalam reaksi
 - Terjadi pelepasan energi
 - *Q is positive*
 - Reaksi *endothermic*
 - Terjadi peningkatan massa dalam reaksi
 - Energi dibutuhkan, dalam bentuk energi kinetik partikel penumbuk
 - *Q is negative*

Energi Ambang

- Agar momentum dan energi kekal, partikel penumbuk harus memiliki energi kinetik minimum, dinamakan energi ambang

$$KE_{\min} = \left(1 + \frac{m}{M}\right) |Q|$$

- m : massa partikel penumbuk
- M : Massa partikel target
- Jika energi partikel penumbuk kurang dari ini, reaksi tidak dapat terjadi

QUICK QUIZ

If the Q value of an endothermic reaction is -2.17 MeV, the minimum kinetic energy needed in the reactant nuclei if the reaction is to occur must be (a) equal to 2.17 MeV, (b) greater than 2.17 MeV, (c) less than 2.17 MeV, or (d) precisely half of 2.17 MeV.

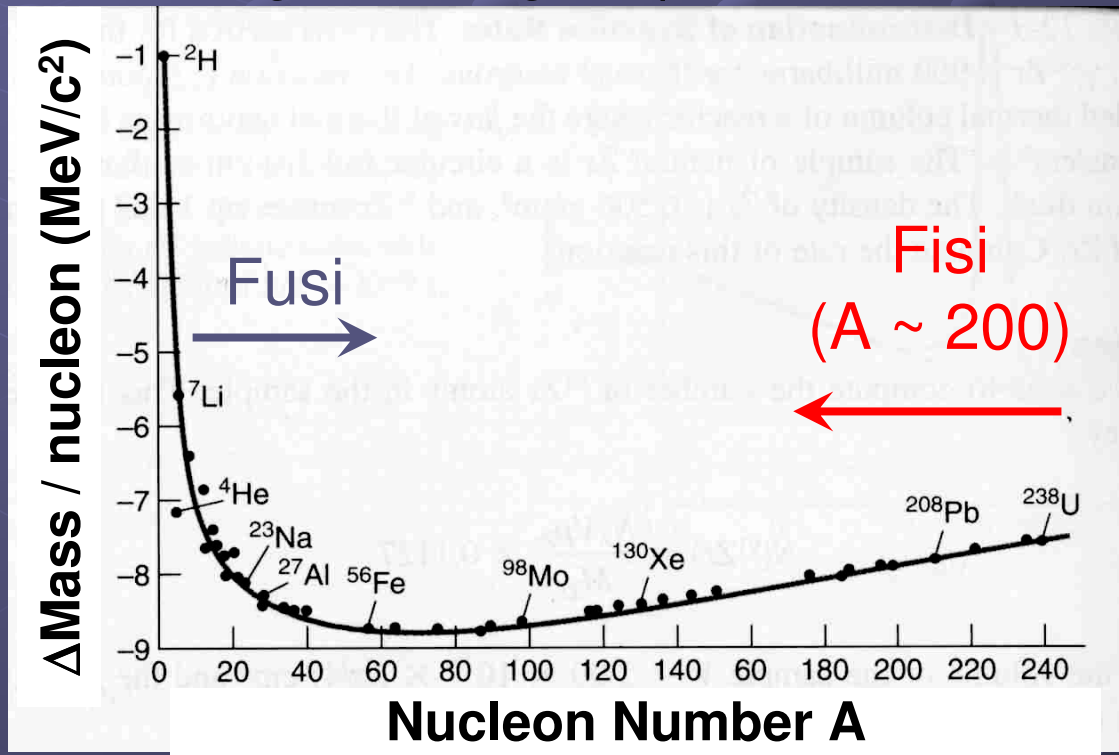
(b). In an endothermic reaction, the threshold energy exceeds the magnitude of the Q value by a factor of $(1 + m/M)$, where m is the mass of the incident particle and M is the mass of the target nucleus.



Energi Inti

Fisi dan Fusi : Mengapa?

- Plot Perbedaan Massa ΔM ($= M - Zm_p - Nm_n$) vs. Jumlah Nukleon A
 - Hasilnya merupakan kebalikan grafik Energi Ikat vs. A
- Unsur dengan ΔM **besar** memiliki inti takstabil
 - Peluruhan melalui fusi (A rendah) atau fisi (A tinggi) untuk membentuk inti yang lebih stabil
 - Massa total berkurang dan energi dilepaskan

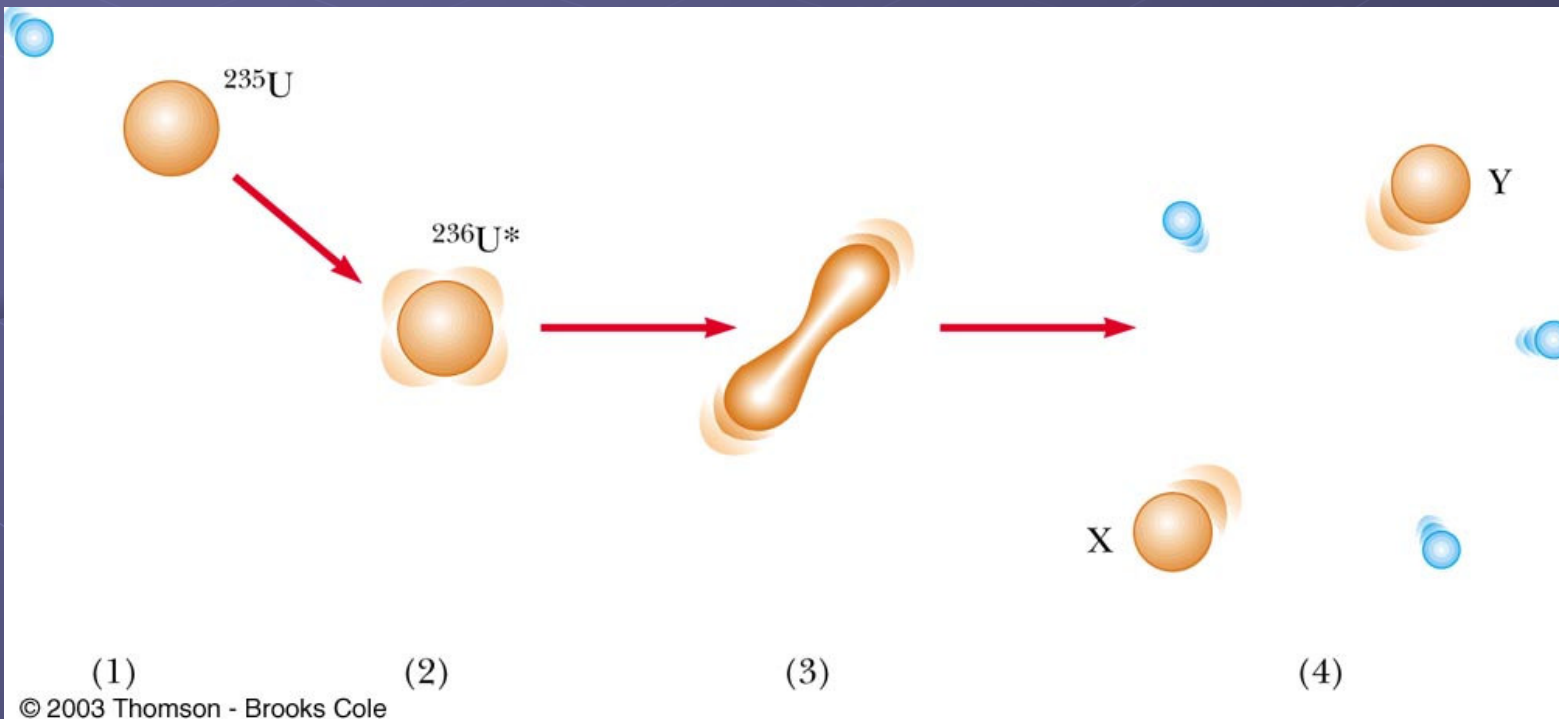


Why??

$$E = mc^2$$

Fisi:

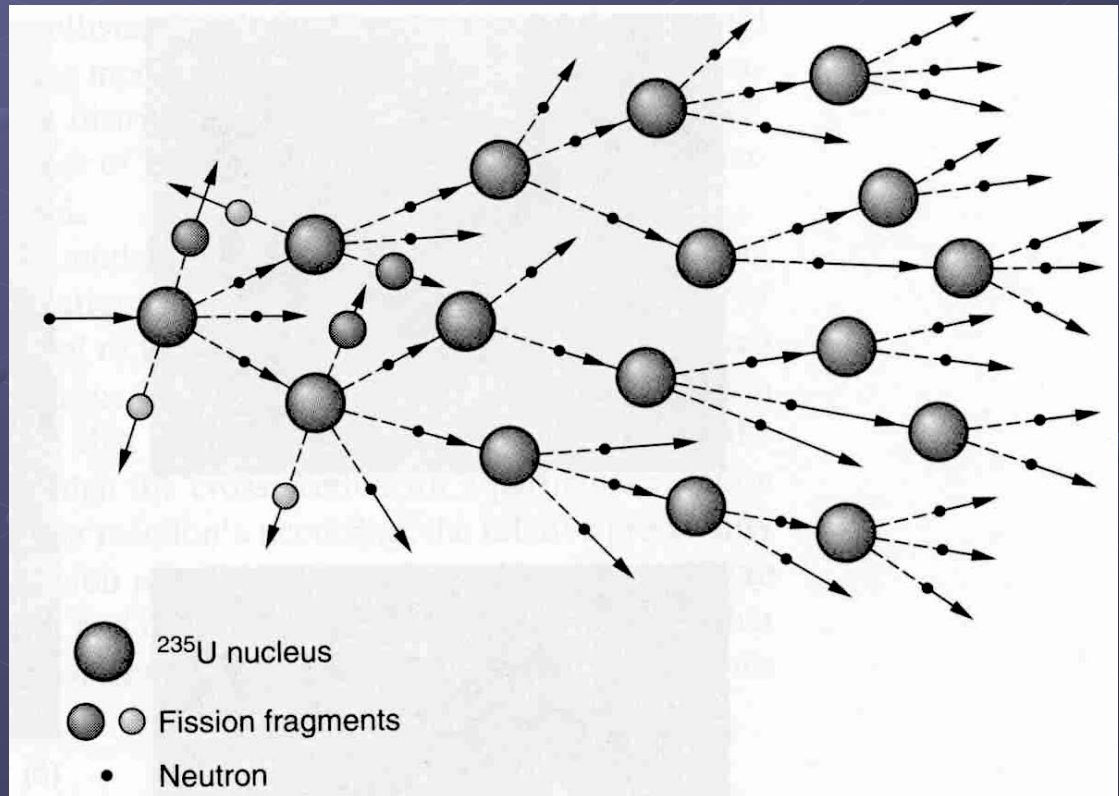
- Neutron menumbuk inti ^{235}U untuk membentuk keadaan tereksitasi yang meluruh menjadi dua inti yang lebih ringan (plus neutrons) plus ENERGY!
- Contoh: $^{235}\text{U} + n \rightarrow ^{92}\text{Kr} + ^{142}\text{Ba} + 2n + \underline{180\text{ MeV}}$
 - (^{238}U tidak berfisi!)



^{235}U tidak akan berfisi tanpa ditumbuk oleh neutron.

Fisi: Reaksi Berantai

- Menggunakan neutron *dari* proses fisi untuk menginisiasi proses fisi yang lain!
- 1942: Fermi membuat reaktor fisi inti yang pertama yang dapat dikontrol
- Untuk bom nuklir, memerlukan lebih dari satu neutron dari peristiwa fisi pertama yang menyebabkan peristiwa kedua (1 g U dapat melepaskan energi sama dengan sekitar 20000 ton TNT)
- Untuk Pembangkit daya nuklir, memerlukan kurang dari satu neutron yang menyebabkan peristiwa kedua



QUICK QUIZ

In the first atomic bomb, the energy released was equivalent to about 30 kilotons of TNT, where a ton of TNT releases an energy of 4.0×10^9 J. The amount of mass converted into energy in this event is nearest to: (a) 1 μ g, (b) 1 mg, (c) 1 g, (d) 1 kg, (e) 20 kilotons

(c). The total energy released was $E = (30 \times 10^3 \text{ ton})(4.0 \times 10^9 \text{ J/ton}) = 1.2 \times 10^{14} \text{ J}$. The mass equivalent of this quantity of energy is:

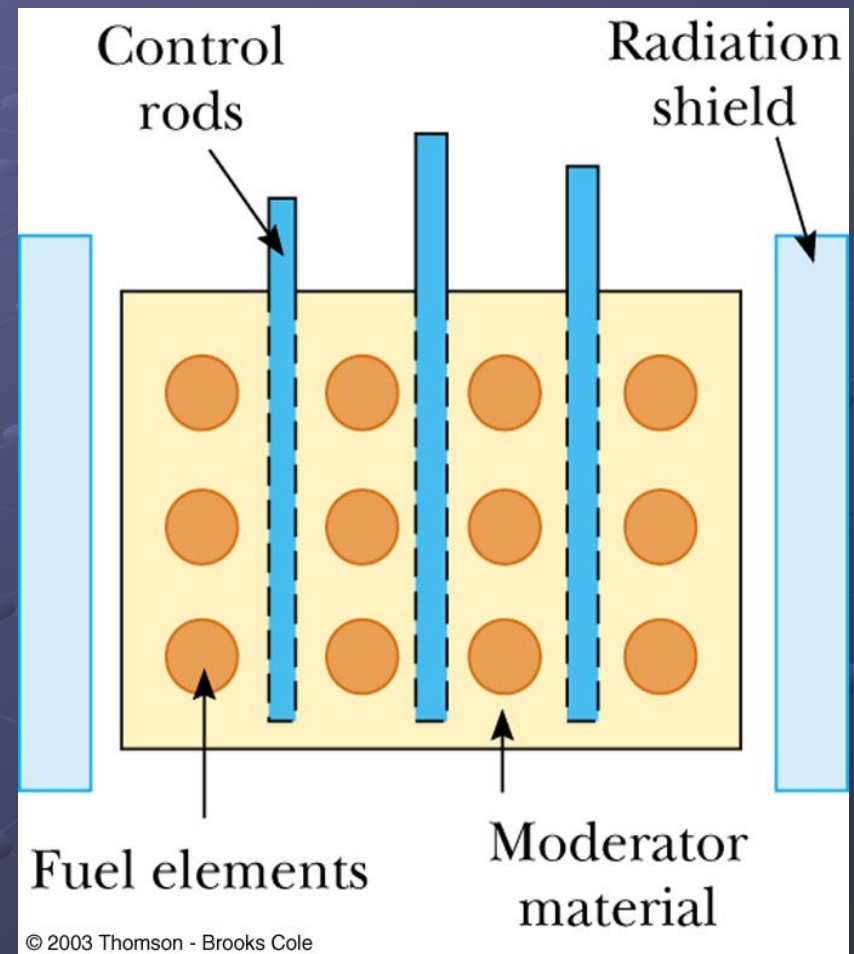
$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{1.2 \times 10^{14} \text{ J}}{(3.0 \times 10^8 \text{ m/s})^2} = 1.3 \times 10^{-3} \text{ kg} \sim 1 \text{ g}$$

Reaktor Nuklir

- Sebuah *reaktor nuklir* adalah sebuah sistem yang didisain untuk terjadinya reaksi berantai yang terkendali
- **Konstanta Reproduksi K**, didefinisikan sebagai jumlah rata-rata neutron dari tiap peristiwa fisi yang akan menyebabkan peristiwa fisi lain
 - Nilai maksimum K dari uranium fisi adalah 2.5
 - Dalam kenyataan, K lebih kecil dari nilai ini
 - Reaksi yang terkendali memiliki nilai $K = 1$

Desain Dasar Reaktor

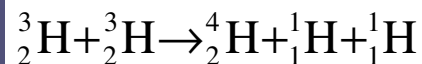
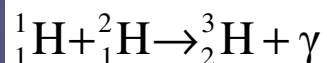
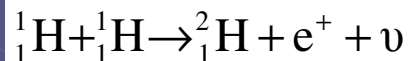
- Elemen **bahan bakar** terdiri atas uranium
- **Material moderator** (air dan grafit) digunakan untuk memperlambat neutron
- **Batang kendali** digunakan untuk mengabsorpsi neutron
- Ketika $K = 1$, reaktor dikatakan *kritis*
 - Reaksi berantai terkendali
- Ketika $K < 1$, reaktor dikatakan *subkritis*
 - Reaksi berhenti
- Ketika $K > 1$, reaktor dikatakan *superkritis*
 - Terjadi reaksi yang berjalan sendiri



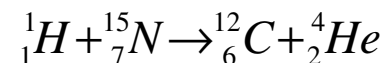
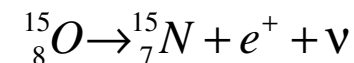
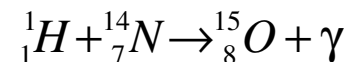
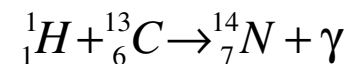
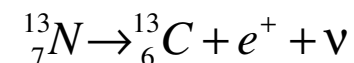
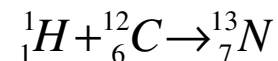
Energi Termonuklir (Fusi Inti)

- Reaksi eksotermik dasar dalam bintang (merupakan sumber dari hampir semua energi dalam semesta) adalah **fusi inti hidrogen** menjadi **inti helium**
- Terjadi dua deretan proses:
 - Siklus **proton-proton**,
merupakan tumbukan langsung proton-proton menghasilkan inti lebih berat yang diikuti dengan tumbukan antara inti-inti itu sehingga menghasilkan inti helium
 - Siklus **karbon**,
merupakan sederetan proses dimana inti karbon menyerap proton berturut-turut sampai akhirnya inti itu memancarkan partikel alfa dan kembali menjadi inti karbon lagi

Siklus Proton - proton



Siklus Karbon



Energi Termonuklir (Fusi Inti) lanjutan

- Reaksi fusi yang dapat berlangsung sendiri hanya dapat terjadi pada kondisi temperatur dan tekanan yang sangat tinggi, agar inti yang ikut dalam proses tsb mempunyai energi cukup untuk berreaksi walaupun dicegah oleh gaya tolak listrik, dan reaksinya terjadi cukup kerap untuk mengimbangi pelepasan energi ke sekelilingnya.
- Energi yang dilepas ketika terjadi fusi inti ringan menjadi inti berat disebut energi termonuklir