



# Kimia Inti dan Radiokimia

# [ Keradioaktifan ]

- Keradioaktifan: proses atom-atom secara spontan memancarkan partikel atau sinar berenergi tinggi dari inti atom.
- Keradioaktifan pertama kali diamati oleh Henry Becquerel pada tahun 1896. Berikut unsur-unsur dalam sistem periodik yang bersifat radioaktif (berwarna merah).

H																	He
Li	Be											B	C	N	O	F	Ne
Na	Mg											Al	Si	P	S	Cl	Ar
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	In	Sn	Sb	Te	I	Xe
Cs	Ba	Lu	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn
Fr	Ra	Lr	Rf	Db	Sg	Bh	Hs	Mt	110	111	112						
		La	Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb		
		Ac	Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No		

# Unsur Radioaktif Alam dan Buatan

## ■ Radioaktif Alam:

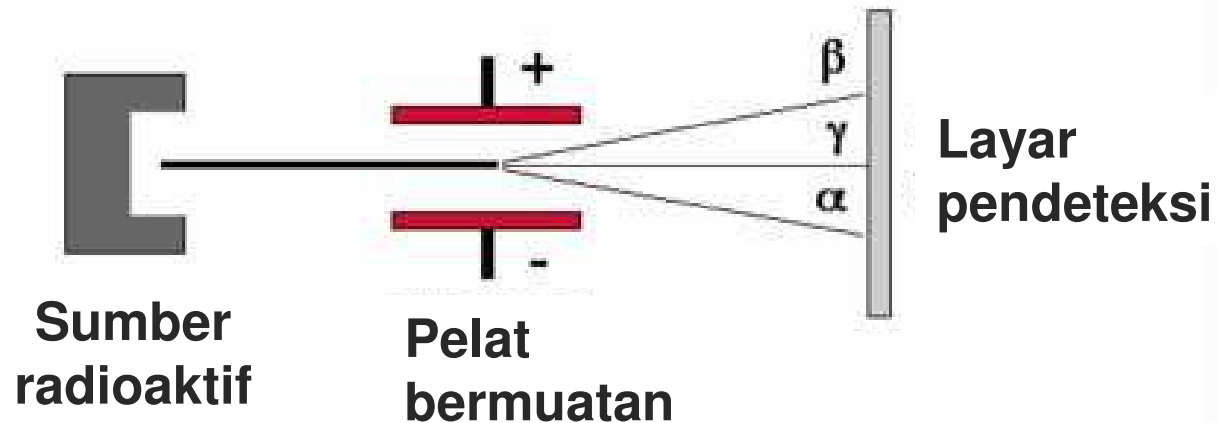
- Isotop yang telah ada sejak bumi terbentuk. Contoh: uranium.
- Unsur yang dihasilkan dari pancaran sinar kosmik matahari. Contoh: karbon – 14

## ■ Radioaktif Buatan:

- Dibuat dalam reaktor nuklir ketika atom-atom terpecah (fisi). Dihasilkan menggunakan siklotron, akselerator linier, dll.

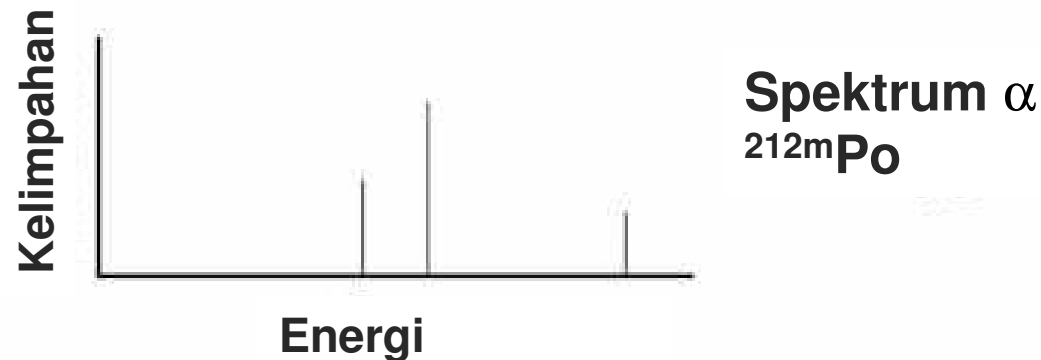
# [ Tipe Emisi Radioaktif ]

- Tipe emisi radioaktif yang umum ada tiga: emisi  $\alpha$ ,  $\beta$ , dan  $\gamma$ .



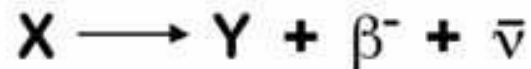
# [ Radiasi Alfa – $\alpha$ ]

- ${}^4\text{He}^{2+}$  dipancarkan secara monoenergetik dengan cakupan energi: 1,5 – 11,7 MeV. (1 MeV =  $1,6 \times 10^{-13}$  J)

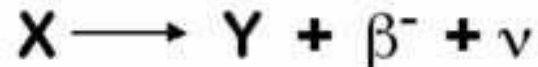


# Radiasi Beta – $\beta$

- Emisi dipancarkan dalam 3 modus:
  - **Negatron,  $\beta^-$ :** elektron dipancarkan dari inti, terutama oleh intri yang kaya neutron. Emisinya disertai dengan pemancaran antineutrino (kekekalan momentum).



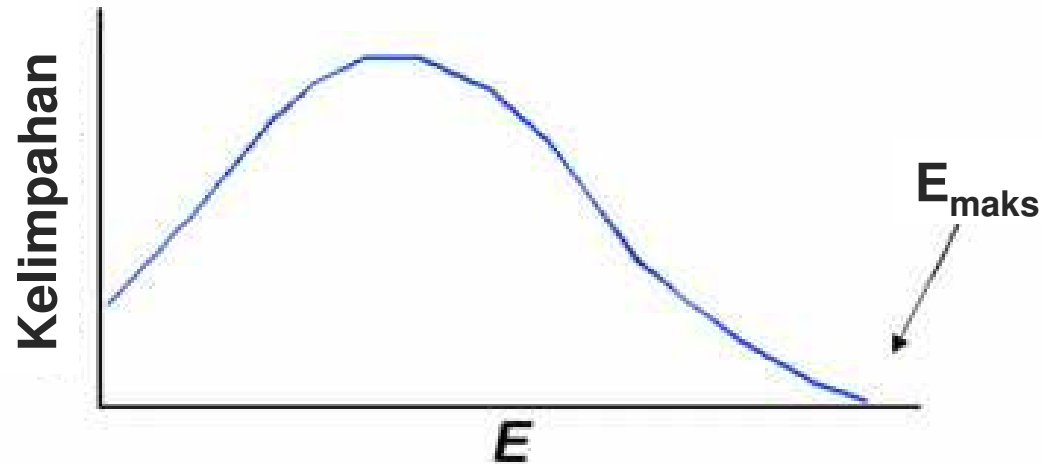
- **Positron,  $\beta^+$ :**  $e^+$  dipancarkan dari inti atom, terutama inti yang kaya proton. Emisinya disertai dengan pemancaran neutrino (kekekalan momentum).



- **Electron Capture (EC):** suatu modus mengurangi nomor atom  $Z$  namun besarnya nomor massa  $A$  dipertahankan. Modus ini berkompetisi dengan pemancaran positron. Elektron tertarik ke dalam inti dari kulit K. Modus ini disukai jika energi peluruhan  $< 2mc^2$ .

# [ Radiasi Beta – $\beta$ ]

- $\beta^+$  dan  $\beta^-$  dipancarkan pada cakupan energi tertentu
  - Dipengaruhi oleh elektron-elektron sekitar atom.
  - Memiliki karakteristik berupa nilai  $E_{\text{maks}}$ .



# [ Annihilasi ]

- $\beta^+$  bersifat tak stabil – antimateri.  $\beta^+$  dan  $e^-$  akan dengan cepat berikatan dan akan terjadi dua hal:
  - $\beta^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$  (0,51 MeV)  
Diemisikan dalam arah berlawanan untuk kekekalan momentum.
  - $\beta^+$  (lambat) +  $e^- \rightarrow \gamma$  (1,02 MeV)  
Modus ini kurang umum terjadi



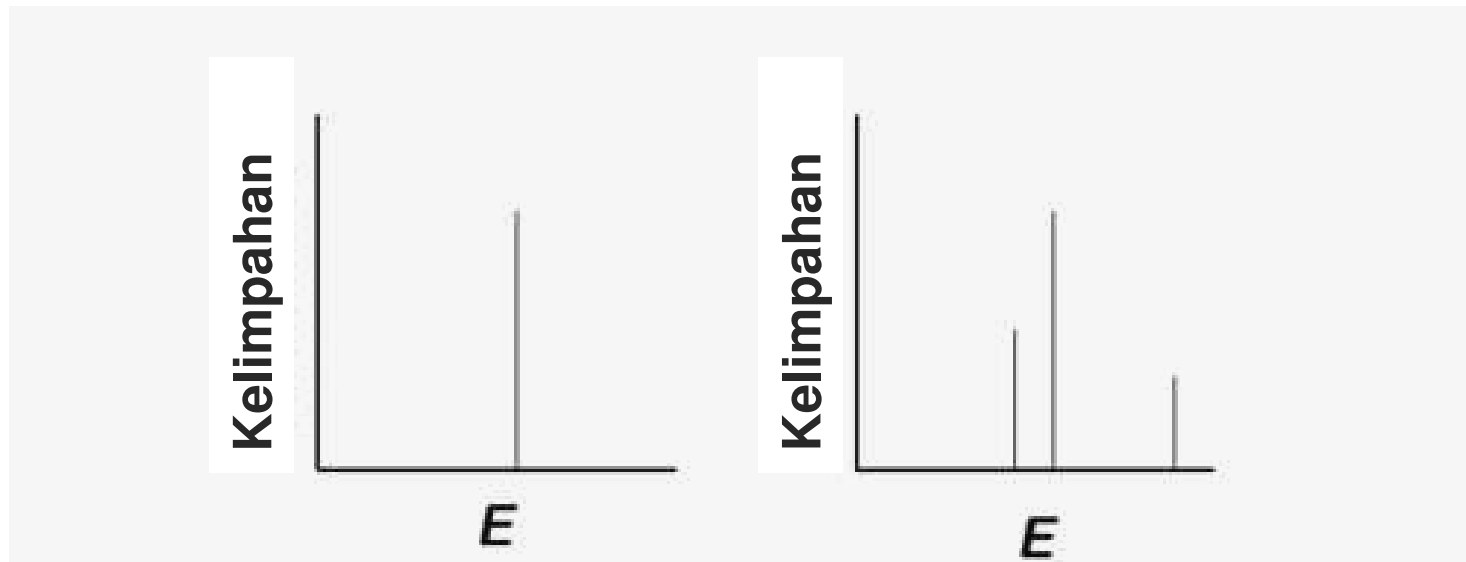
# [ Radiasi Gamma – $\gamma$ ]

- Radiasi gamma merupakan bagian dari spektrum EM yang energinya lebih tinggi daripada daerah sinar-X. Besarnya energi 0,1- 10 MeV, rata-rata  $> 5$  MeV.
- Radiasi terjadi bersama-sama dengan emisi  $\alpha$  dan  $\beta$  ketika atom kembali dari keadaan transisi ke keadaan dasar.



# [ Radiasi Gamma – $\gamma$ ]

- Radiasi Gamma juga berlangsung secara monoenergetik.

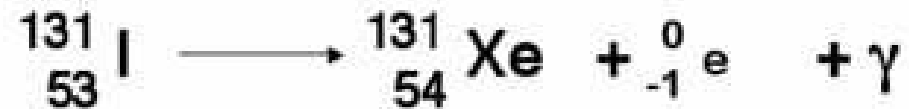


# Reaksi Inti

- Persamaan reaksi inti menunjukkan bagaimana atom-atom meluruh.
  - Sama dengan persamaan kimia. Harus ada kesetaraan massa dan muatan.
  - Berbeda dengan persamaan kimia karena:
    - Unsur-unsur berubah menjadi unsur yang lain.
    - Tipe isotop menjadi penting.
- Contoh: seorang pasien diberikan iod radioaktif untuk menguji fungsi tiroidnya. Apa yang terjadi dengan iod? Apakah persamaan reaksi berikut seimbang? Perhatikan bahwa muatan dan massa di kedua ruas sama.



Jawab:



**Massa**

53 proton

54 proton

78 neutron

77 neutron

131 total massa

131 total massa

**Muatan**

+ 53, proton

+ 54, proton

78 neutron

- 1 muatan  $\beta^-$

+ 53, total muatan

+ 53 total muatan

Jadi persamaan reaksi ini setara

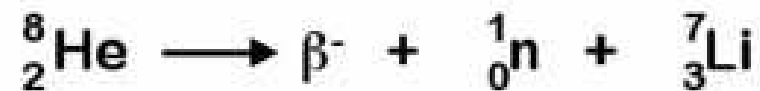
# [ Modus Emisi Lainnya ]

- Fisi Spontan (*Spontaneous Fission, SF*): terjadi ketika nomor massa  $A \geq 100$  karena inti atom memiliki energi pengikat yang bernilai negatif. Fisi spontan tak dapat teramati, kecuali nomor massa  $\geq 232$ . Secara umum modus emisi ini jarang teramati dan waktu paruhnya sangat lama.



## Modus Emisi Lainnya

- Emisi Neutron. Emisi ini jarang terjadi, hanya teramati untuk atom tertentu yang kaya neutron, biasanya isotop sintetis. Contoh:



- Nuklida sintetis dapat dibuat dengan reaksi inti terinduksi.

# Reaksi Inti Terinduksi

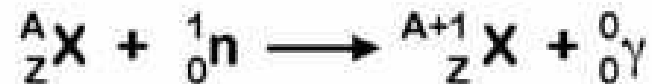
- Suatu reaksi inti disebabkan tumbukan dari partikel yang bergerak dengan suatu inti.
- Proses ini terjadi di atmosfer bumi sepanjang waktu
- Contoh – produksi  $^{14}\text{C}$  berikut:



- Nuklida sintetis dapat dibuat dengan seperangkat alat yang menghasilkan energi tinggi, seperti: akselerator Cockcroft-Walton, akselerator linier, siklotron, generator Van der Graaff, reaktor nuklir, dan emiter isotop neutron.

# Aktivasi Neutron

- Salah satu untuk membuat reaksi inti terinduksi adalah dengan aktivasi neutron.



- Sinar gamma dihasilkan yang disebut prompt gamma.
- Neutron yang digunakan biasanya neutron termal, yaitu suatu partikel lambat yang berada dalam kesetimbangan dengan lingkungan bersuhu kamar.



# [ Satuan Aktivitas ]

- Satuan yang umum digunakan:
  - dps : disintegrasi per sekon
  - dpm : disintegrasi per menit
  - Ci, Curie =  $3,7 \times 10^{10}$  dps =  $2,22 \times 10^{12}$  dpm
  - Bq, Becquerel (satuan SI) = 1 kejadian  $s^{-1}$  = 1 dps
- Dalam studi radioanalitik, satuan yang biasa digunakan adalah  $\mu$ Ci atau mCi.

# Peluruhan Radioaktif

- Peluruhan radioaktif bersifat eksponensial, dimana jumlah fraksi yang tersisa setelah peluruhan dinyatakan dengan persamaan di samping:
- Dengan  $N_t$  = jumlah partikel yang tersisa setelah  $t$  satuan waktu;  $N_0$  = jumlah partikel sebelum meluruh;  $t$  = waktu peluruhan;  $k$  = tetapan laju peluruhan.

$$\frac{N_t}{N_0} = e^{-k t}$$

$$-d N / d t = k N$$

$$\ln N = -k t + a$$

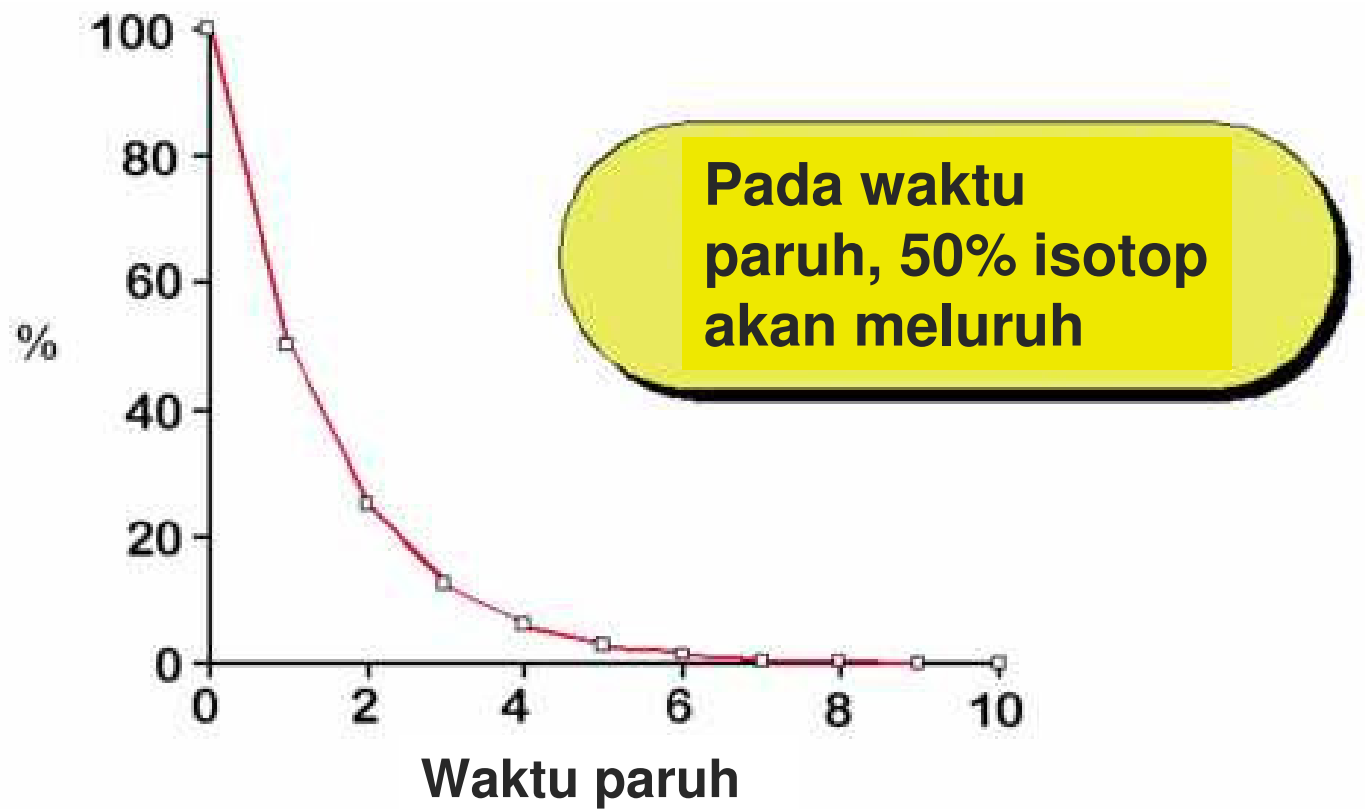
$$\ln (N / N_0) = k t$$

$$N = N_0 e^{-k t}$$

# [ Peluruhan Radioaktif ]

- Tetapan laju ( $k$ ) bergantung pada spesi radioaktif tertentu:
  - Merupakan salah satu karakteristik yang jelas mengenai suatu isotop radioaktif.
    - Bentuk termodifikasi dari tetapan laju  $k$  adalah  $t_{1/2}$  dimana  $t_{1/2} = \ln 2/k$
    - Nilai  $t_{1/2}$  adalah waktu yang dibutuhkan oleh suatu spesi radioaktif tertentu untuk dapat meluruh 50% dari semula, disebut juga waktu paruh.

# [ Waktu Paruh ]



# Contoh Waktu Paruh

<b>Nama</b>	<b>Waktu Paruh</b>
<b>Carbon-14</b>	<b>5730 tahun</b>
<b>Sodium-24</b>	<b>15 jam</b>
<b>Iron-59</b>	<b>45 hari</b>
<b>Cobalt-60</b>	<b>5.3 tahun</b>
<b>Nickel-63</b>	<b>100 tahun</b>
<b>Uranium-235</b>	<b>704 Miliaran tahun</b>

# Aktivitas

- Dalam praktek, kita tak dapat secara langsung mengetahui nilai  $N$  atau bahkan  $dN/dt$ .
- Sebagai pendekatan digunakan nilai  $A$  (aktivitas), yaitu  $A = \text{disintegrasi/satuan waktu} = \text{cacahan/satuan waktu}$
- Karena aktivitas sebanding dengan  $N$ , maka bisa digunakan hubungan berikut, dengan asumsi kita hanya mengukur spesi tunggal saja:

$$A = A_0 e^{-k t}$$

atau

$$A = A_0 e^{-0.693 t / t_{1/2}}$$

## Contoh soal waktu paruh

- Nilai  $t_{1/2}$  untuk  $^{63}\text{Ni}$  adalah 100 tahun. Jika terdapat 100 g  $^{63}\text{Ni}$ , berapa banyak  $^{63}\text{Ni}$  yang tersisa setelah 250 tahun?
- Jawab:

$$\begin{aligned} A &= A_0 e^{-0,693 t/t_{1/2}} \\ &= 100 \text{ g } e^{-0,693(250\text{thn})/(100\text{thn})} \\ &= 17,7 \text{ g} \end{aligned}$$

# Waktu Paruh

- Jumlah  $^{63}\text{Ni}$  yang tersisa adalah:

Waktu paruh	Jumlah sisa, g	Waktu, tahun
0	100	0
1	50	100
2	25	200
3	12.5	300
4	6,25	400

- $^{63}\text{Ni}$  digunakan untuk detektor asap.

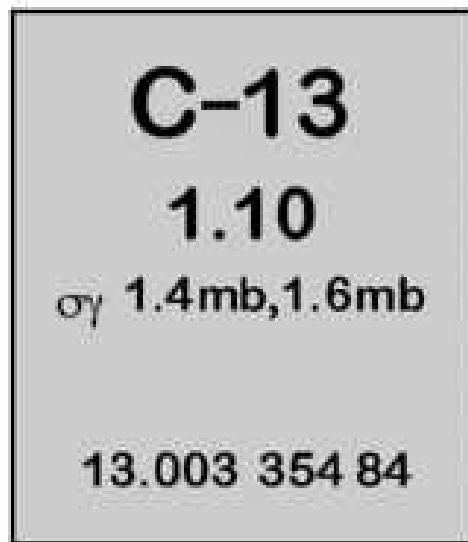


# [ Grafik Nuklida ]

- Tabel periodik versi radiokimiawan meliputi daftar semua nuklida yang diketahui.
- Terdapat lebih dari 2300 nuklida dan lebih dari 400 isomer yang metastabil.
- Hanya 287 isotop yang stabil atau dalam bentuk radioaktif alam.
- Daftar informasi nuklida ini disusun dalam tabel dan grafik nuklida.

# Contoh Isotop Stabil

- Isotop stabil dituliskan dalam kotak berwarna abu-abu.



← Lambang atom dan nomor massa

← Persen kelimpahan

← Neutron termal dan bagian resonansi silang

← Massa isotop – skala C-12

# Contoh Radioisotop Alam

- Catatan: Pengkodean warna juga digunakan untuk menunjukkan nilai waktu paruh relatif.

<b>H3</b>	
<b>12.3y</b>	← Waktu paruh
$\beta^-$ .01860	← Modus dan energi peluruhan (dalam MeV)
no $\gamma$	
$\sigma_{\gamma} < 6\mu\text{b}$	← Bagian persilangan
E 0.01860	← Energi Disintegrasi beta dalam MeV

# Radioaktif Buatan

- Contoh berikut menunjukkan modus peluruhan yang paling umum terjadi. Modus peluruhan lainnya bisa juga terjadi.

**Ca47**

**4.54 d**

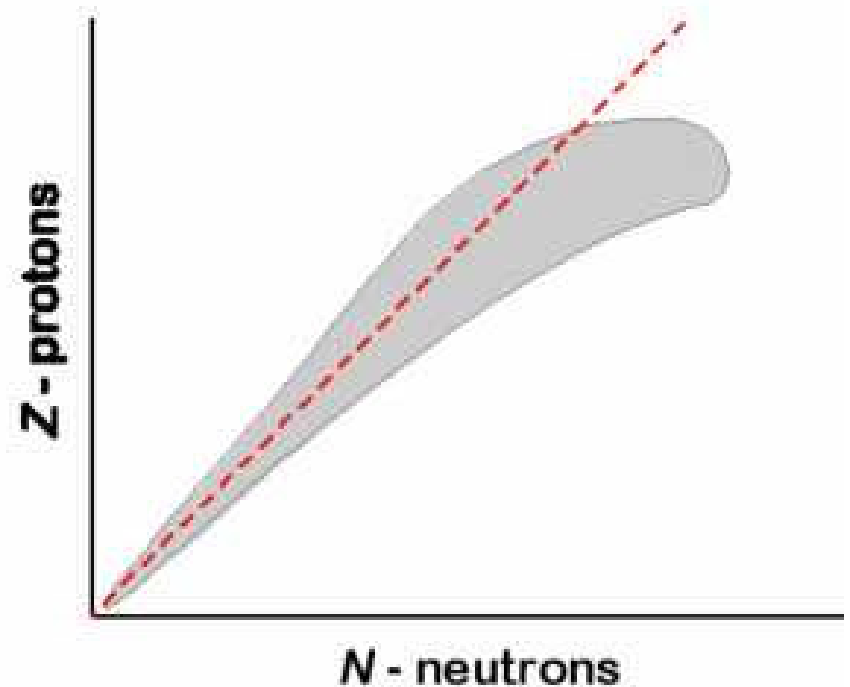
$\beta^-$  .69, ...

$\gamma$  1.297, ...

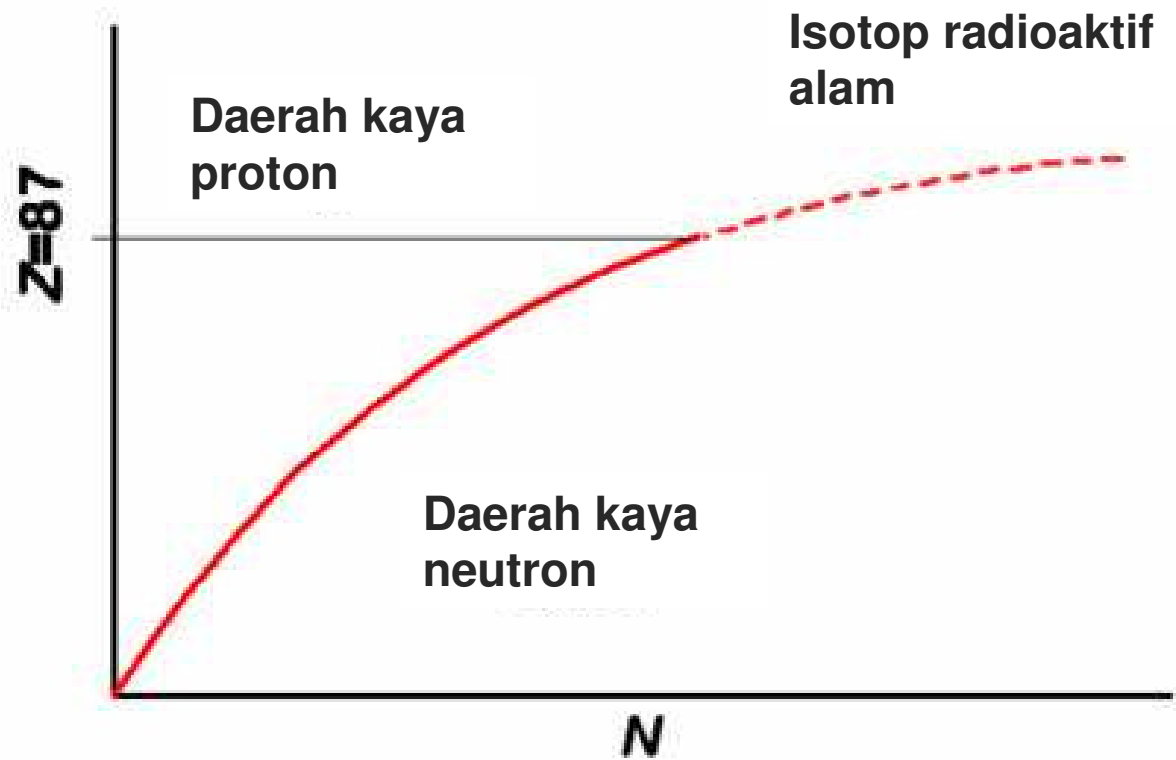
**E 1.988**

# Memprediksi Tipe Peluruhan

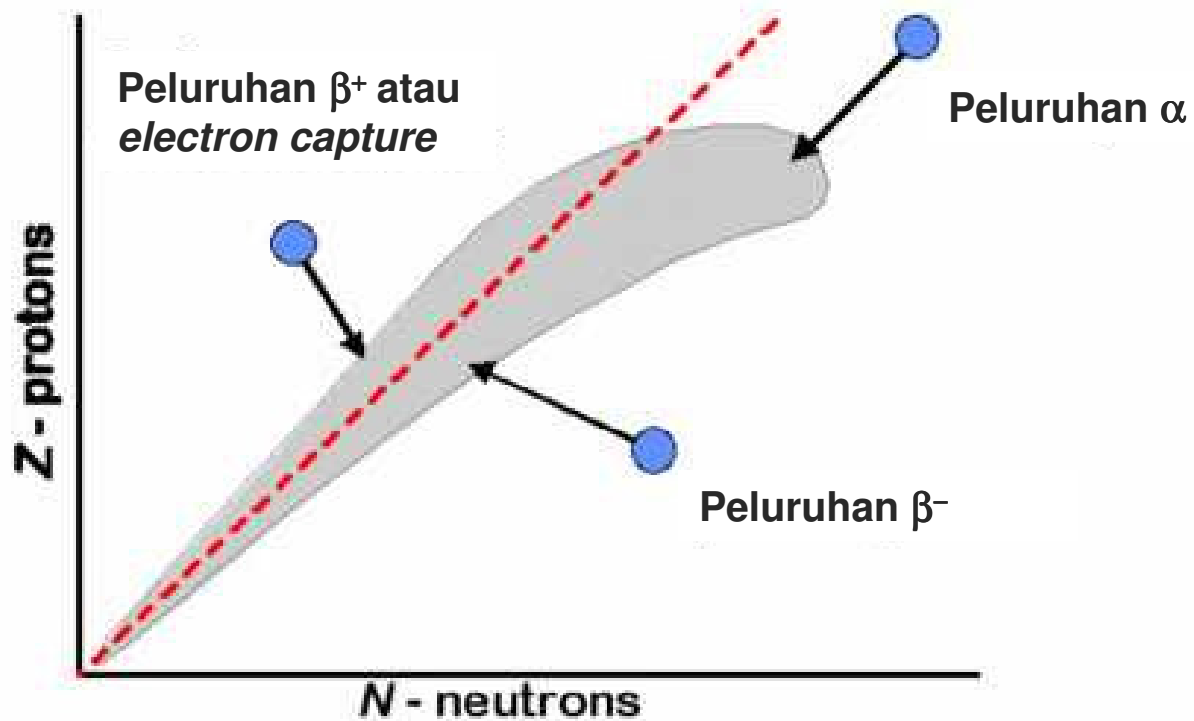
- Grafik nuklida merupakan pemetaan yang baik untuk mengetahui tipe-tipe isotop.
- Grafik ini menunjukkan tiap tipe radioisotop yang akan mengalami peluruhan. Isotop-isotop yang stabil adalah yang berada di daerah pita kestabilan, yaitu pada kemiringan  $45^\circ$ .
- Nuklida radioaktif akan meluruh dengan modus peluruhan yang sesuai untuk mencapai jalur terpendek menuju pita kestabilan.



# [ Trend Peluruhan ]



# Rasio Proton:Neutron



# [ Bilangan Sakti (*Magic Number*) ]

- Beberapa kombinasi proton dengan neutron menunjukkan kestabilan isotop dibandingkan isotop lainnya.
- Bilangan Sakti Proton: 2, 8, 20, 28, 40, 50, dan 82.
- Bilangan Sakti Neutron: 2, 8, 20, 28, 40, 50, 82, dan 126.
- Bilangan Sakti ini menunjukkan keberadaan tingkat energi dalam inti, sama dengan yang teramati pada elektron di luar inti atom.



# Perubahan Energi dalam Reaksi Inti

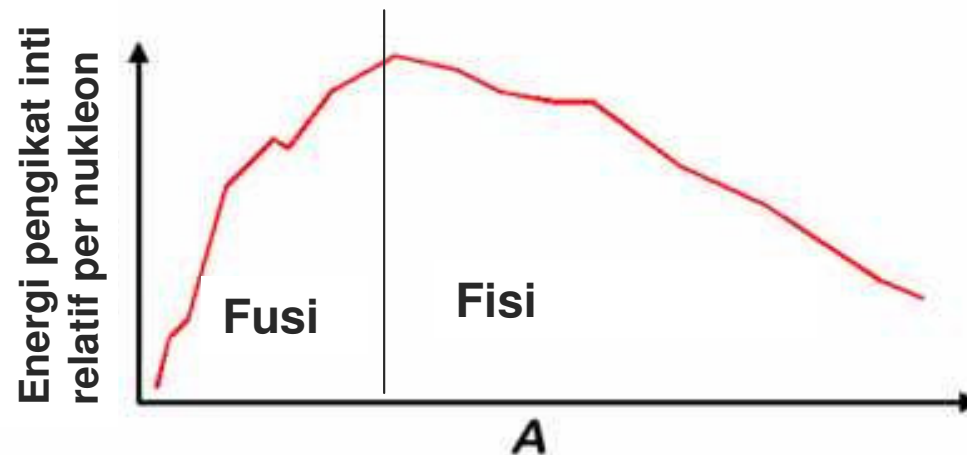
- **Energi Pengikat Inti:** Ukuran kestabilan yang diperoleh ketika proton dan neutron saling berikatan membentuk inti atom.
- Persamaan yang menunjukkan hubungan antara massa dan energi adalah:  **$E = mc^2$** .
- Hubungan ini dapat digunakan untuk menentukan berapa banyak energi yang dihasilkan oleh adanya pengurangan massa atom. Versi lain:  **$\Delta E = \Delta mc^2$** .
- Dengan  **$\Delta E$**  = energi pengikat inti;  **$\Delta m$**  = perbedaan massa inti atom dengan nukleon yang terpisah.
- Karena  $1 \text{ sma} = 931 \text{ MeV}$ , maka **Energi Pengikat Inti =  $\Delta m(\text{sma}) \times 931 \text{ MeV/sma}$** .

# [ Contoh soal ]

- Tentukan energi pengikat inti untuk  $^{16}\text{O}$ . Diketahui massa  $^{16}\text{O} = 15,9949146$  sma;  $n = 1,0086649$  sma;  $p = 1,0078250$  sma.
- Jawab: pertama-tama, hitung massa nukleon dalam  $^{16}\text{O}$  yang terdiri dari 8 proton dan 8 neutron.
  - $8 n = 8 \times 1,0086649 = 8,0693192$
  - $8 p = 8 \times 1,0078250 = 8,0620000$
  - Total  $\quad\quad\quad = 16,1319192$
- Kemudian hitung energi pengikat inti berdasarkan perbedaan massa:
  - $\Delta m = (16,1319192 - 15,9949146) \text{ sma} = 0,1370046 \text{ sma}$
  - Energi Pengikat Inti  $= 0,1370046 \text{ sma} \times 931 \text{ MeV/sma}$
  - $\quad\quad\quad = 127,6 \text{ MeV}$

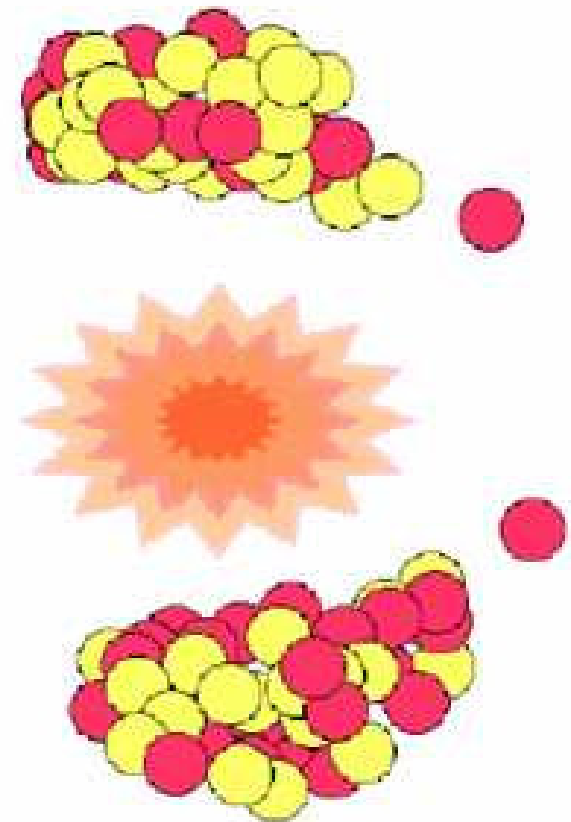
# Energi Pengikat Inti

- Kita dapat menghitung energi pengikat inti semua isotop stabil dan akan terbentuk grafik di bawah ini.
- Dengan semakin bertambahnya nukleon, akan mencapai energi maksimum (pada  $A = 56$ , besi). Massa nukleon yang lebih besar bersifat kurang stabil. Oleh karena itu kita bisa memperoleh energi baik dari peristiwa fisi maupun fusi.
- Untuk massa nukleon yang lebih berat akan cenderung mengalami emisi partikel  $\alpha$ .



# Energi Inti

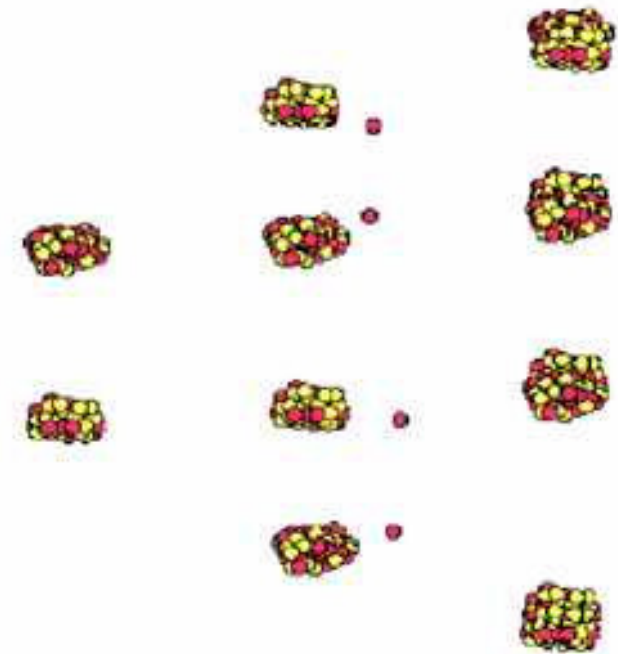
- Energi inti dapat diperoleh dengan dua cara:
  - Fisi: pemecahan atom:
    - Energi diperoleh jika inti atom besar
    - Inti yang lebih kecil bersifat lebih stabil.
    - Ini yang terjadi di dalam reaktor nuklir.
  - Fusi: Penggabungan atom:
    - Energi diperoleh jika inti atom kecil.
    - Inti yang lebih besar bersifat lebih stabil.
    - Ini yang terjadi pada matahari.



Reaksi Fisi

# Reaksi Berantai

- Reaksi Ktitik: terjadi ketika reaksi fisi yang cukup terjadi agar reaksi berantai berlangsung (neutron yang terbentuk = neutron yang digunakan) – energi inti/nuklir.
- Reaksi Superkritik: ketika kelebihan neutron dihasilkan dan laju reaksi fisi terus meningkat – bom inti/nuklir.



Reaksi Berantai

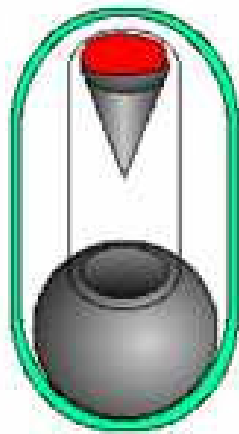
# [ Energi Fisi ]

- Uranium-235 digunakan sebagai bahan bakar dalam suatu reaktor nuklir. Reaksinya:

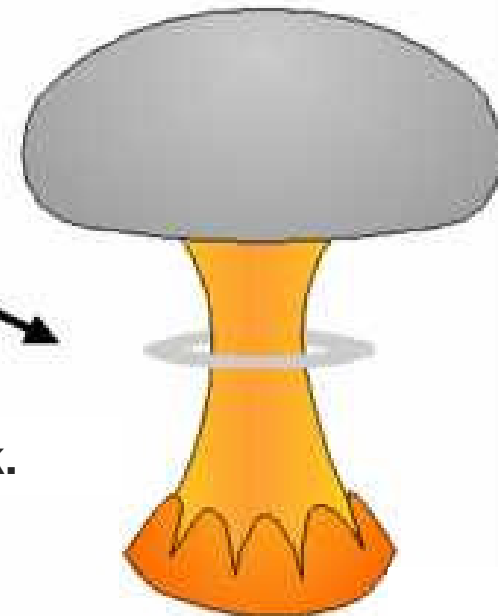
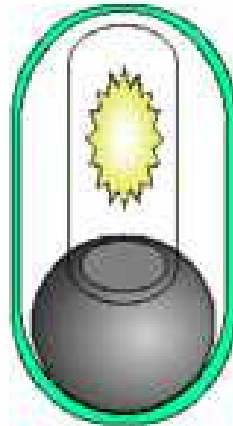


- Energi yang dihasilkan dari pemecahan satu atom uranium sekitar 200 miliaaar elektron volt.
- 100 g  ${}^{235}\text{U}$  dapat menghasilkan energi yang sama besarnya dengan yang dihasilkan oleh 80 triliun ton TNT!

# [ Bom Nuklir ]

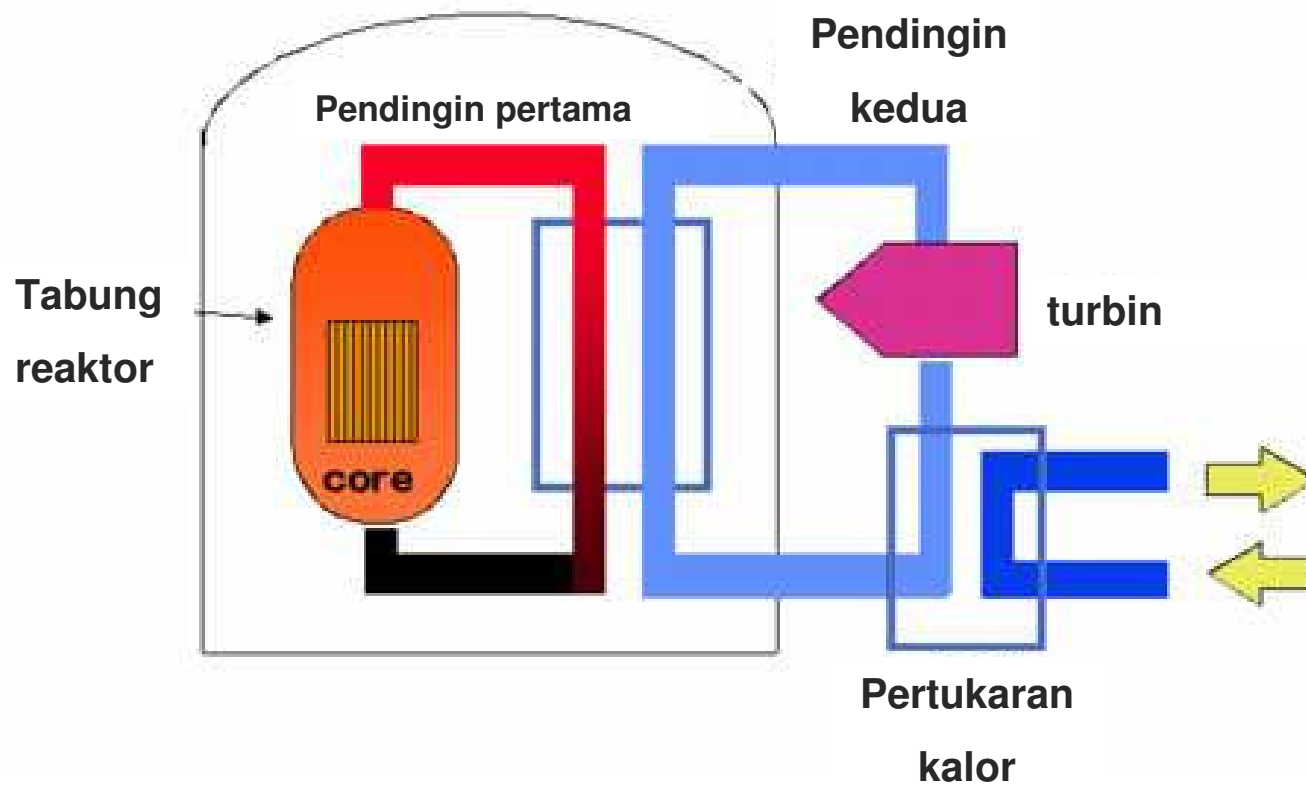


Ledakan konvensional digunakan untuk memicu dua bagian U-235 bersamaan.



Hal ini yang menimbulkan massa superkritik.

# [ Reaktor Nuklir ]





# Energi Fusi

- Ketika beberapa atom bermassa kecil digabung, akan diperoleh sejumlah energi.
- Di dalam Matahari terjadi penggabungan atom-atom hidrogen menjadi helium.
- Dalam reaktor dapat dibuat reaksi fusi antara dua isotop hidrogen, dengan dihasilkan energi. Energi ini bisa digunakan sebagai bahan bakar masa depan, murah karena bahan dasarnya bisa diperoleh dari lautan yang bisa dianggap tak usah dibeli.

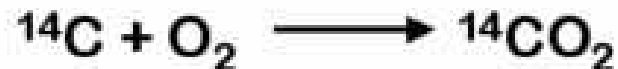


# [ Kegunaan Radionuklida ]

- Kemampuan untuk mengukur radioaktivitas bersifat sensitid sehingga bisa digunakan untuk beberapa keperluan apalagi interaksi radionuklida dengan organisme hidup telah dipelajari.
- Beberapa kegunaan diantaranya:
  - Teknik penentuan umur material
  - Pengobatan kanker
  - Penelusur
  - Pencitraan (*imaging*)
  - Metode Pengujian sampel

# Penentuan Umur material

- Terdapat dua tipe umum:
  - Geokronologi: menggunakan isotop yang memiliki waktu paruh panjang untuk menentukan umur mineral.
  - Penanggalan Karbon: menggunakan bentuk radioaktif karbon yaitu karbon-14 yang dihasilkan di bagian atas permukaan atmosfer oleh sinar kosmik pada laju yang hampir konstan, untuk mengetahui umur material yang pernah hidup di masa lampau. Karbon-14 akan segera bereaksi dengan oksigen di udara menghasilkan isotop karbondioksida.



# Penanggulangan Karbon

Tanaman dan alga menggunakan karbondioksida untuk membuat gula dan protein. Kemudian tanaman dan alga dimakan dan begitu seterusnya dalam rantai makanan.



# Aplikasi Medis

- Terapi kanker:
  - Radiasi dapat menimbulkan sekaligus menyembuhkan kanker.
  - Radiasi menyebabkan molekul-molekul dalam sel terpecah/terionisasi. Kerusakan yang paling terlihat apabila DNA rusak dan pengaruh terbesar terjadi dalam pertumbuhan sel yang cepat.
- Contoh: Iod-127 digunakan untuk menelusuri fungsi kelenjar tiroid.



**Tyroid  
normal**



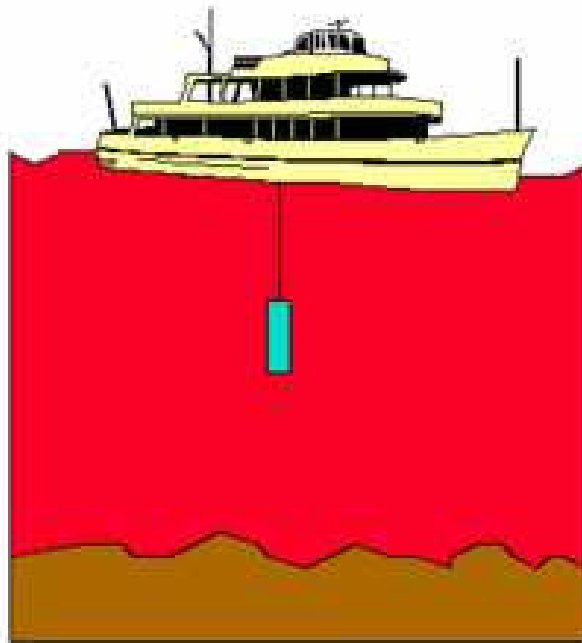
**Tumor  
Jinak**



**Kanker**

# [ Pengukuran Pergerakan Lumpur dan Pasir di Sungai ]

- Isotop yang digunakan adalah yang memiliki waktu paruh singkat, contoh:  $^{140}\text{BaSO}_4$ ,  $t_{1/2} = 12,8$  hari.



**Studi penelusuran ini membantu untuk memprediksi seberapa sering jalur air komersial perlu ditelusuri**

# Pendeteksi Kebocoran

- Digunakan sejumlah kecil radioisotop  $^{24}\text{Na}$  ( $t_{1/2} = 15$  jam), dengan cara dimasukkan ke dalam saluran air, dan pergerakannya diikuti dengan detektor. Ketika proses ini berlangsung, air ini tak boleh digunakan oleh makhluk hidup.

