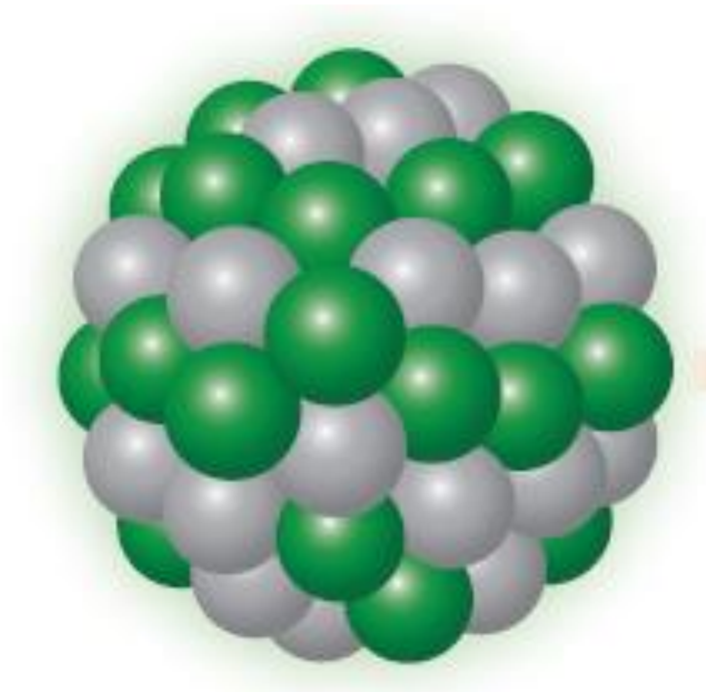
Il nucleo dell’atomo



Fra protoni e neutroni (*nucleoni*) agisce l’**interazione forte**, una potente forza attrattiva a corto raggio

Massa del protone ≈ massa del neutrone

= 1.672×10^{-27} kg

≈ 1836 volte la massa dell’elettrone

Carica dell’elettrone = $1{,}602 \times 10^{-19}$ C

Ogni nuclide è composto da 3 quark:

Protone: 2 quark up (2×+2/3) + 1 quark down (-1/3)

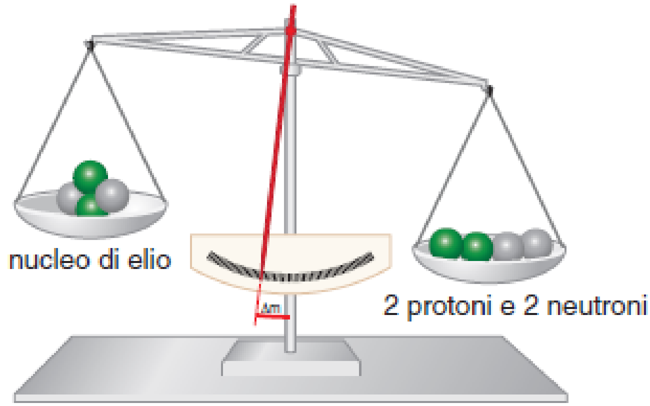
Neutrone: 1 quark up (+2/3) + 2 quark down (2×-1/3)

Numero di massa

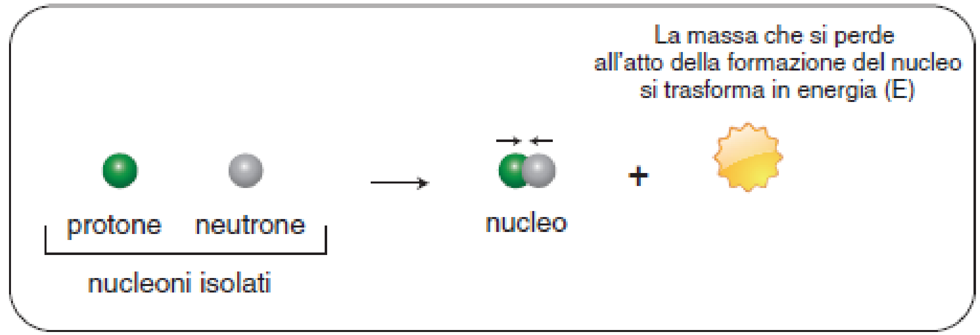
$$^{56}_{26}\mathrm{Fe}$$

Numero atomico

Energia di legame nucleare



Difetto di massa
La somma delle masse dei singoli nucleoni componenti un nucleo atomico è leggermente superiore a quella del nucleo preso nel suo complesso.



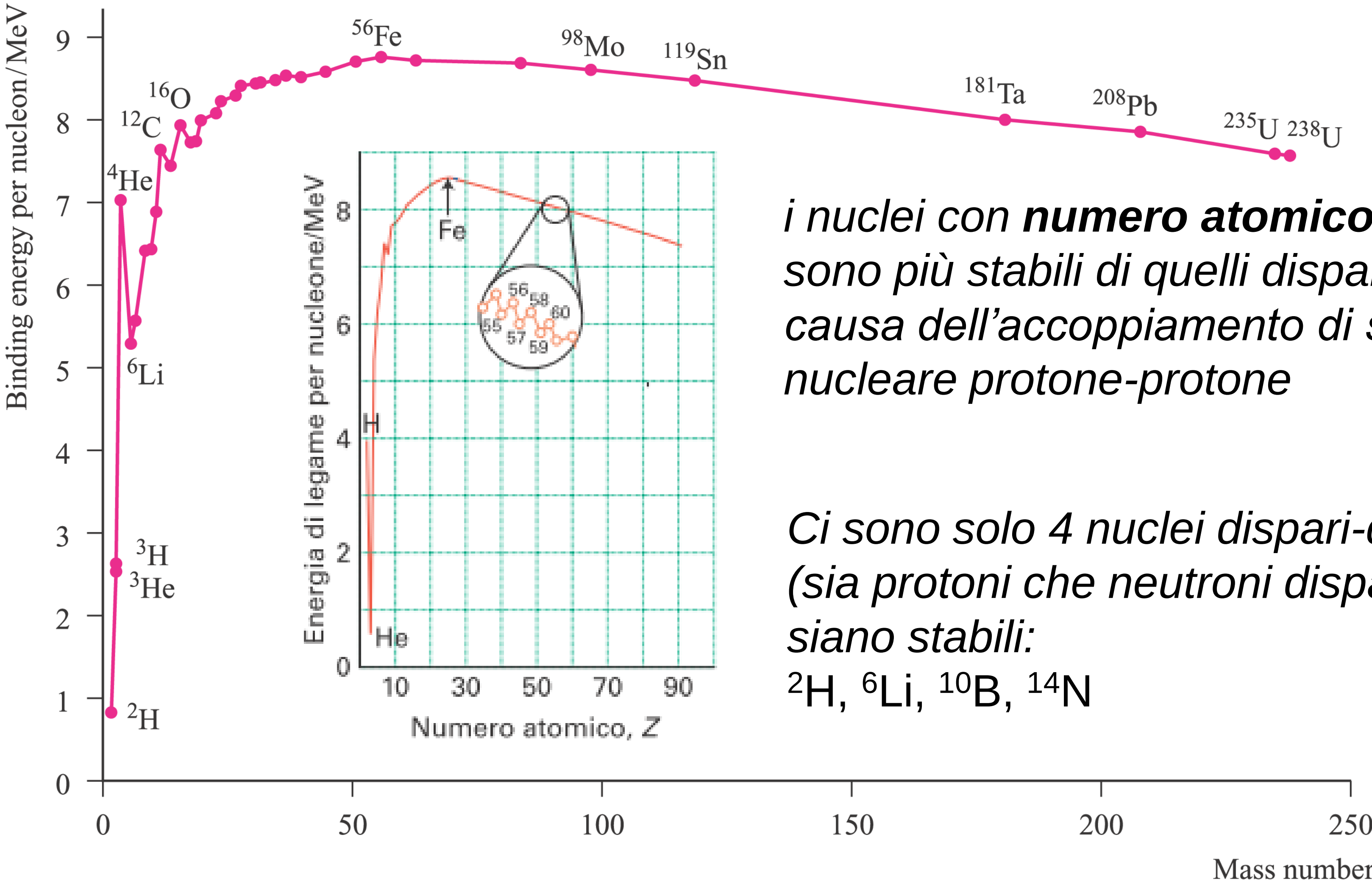
$$\Delta E = \Delta mc^2$$

$C = 2.998 \times 10^8$ m s^{-1}

1 mole ^{7}Li: 3.79×10^9 kJ

1 mole butano (combustione): 2857 kJ

Energia per nucleone



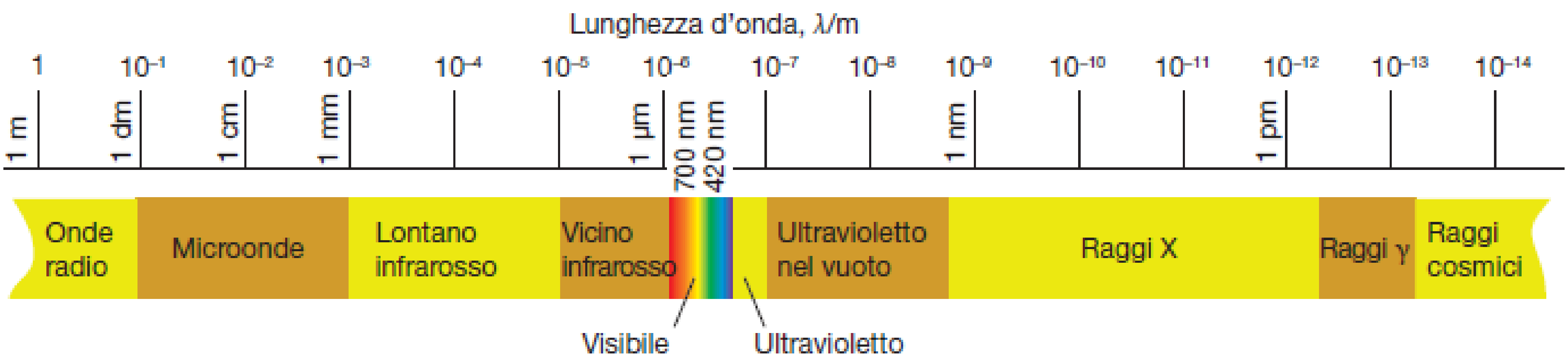
*i nuclei con **numero atomico pari** sono più stabili di quelli dispari a causa dell'accoppiamento di spin nucleare protone-protone*

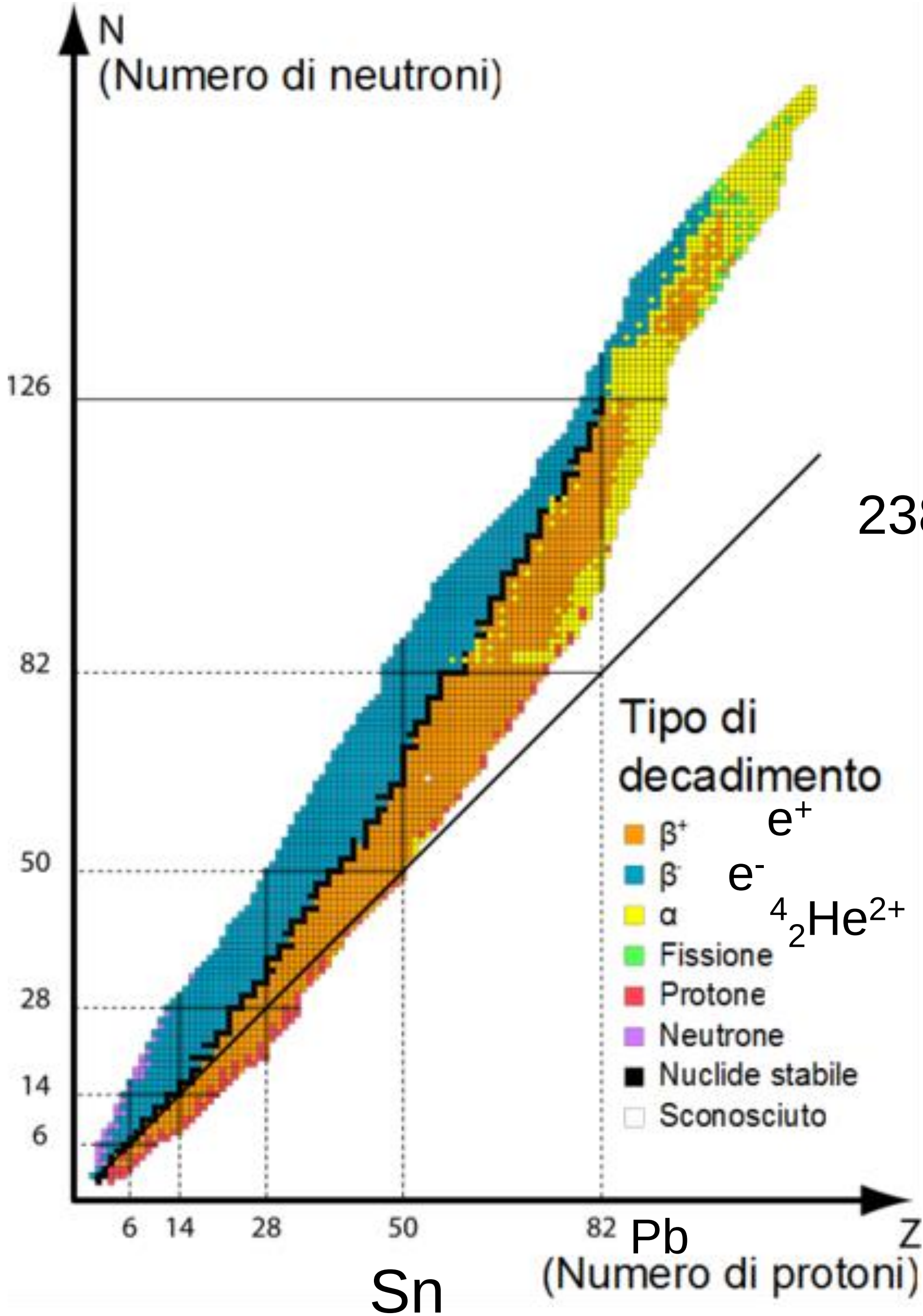
Ci sono solo 4 nuclei dispari-dispari (sia protoni che neutroni dispari) che siano stabili:
^{2}H, ^{6}Li, ^{10}B, ^{14}N

Numeri magici (di nucleoni): 2, 6, 8, 20, 28, 50, 82, 126
Nuclei doppiamente magici: ^{4}He, ^{16}O, ^{40}Ca, ^{208}Pb

Processi spontanei nei nuclei radioattivi

- Emissione di particelle (α, β-, β+)
- Cattura di elettroni
- Emissione di radiazioni (raggi X, γ)
- Fissione





$$^{14}_{6}C \rightarrow {}^{14}_{7}N + \beta^{-}$$

$$^{11}_{6}C \rightarrow {}^{11}_{5}B + \beta^{+}$$

$\Delta E_{pf} > 1.022$ MeV

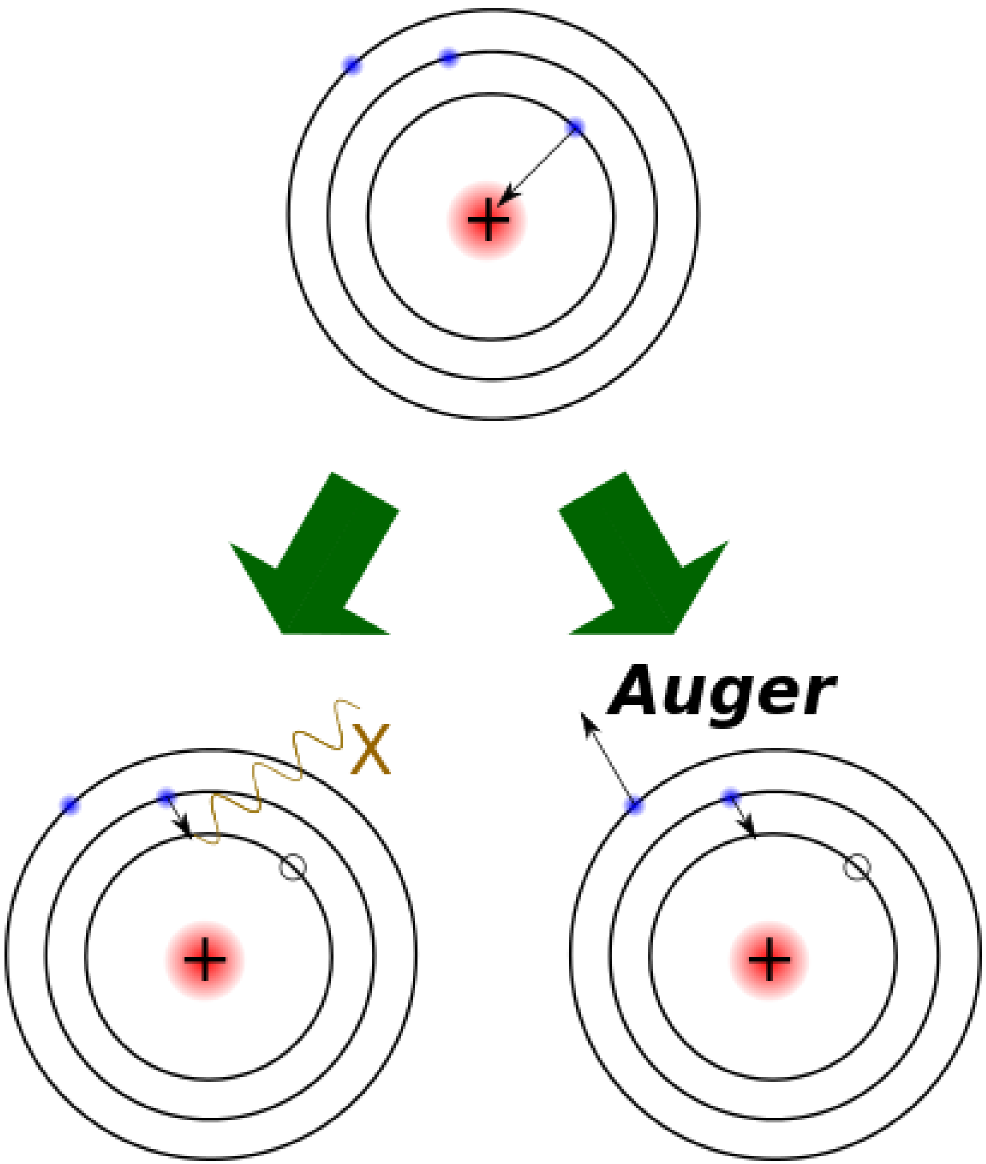
se $\Delta E_{pf} < 1.022$ MeV $\rightarrow$ EC

$$^{238}_{92}U \rightarrow {}^{234}_{90}Th + {}^{4}_{2}He + \gamma$$

Live Chart of Nuclides

https://www-nds.iaea.org/relnsd/vcharthtml/VChartHTML.html

Electron capture (EC)

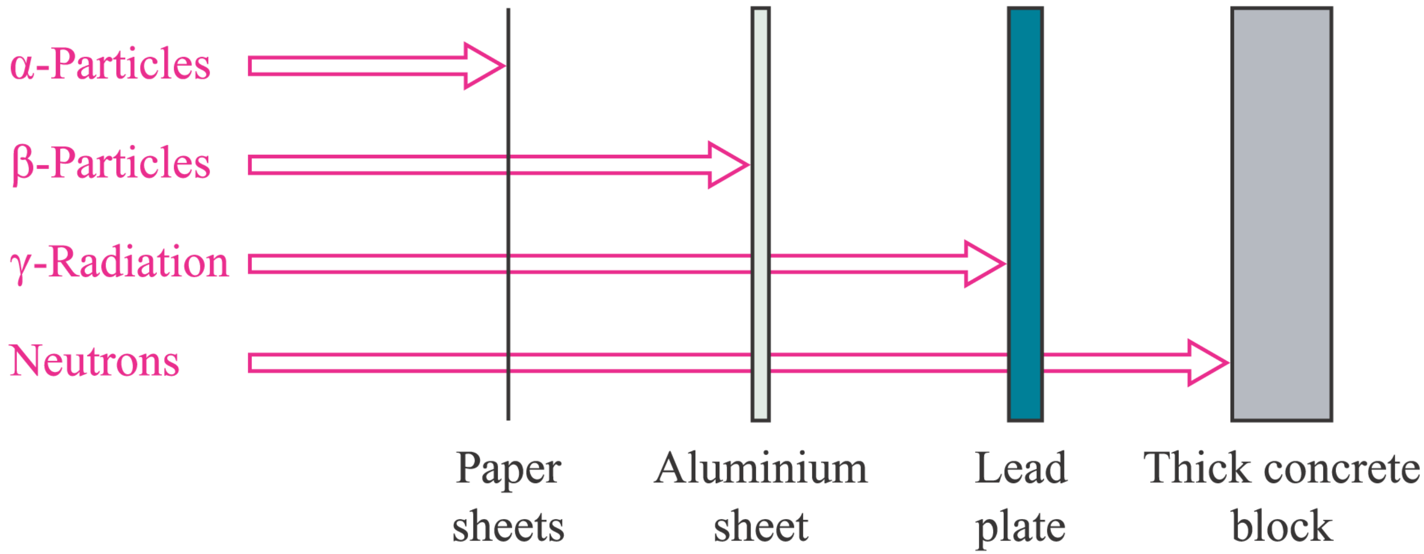


Unità di misura della radioattività e penetrazione

1 becquerel (Bq) = una disintegrazione nucleare per secondo (SI)
1 Ci (Curie) = 3.7×10^{10} Bq

$6 - 16 \times 10^{-13}$ J

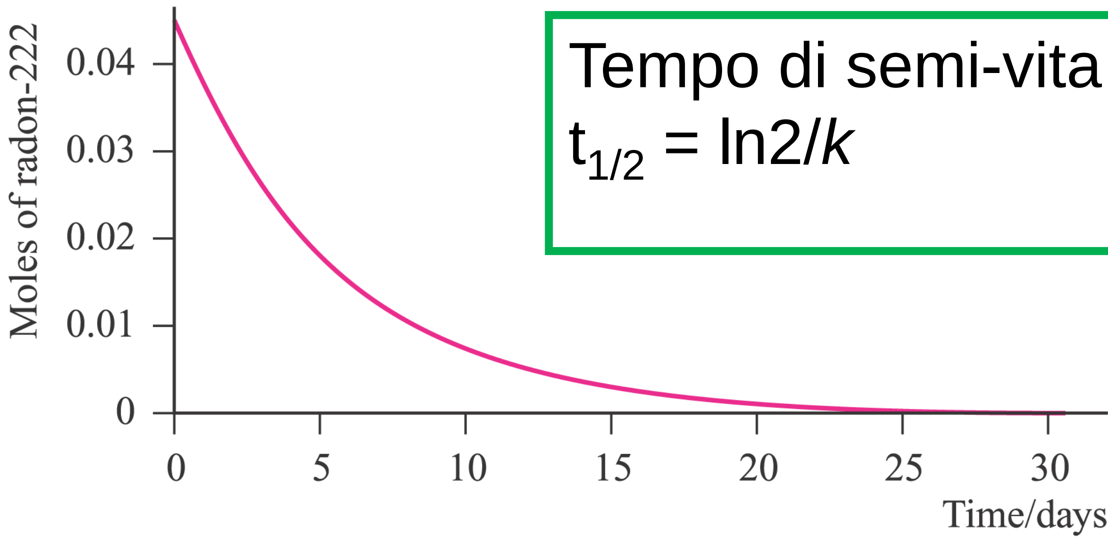
$0.03 - 5.0 \times 10^{-13}$ J



^{210}Po, emettitore α, *caso Litvinenko 2006*

Decadimento radioattivo del primo ordine di ^{222}Rn

$$N/N_0 = e^{-kt}$$



Tempo di semi-vita

$t_{1/2} = \ln 2/k$

$$\ln N - \ln N_0 = -kt$$

$$\ln N/2 - \ln N = -kt_{1/2}$$

$$\ln 2 = kt_{1/2}$$

$$\mathbf{t_{1/2} = \ln 2/k}$$

Datazione con il carbonio-14

(W. F. Libby, Nobel 1960)

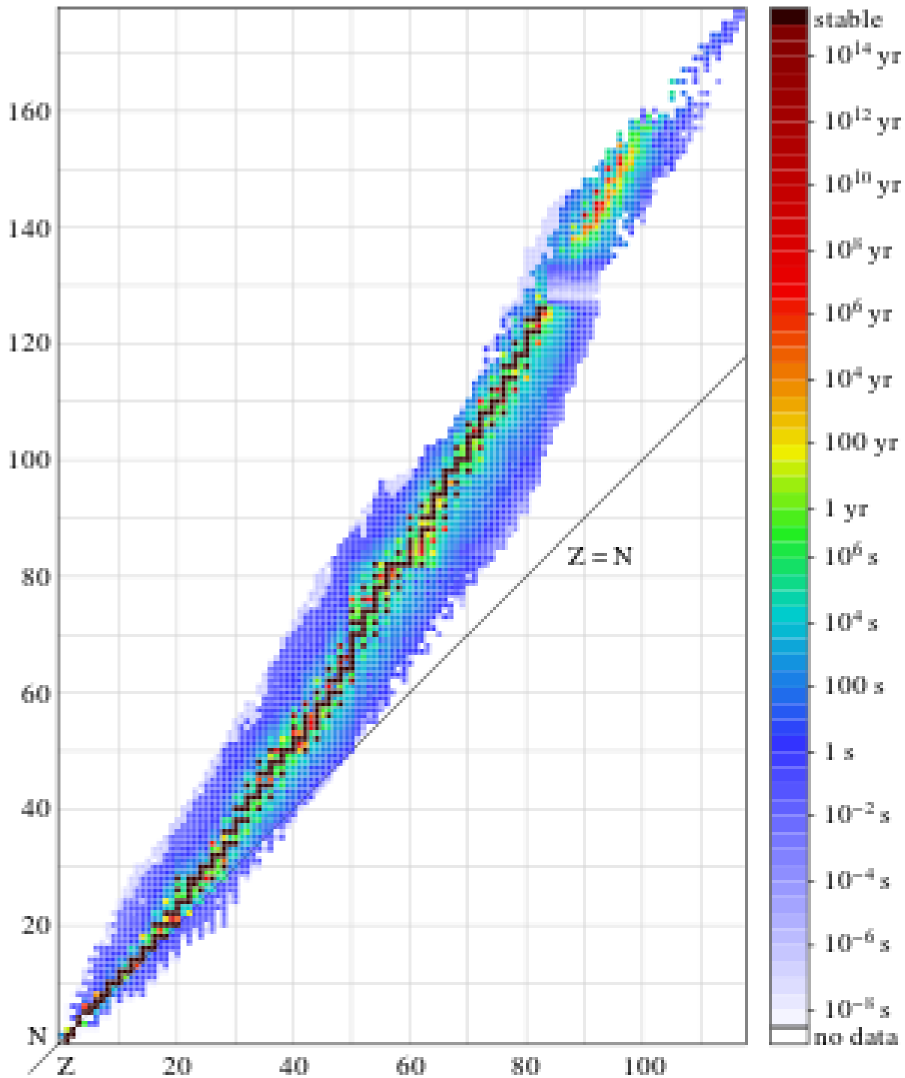
$$^{14}_{6}C \rightarrow ^{14}_{7}N + \beta^{-} \qquad t_{1/2} = 5730 \text{ a}$$

$$^{14}_{7}N + ^{1}_{0}n \rightarrow ^{14}_{6}C + ^{1}_{1}H$$

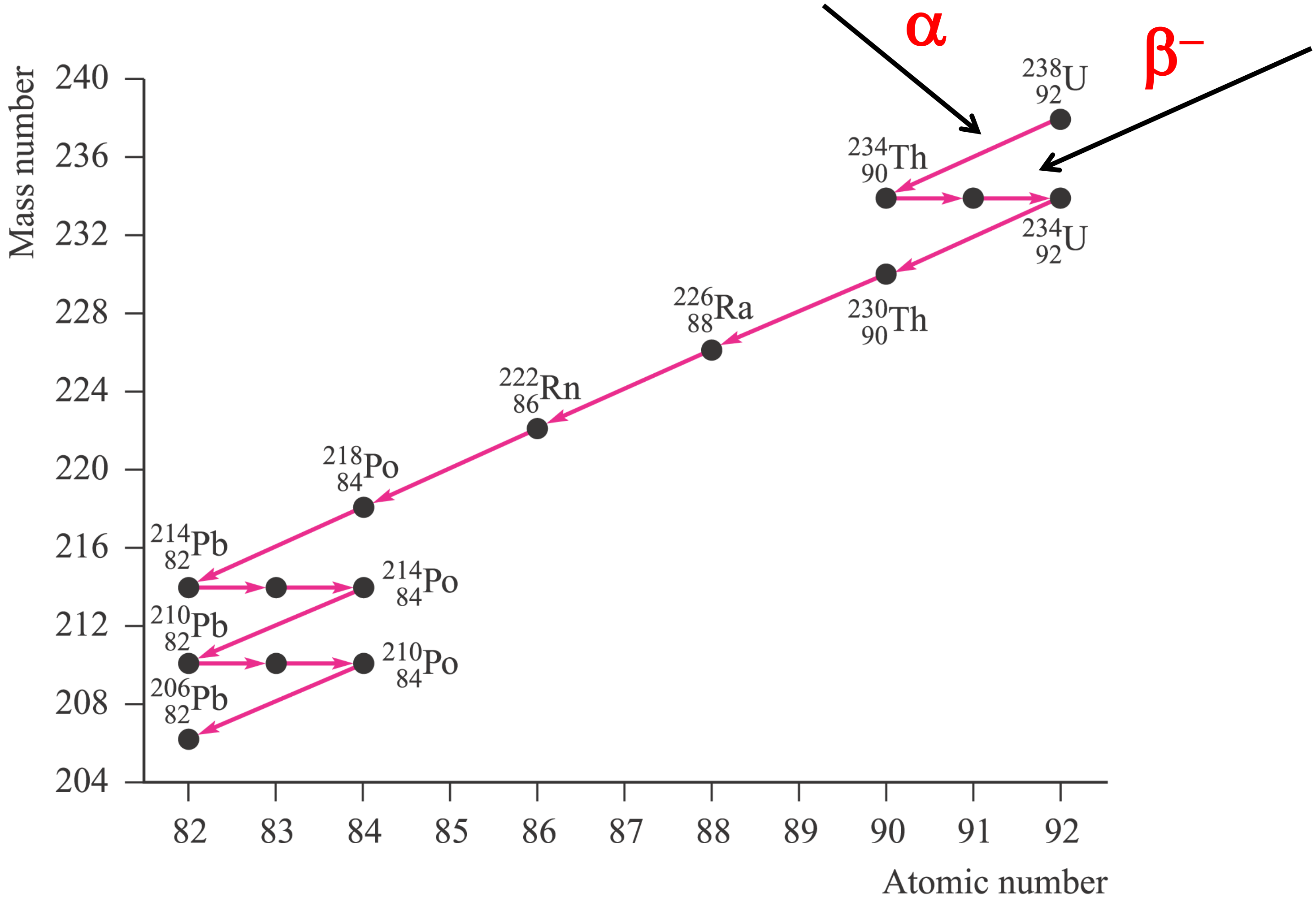
↑ Radiazioni cosmiche

Datazione di un manufatto in base alla misura del rapporto ^{14}C:^{12}C

Emivite degli isotopi



Decadimento in serie



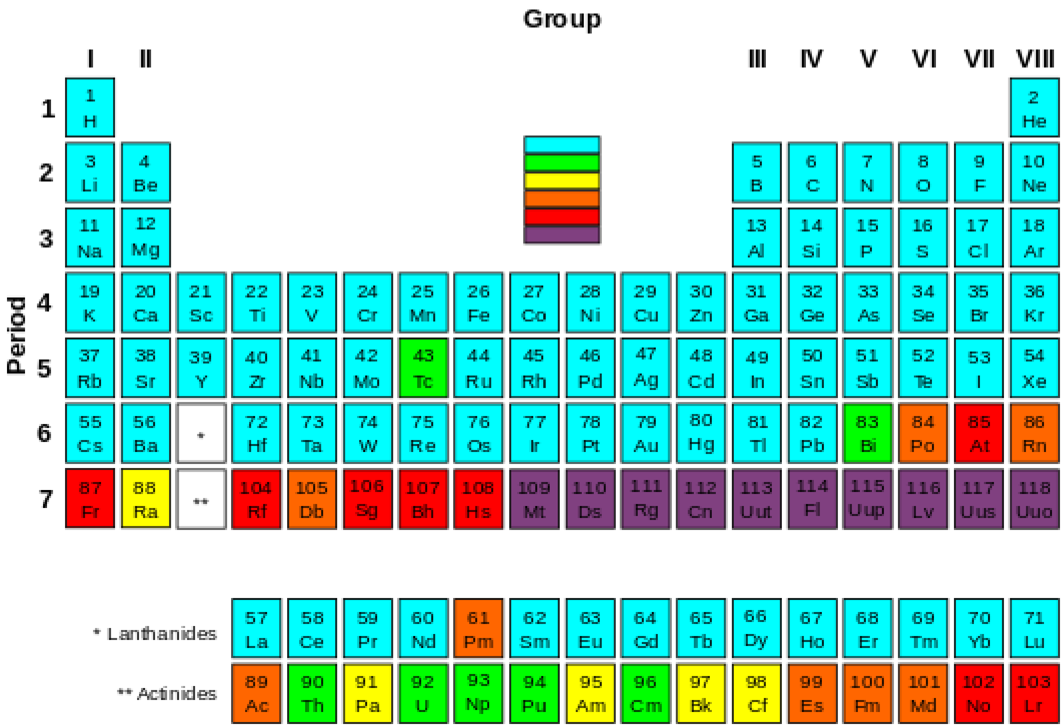
Nuclide	Symbol	Particle emitted	Half-life
Uranium-238	$^{238}_{92}\mathrm{U}$	α	4.5×10^{9} yr
Thorium-234	$^{234}_{90}\mathrm{Th}$	β^-	24.1 d
Protactinium-234	$^{234}_{91}\mathrm{Pa}$	β^-	1.18 min
Uranium-234	$^{234}_{92}\mathrm{U}$	α	2.48×10^{5} yr
Thorium-230	$^{230}_{90}\mathrm{Th}$	α	8.0×10^{4} yr
Radium-226	$^{226}_{88}\mathrm{Ra}$	α	1.62×10^{3} yr
Radon-222	$^{222}_{86}\mathrm{Rn}$	α	3.82 d
Polonium-218	$^{218}_{84}\mathrm{Po}$	α	3.05 min
Lead-214	$^{214}_{82}\mathrm{Pb}$	β^-	26.8 min
Bismuth-214	$^{214}_{83}\mathrm{Bi}$	β^-	19.7 min
Polonium-214	$^{214}_{84}\mathrm{Po}$	α	1.6×10^{-4} s
Lead-210	$^{210}_{82}\mathrm{Pb}$	β^-	19.4 yr
Bismuth-210	$^{210}_{83}\mathrm{Bi}$	β^-	5.0 d
Polonium-210	$^{210}_{84}\mathrm{Po}$	α	138 d
Lead-206	$^{206}_{82}\mathrm{Pb}$	None	Non-radioactive

Thorium-234, Protactinium-234: p,p → p,p

Lead-214, Bismuth-214: p,p → p,p

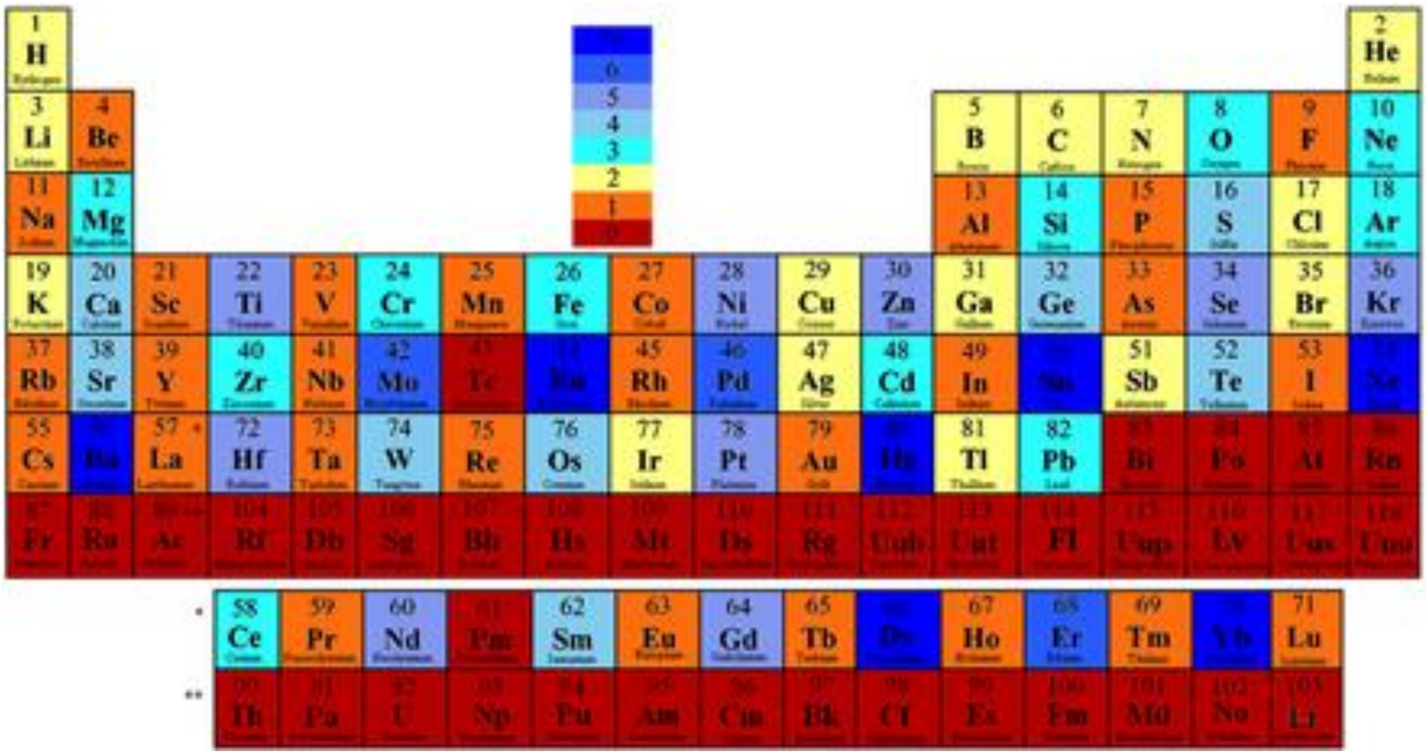
Lead-210, Bismuth-210: p,p → p,p

Tavola periodica con gli elementi colorati secondo l'emivita del loro isotopo più stabile



- Elementi stabili
- Elementi radioattivi con isotopi di emivita > 4 milioni di anni. Radioattività molto piccola, se non trascurabile
- Elementi radioattivi che possono presentare bassi rischi per la salute. I loro isotopi più stabili hanno emivite tra 800 e 34 000 anni.

Tavola periodica con il numero degli isotopi stabili



339 nuclei in natura sulla terra

di cui:

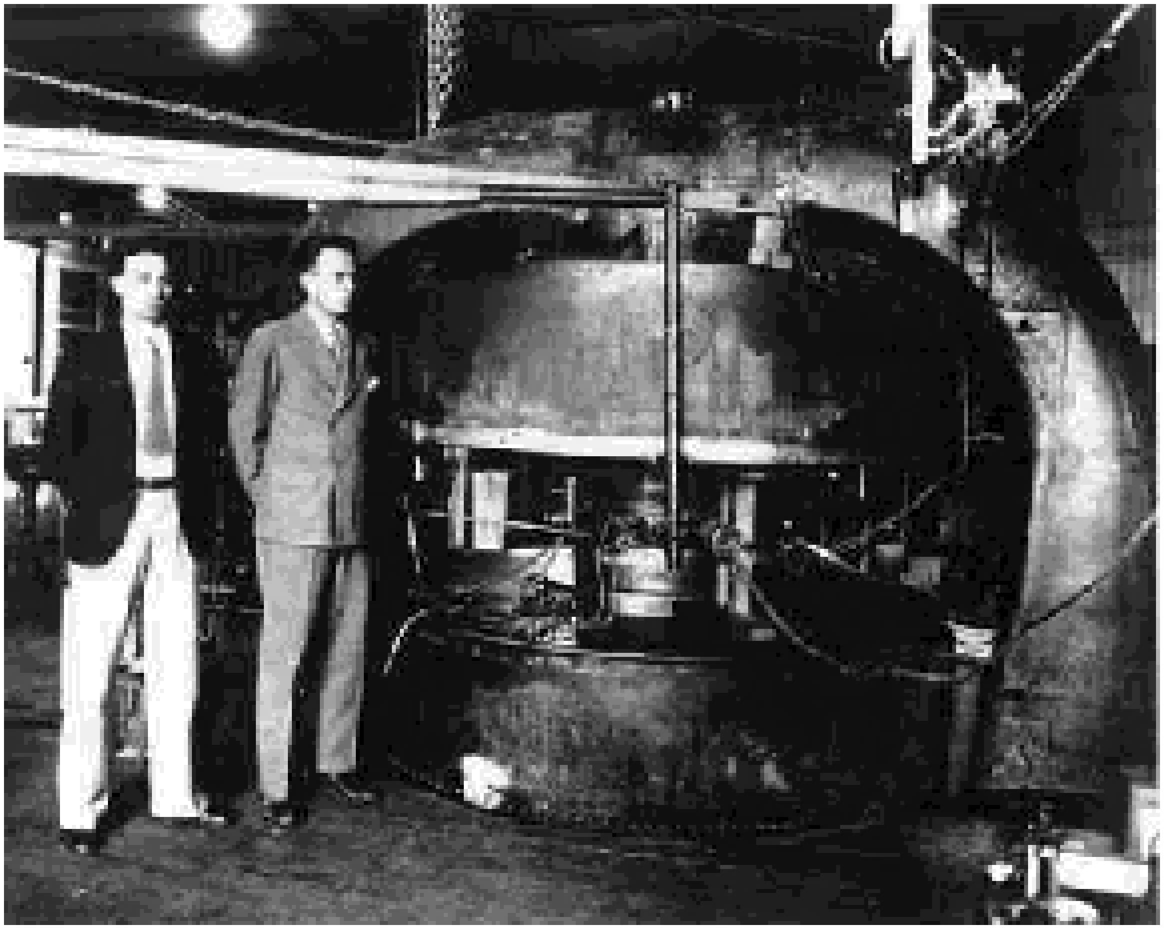
- 255 nuclei **stabili**
- 33 nuclei **radioattivi primordiali** ($t_{1/2}$ > 80 Ma)
- 51 nuclei radioattivi ($t_{1/2}$ < 80 Ma) figli o **cosmogenici**

255+33 = 288 **nuclei primordiali**

Gli isotopi radioattivi noti sono circa 3000

26 elementi con 1 solo nucleo stabile (25 con *Z* dispari)

Il primo ciclotrone (Ciclotrone Lawrence, 1931)
Acceleratore di particelle cariche



Isotopi artificiali

Le reazioni nucleari avvengono con la **conservazione del numero atomico e del numero di massa**

$$^{27}_{13}Al + {}^{4}_{2}He \rightarrow {}^{30}_{15}P + {}^{1}_{0}n$$

$$^{27}_{13}Al(\alpha,n)^{30}_{15}P$$

$$^{30}_{15}P \rightarrow {}^{30}_{14}Si + \beta^{+} \qquad t_{1/2} = 3.2 \text{ min}$$

$$^{32}_{16}S + {}^{1}_{0}n(\text{fast}) \rightarrow {}^{32}_{15}P + {}^{1}_{1}H$$

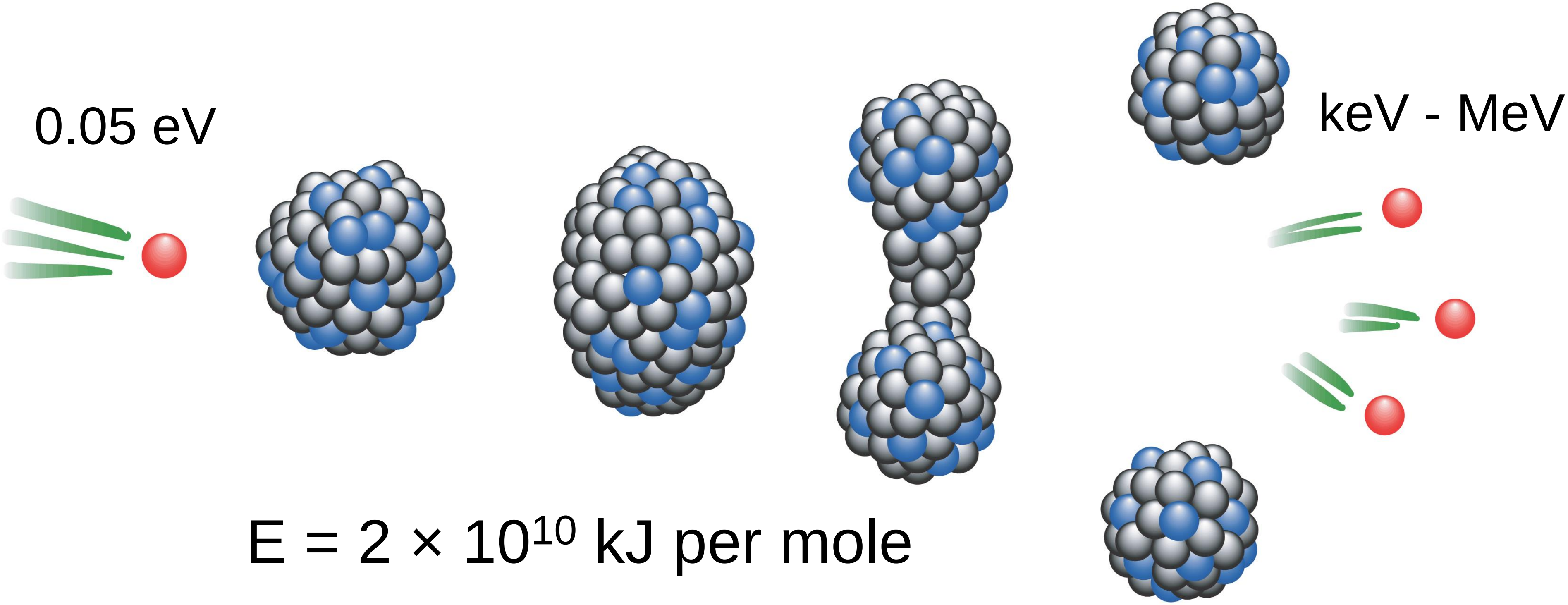
$$^{32}_{15}P \rightarrow {}^{32}_{16}S + \beta^{-} \qquad t_{1/2} = 14.3 \text{ d}$$

$$^{31}_{15}P + {}^{1}_{0}n(\text{slow}) \rightarrow {}^{32}_{15}P + \gamma$$

Reazione (n,γ)

Reazione (n,γ)

Bombardamento di un nucleo di ^{235}U con neutroni termici

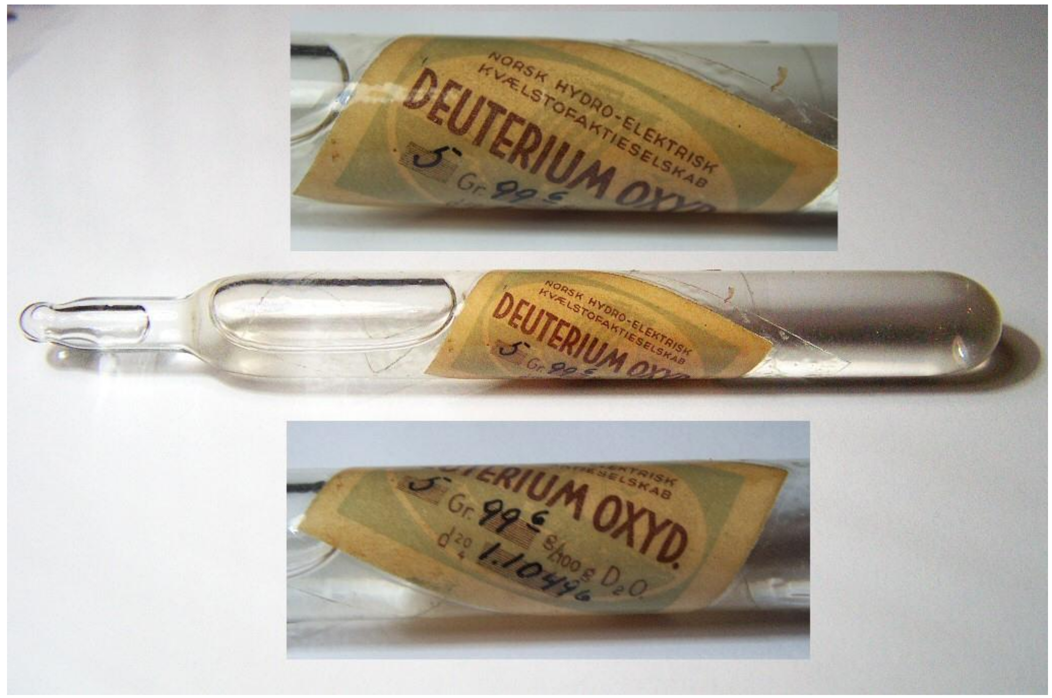


$E = 2 \times 10^{10}$ kJ per mole

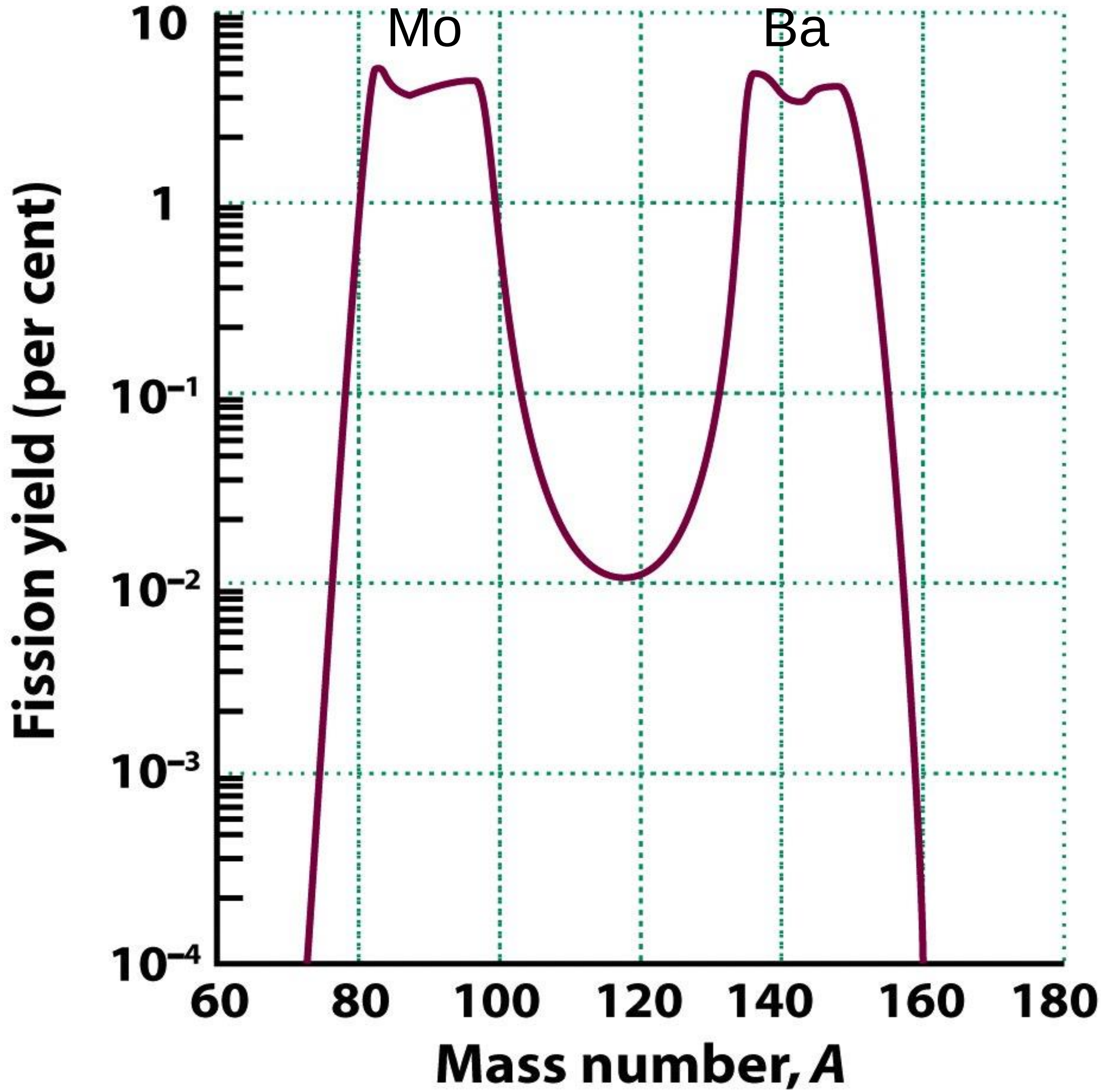
$^{235}_{92}U + ^{1}_{0}n(slow) \longrightarrow ^{95}_{39}Y + ^{138}_{53}I + 3\,^{1}_{0}n(fast)$

^{235}U = ca. 0.72% dell'uranio naturale

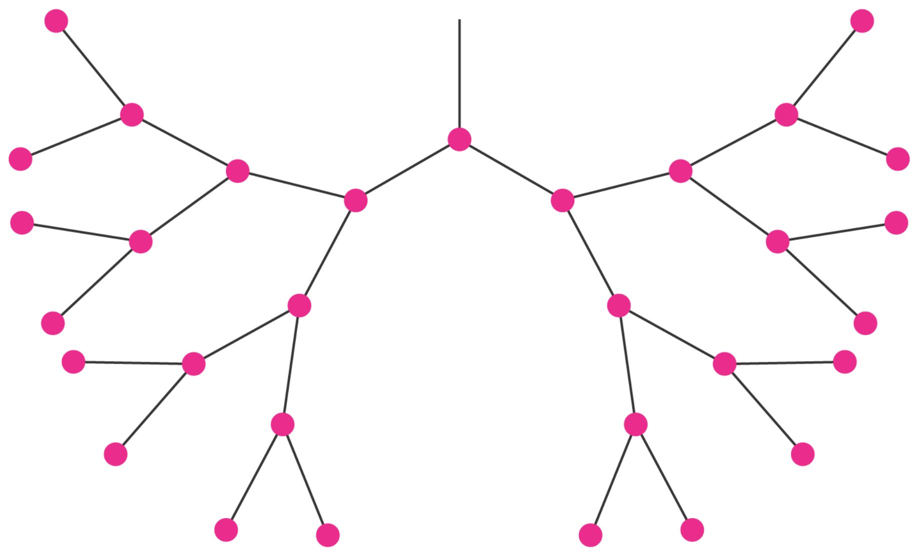
16 febbraio 1943



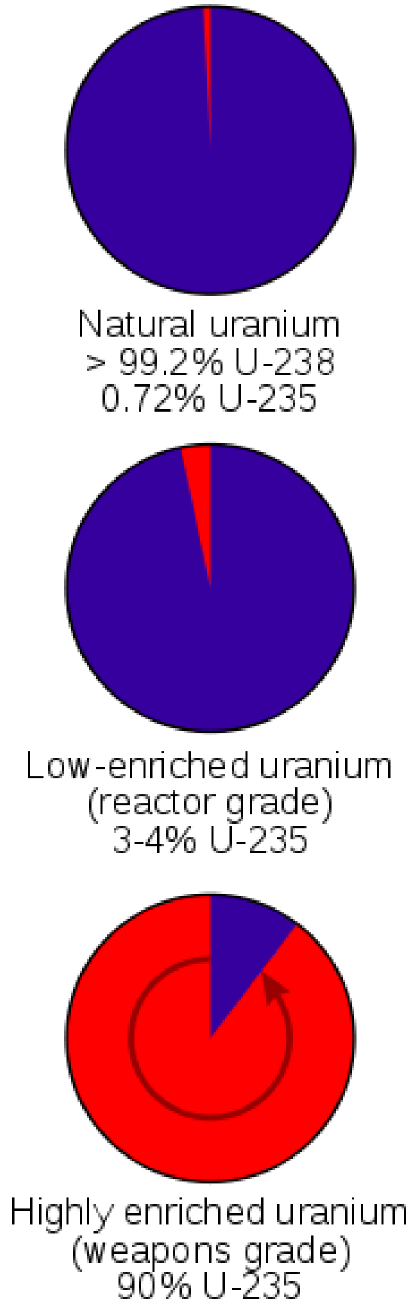
Neutroni termici possono essere ottenuti diminuendo l’energia cinetica di neutroni veloci tramite urti elastici con atomi leggeri, come il deuterio di D_2O (*acqua pesante*)


Mo
Ba
10
1
10^{-1}
10^{-2}
10^{-3}
10^{-4}
Fission yield (per cent)
60
80
100
120
140
160
180
Mass number, *A*

Reazione a catena



- Grafite o D_2O per rallentare i neutroni (sezioni d’urto piccole)
- Acciaio al boro, carburo di boro o carburo di cadmio per catturare i neutroni (B e Cd hanno alte sezioni d’urto per la cattura)



la massa critica per generare un’esplosione nucleare diminuisce al crescere dell’arricchimento di ^{235}U

Trasformazione dell'uranile in UF_6

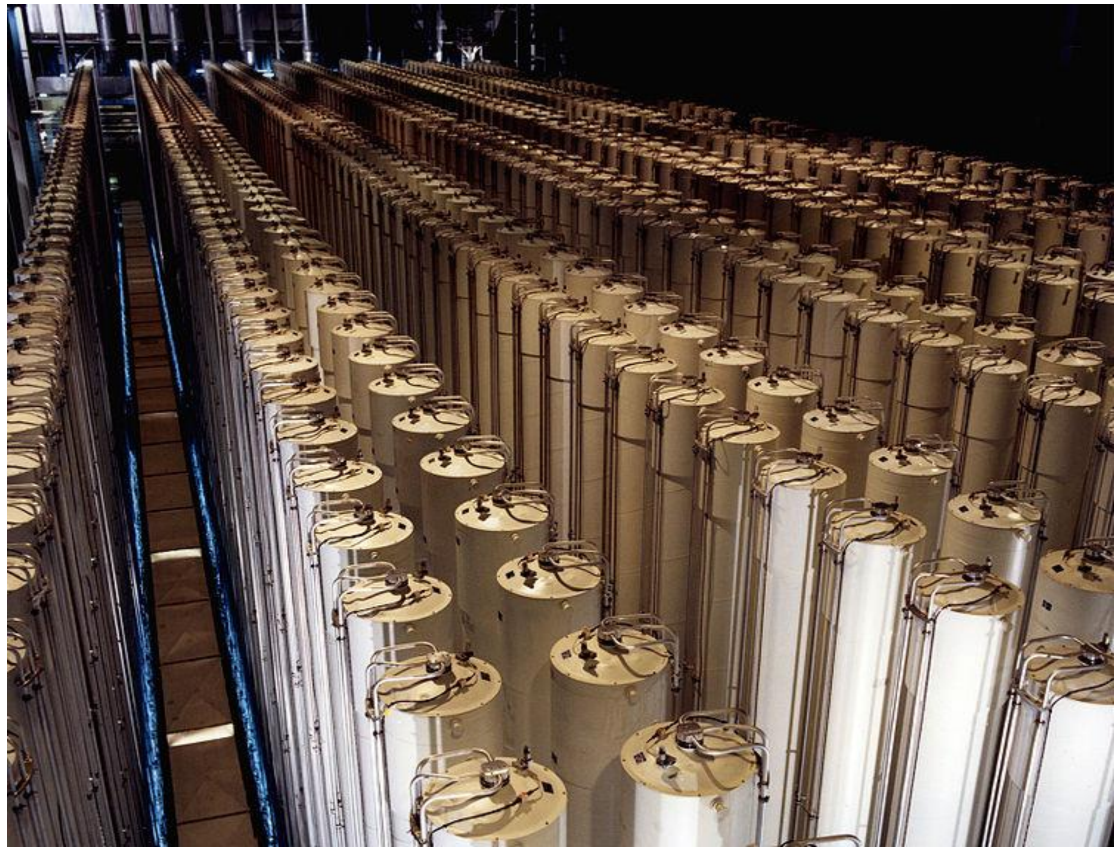
$[UO_2][NO_3]_2 \rightarrow UO_3 + NO + NO_2 + O_2$ (a 570 K)

$UO_3 + H_2 \rightarrow UO_2 + H_2O$ (a 970 K)

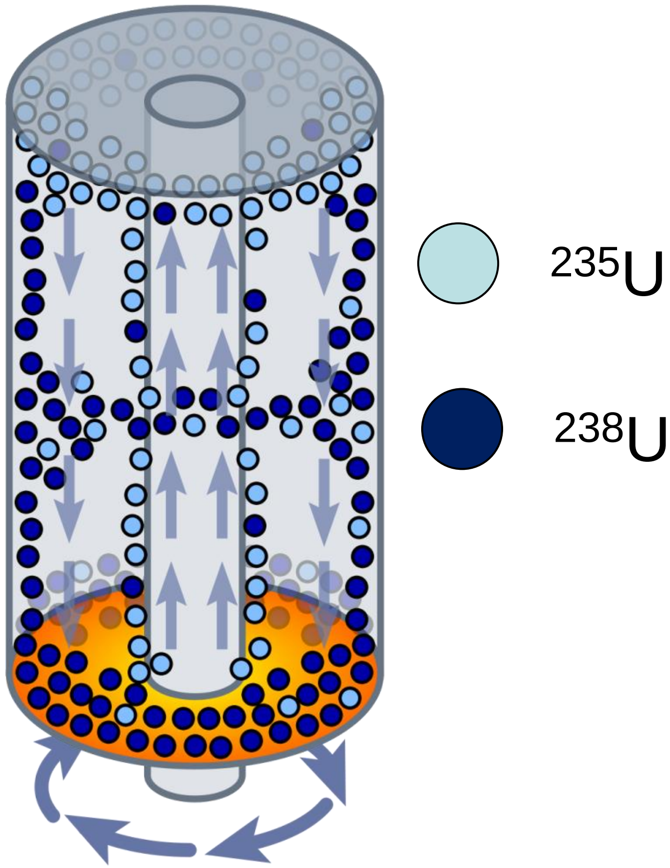
$UO_2 + 4HF \rightarrow UF_4 + 2H_2O$

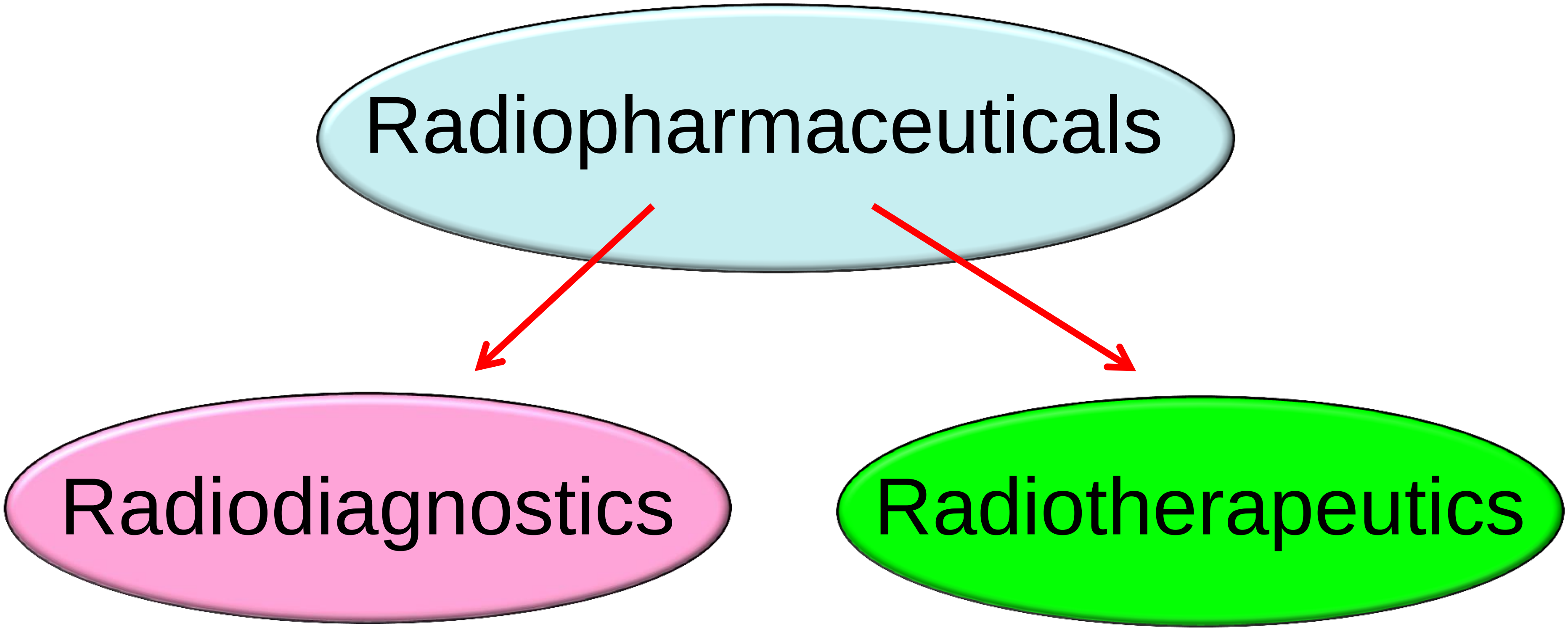
$UF_4 + F_2 \rightarrow UF_6$ (a 720 K)

Centrifughe per la separazione della miscela di $^{235}UF_6$ e $^{238}UF_6$ sfruttando la **legge di Graham** per la diffusione (la velocità di diffusione di un gas è inversamente proporzionale a √massa molecolare)



Centrifuga Zippe

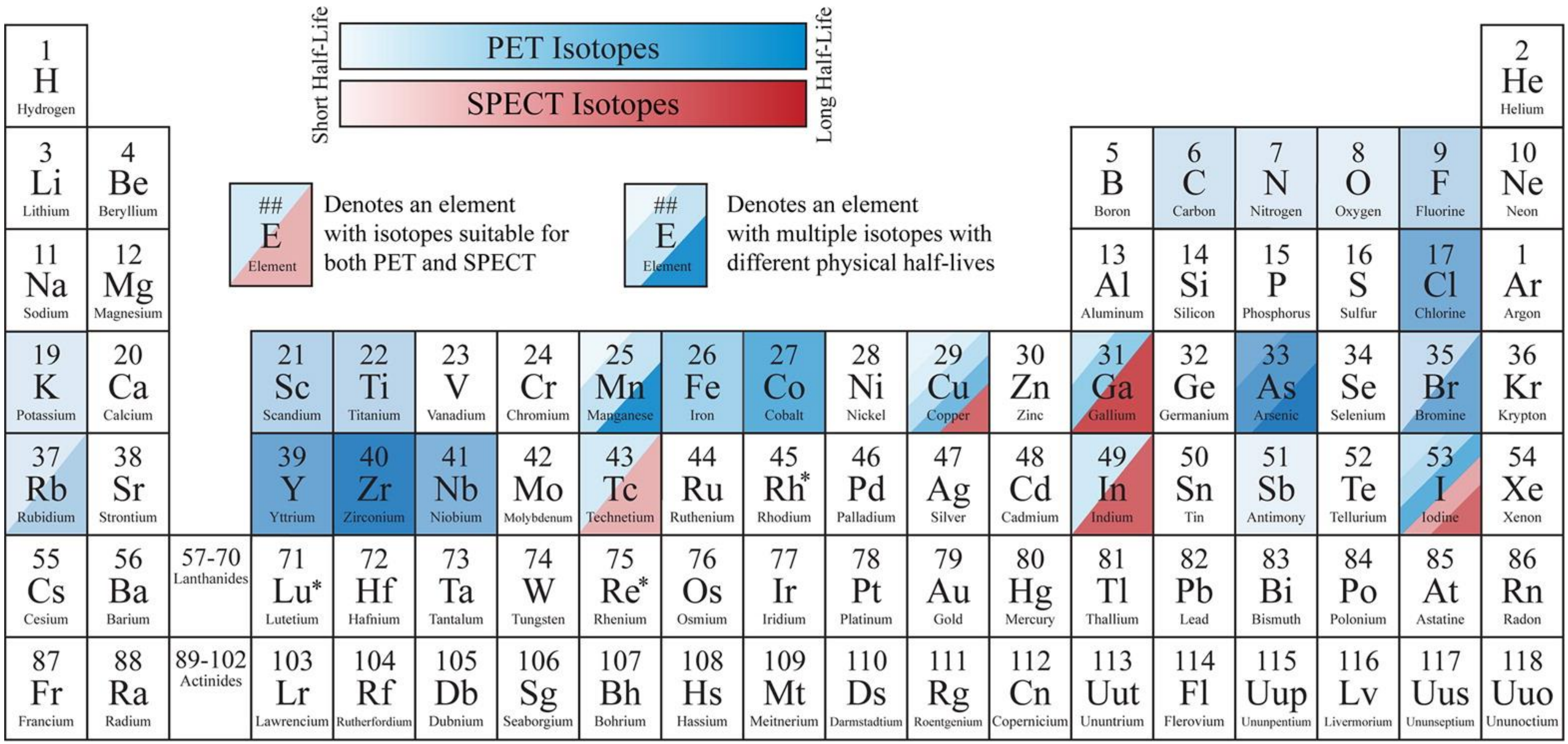




γ-emitters (SPECT)
positron-emitters (β^+) (PET)
$10^{-6} - 10^{-8}$ M

α or β^- emitters

Isotopes suitable for nuclear imaging



*Isotopes typically used for radiotherapy with which SPECT is also possible but not common — *e.g.*, ^{177}Lu, ^{105}Rh, ^{186}Re, etc. — have been omitted.