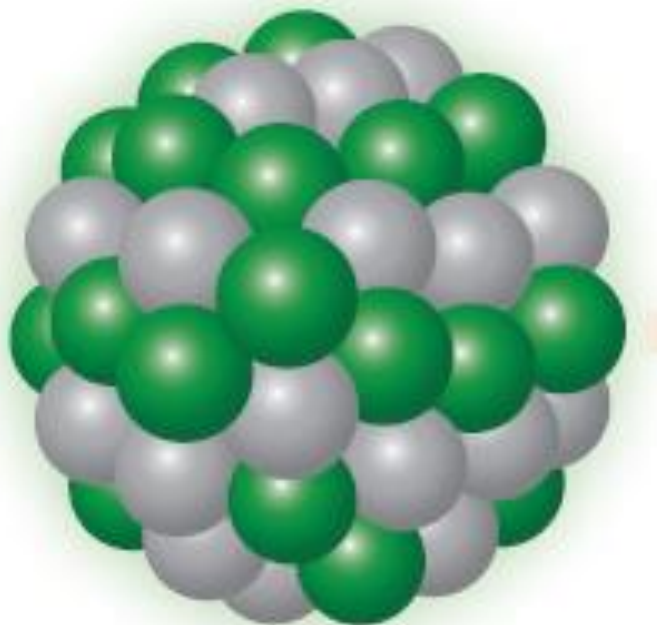


Il nucleo dell'atomo



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

Massa del protone $\approx$ massa del neutrone
 $= 1.672 \times 10^{-27}$ kg
 ≈ 1836 volte la massa dell'elettrone

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

Ogni nucleone è composto da 3 **quark** (che possono essere *up*, con carica $+2/3$, o *down*, con carica $-1/3$):

Protone: 2 quark up ($2 \times 2/3$) + 1 quark down ($-1/3$)

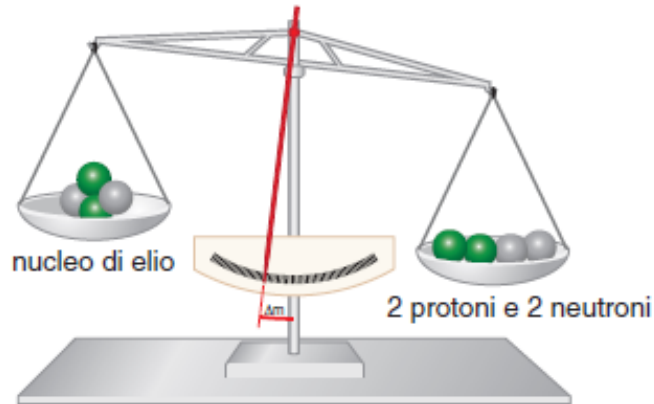
Neutrone: 1 quark up ($2/3$) + 2 quark down ($2 \times -1/3$)

Numero di massa



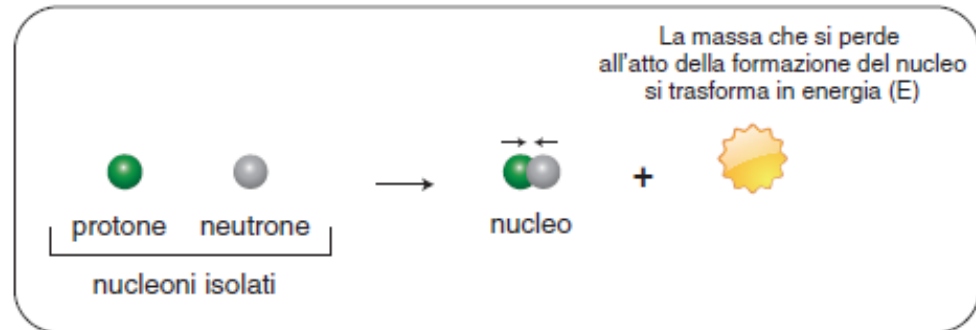
Numero atomico

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.



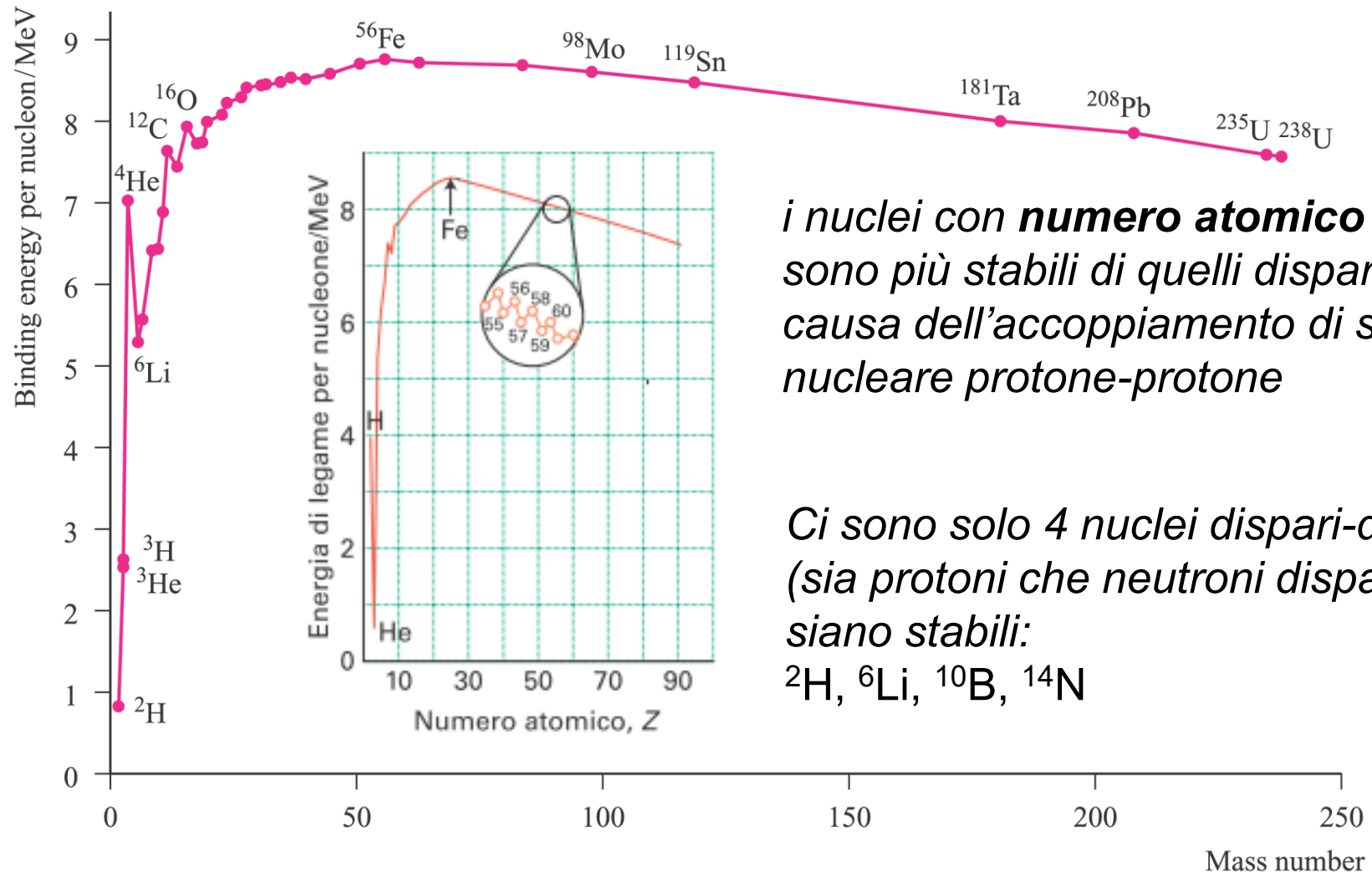
$$\Delta E = \Delta mc^2$$

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

$$1 \text{ mole } {}^7\text{Li}: 3.79 \times 10^9 \text{ kJ}$$

$$1 \text{ mole butano (combustione)}: 2857 \text{ kJ}$$

Energia di legame 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:

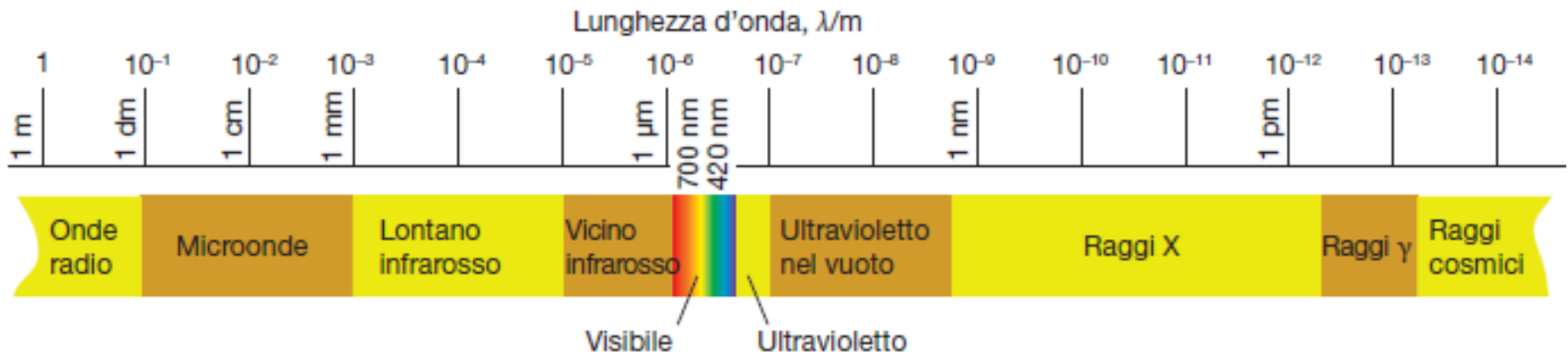
^2H , ^6Li , ^{10}B , ^{14}N

Numeri magici (di nucleoni): 2, 6, 8, 20, 28, 50, 82, 126

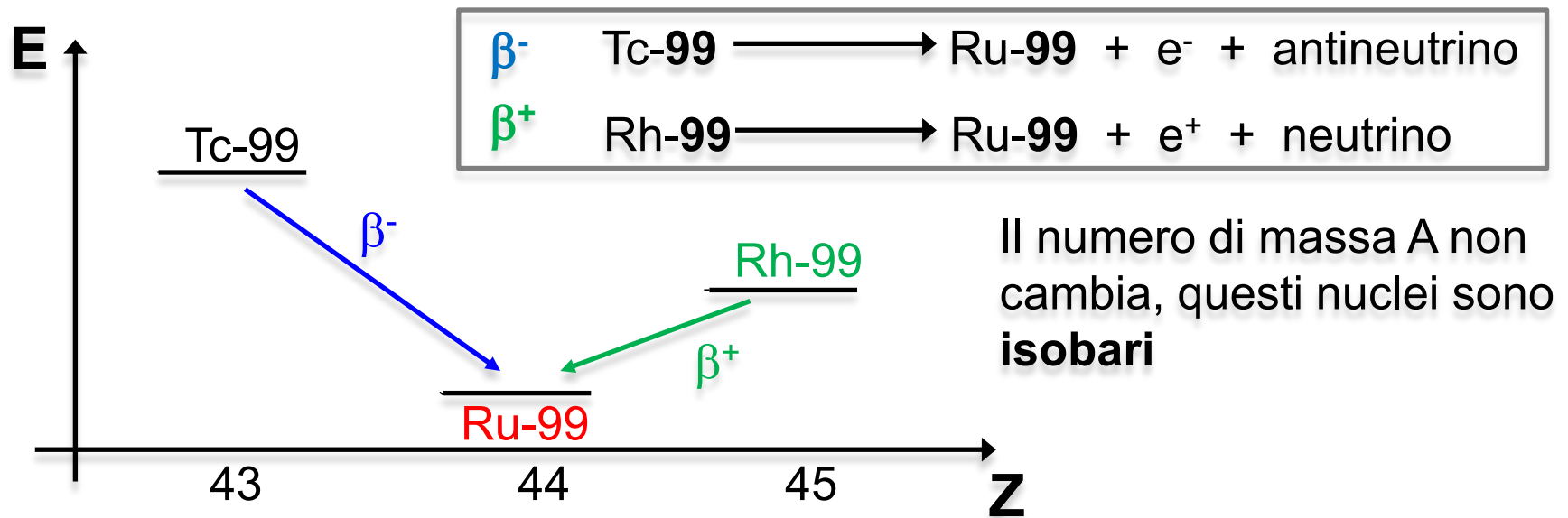
Nuclei doppiamente magici: ^4He , ^{16}O , ^{40}Ca , ^{208}Pb

Processi spontanei nei nuclei radioattivi

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



Radioattività: perchè i nuclei possono essere instabili?



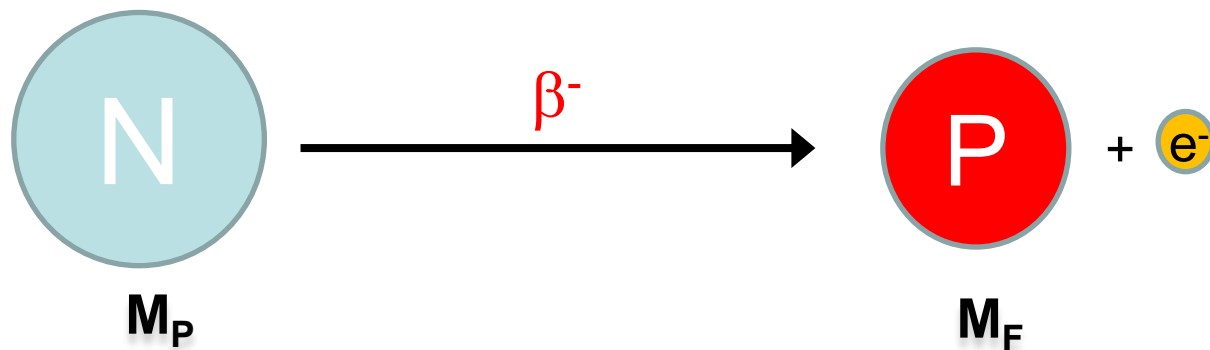
- ➔ Nuclei **isobari** hanno lo **stesso numero** di interazioni fra nucleoni
- ➔ Una combinazione n-p ; p-p ; n-n deve essere quella energeticamente più favorita, cioè quella del nucleo più stabile
- ➔ Tutte le altre combinazioni n/p hanno energia più alta e quindi i corrispondenti nuclei sono instabili



Sulla scala nucleare, **stabilità significa massa**, cioè minore è la massa, maggiore è la stabilità del nucleo

Il decadimento β^-

Neutrone:	$m_n = 1.0086647 \text{ a.u.}$
Protone:	$m_p = 1.007276 \text{ a.u.}$
Elettrone:	$m_e = 5.485799 \cdot 10^{-4} \text{ a.u.}$



Un protone è più leggero di un neutrone per 0.0013887 amu



La massa di un elettrone è 0.0005485799 amu

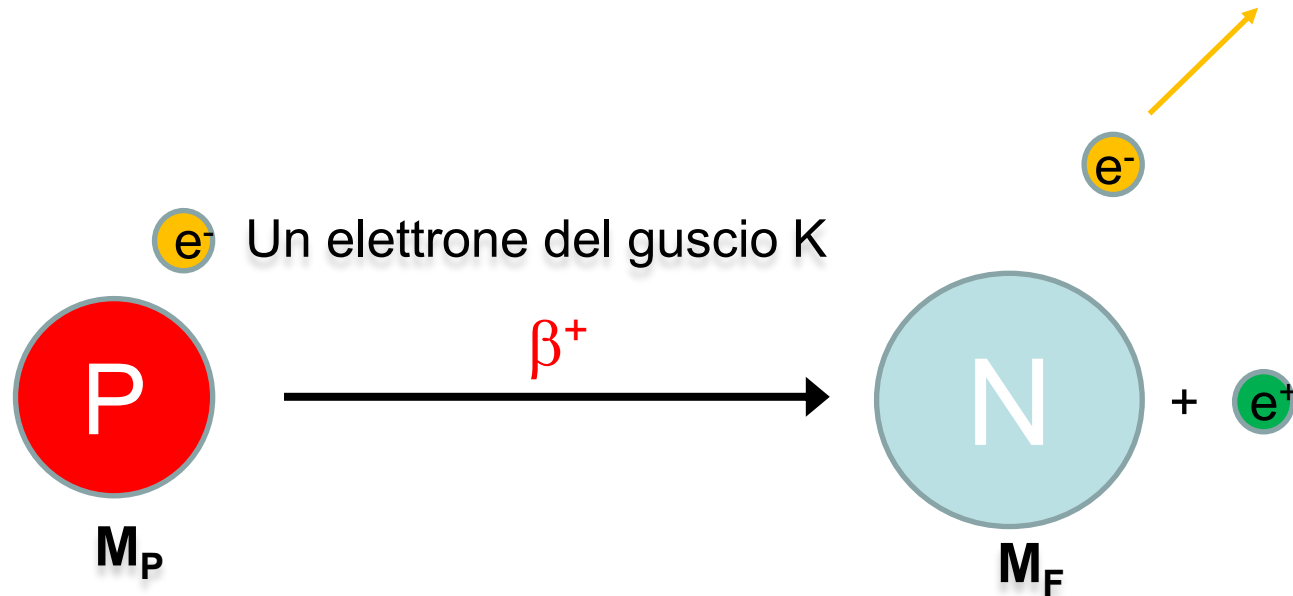


La differenza di massa $\Delta m = m_n - (m_p + m_e)$ è quindi 0.000840121 amu che corrisponde a un'energia di 0.78 MeV



Quindi un **neutrone libero decade** a un protone e un elettrone (e un antineutrino)

Il decadimento β^+



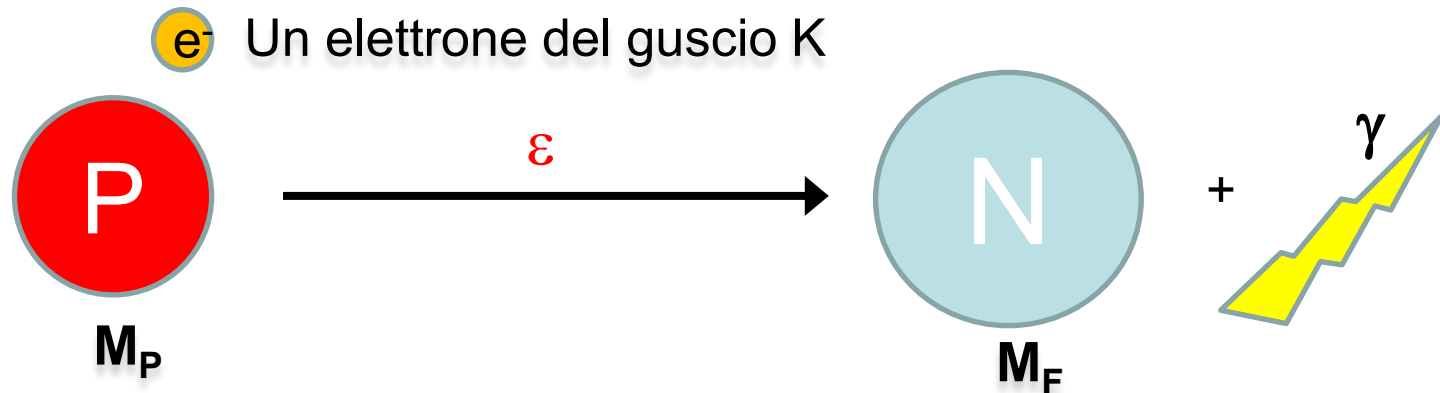
Il nuovo nucleo perde un elettrone del guscio K con $m_e = 0.0005485$ amu

Inoltre si **genera** una particella β^+ con $m = 0.0005485$ amu

in totale, si **genera** una massa = 0.001097 amu = 1.022MeV

Quindi, se il nuovo nucleo ha una energia di legame addizionale inferiore a **1.022MeV**, il decadimento β^+ è termodinamicamente sfavorito e non avverrà

Il decadimento ε



Un elettrone del guscio K viene catturato da un protone nel nucleo

Quindi non vengono persi nè positroni nè elettroni

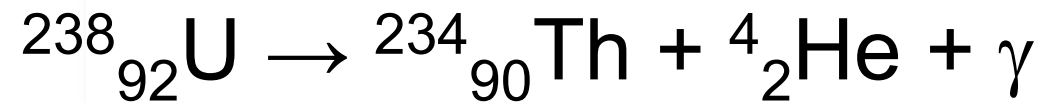
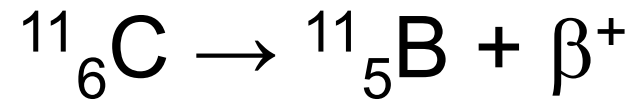
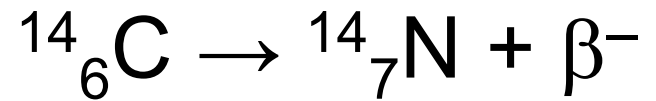
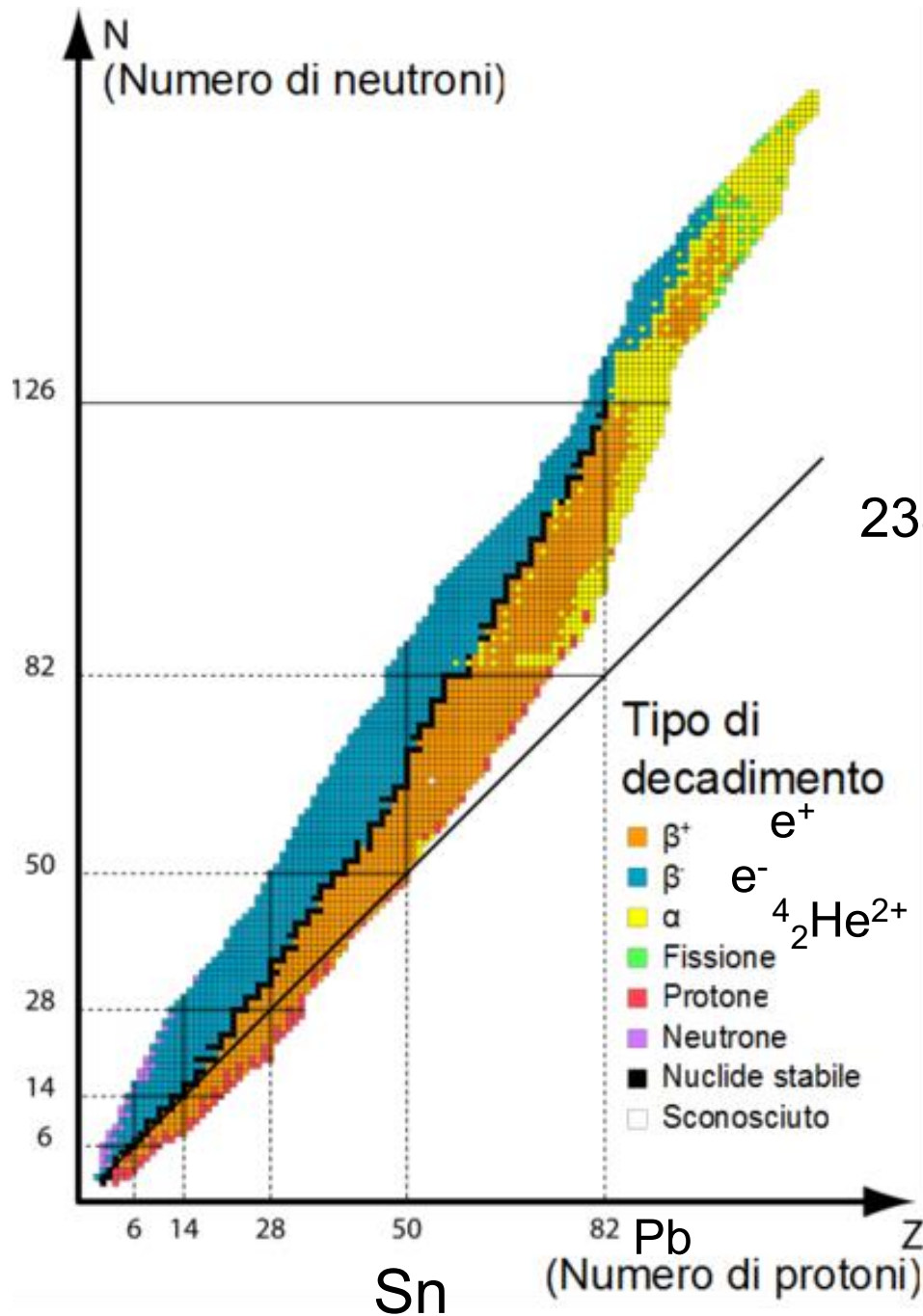
L'energia del decadimento Q è equivalente a $M_P - M_F$ sotto forma di un fotone γ

se $Q < 1.022\text{MeV}$ avviene soltanto il decadimento ε ;
se $Q > 1.022\text{MeV}$ possono avvenire in parallelo sia il decadimento β^+ che quello ε

L'emissione di particelle β^- formalmente trasforma un neutrone in un protone (lascia la massa atomica invariata ma fa aumentare di una unità il numero atomico)

Sia l'emissione di particelle β^+ che la cattura di elettroni formalmente trasformano un protone in un neutrone (lasciano la massa atomica invariata ma fanno diminuire di una unità il numero atomico)

L'emissione β^+ avviene quando $\Delta E_{pf} > 1.022 \text{ MeV}$
La cattura di elettroni avviene quando $\Delta E_{pf} < 1.022 \text{ MeV}$



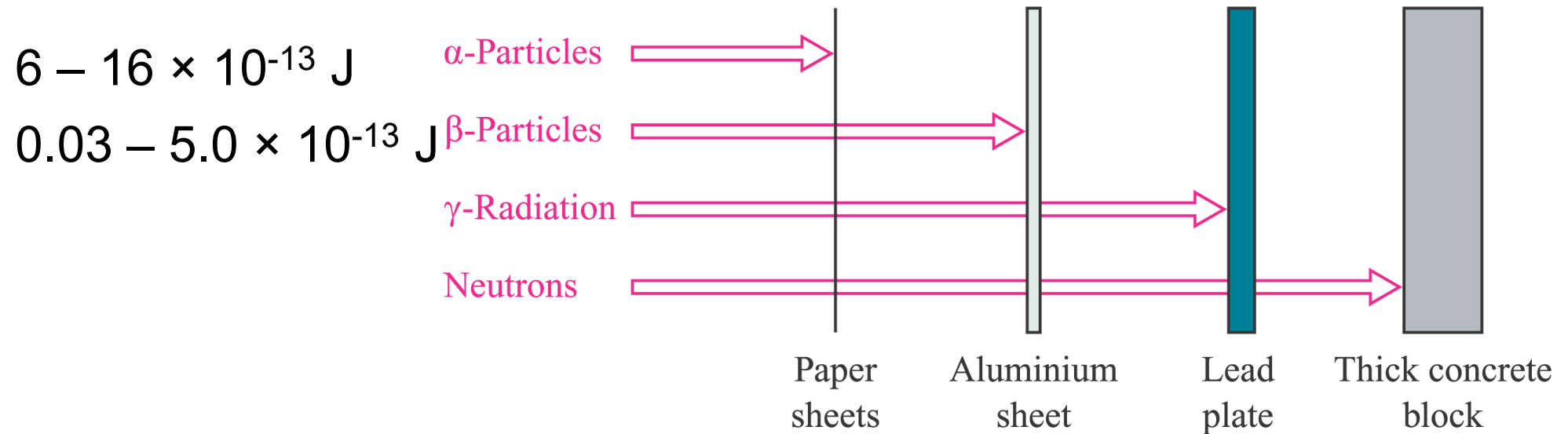
Live Chart of Nuclides

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

Unità di misura della radioattività e penetrazione

1 becquerel (Bq) = una disintegrazione nucleare per secondo (SI)

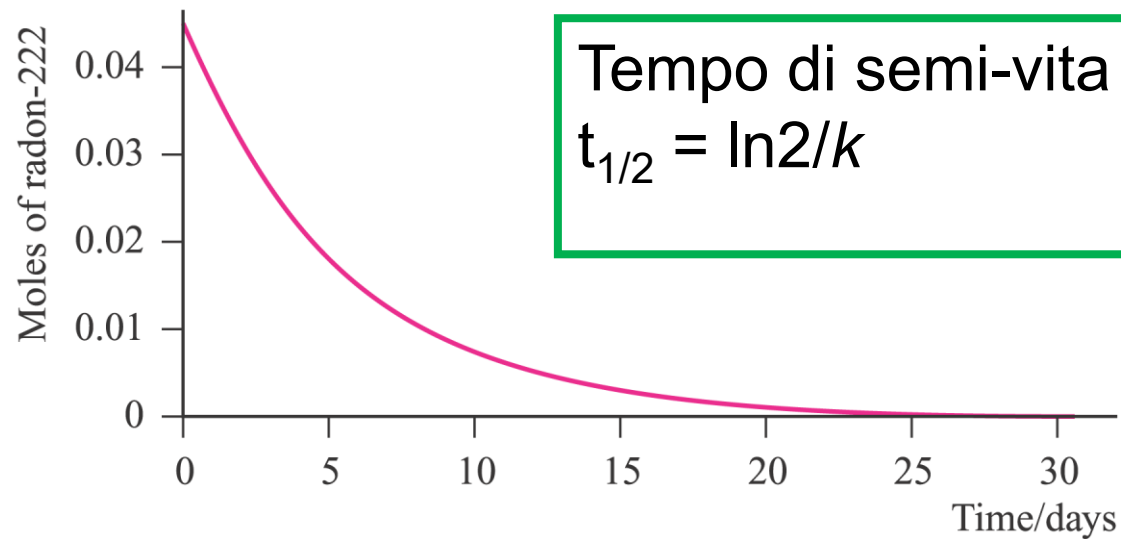
1 Ci (Curie) = 3.7×10^{10} Bq



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

Cinetica di decadimento radioattivo del primo ordine di ^{222}Rn

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



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

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

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

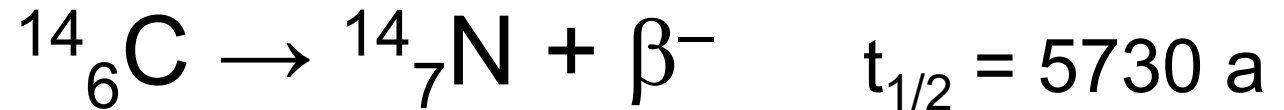
$$\mathbf{t_{1/2} = \ln 2/k}$$

Datazione con il carbonio-14

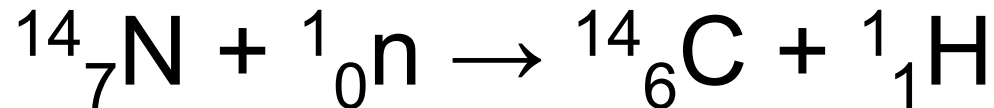
(W. F. Libby, Nobel 1960)

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

Decadimento spontaneo



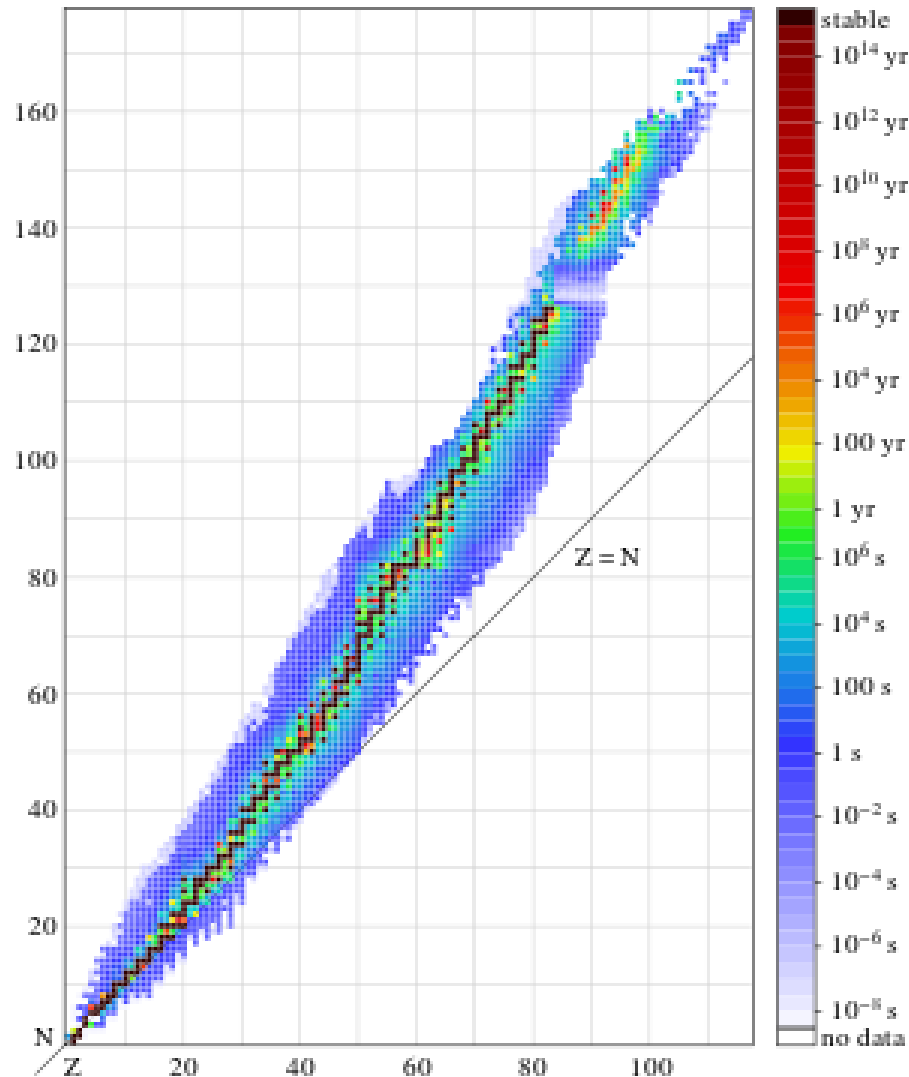
Rigenerazione



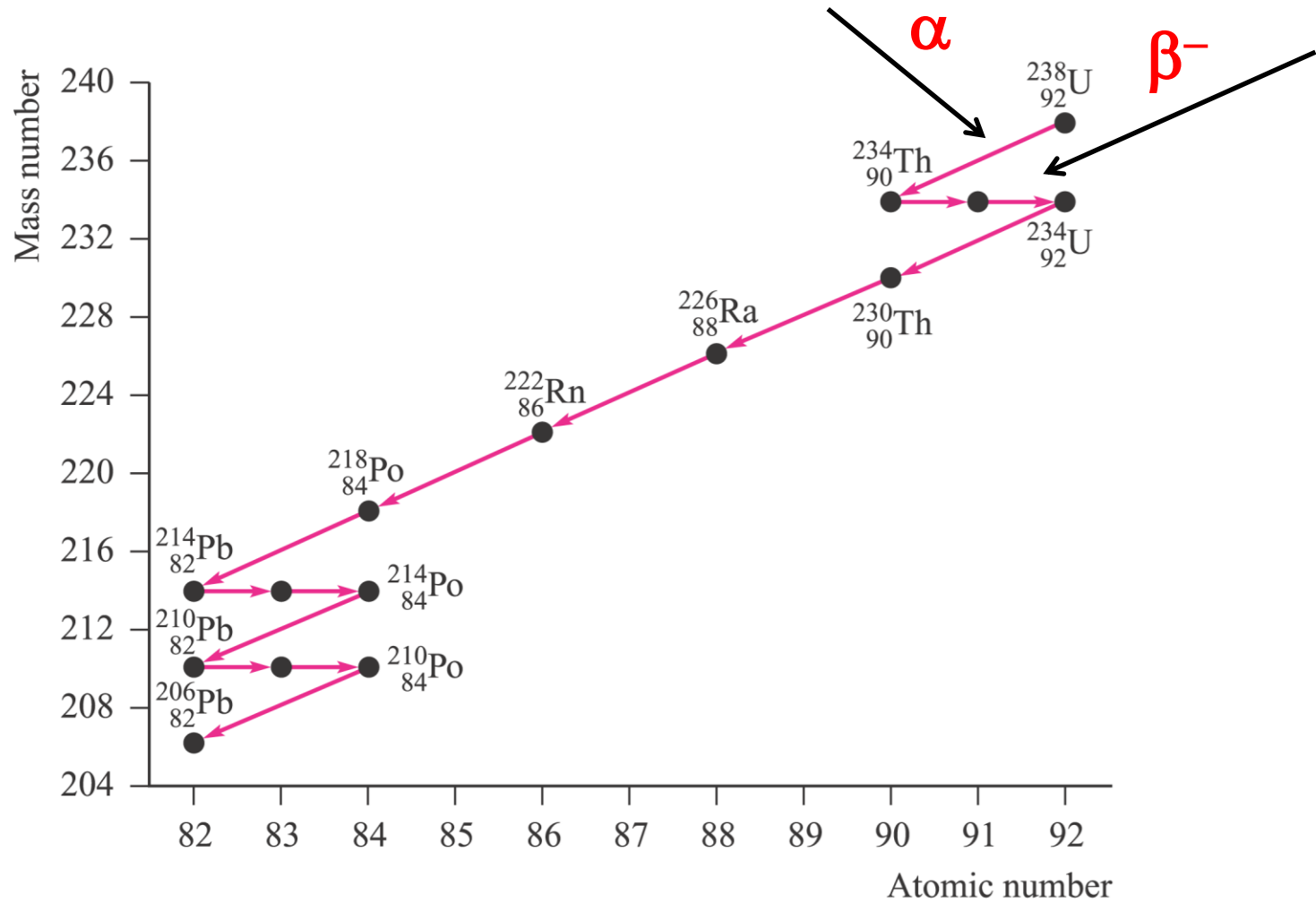
↑
Radiazioni cosmiche

Le reazioni nucleari di decadimento e formazione di ^{14}C hanno velocità simili, quindi negli organismi viventi il rapporto $^{14}\text{C}:^{12}\text{C}$ è sostanzialmente costante.

Emivite degli isotopi



Decadimento in serie



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

} $p, p \xrightarrow{d, d} p, p$

} $p, p \xrightarrow{d, d} p, p$

} $p, p \xrightarrow{d, d} p, p$

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

		Group																												
		I	II																	III	IV	V	VI	VII	VIII					
Period	1	1 H																										2 He		
	2	3 Li	4 Be																	5 B	6 C	7 N	8 O	9 F	10 Ne					
	3	11 Na	12 Mg																	13 Al	14 Si	15 P	16 S	17 Cl	18 Ar					
	4	19 K	20 Ca	21 Sc	22 Ti	23 V	24 Cr	25 Mn	26 Fe	27 Co	28 Ni	29 Cu	30 Zn	31 Ga	32 Ge	33 As	34 Se	35 Br	36 Kr											
	5	37 Rb	38 Sr	39 Y	40 Zr	41 Nb	42 Mo	43 Tc	44 Ru	45 Rh	46 Pd	47 Ag	48 Cd	49 In	50 Sn	51 Sb	52 Te	53 I	54 Xe											
	6	55 Cs	56 Ba	*	72 Hf	73 Ta	74 W	75 Re	76 Os	77 Ir	78 Pt	79 Au	80 Hg	81 Tl	82 Pb	83 Bi	84 Po	85 At	86 Rn											
	7	87 Fr	88 Ra	**	104 Rf	105 Db	106 Sg	107 Bh	108 Hs	109 Mt	110 Ds	111 Rg	112 Cn	113 Uut	114 Fl	115 Uup	116 Lv	117 Uus	118 Uuo											
* Lanthanides			57 La	58 Ce	59 Pr	60 Nd	61 Pm	62 Sm	63 Eu	64 Gd	65 Tb	66 Dy	67 Ho	68 Er	69 Tm	70 Yb	71 Lu													
** Actinides			89 Ac	90 Th	91 Pa	92 U	93 Np	94 Pu	95 Am	96 Cm	97 Bk	98 Cf	99 Es	100 Fm	101 Md	102 No	103 Lr													



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

Legend for number of stable isotopes:

- 1 (Yellow)
- 2 (Orange)
- 3 (Light Blue)
- 4 (Medium Blue)
- 5 (Dark Blue)
- 6 (Purple)
- 7 (Red)
- 8 (Dark Red)
- 9 (Black)

Periodic table showing the number of stable isotopes for each element. The number of isotopes is indicated by a color-coded box in the top left corner of each element's cell.

339 nuclei in natura sulla terra

di cui:

- 255 nuclei **stabili**
- 33 nuclei **radioattivi primordiali** (quasi-stabili, $t_{1/2} > 80$ 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)



GILBERT

Atomic Energy

MANUAL

INSTRUCTIONS FOR OPERATING GILBERT ATOMIC ENERGY LAB



RADIOACTIVE SOURCE REPLACEMENT

The radioactive sources in your Gilbert Atomic Energy Lab will, in a period ranging from 1 to 50 years, deteriorate with time. Therefore, when replacement of your Alpha, Beta, Gamma or Cloud Chamber sources is required (see inside back cover of this manual) fill in the coupon below and send it to The A. C. Gilbert Company. You will be notified as to cost and mailing.

IMPORTANT!

NO REQUEST FOR RADIOACTIVE SOURCE REPLACEMENT CAN BE HONORED BY THE A. C. GILBERT COMPANY UNLESS IT IS ACCOMPANIED BY THE COUPON BELOW. KEEP THIS SHEET IN A SAFE PLACE, PREFERABLY WITH THE MANUAL OR WITH THE ATOMIC ENERGY LAB ITSELF.

clip along dotted line

The A. C. Gilbert Company
Erector Square
New Haven 6, Conn.

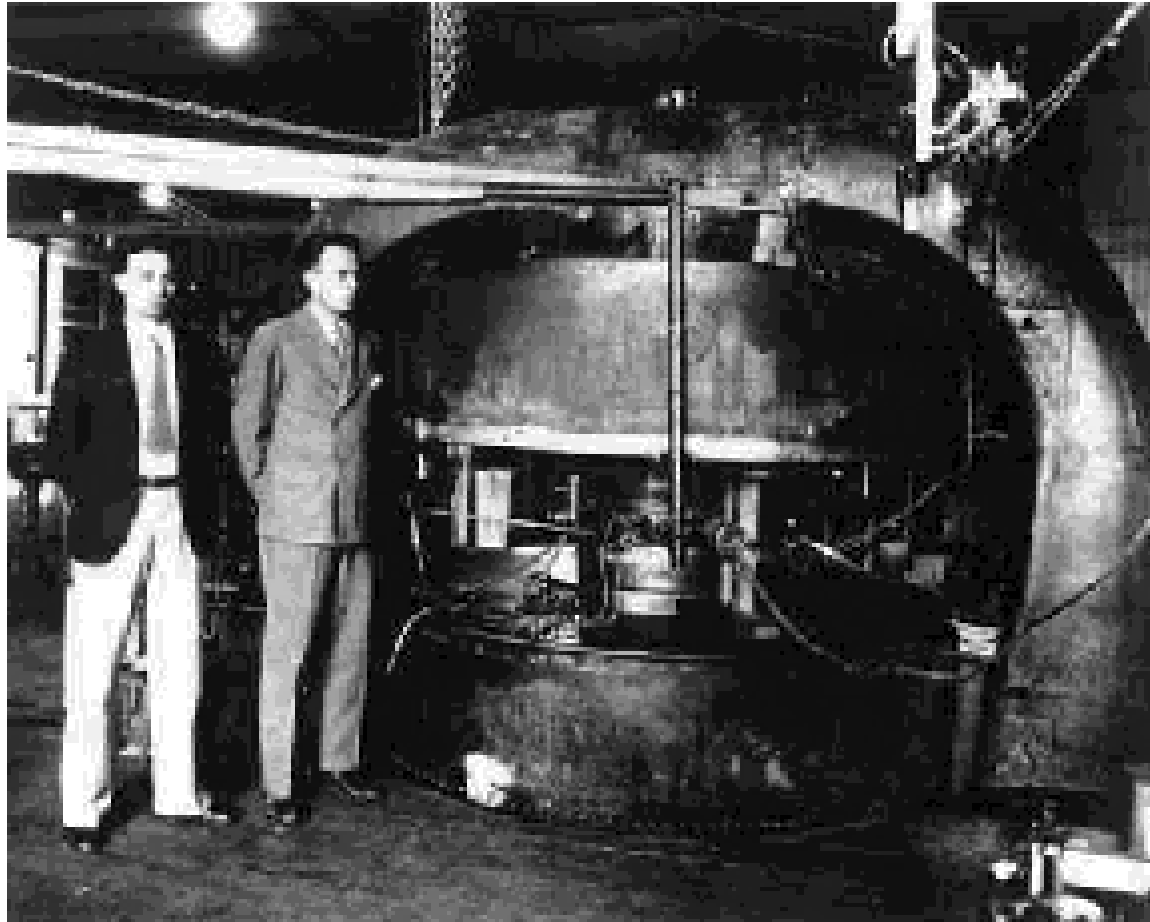
Gentlemen: I need replacements for the following radioactive sources, (check which): ALPHA _____
BETA _____ GAMMA _____ CLOUD CHAMBER
SOURCE _____
Please notify me as to cost and date of mailing.

NAME _____
(please print)

STREET _____

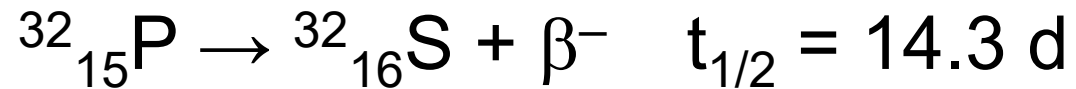
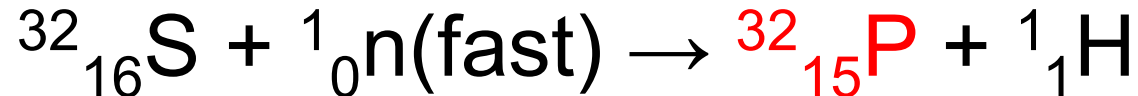
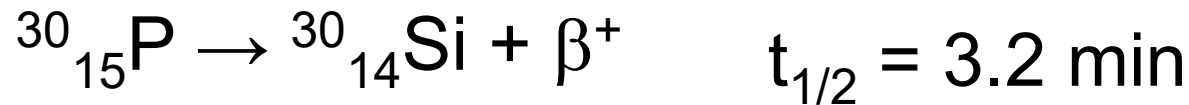
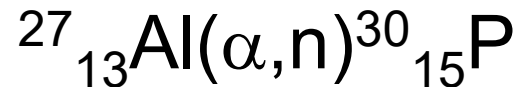
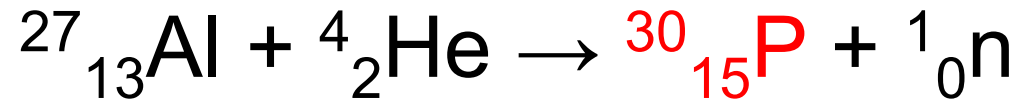
CITY _____ ZONE _____ STATE _____

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



Isotopi artificiali

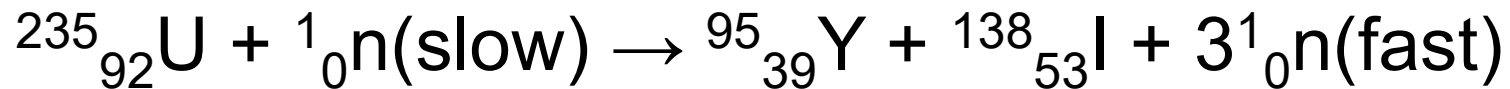
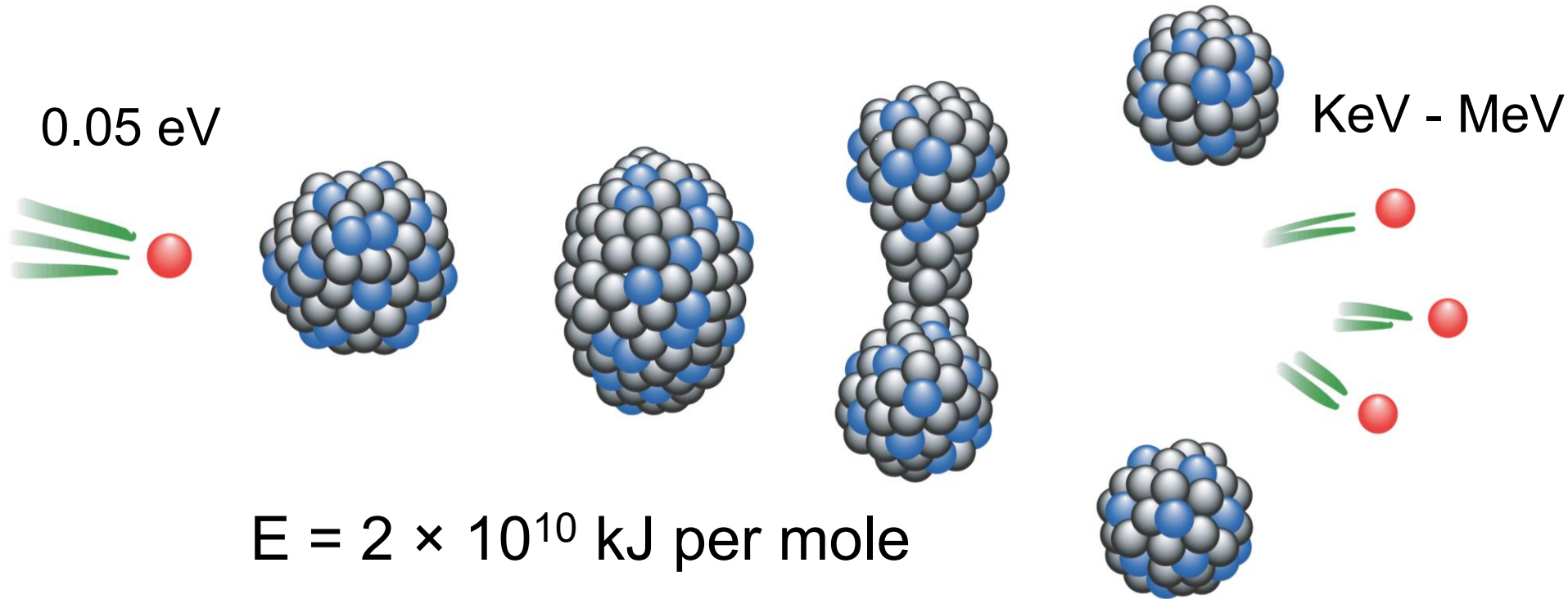
Le reazioni nucleari avvengono con la **conservazione del numero atomico e del numero di massa**



Reazione (n,γ)

Reazione (n,γ)

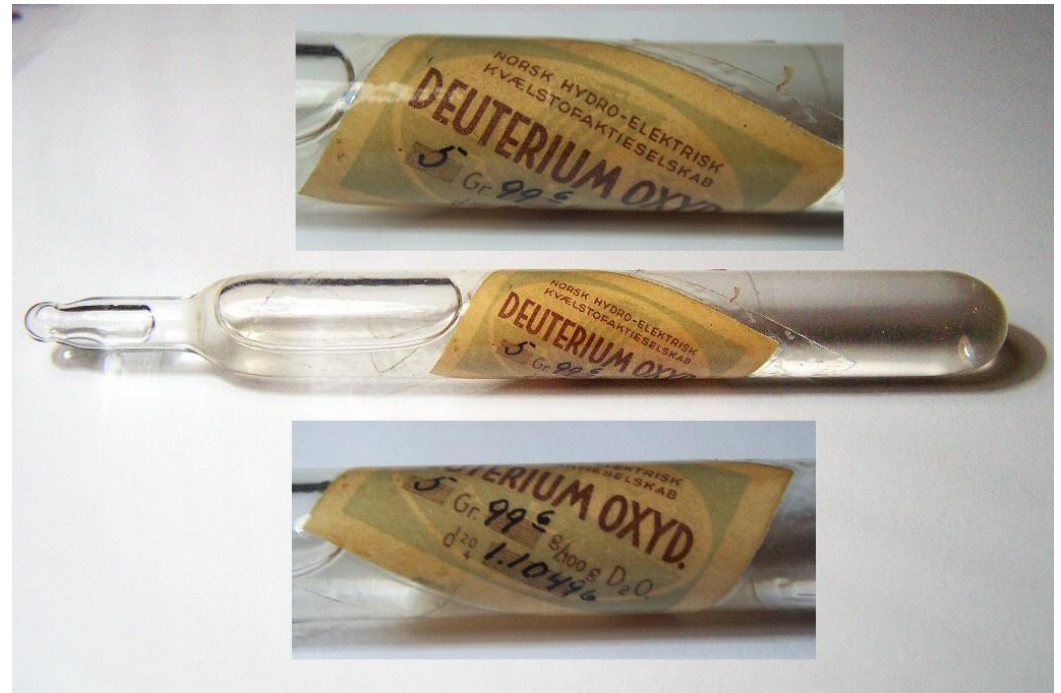
Bombardamento di un nucleo di ^{235}U con neutroni termici



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



16 febbraio 1943



Neutroni termici (0.05 eV) possono essere ottenuti diminuendo l'energia cinetica di neutroni veloci (centinaia di keV) tramite urti elastici con atomi leggeri, come ^{12}C (grafite) e il deuterio di D_2O (*acqua pesante*)

Effetto cinetico isotopico

I legami E–D, dove E è un altro elemento, sono un po' più forti dei legami E–H. I processi di rottura, formazione, o riarrangiamento di legami E–H ed E–D hanno spesso velocità apprezzabilmente diverse (effetto cinetico isotopico).

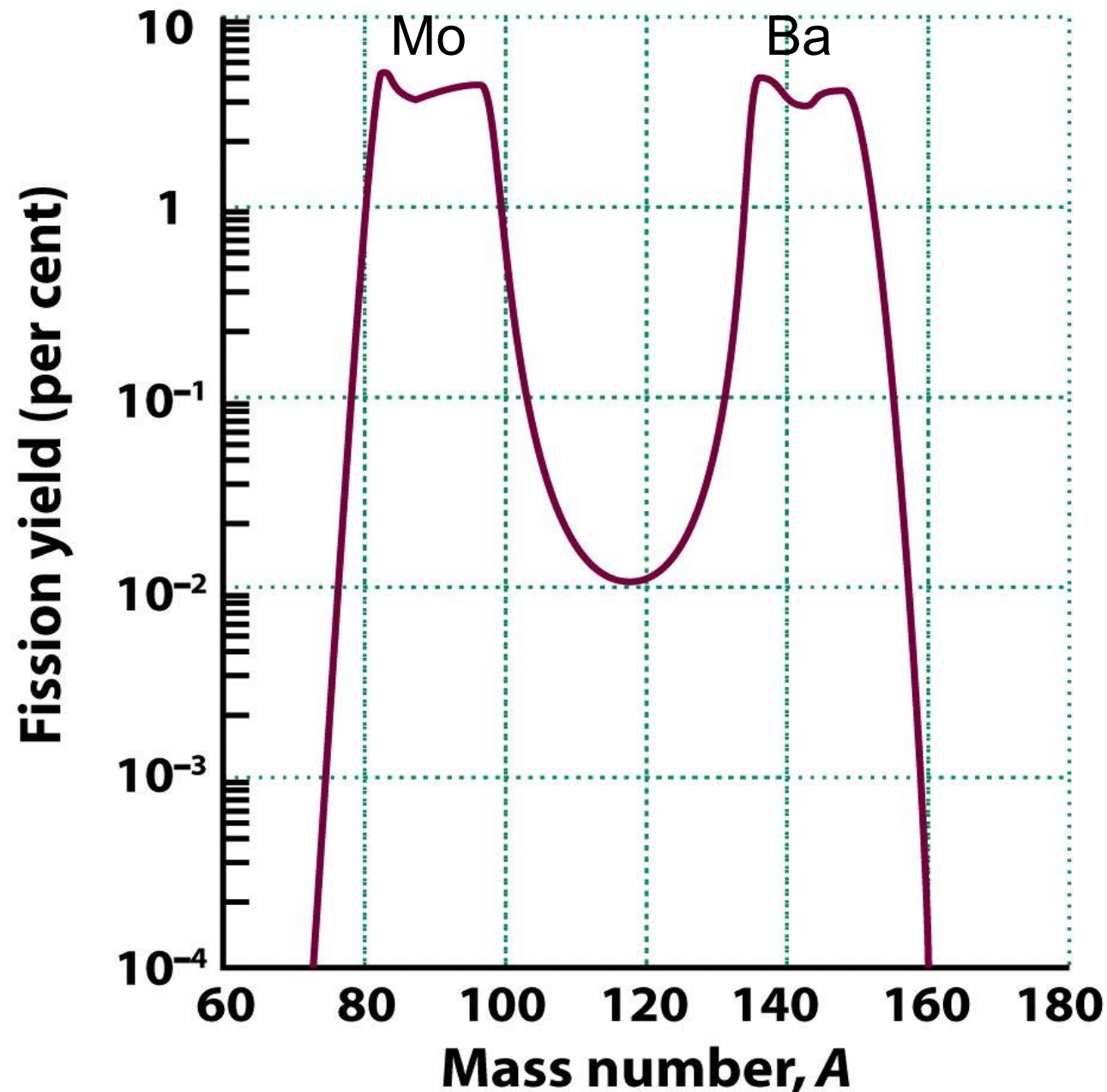
In generale, le reazioni che coinvolgono D_2O avvengono più lentamente di quelle che coinvolgono H_2O

TABELLA 10.2 L'effetto della deuterazione sulle proprietà fisiche.

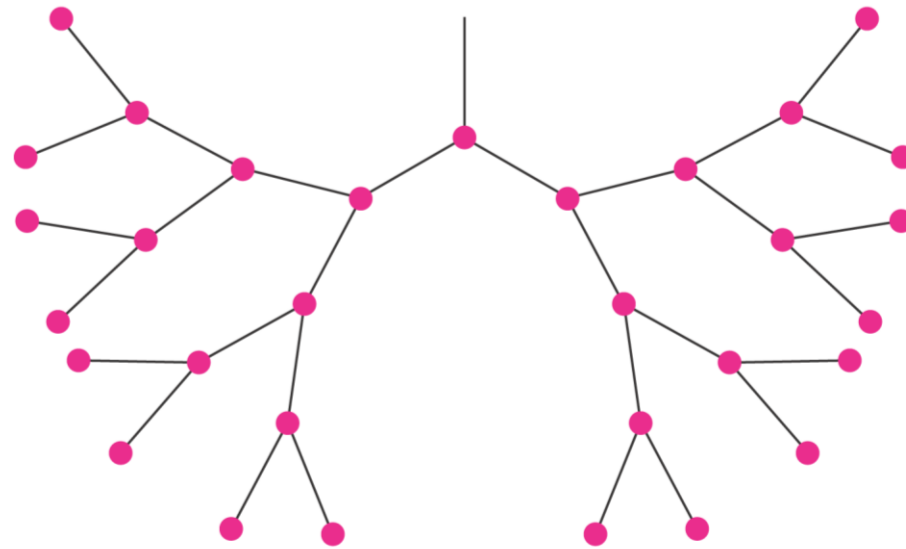
	H_2	D_2	H_2O	D_2O
Punto di ebollizione normale/ $^{\circ}C$	-252,8	-249,7	100,0	101,4
Entalpia media di legame/ $kJ\ mol^{-1}$	436,0	443,3	463,5	470,9

Si osserva un significativo effetto isotopico nella riduzione elettrochimica di $H^+(aq)$ e $D^+(aq)$: H_2 viene sviluppato molto più velocemente rispetto a D_2 . Di conseguenza D_2O può essere concentrata per elettrolisi.

Distribuzione dei nuclei prodotti dalla fissione di ^{235}U



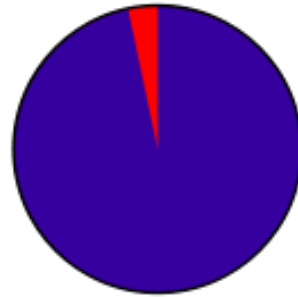
Reazione a catena



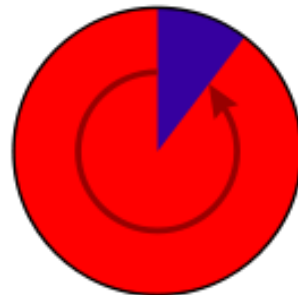
- Grafite o D_2O per rallentare i neutroni (sezioni d'urto – *cross sections* – piccole per la cattura di neutroni)
- Acciaio al boro, carburo di boro o carburo di cadmio per catturare i neutroni (^{10}B e ^{113}Cd hanno grandi sezioni d'urto per la cattura)



Natural uranium
> 99.2% U-238
0.72% U-235



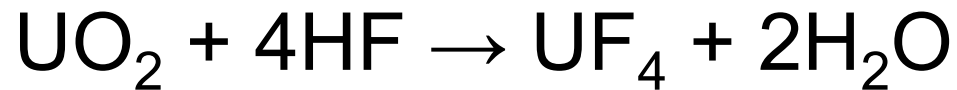
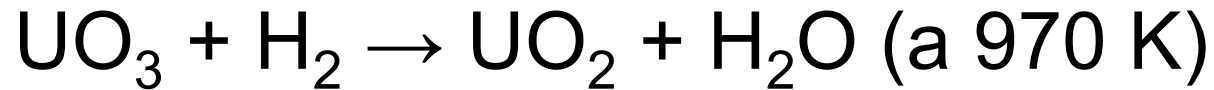
Low-enriched uranium
(reactor grade)
3-4% U-235



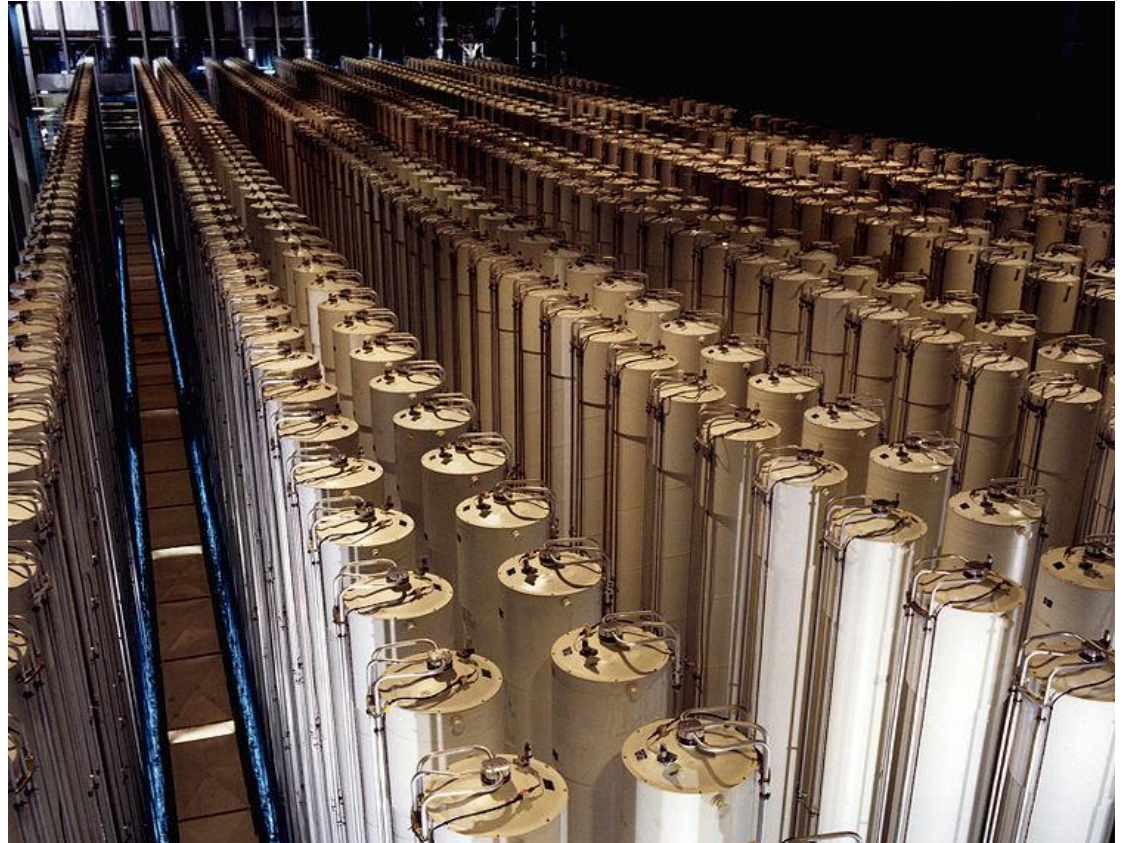
Highly enriched uranium
(weapons grade)
90% U-235

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

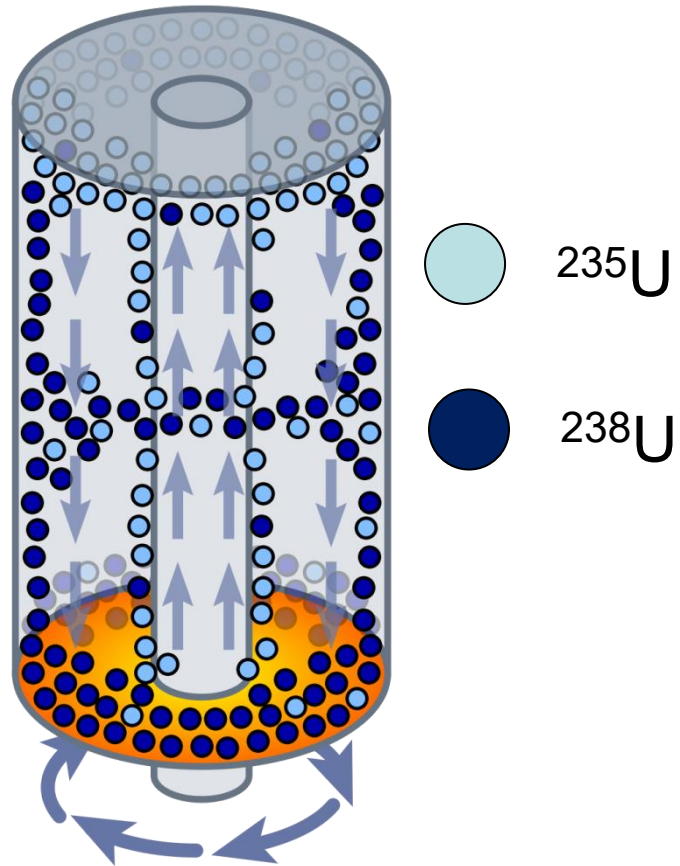
Trasformazione dell'uranile in UF_6



Centrifughe per la separazione della miscela di $^{235}\text{UF}_6$ e $^{238}\text{UF}_6$ sfruttando la **legge di Graham** per la diffusione (la velocità di diffusione di un gas è inversamente proporzionale a $\sqrt{\text{massa molecolare}}$)



Centrifuga Zippe



Radiopharmaceuticals

```
graph TD; A([Radiopharmaceuticals]) --> B([Radiodiagnostics]); A --> C([Radiotherapeutics]);
```

Radiodiagnostics

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

Radiotherapeutics

α or β^- emitters

Isotopes suitable for nuclear imaging

1 H Hydrogen		Short Half-Life PET Isotopes SPECT Isotopes Long Half-Life																2 He Helium	
3 Li Lithium 4 Be Beryllium																		5 B Boron 6 C Carbon 7 N Nitrogen 8 O Oxygen 9 F Fluorine 10 Ne Neon	
11 Na Sodium 12 Mg Magnesium																		13 Al Aluminum 14 Si Silicon 15 P Phosphorus 16 S Sulfur 17 Cl Chlorine 1 Ar Argon	
19 K Potassium 20 Ca Calcium																		31 Ga Gallium 32 Ge Germanium 33 As Arsenic 34 Se Selenium 35 Br Bromine 36 Kr Krypton	
37 Rb Rubidium 38 Sr Strontium																		49 In Indium 50 Sn Tin 51 Sb Antimony 52 Te Tellurium 53 I Iodine 54 Xe Xenon	
55 Cs Cesium 56 Ba Barium																		81 Tl Thallium 82 Pb Lead 83 Bi Bismuth 84 Po Polonium 85 At Astatine 86 Rn Radon	
87 Fr Francium 88 Ra Radium																		113 Uut Ununtrium 114 Fl Flerovium 115 Uup Ununpentium 116 Lv Livermorium 117 Uus Ununseptium 118 Uuo Ununoctium	

E
Element

Denotes an element with isotopes suitable for both PET and SPECT

E
Element

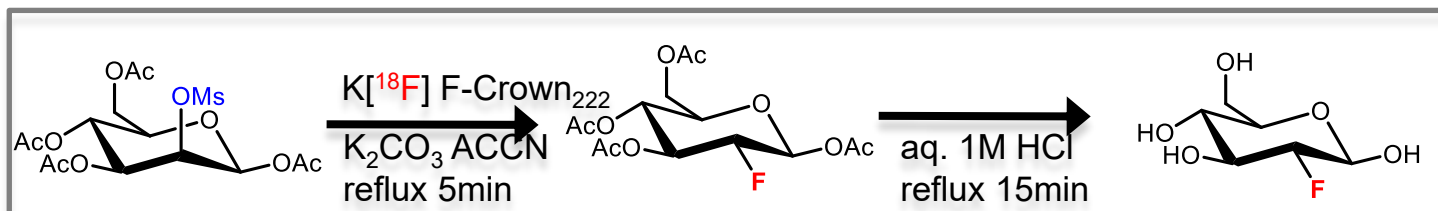
Denotes an element with multiple isotopes with different physical half-lives

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

The Concept of Radiopharmaceutical Production

Radiopharmaceuticals with any nuclide **can be produced**

- ➔ at the site of nuclide production, e.g. cyclotrons or reactors, **quality controlled** and
- ➔ **shipped** to the hospital of administration.



shipping must be fast as half of the activity is lost after 109 min.

Chemical kinetics: ^{99}Mo (parent) $\xrightarrow{k_1}$ $^{99\text{m}}\text{Tc}$ (desired nuclide) $\xrightarrow{k_2}$ ^{99}Tc (final product)

