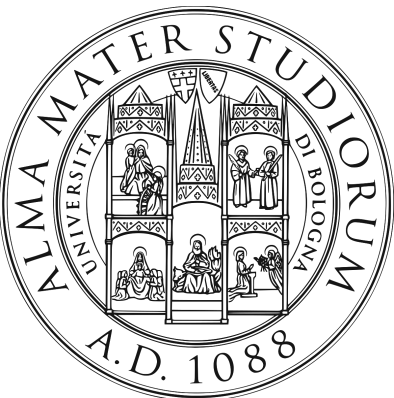
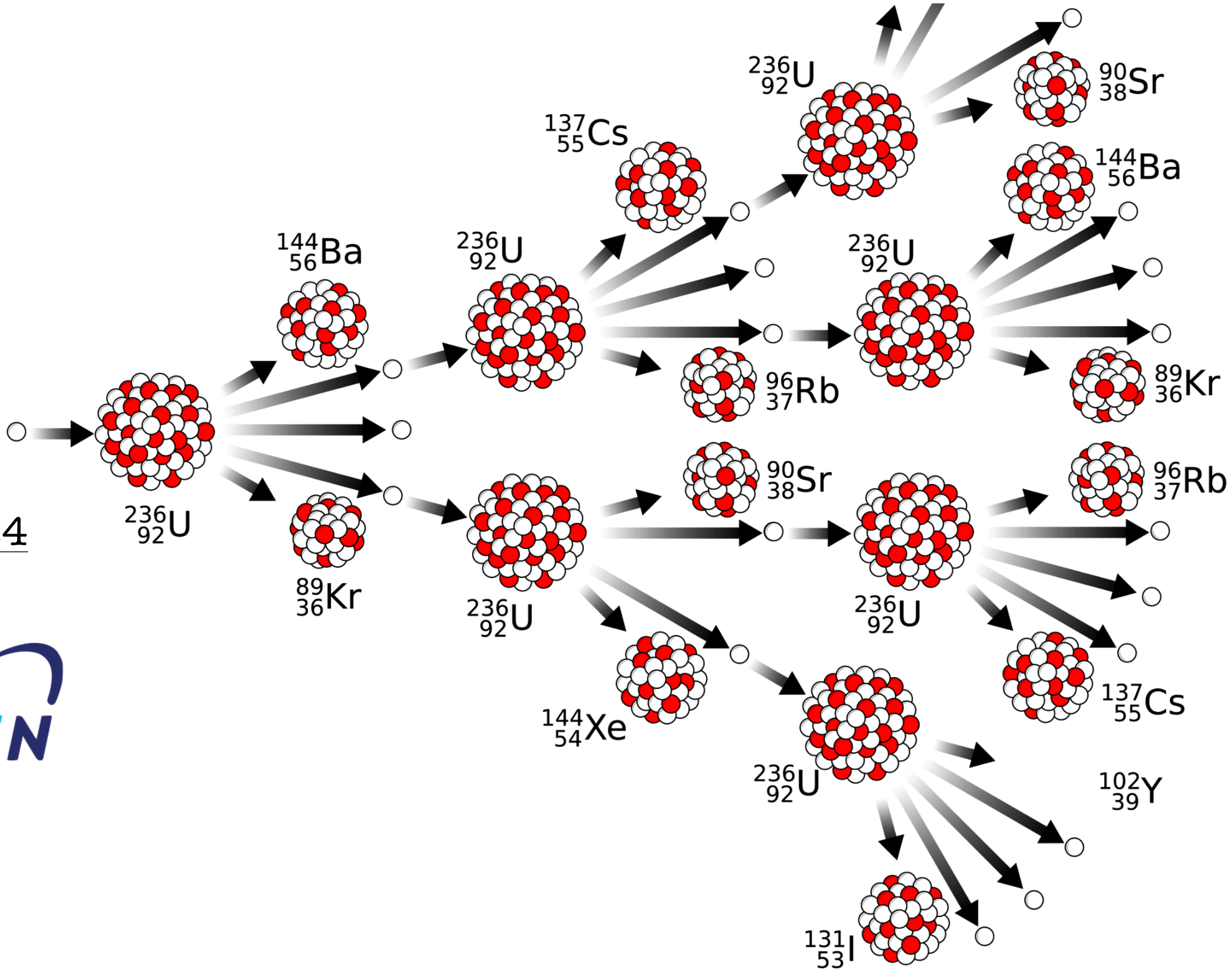


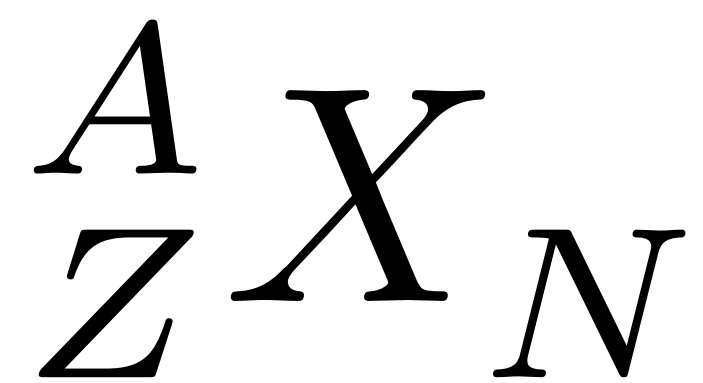
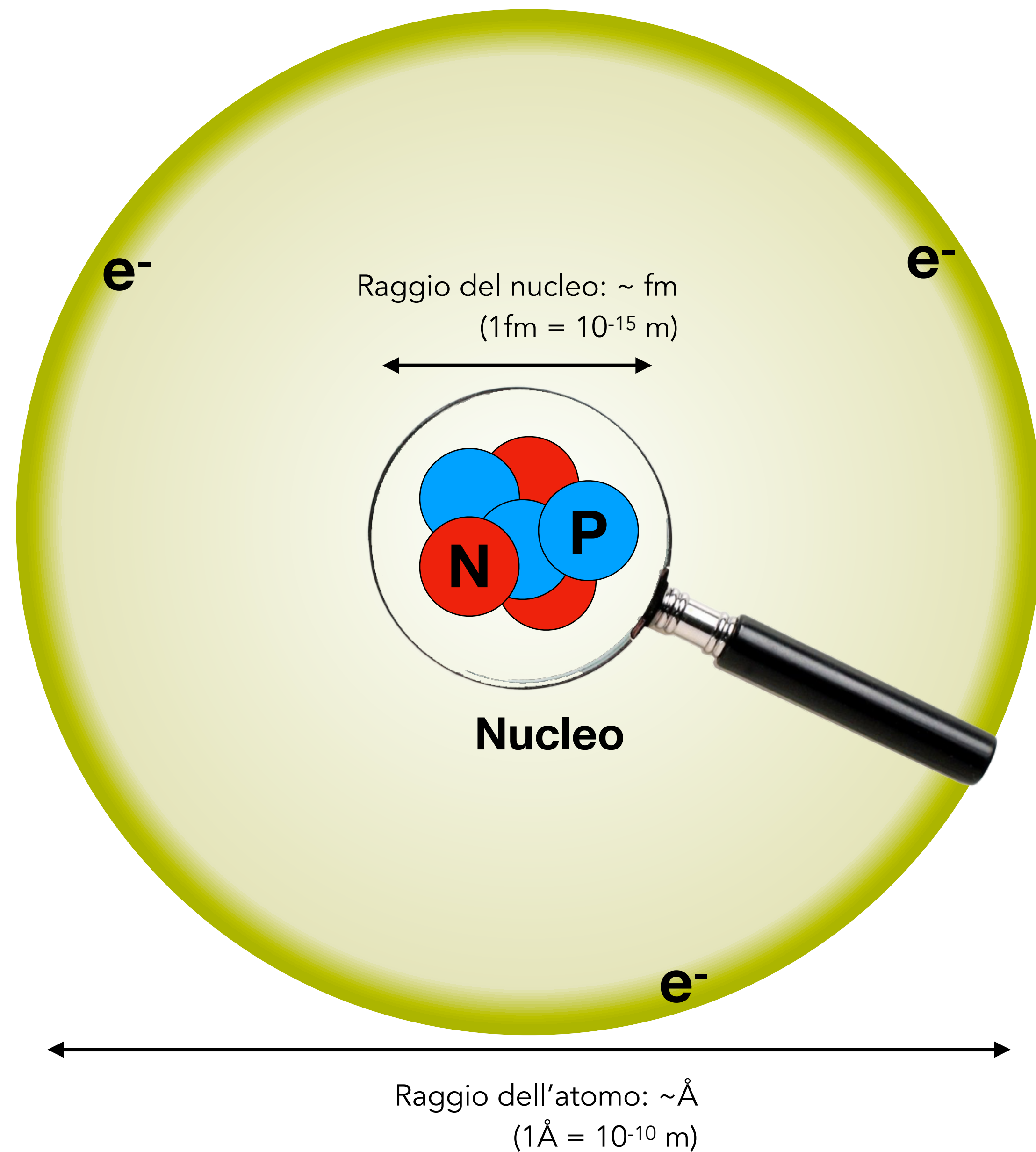
# Fisica delle reazioni nucleari

*tutto (o quasi) ciò che serve per capire l'energia nucleare*

Prof. Dr. Paolo Finelli

[https://github.com/paolofinelli/Conferenza\\_energia\\_2024](https://github.com/paolofinelli/Conferenza_energia_2024)





**A** numero totale dei nucleoni  
**Z** numero di protoni  
**N** numero di neutroni  
**X** elemento chimico

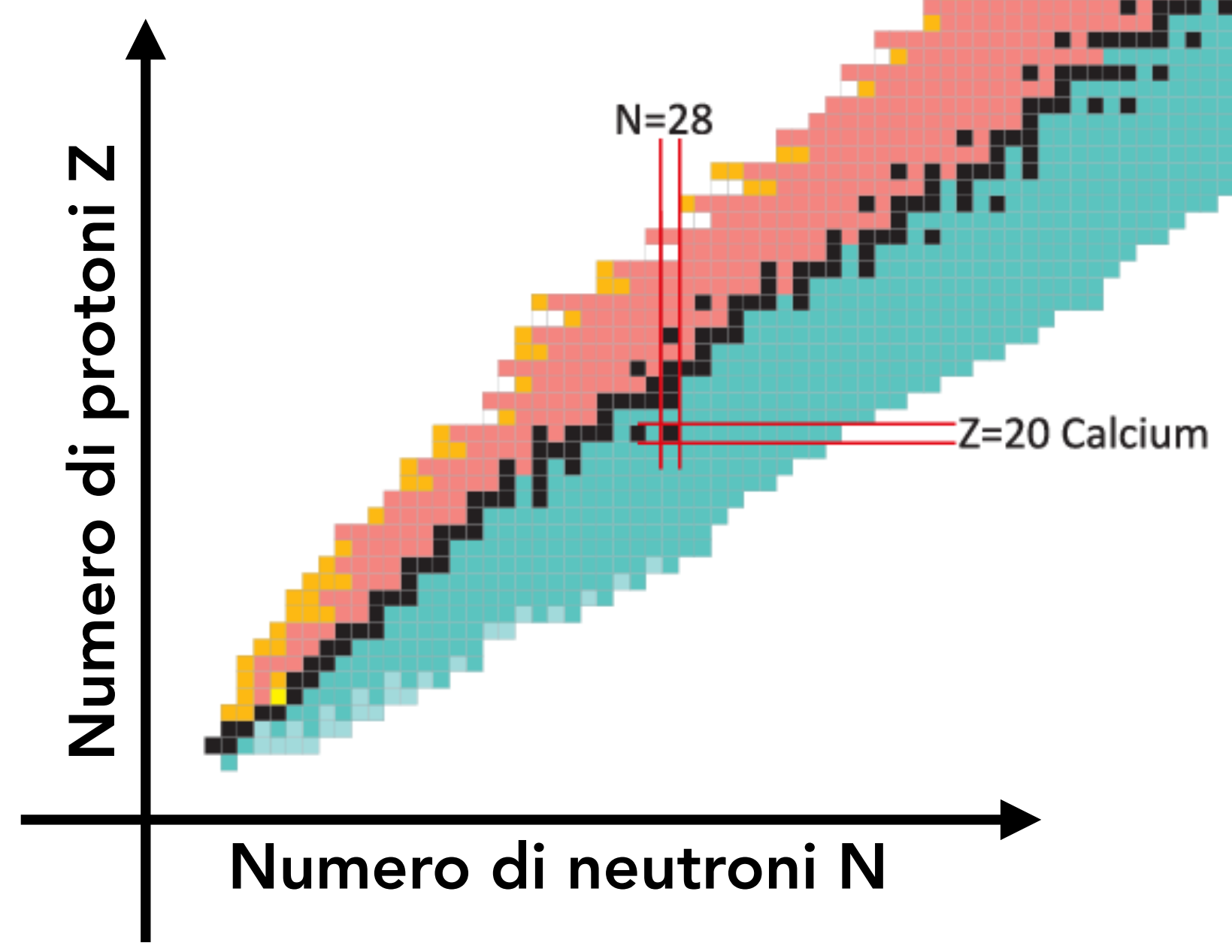
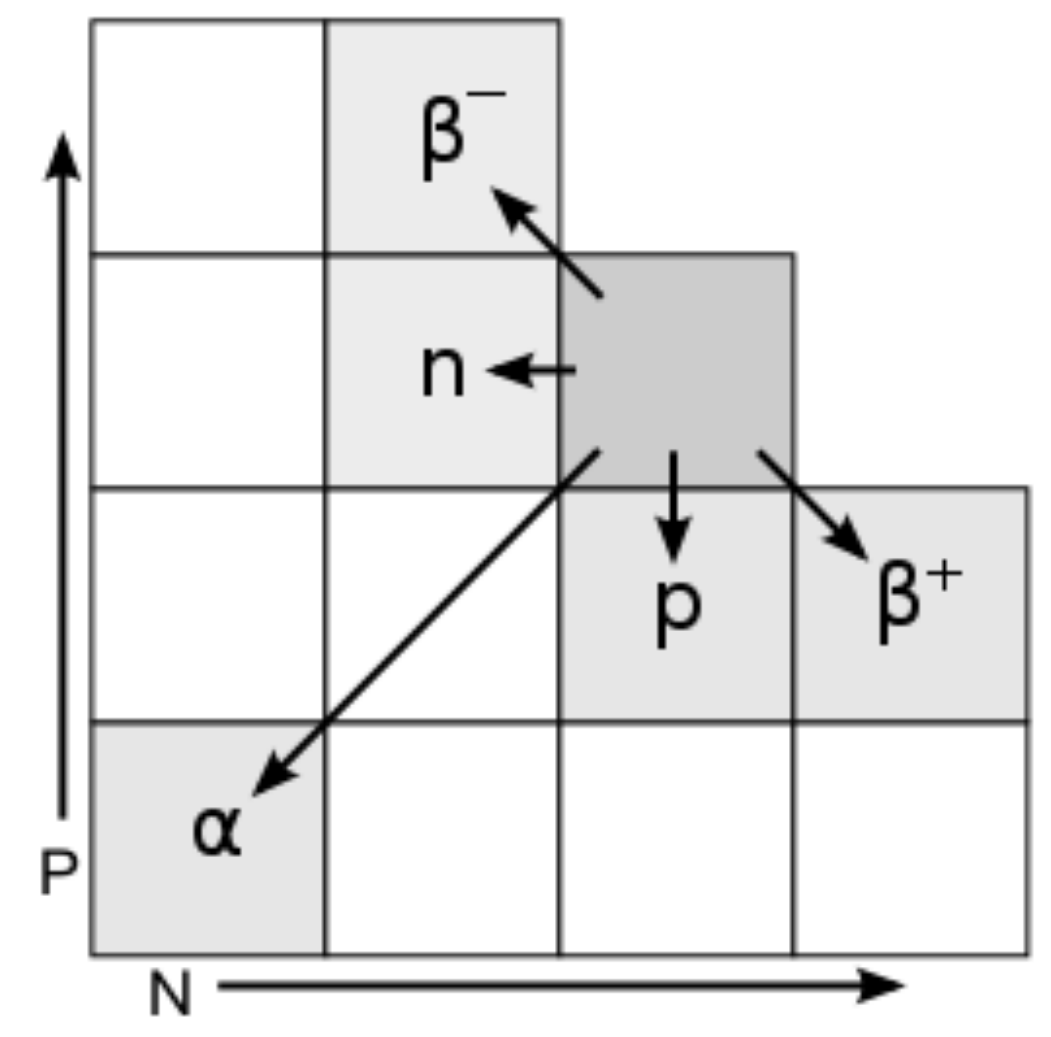
$$A = Z + N$$

## Atomo

Il nucleo, che rappresenta la parte centrale dell'atomo in cui è concentrata la quasi totalità della massa atomica, è circa centomila volte più piccolo dell'atomo stesso ed è, a sua volta, un aggregato di altre particelle: **protoni** e **neutroni**.

Particella	Simbolo	Carica elettrica (C)	Massa	
			(kg)	(u)
elettrone	$e$	$-1,60217653 \cdot 10^{-19}$	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	$5,485799 \cdot 10^{-4}$
protone	$p$	$+ 1,60217653 \cdot 10^{-19}$	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	1,007276
neutrone	$n$	0	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	1,008665

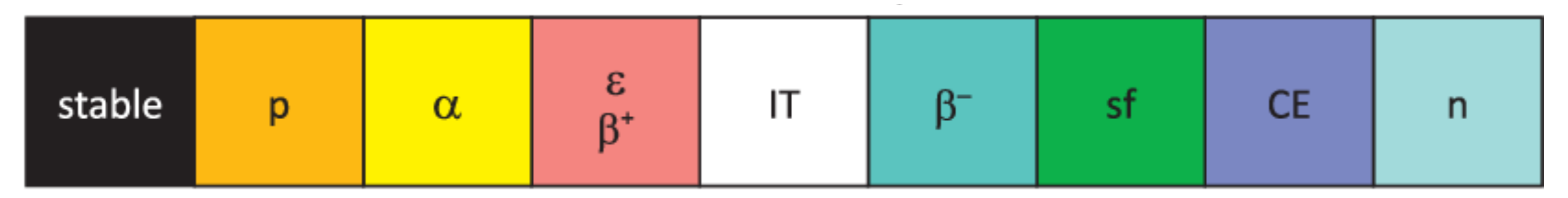
# Valle di stabilità



Lead  $Z=82$   
 $N=126$

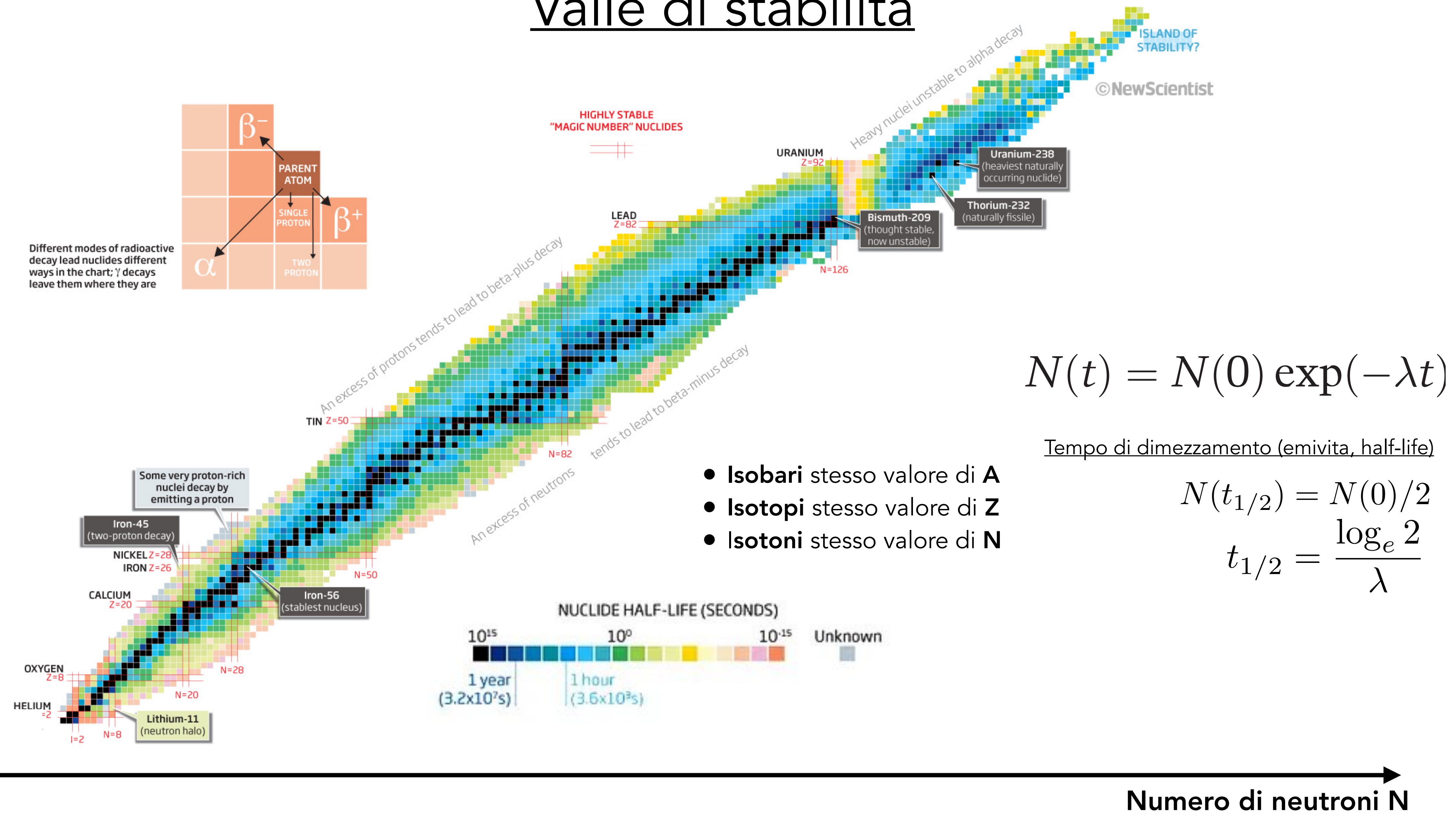
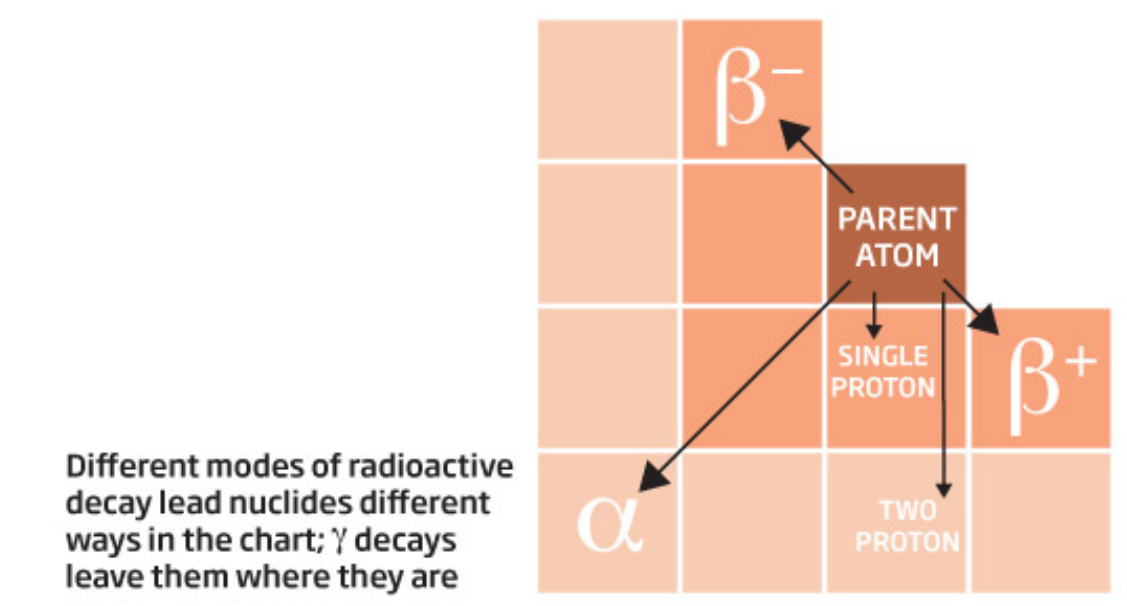
Examples of the nuclide box structure

<b>Th 232</b> 100 1.40·10 <sup>10</sup> a $\alpha$ 4.012, 3.947... $\gamma$ (64...), e <sup>-</sup> , sf $\sigma$ 7.37, $\sigma_f$ 3E-6	<b>Ac 226</b> 29.37 h $\beta^-$ 0.9, 1.1 $\epsilon, \alpha$ 5.40 $\gamma$ 230, 158, 254 186...
<b>Ra 225</b> 14.9 d $\beta^-$ 0.3, 0.4 $\gamma$ 40, e <sup>-</sup>	<b>Bi 207</b> 31.55 a $\epsilon, \beta^+$ ... $\gamma$ 570, 1064 1770...
<b>Cs 135</b> 53 m 2.3·10 <sup>6</sup> a $\beta^-$ 0.3 no $\gamma$ IT 846 $\gamma$ 787	<b>Rn 219</b> 3.96 s $\alpha$ 6.819, 6.553 6.425... $\gamma$ 271, 402...



# Valle di stabilità

Numero di protoni Z



$$N(t) = N(0) \exp(-\lambda t)$$

Tempo di dimezzamento (emivita, half-life)

$$N(t_{1/2}) = N(0)/2$$

$$t_{1/2} = \frac{\log_e 2}{\lambda}$$

- **Isobari** stesso valore di **A**
- **Isotopi** stesso valore di **Z**
- **Isotoni** stesso valore di **N**



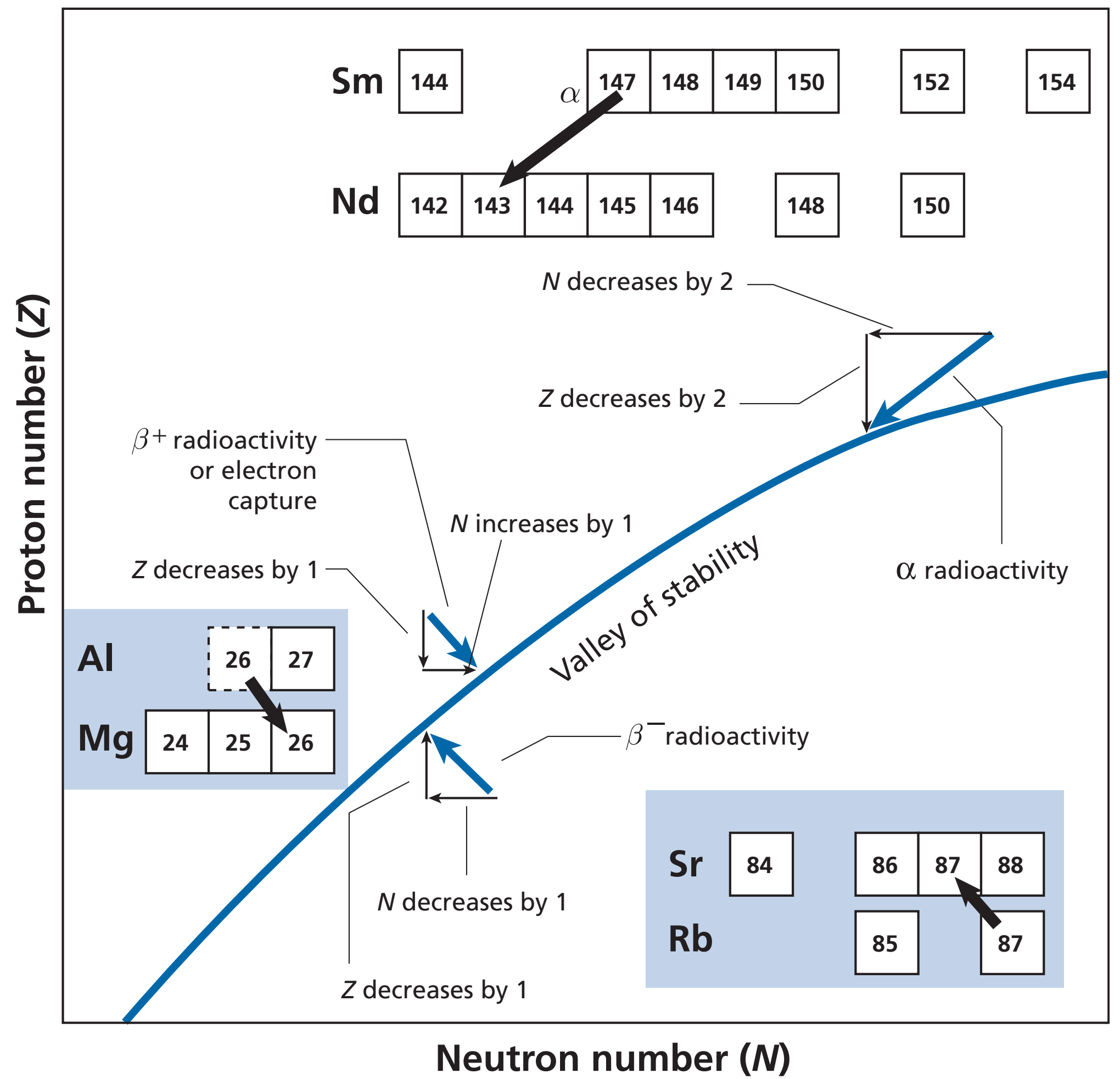
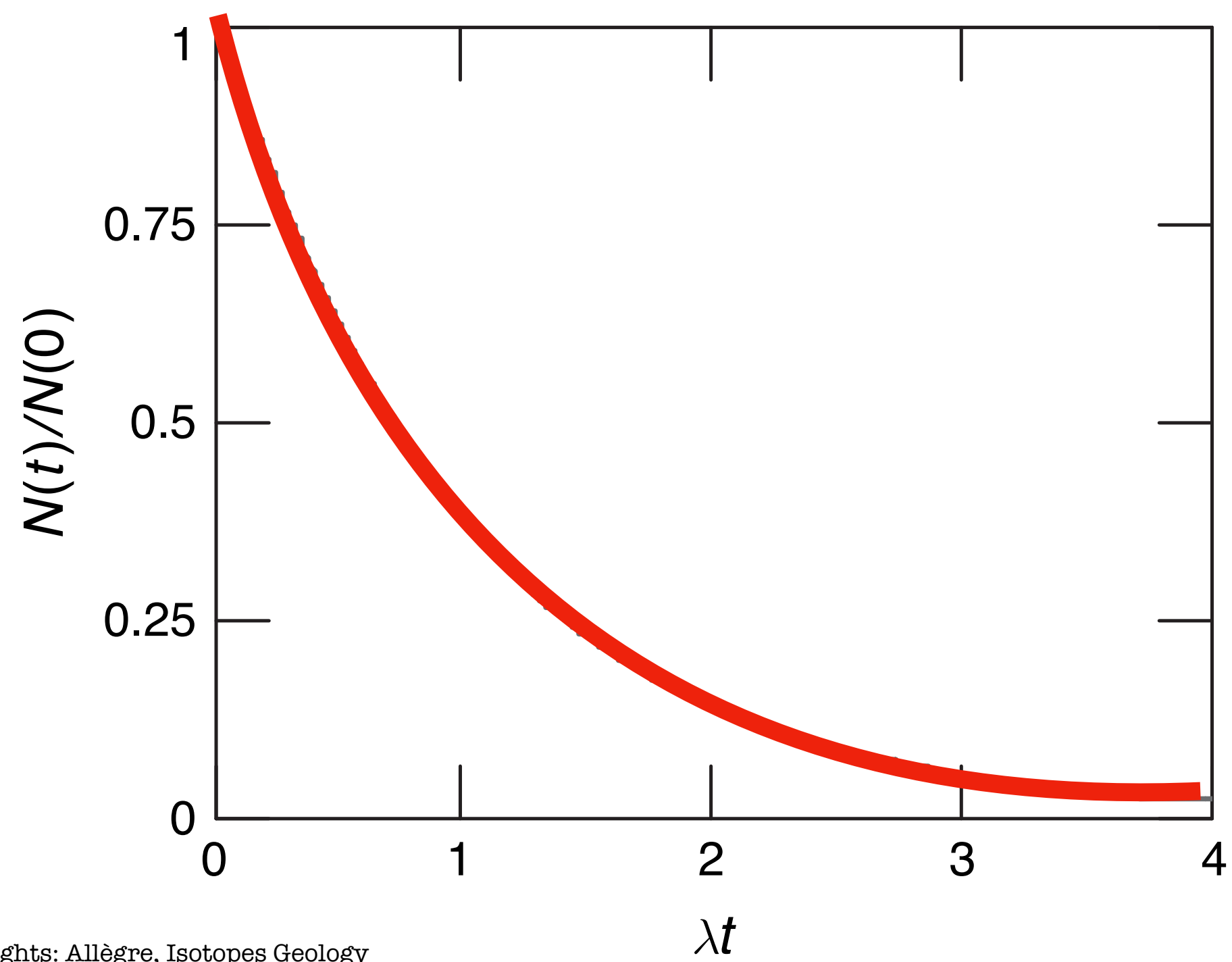
Numero di neutroni N

Copyrights: Walker, New Scientist

# Legge del decadimento radioattivo

$$\frac{d}{dt}N(t) = -\lambda N(t)$$

$$N(t) = N(0) \exp(-\lambda t)$$



Tempo di dimezzamento (emivita)  $N(t_{1/2}) = N(0)/2$

$$t_{1/2} = \frac{\log_e 2}{\lambda}$$

# Tavola periodica degli elementi

La massa dell'elemento naturale è data dalle masse degli isotopi pesate per l'abbondanza

stesso valore di Z

Atomic Number 17 Atomic Mass, u 35.45

Name Chlorine Symbol Cl

Chemical Group Block Halogen

PubChem

1 1 1.0080 <b>H</b> Hydrogen Nonmetal																	18 2 4.00260 <b>He</b> Helium Noble Gas	
3 7.0 <b>Li</b> Lithium Alkali Metal	4 9.012183 <b>Be</b> Beryllium Alkaline Earth Me...																	10 20.180 <b>Ne</b> Neon Noble Gas
11 22.989... <b>Na</b> Sodium Alkali Metal	12 24.305 <b>Mg</b> Magnesium Alkaline Earth Me...																	18 39.9 <b>Ar</b> Argon Noble Gas
19 39.0983 <b>K</b> Potassium Alkali Metal	20 40.08 <b>Ca</b> Calcium Alkaline Earth Me...	21 44.95591 <b>Sc</b> Scandium Transition Metal	22 47.867 <b>Ti</b> Titanium Transition Metal	23 50.9415 <b>V</b> Vanadium Transition Metal	24 51.996 <b>Cr</b> Chromium Transition Metal	25 54.93804 <b>Mn</b> Manganese Transition Metal	26 55.84 <b>Fe</b> Iron Transition Metal	27 58.93319 <b>Co</b> Cobalt Transition Metal	28 58.693 <b>Ni</b> Nickel Transition Metal	29 63.55 <b>Cu</b> Copper Transition Metal	30 65.4 <b>Zn</b> Zinc Transition Metal	31 69.723 <b>Ga</b> Gallium Post-Transition M...	32 72.63 <b>Ge</b> Germanium Metalloid	33 74.92159 <b>As</b> Arsenic Metalloid	34 78.97 <b>Se</b> Selenium Nonmetal	35 79.90 <b>Br</b> Bromine Halogen	36 83.80 <b>Kr</b> Krypton Noble Gas	
37 85.468 <b>Rb</b> Rubidium Alkali Metal	38 87.62 <b>Sr</b> Strontium Alkaline Earth Me...	39 88.90584 <b>Y</b> Yttrium Transition Metal	40 91.22 <b>Zr</b> Zirconium Transition Metal	41 92.90637 <b>Nb</b> Niobium Transition Metal	42 95.95 <b>Mo</b> Molybdenum Transition Metal	43 96.90636 <b>Tc</b> Technetium Transition Metal	44 101.1 <b>Ru</b> Ruthenium Transition Metal	45 102.9055 <b>Rh</b> Rhodium Transition Metal	46 106.42 <b>Pd</b> Palladium Transition Metal	47 107.868 <b>Ag</b> Silver Transition Metal	48 112.41 <b>Cd</b> Cadmium Transition Metal	49 114.818 <b>In</b> Indium Post-Transition M...	50 118.71 <b>Sn</b> Tin Post-Transition M...	51 121.760 <b>Sb</b> Antimony Metalloid	52 127.6 <b>Te</b> Tellurium Metalloid	53 126.9045 <b>I</b> Iodine Halogen	54 131.29 <b>Xe</b> Xenon Noble Gas	
55 132.90... <b>Cs</b> Cesium Alkali Metal	56 137.33 <b>Ba</b> Barium Alkaline Earth Me...																	86 222.01... <b>Rn</b> Radon Noble Gas
87 223.01... <b>Fr</b> Francium Alkali Metal	88 226.02... <b>Ra</b> Radium Alkaline Earth Me...	104 267.1... <b>Rf</b> Rutherfordium Transition Metal	105 268.1... <b>Db</b> Dubnium Transition Metal	106 269.1... <b>Sg</b> Seaborgium Transition Metal	107 270.1... <b>Bh</b> Bohrium Transition Metal	108 269.1... <b>Hs</b> Hassium Transition Metal	109 277.1... <b>Mt</b> Meitnerium Transition Metal	110 282.1... <b>Ds</b> Darmstadtium Transition Metal	111 282.1... <b>Rg</b> Roentgenium Transition Metal	112 286.1... <b>Cn</b> Copernicium Transition Metal	113 286.1... <b>Nh</b> Nihonium Post-Transition M...	114 290.1... <b>Fl</b> Flerovium Post-Transition M...	115 290.1... <b>Mc</b> Moscovium Post-Transition M...	116 293.2... <b>Lv</b> Livermorium Post-Transition M...	117 294.2... <b>Ts</b> Tennessine Halogen	118 295.2... <b>Og</b> Oganesson Noble Gas		
		57 138.9055 <b>La</b> Lanthanum Lanthanide	58 140.116 <b>Ce</b> Cerium Lanthanide	59 140.90... <b>Pr</b> Praseodymium Lanthanide	60 144.24 <b>Nd</b> Neodymium Lanthanide	61 144.91... <b>Pm</b> Promethium Lanthanide	62 150.4 <b>Sm</b> Samarium Lanthanide	63 151.964 <b>Eu</b> Europium Lanthanide	64 157.2 <b>Gd</b> Gadolinium Lanthanide	65 158.92... <b>Tb</b> Terbium Lanthanide	66 162.500 <b>Dy</b> Dysprosium Lanthanide	67 164.93... <b>Ho</b> Holmium Lanthanide	68 167.26 <b>Er</b> Erbium Lanthanide	69 168.93... <b>Tm</b> Thulium Lanthanide	70 173.05 <b>Yb</b> Ytterbium Lanthanide	71 174.9668 <b>Lu</b> Lutetium Lanthanide		
		89 227.02... <b>Ac</b> Actinium Actinide	90 232.038 <b>Th</b> Thorium Actinide	91 231.03... <b>Pa</b> Protactinium Actinide	92 238.0289 <b>U</b> Uranium Actinide	93 237.04... <b>Np</b> Neptunium Actinide	94 244.06... <b>Pu</b> Plutonium Actinide	95 243.06... <b>Am</b> Americium Actinide	96 247.07... <b>Cm</b> Curium Actinide	97 247.07... <b>Bk</b> Berkelium Actinide	98 251.07... <b>Cf</b> Californium Actinide	99 252.0830 <b>Es</b> Einsteinium Actinide	100 257.0... <b>Fm</b> Fermium Actinide	101 258.0... <b>Md</b> Mendelevium Actinide	102 259.1... <b>No</b> Nobelium Actinide	103 266.1... <b>Lr</b> Lawrencium Actinide		

# Energia di legame

La massa di un nucleo è minore della somma delle masse dei suoi costituenti

$$m(A, Z) < Nm_n + Zm_p$$

Massa di protoni e neutroni

$$m_p = 938.27 \text{ MeV}$$

$$m_n = 939.57 \text{ MeV}$$

**Atomic Mass Unit (a.m.u.)**

$$1u = \frac{1}{12}m(^{12}\text{C})$$

$$1u = 931.494 \text{ MeV}/c^2$$

$$1u = 1.660 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

La differenza di massa è dovuta all'energia di legame generata dalle forze nucleari e dall'interazione coulombiana

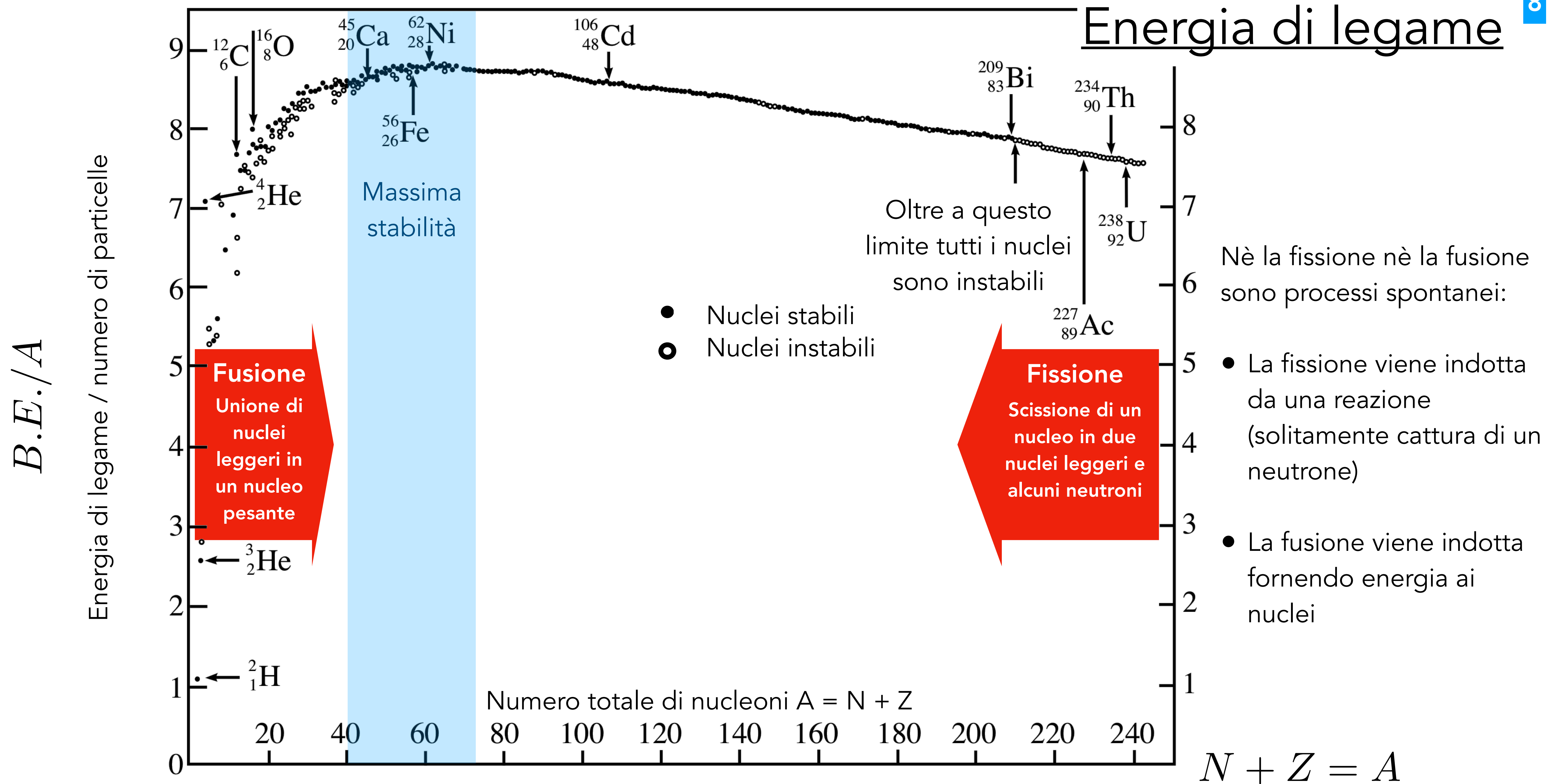
$$B(A, Z) = Nm_n c^2 + Zm_p c^2 - m(A, Z)c^2$$

**Equivalenza massa-energia**

$$E = mc^2$$

L'energia di legame media per nucleone è approssimativamente costante  $\sim 8 \text{ MeV}$ , con alcune eccezioni per i nuclei leggeri

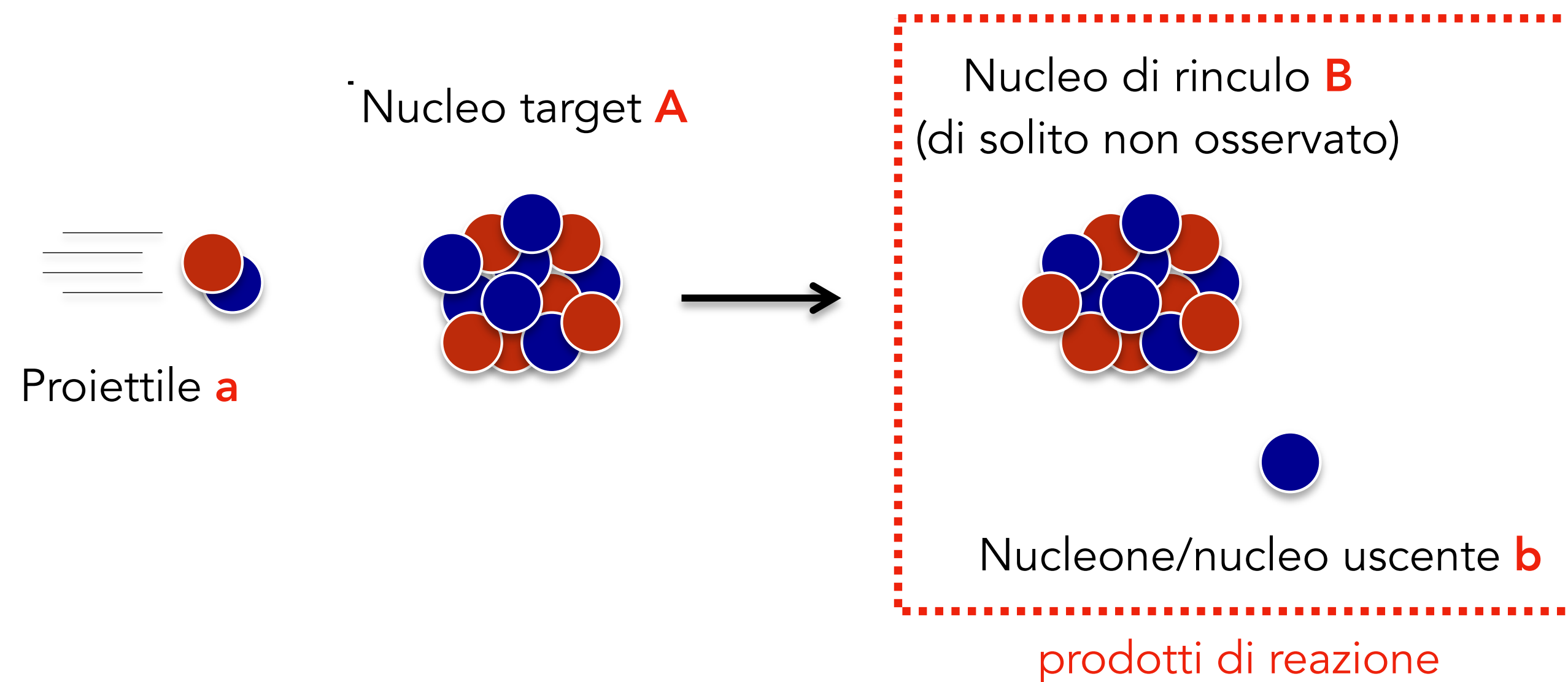
L'**elettronvolt** è definito come l'energia acquistata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, che si muove nel vuoto tra due punti in una regione tra cui esiste una differenza di potenziale elettrostatico di 1 volt. **1 eV = 1,602 176 46 × 10<sup>-19</sup> J**





# Per conoscere una reazione nucleare dobbiamo studiarne la sezione d'urto

Una tipica reazione nucleare può essere scritta come segue

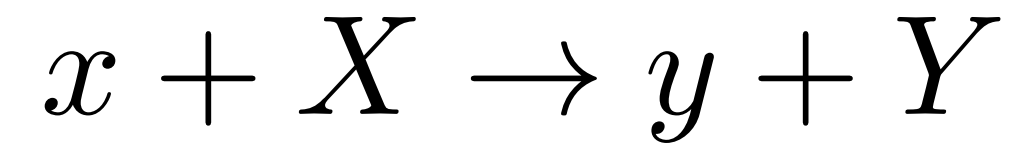


**Reazione diretta:** solo pochi nucleoni prendono parte alla reazione. I rimanenti nucleoni del bersaglio fungono da spettatori

**Meccanismo del nucleo composto:** il nucleo incidente ed il nucleo bersaglio si fondono in uno stato metastabile prima che un nucleone/nucleo venga espulso

# Q-valore e reazioni nucleari

Data questa semplice reazione



La legge di conservazione dell'energia può essere espressa come

$$m_x c^2 + T_x + m_X c^2 + T_X = m_y c^2 + T_y + m_Y c^2 + T_Y$$

Dove **T** è l'energia cinetica e **m** è la massa a riposo. Riscrivendo tale relazione nella forma

$$(m_x + m_X - m_y - m_Y) c^2 = T_y + T_Y - T_x - T_X$$

è possibile definire il valore **Q** come segue

$$Q = (m_i - m_f) c^2 = T_f - T_i$$

Una reazione con valore **Q** positivo (**Q > 0**) è detta esotermica poiché libera energia, poiché l'energia cinetica finale è maggiore di quella iniziale. Una reazione con valore **Q** negativo (**Q < 0**) è detta endotermica perché assorbe energia.

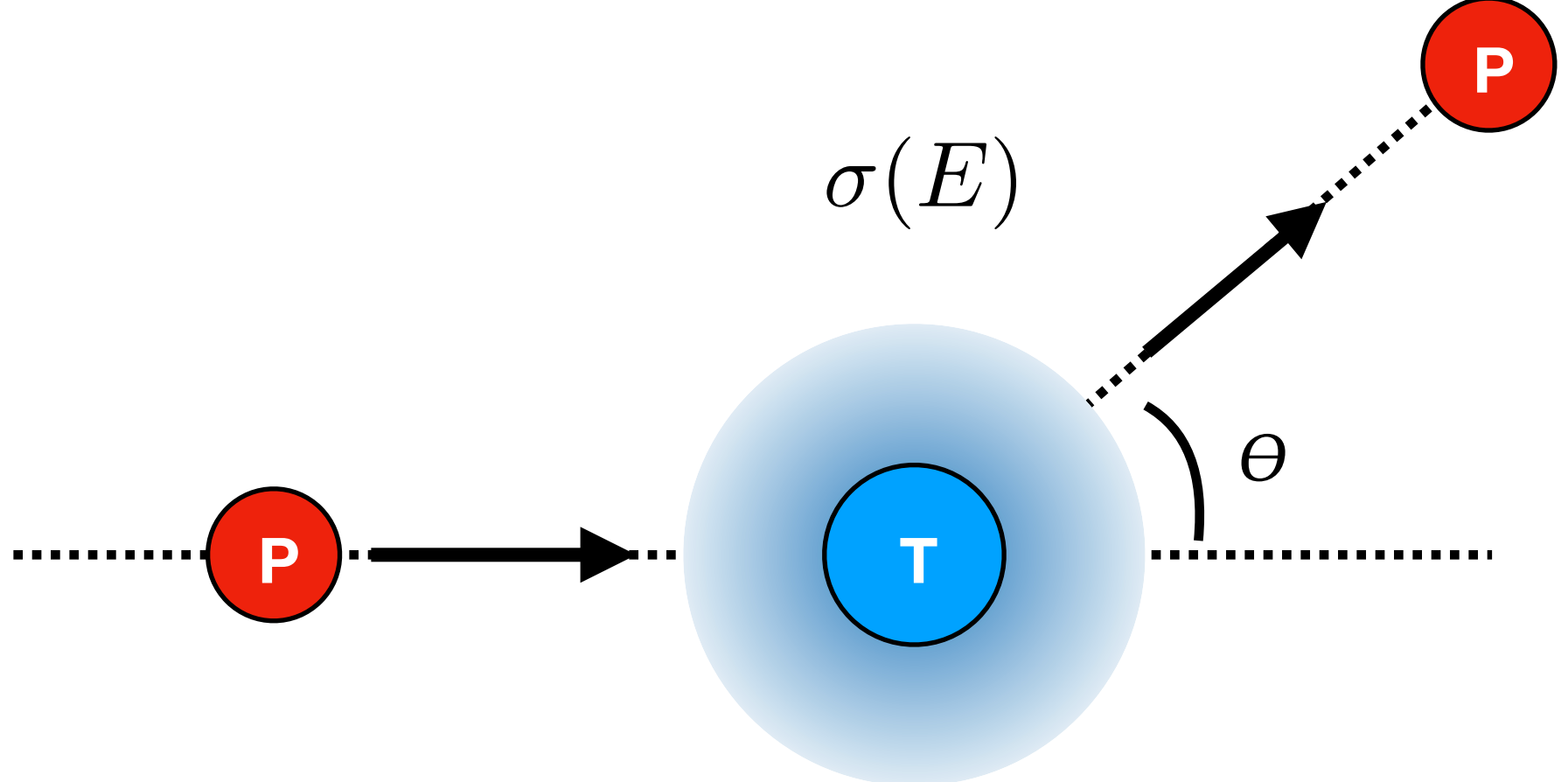
# Descriviamo una reazione nucleare tramite la sezione d'urto

**Sezione d'urto:** grandezza che caratterizza una reazione nucleare (di qualsivoglia genere) interpretabile come *area effettiva* di un target (obiettivo) nucleare. Definiamo la sezione d'urto totale come segue:

flusso incidente  
*incident flux*

$$\Phi = \frac{dN_{in}}{dS dt}$$

tasso di interazione  
*reaction rate*

$$\frac{dN_r}{dt}$$


$\sigma(E)$

$\theta$

- dimensioni fisiche di una superficie
- dipende dall'energia del proiettile

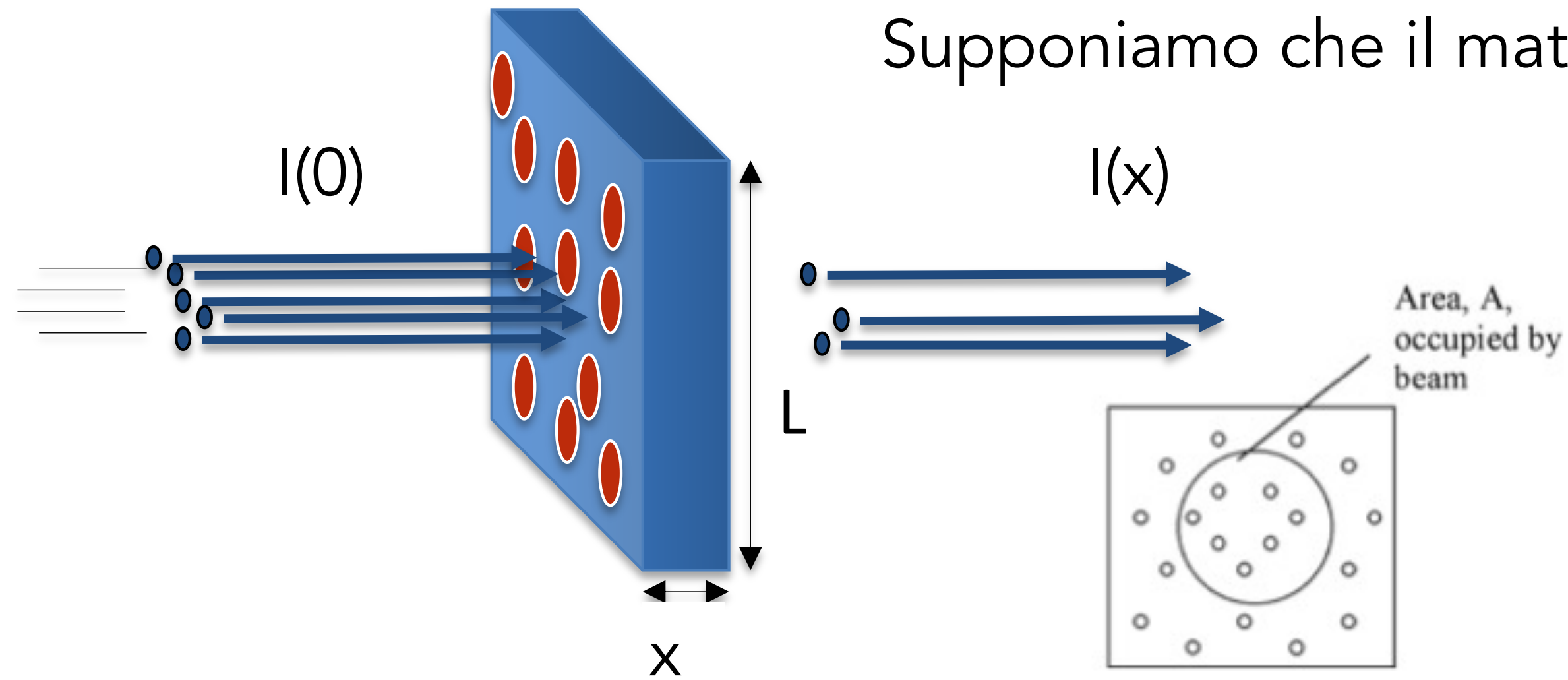
$$\sigma = \frac{\frac{dN_r}{dt}}{\Phi}$$

Poiché il raggio nucleare è di circa  $10^{-12}$  cm, l'area geometrica della sezione trasversale del nucleo è di circa  **$10^{-24}$  cm<sup>2</sup> = 1 barn**, quindi useremo il barn come unità di misura

La sezione d'urto  $\sigma$  è divisa in sezioni d'urto per ogni dato processo ed è la somma di tutti i contributi

$$\sigma = \sigma_{el} + \sigma_{inel} + \sigma_{\gamma} + \sigma_f + \dots$$

# Sezione d'urto macroscopica



Supponiamo che il materiale di densità  $\rho$  (gr/cm<sup>3</sup>) venga colpito da un flusso di particelle di intensità  $I$  (particelle/sec)

$N_A$ : numero di Avogadro

$$I(x) = I(0)e^{-\frac{\rho}{A} N_A \sigma x}$$

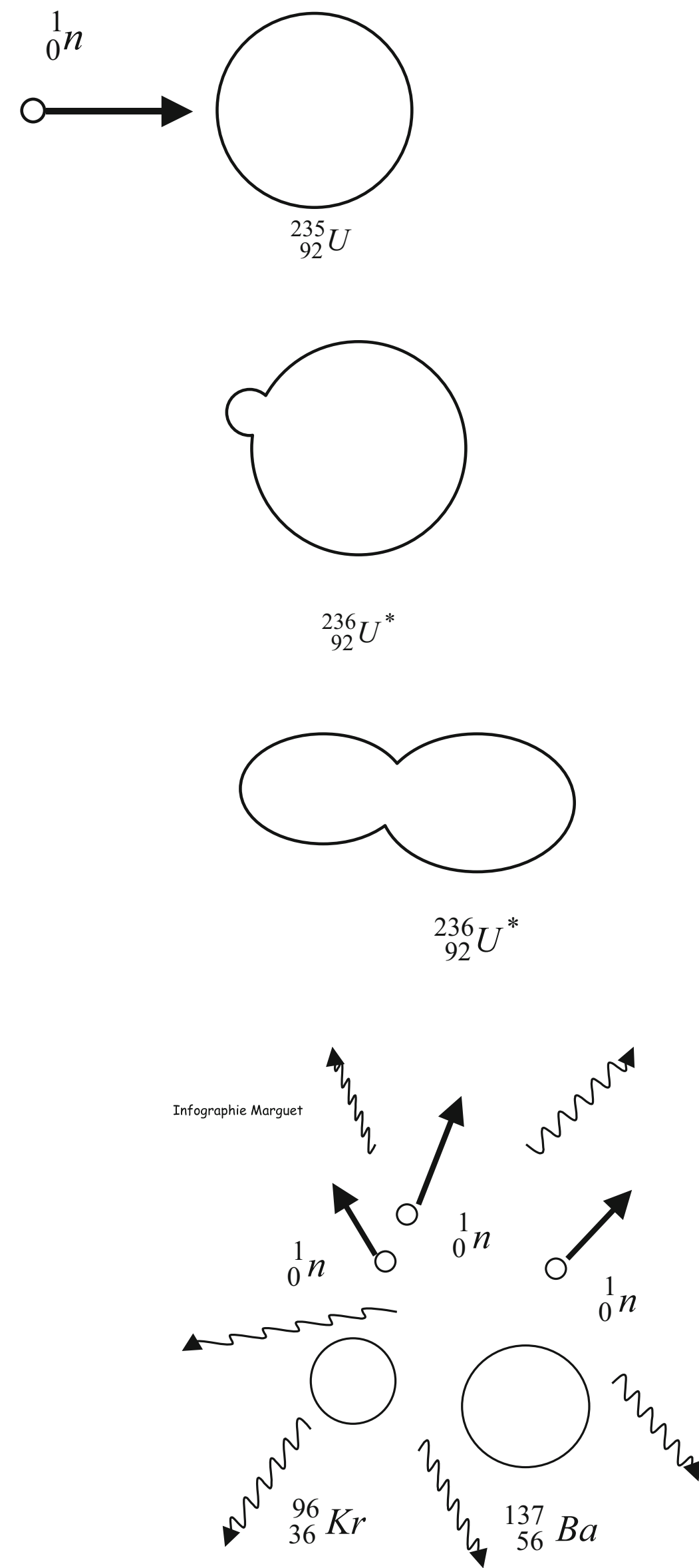
$$\Sigma = \frac{\rho}{A} N_A \sigma$$

**Sezione d'urto macroscopica**  
(probabilità di reazione per unità di lunghezza)

$1/\Sigma$  **cammino libero medio**  
*mean free path*

# Fissione nucleare

# Quanta energia viene rilasciata da un processo di fissione ?



$$\underbrace{8.6 \text{ MeV/nucleon} \times 96}_{825.6} + \underbrace{8.5 \text{ MeV/nucleon} \times 137}_{1164.5} - \underbrace{7.6 \text{ MeV/nucleon} \times 236}_{1793.6} = 196.5 \text{ MeV}$$

<b>Energia cinetica dei prodotti di fissione</b>	<b>166.2 ± 1.3 MeV</b>
Energia raggi γ immediati (prompt)	8.0 ± 0.8 MeV
Energia raggi γ ritardati (delayed)	7.2 ± 1.1 MeV
Energia raggi β	7.0 ± 0.3 MeV
Energia cinetica dei neutroni	4.8 ± 0.1 MeV
...	...

# Stima dell'energia rilasciata da un processo di fissione

Una delle caratteristiche più importanti di un combustibile è la densità d'energia, ovvero la quantità di energia immagazzinata in un dato sistema o regione dello spazio per unità di **volume** o per unità di **massa**.

	Combustibile / Processo	Densità di energia per massa (MJ/Kg)
nucleare	Fissione nucleare (dell'U 235 puro)	88.250.000
	Fusione nucleare deuterio-trizio	337.000.000
chimico	Benzina	46,9
	Gas naturale (compressato) a 200 bar	53,6
	Gasolio da riscaldamento	45,8

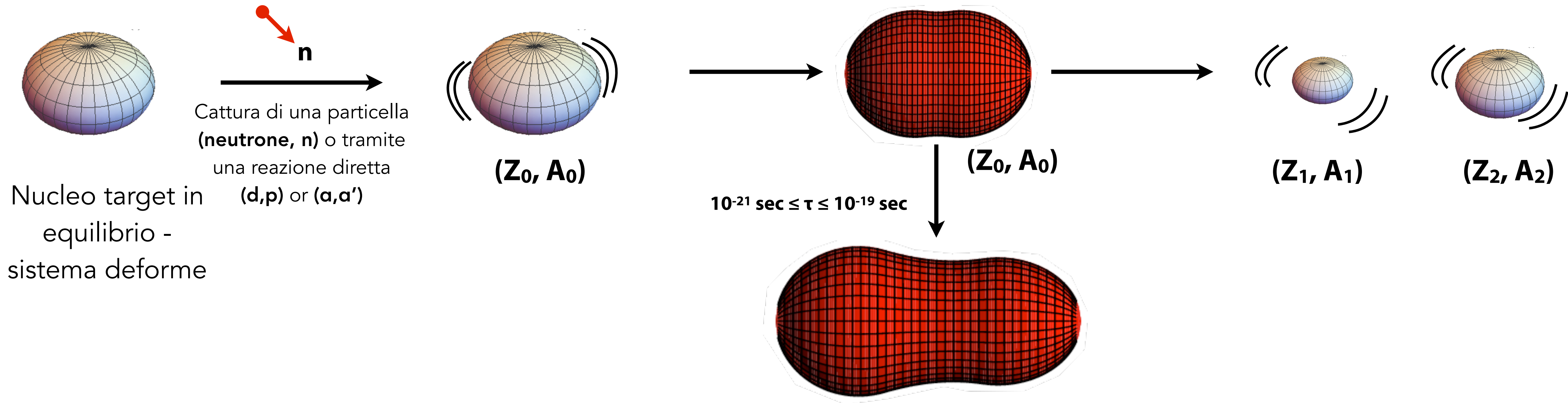
# Dinamica di un processo di fissione (I)



Nucleo eccitato dalla cattura del proiettile, creazione di uno stato metastabile

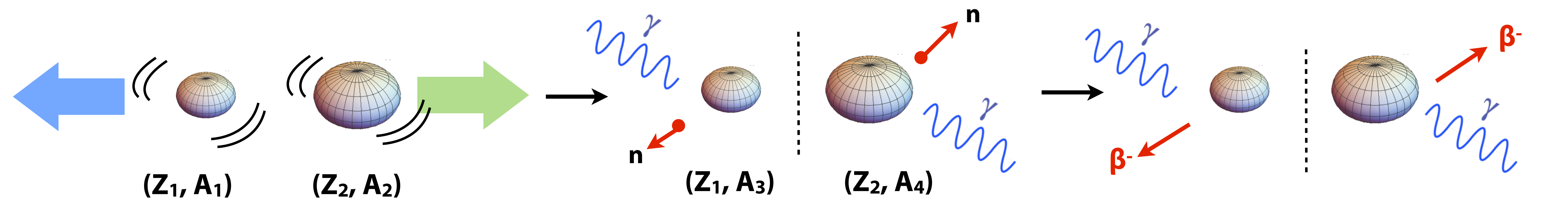
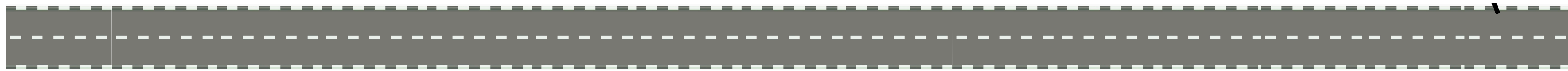
Stato transizionale con deformazione asimmetrica di massa (se il neutrone è di bassa energia)

Configurazione di fissione con frammenti deformati; energie cinetiche inizialmente piccole





# Dinamica di un processo di fissione (II)

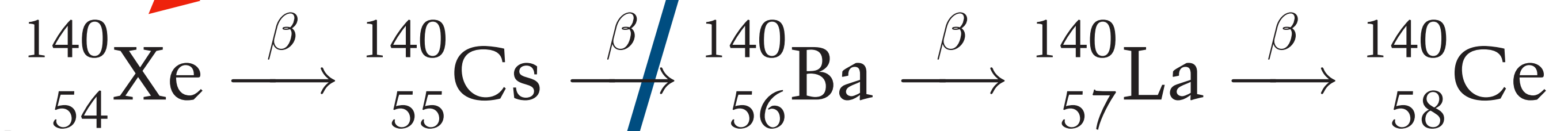
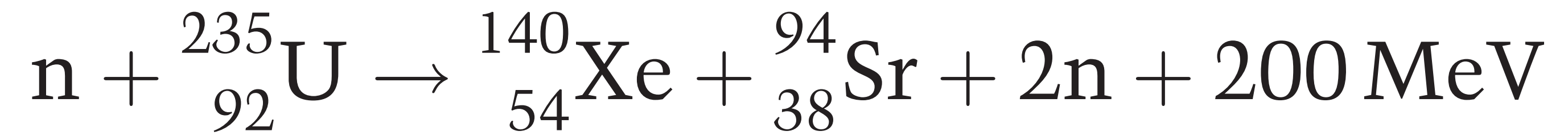
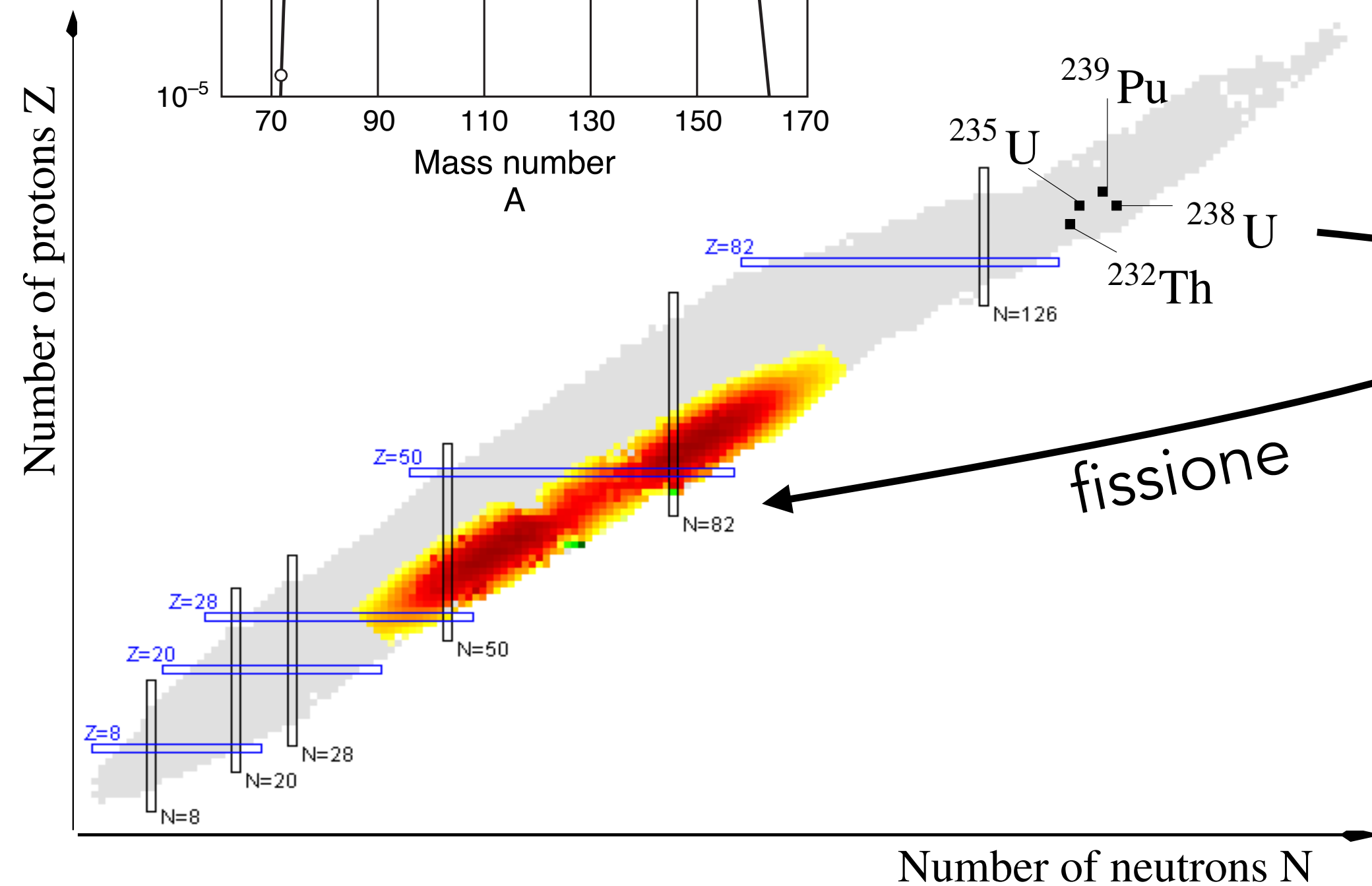
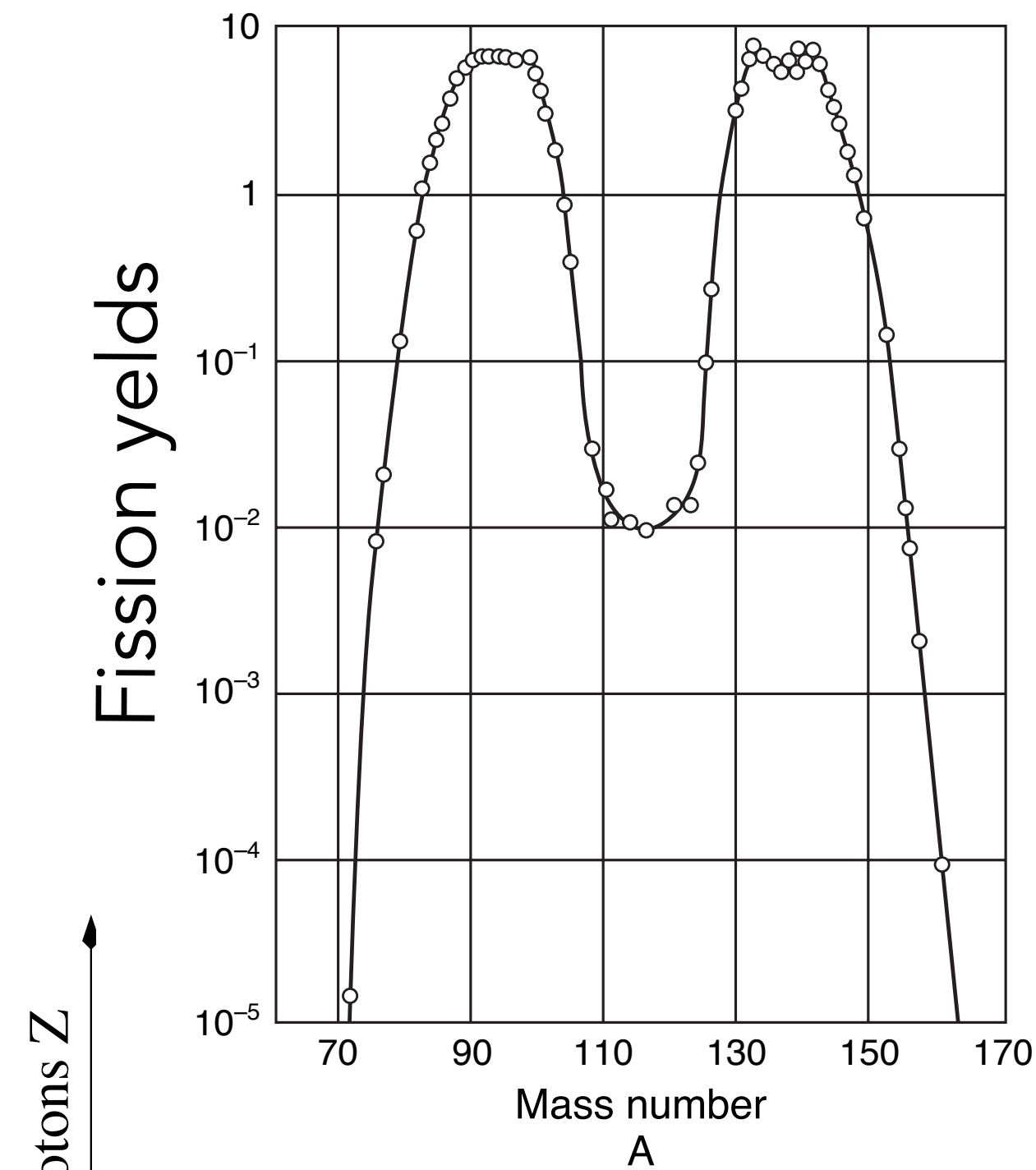


Per effetto dell'interazione coulombiana i frammenti si respingono, in circa  $10^{-20}$  sec raggiungono il **90%** della loro energia cinetica finale

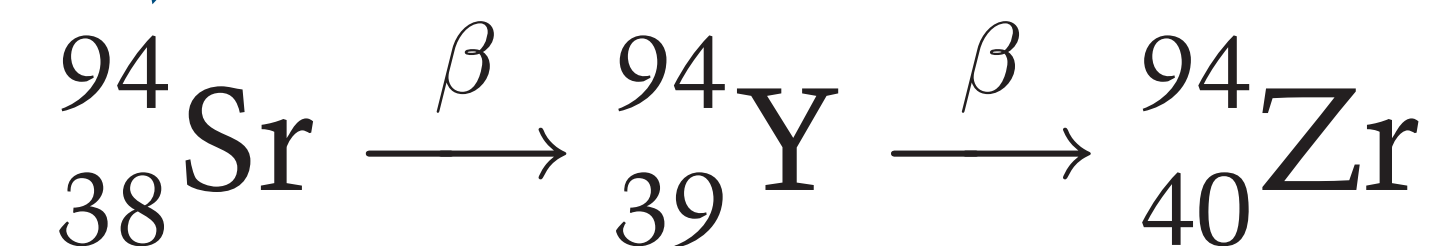
Tempo di emissione dei **neutroni veloci** (prompt neutrons)  $10^{-18}$  sec -  $10^{-16}$  sec.  
Emissione dei raggi  $\gamma$  in tempi dell'ordine  $\sim 10^{-14}$  sec -  $10^{-12}$  sec

Decadimento radioattivo; occasionalmente possono essere popolati nuclei instabili per emissione diretta di **neutroni lenti** (delayed neutrons)

# Frammenti di fissione

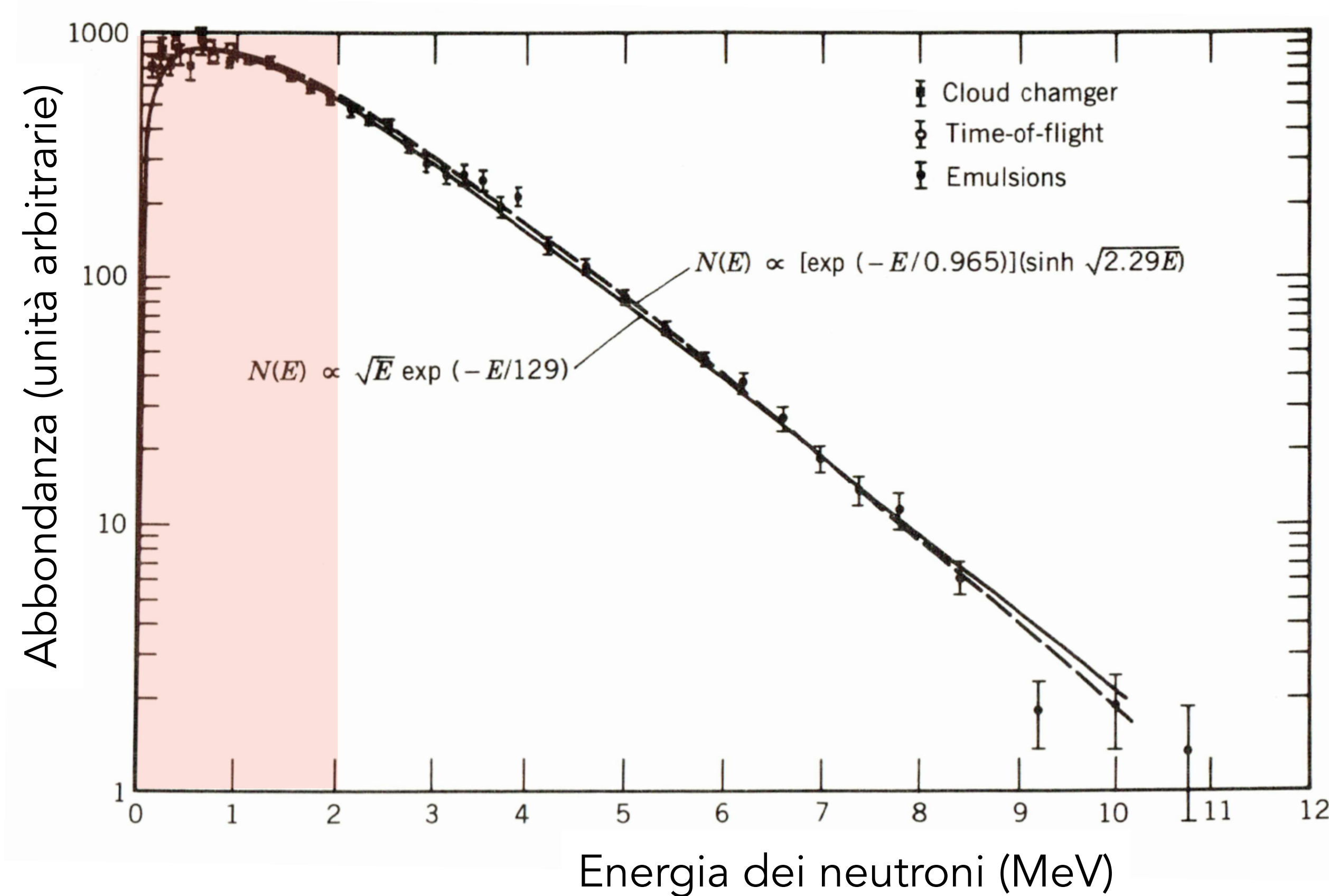
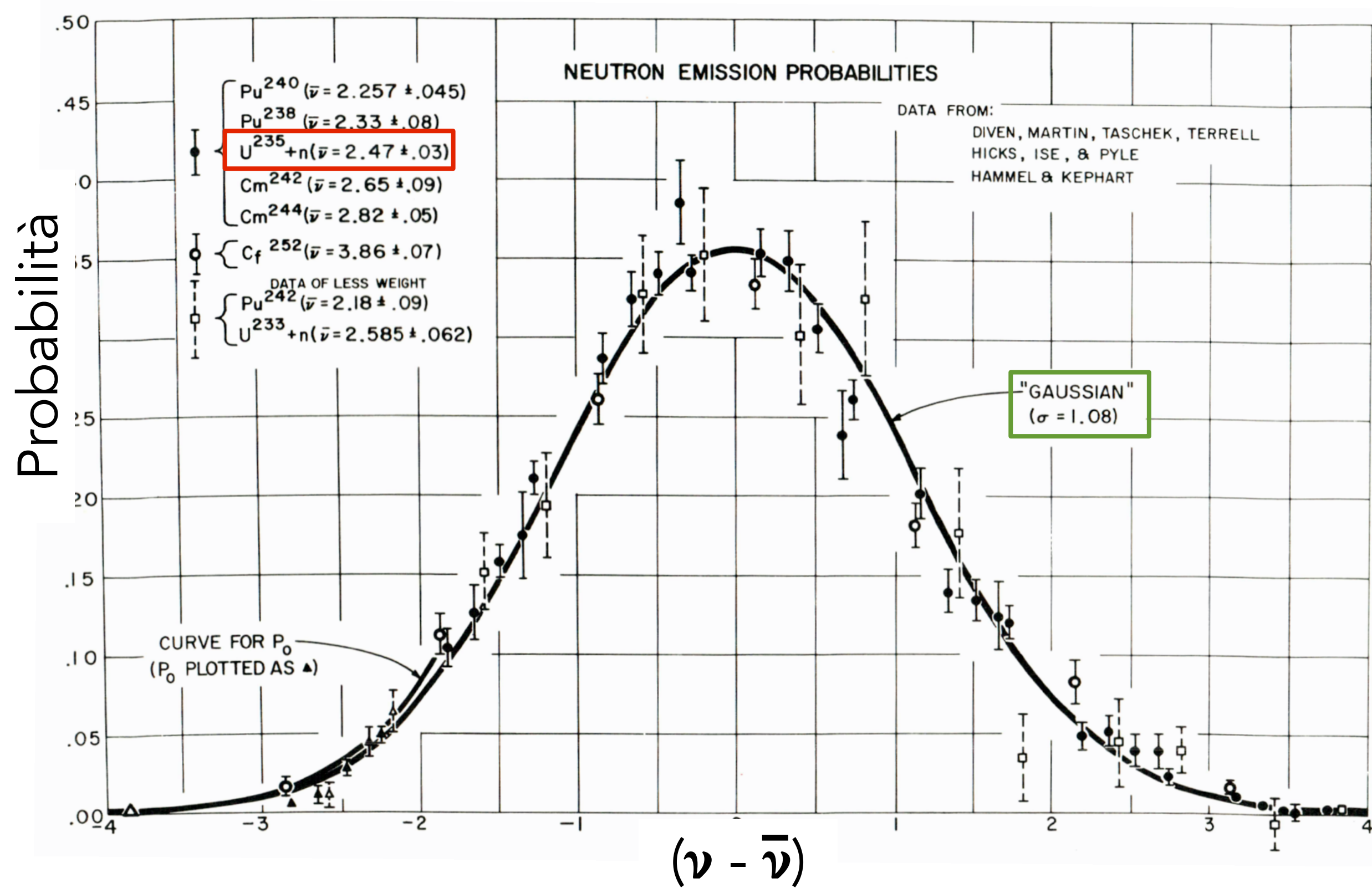


grande energia cinetica → calore  
radioattivi → no dispersione



Il processo di fissione origina coppie di frammenti distribuiti *asimmetricamente* rispetto ad A, con due picchi a  $A \approx 95$  e  $A \approx 140$

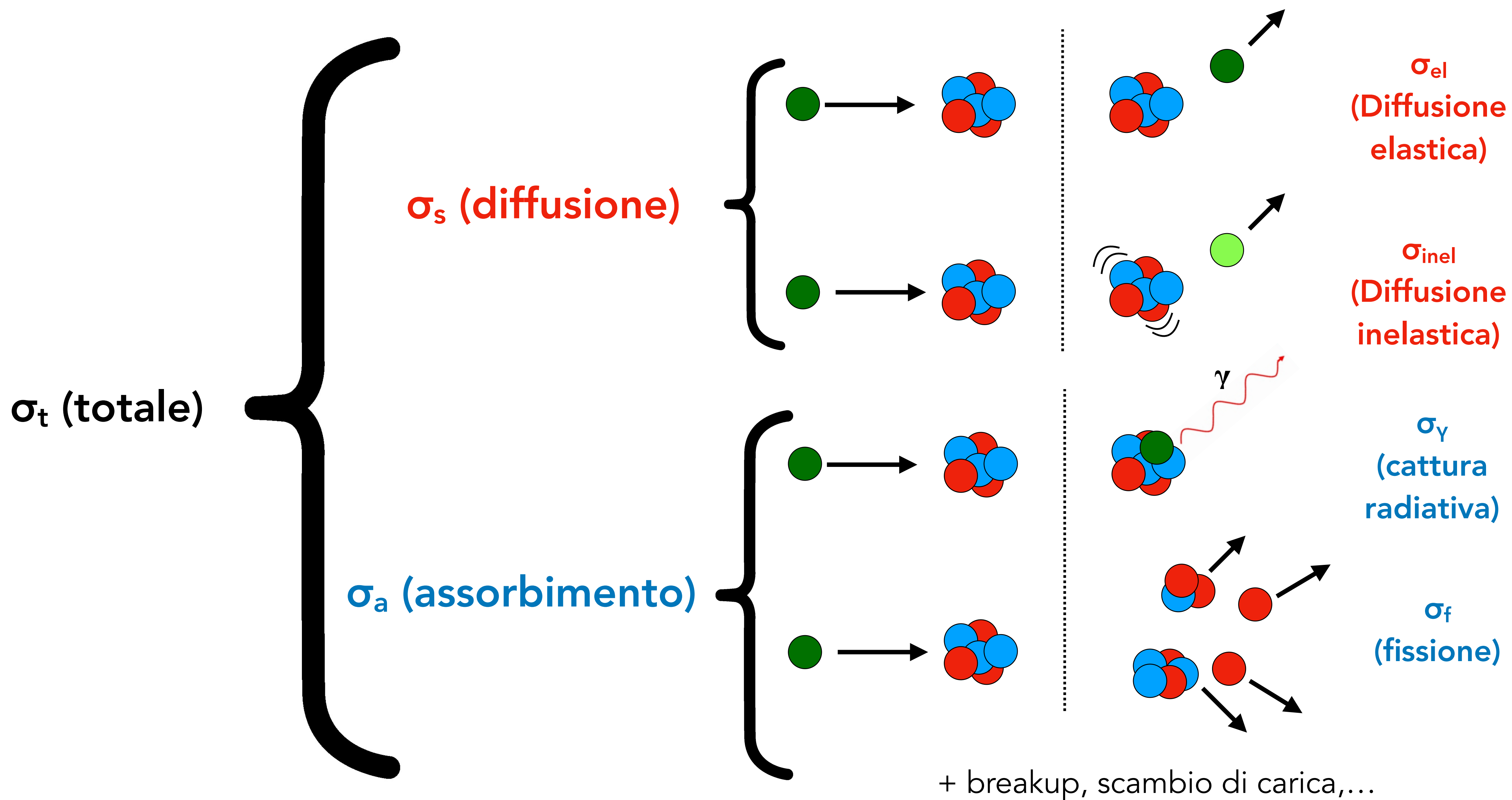
# Neutroni da fissione: quanti sono e che energia hanno?



⇒ Lo spettro di emissione è gaussiano con una deviazione standard quasi indipendente dal nucleo genitore

⇒ I neutroni sono emessi con energie dell'ordine dei MeV, parliamo di **neutroni veloci** (fast neutrons)

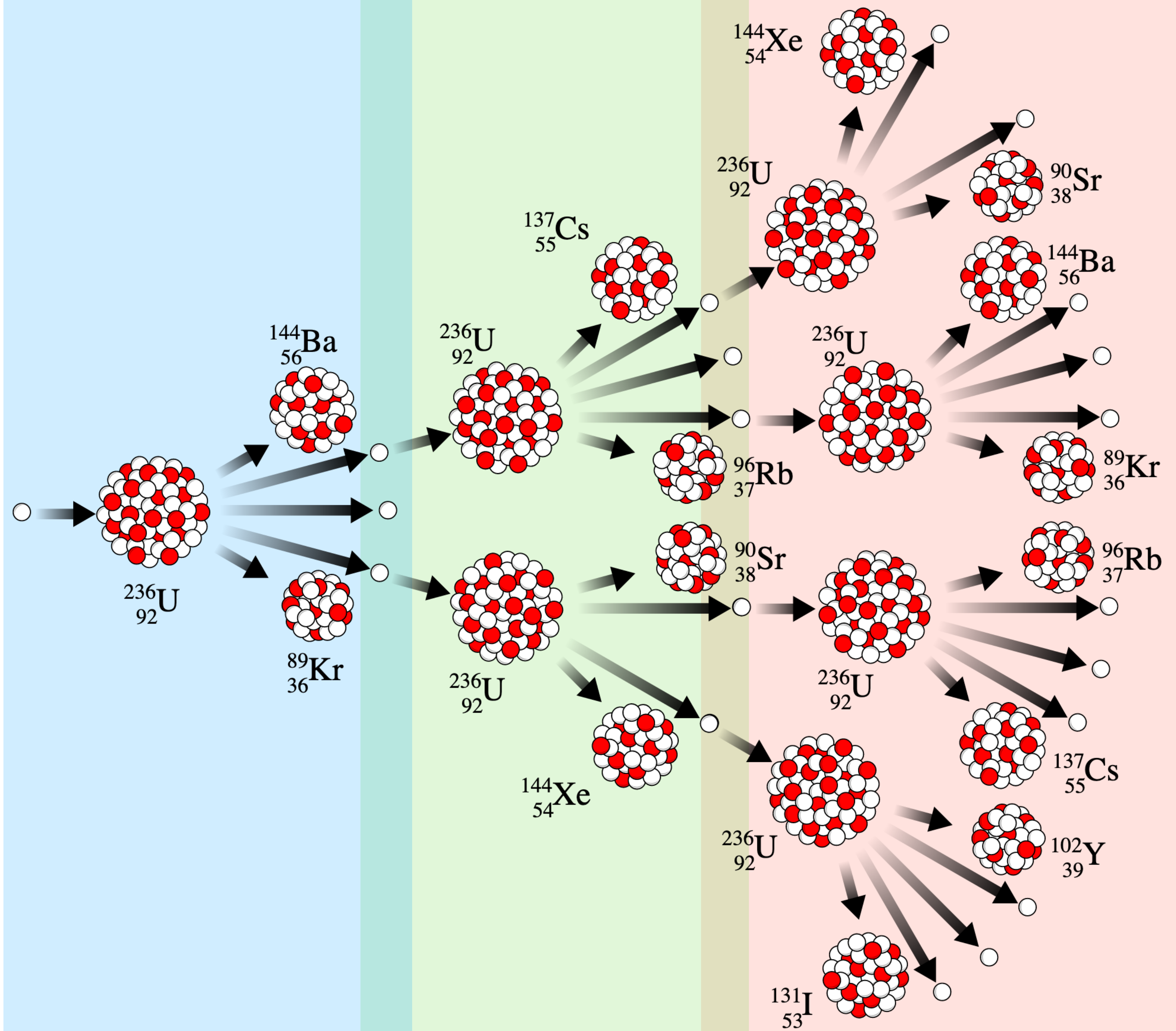
⇒ La maggioranza dei neutroni sono emessi con energie tra 1 e 2 MeV



# Reazione a catena

L'idea alla base della produzione di energia nucleare si basa sul concetto di reazione a catena (controllata!).

Ad ogni ciclo di fissione alcuni dei neutroni prodotti inducono la fissione su altri nuclei di uranio

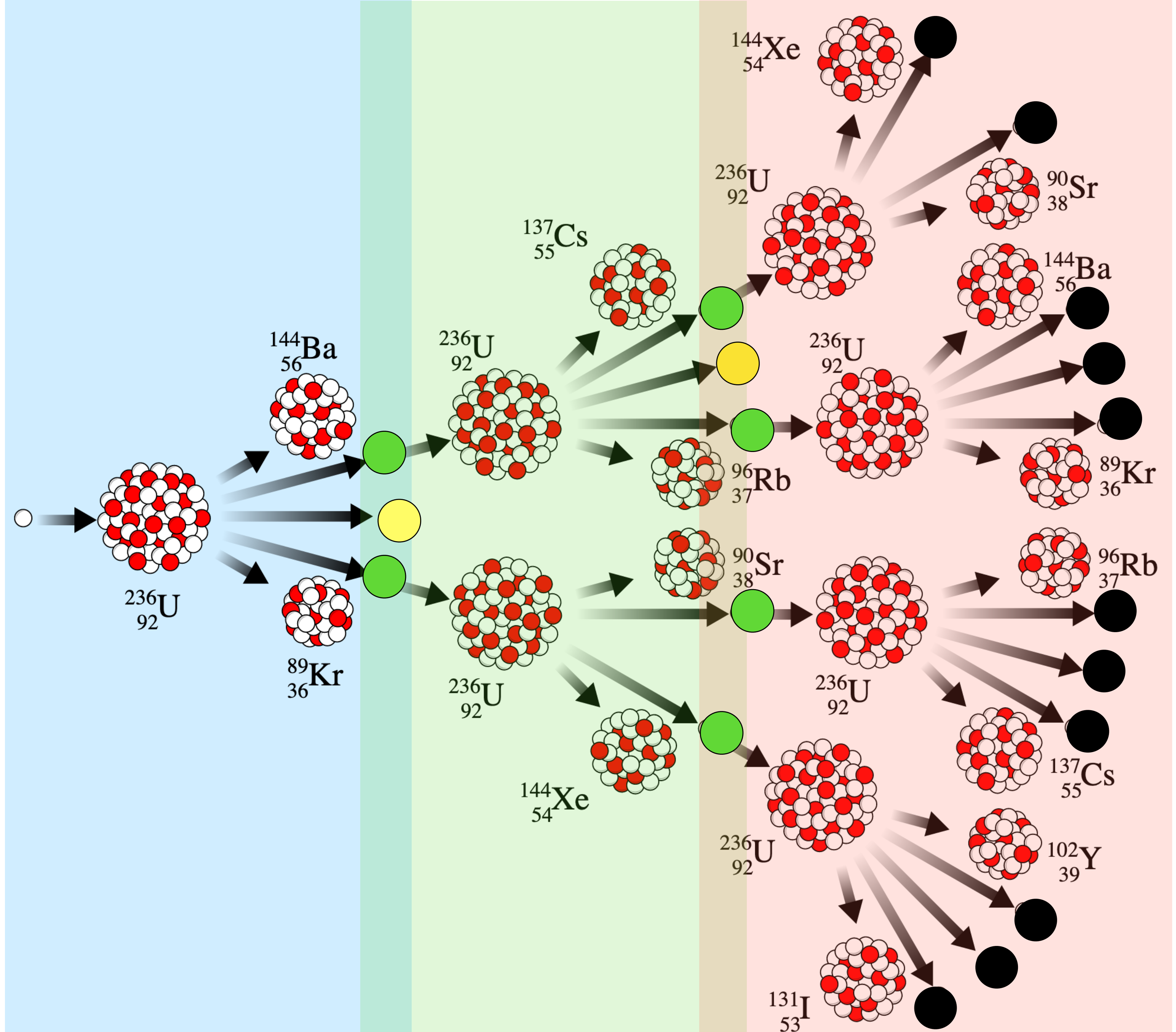


Copyrights: Wikipedia

# Reazione a catena

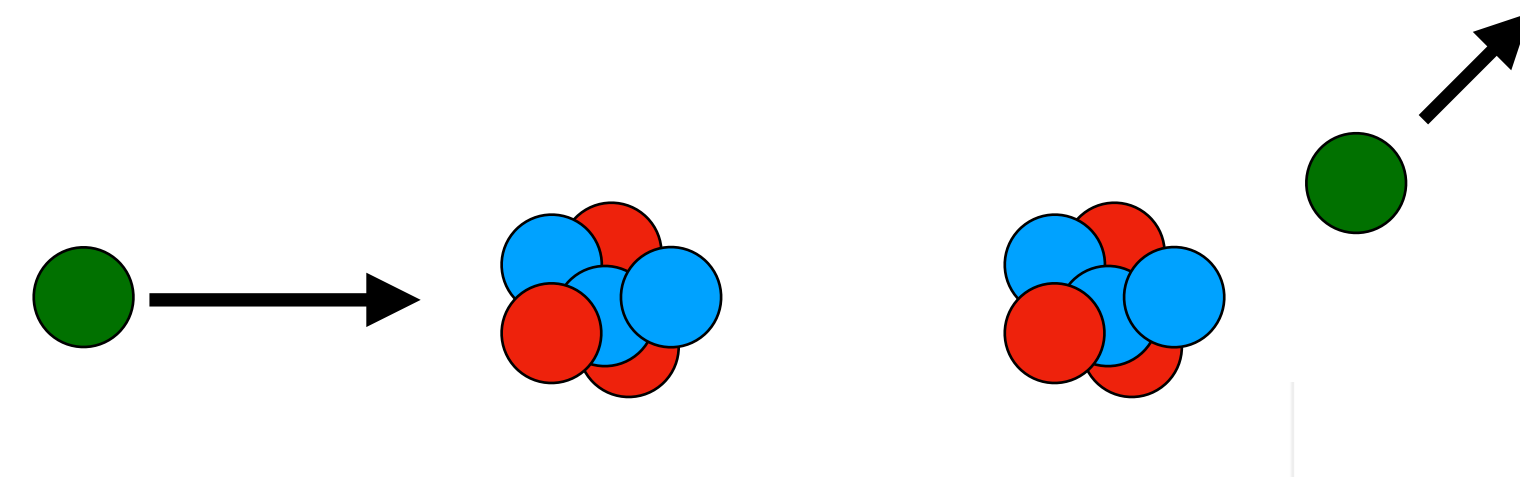
Non tutti i neutroni sono utilizzabili, alcuni vanno persi (●). Alcuni vanno persi perché ci sono altre reazioni in competizione, altri perché assorbiti dagli elementi del reattore.

La sezione d'urto di reazione ci fornisce tutte le informazioni di cui abbiamo bisogno



# Sezione d'urto elastica indotta da neutroni

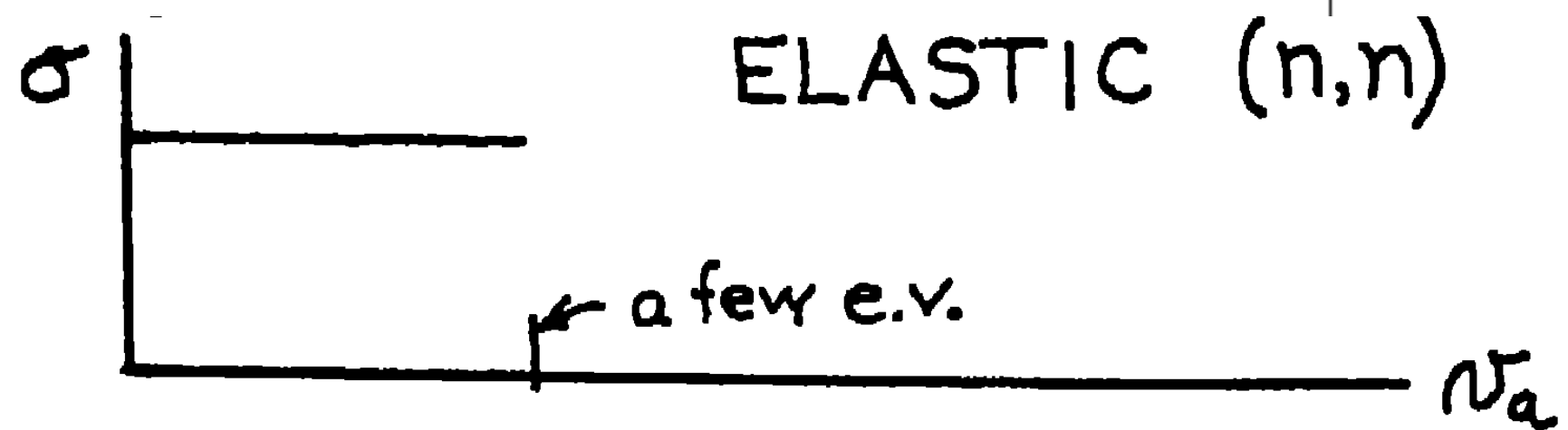
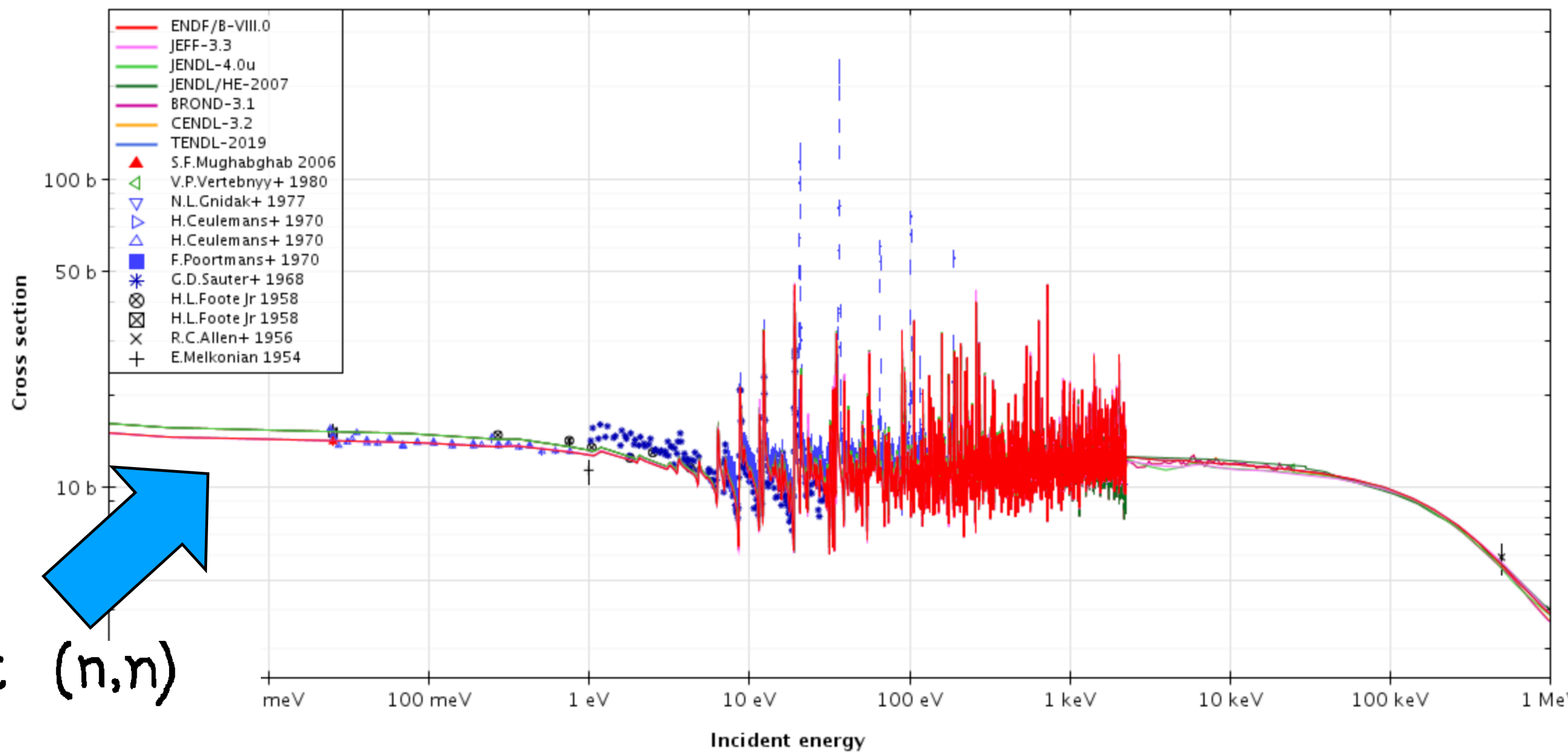
$$\sigma_{A \rightarrow B} = \frac{1}{\pi \hbar^4} |M_{fi}|^2 \frac{p_b^2}{v_a v_b} (2I_b + 1)(2I_B + 1)$$



L'energia cinetica del proiettile rimane invariata

$$v_a = v_b$$

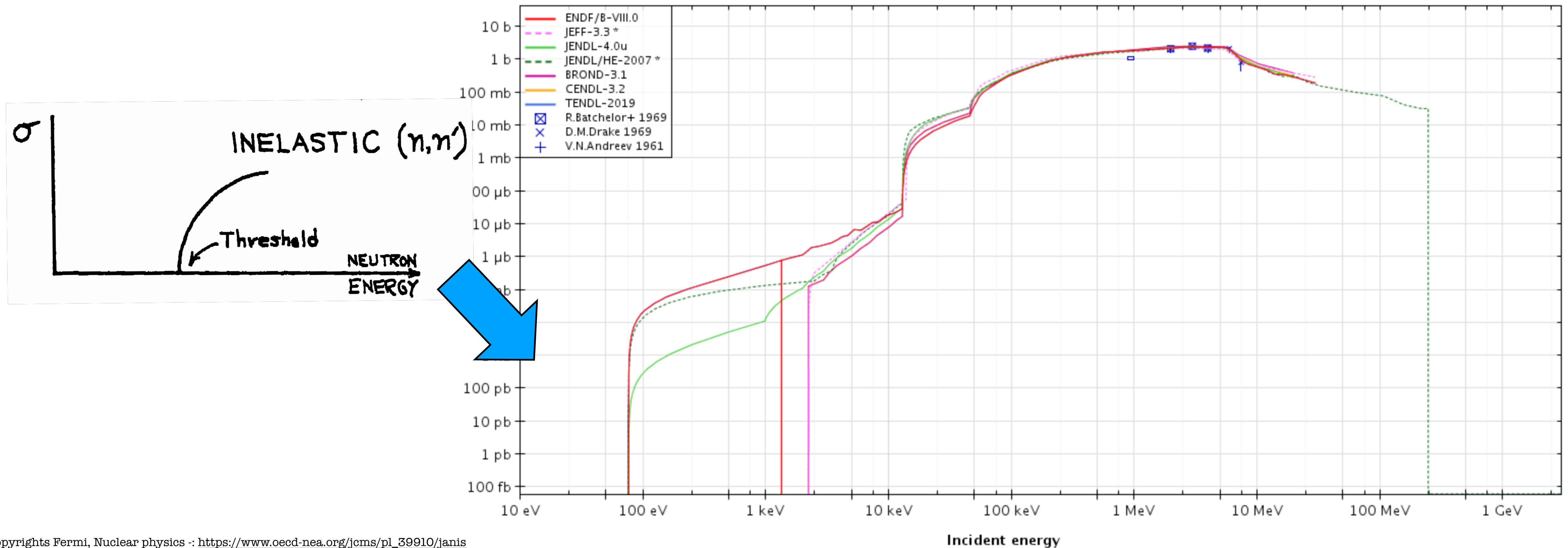
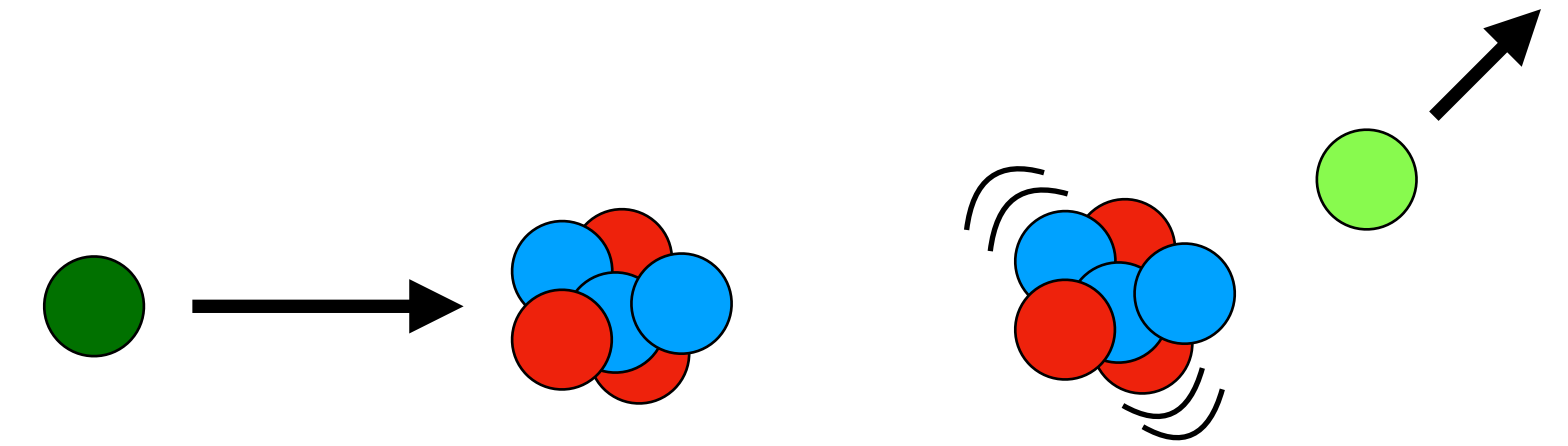
$\sigma$  è costante a basse energie



# Sezione d'urto inelastica indotta da neutroni

$$\sigma_{A \rightarrow B} = \frac{1}{\pi \hbar^4} |M_{fi}|^2 \frac{p_b^2}{v_a v_b} (2I_b + 1)(2I_B + 1)$$

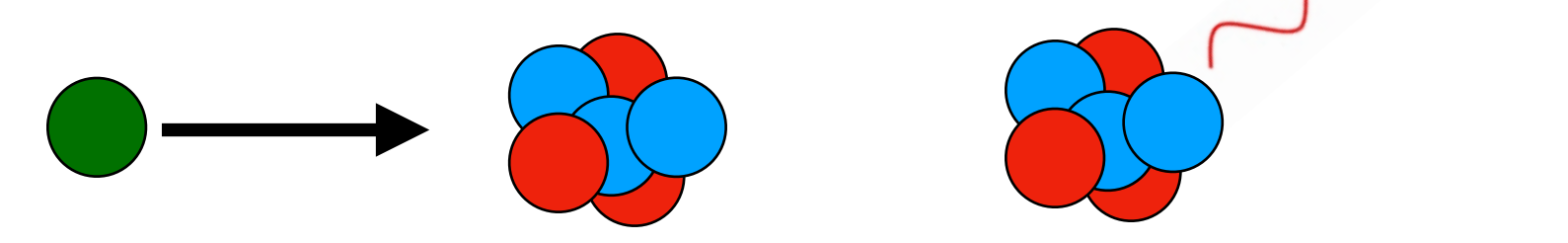
$$p_{n'}^2 / v_n v_{n'} \propto v_{n'} \propto \sqrt{E} \text{ above threshold} \quad \text{U235 (n,n')}$$





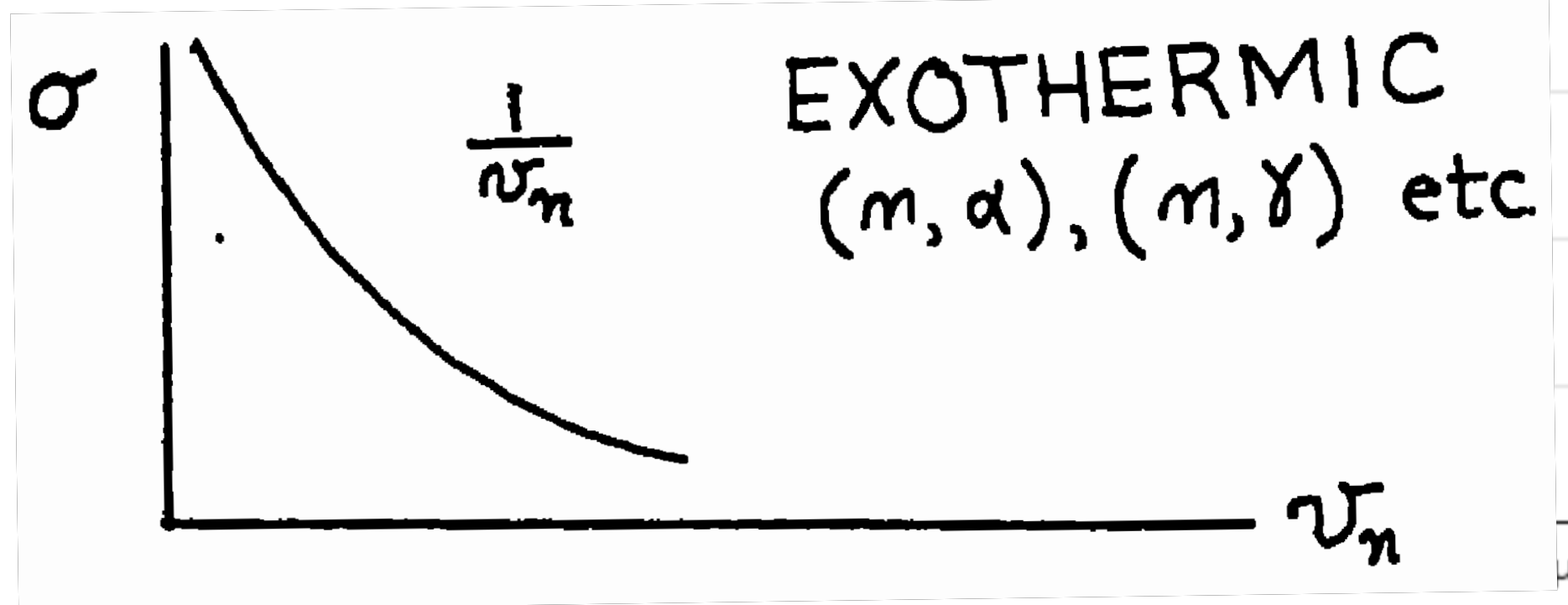
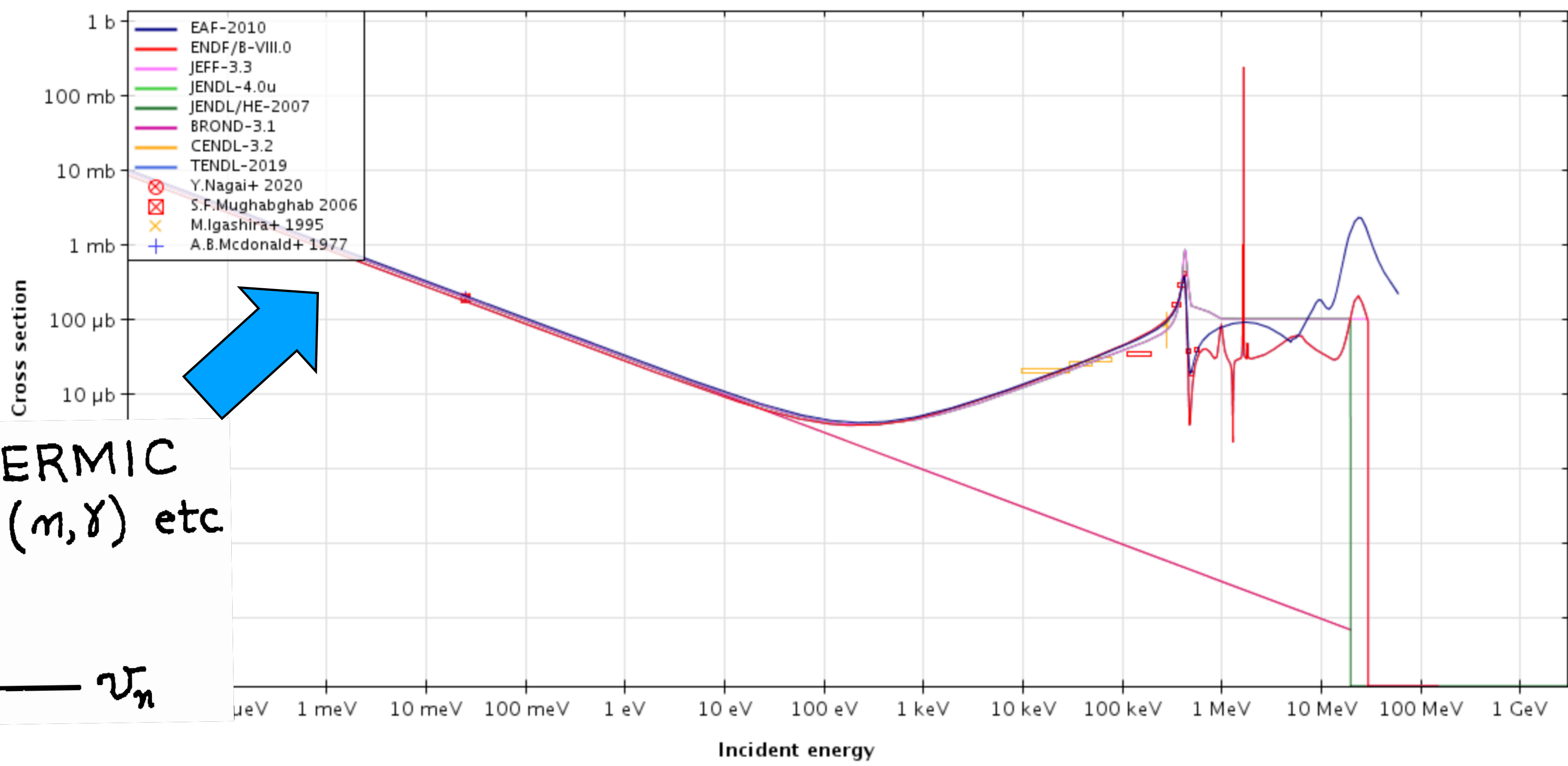
# Sezione d'urto (n,γ)

$$\sigma_{A \rightarrow B} = \frac{1}{\pi \hbar^4} |M_{fi}|^2 \frac{p_b^2}{v_a v_b} (2I_b + 1)(2I_B + 1)$$



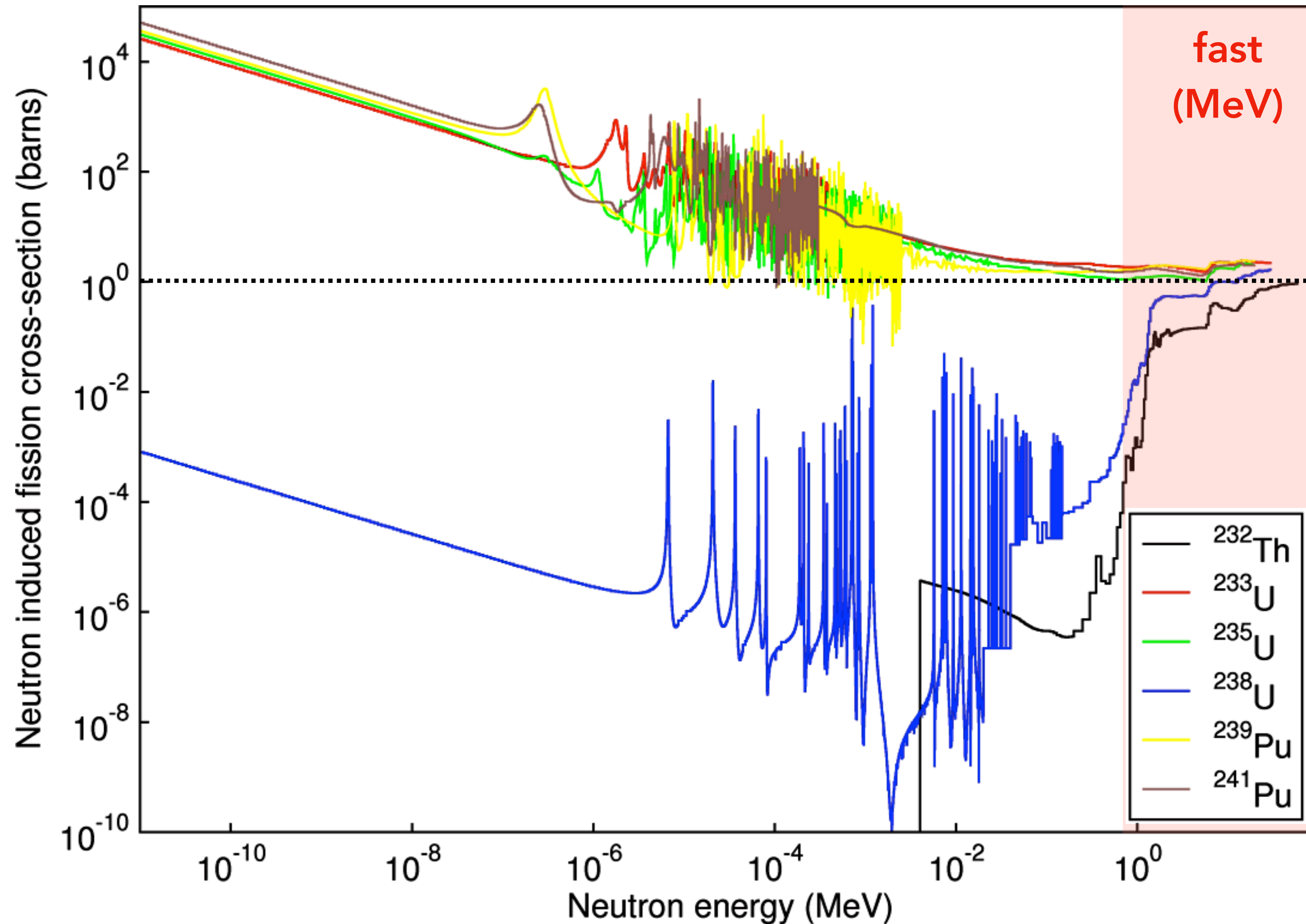
O16 (n,γ) or O17 production

$$p_b^2 / v_a v_b \propto 1 / v_a$$



Copyrights Fermi, Nuclear physics - : [https://www.oecd-nea.org/jcms/pl\\_39910/janis](https://www.oecd-nea.org/jcms/pl_39910/janis)

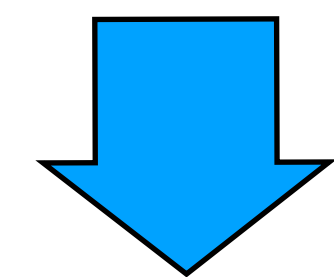
# Sezione d'urto per fissione indotta da neutroni



## Regione dei neutroni veloci.

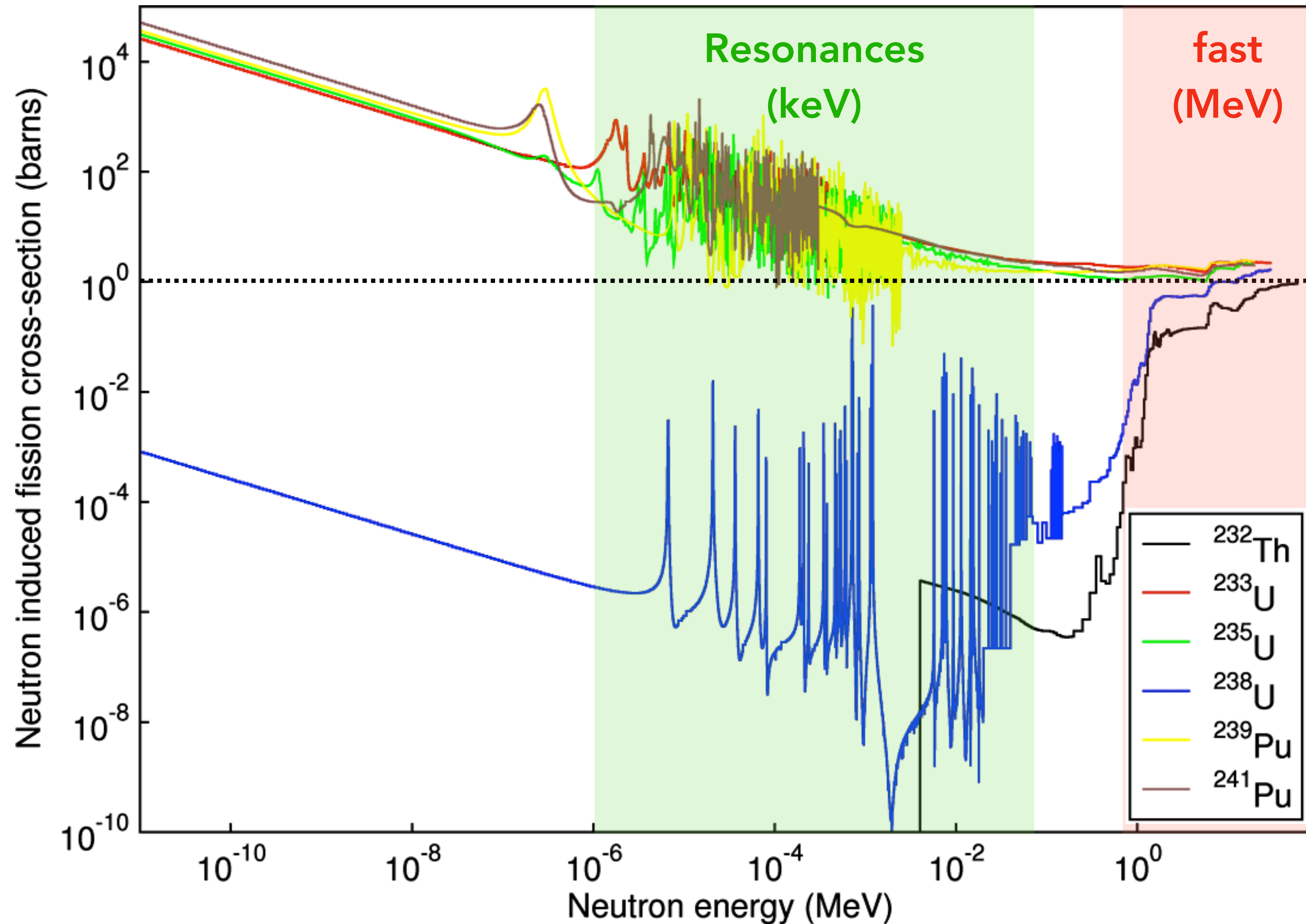
All'energia con cui di solito i neutroni vengono emessi le sezioni d'urto non sono particolarmente alte ( $\sim$  barn).

Se pensiamo di rallentarli rendiamo il processo molto più efficiente (più probabile)



**moderazione dei neutroni**

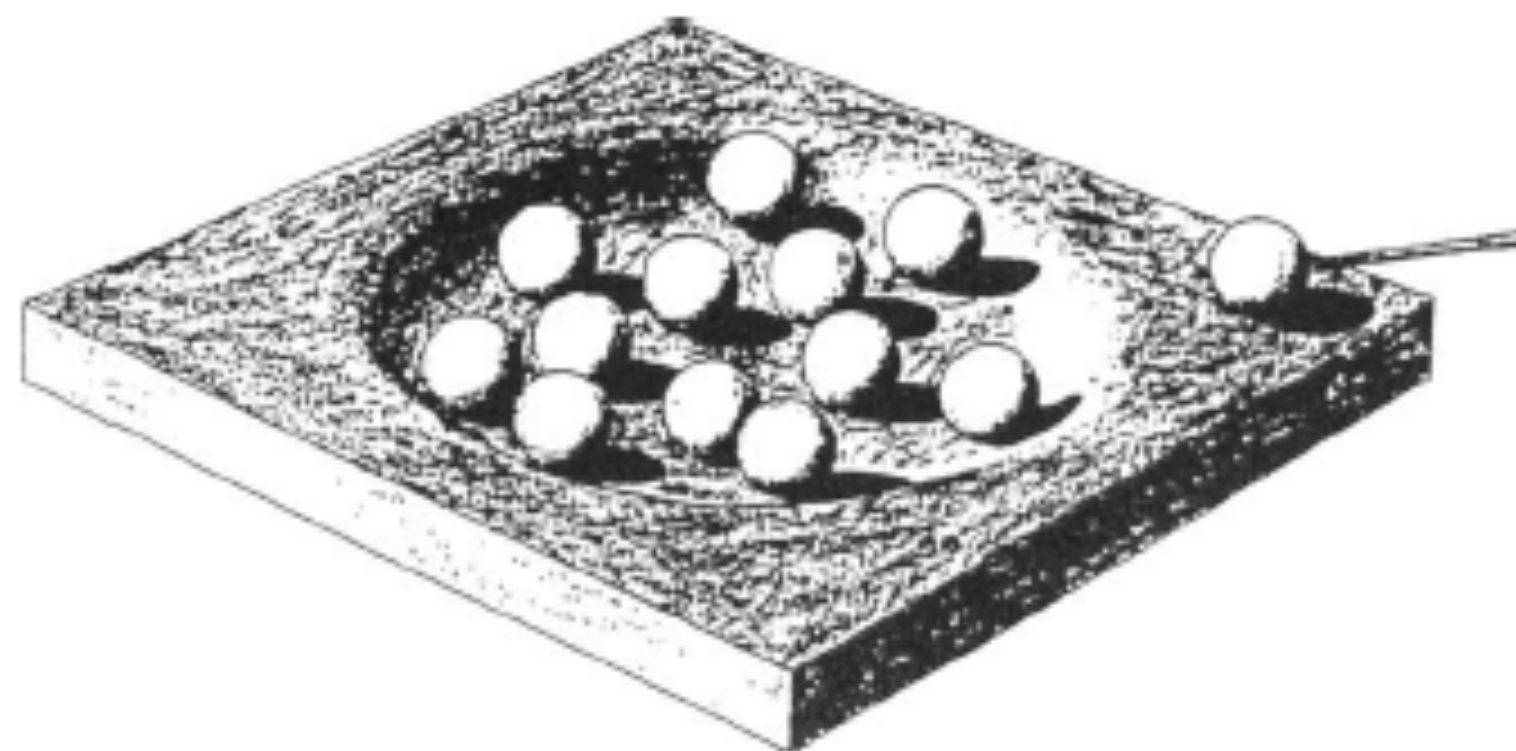
# Sezione d'urto per fissione indotta da neutroni



Diminuendo l'energia dei neutroni incontriamo la regione delle **risonanze**.

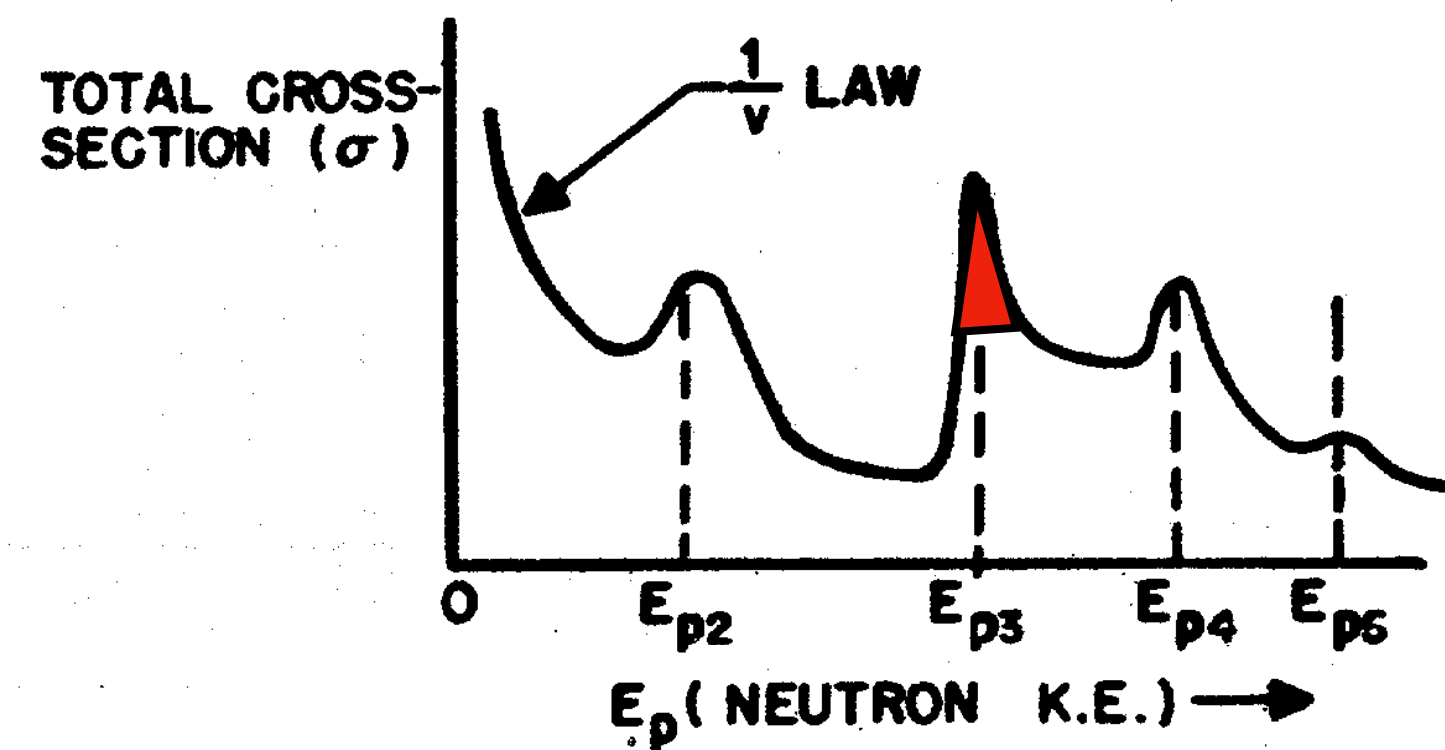
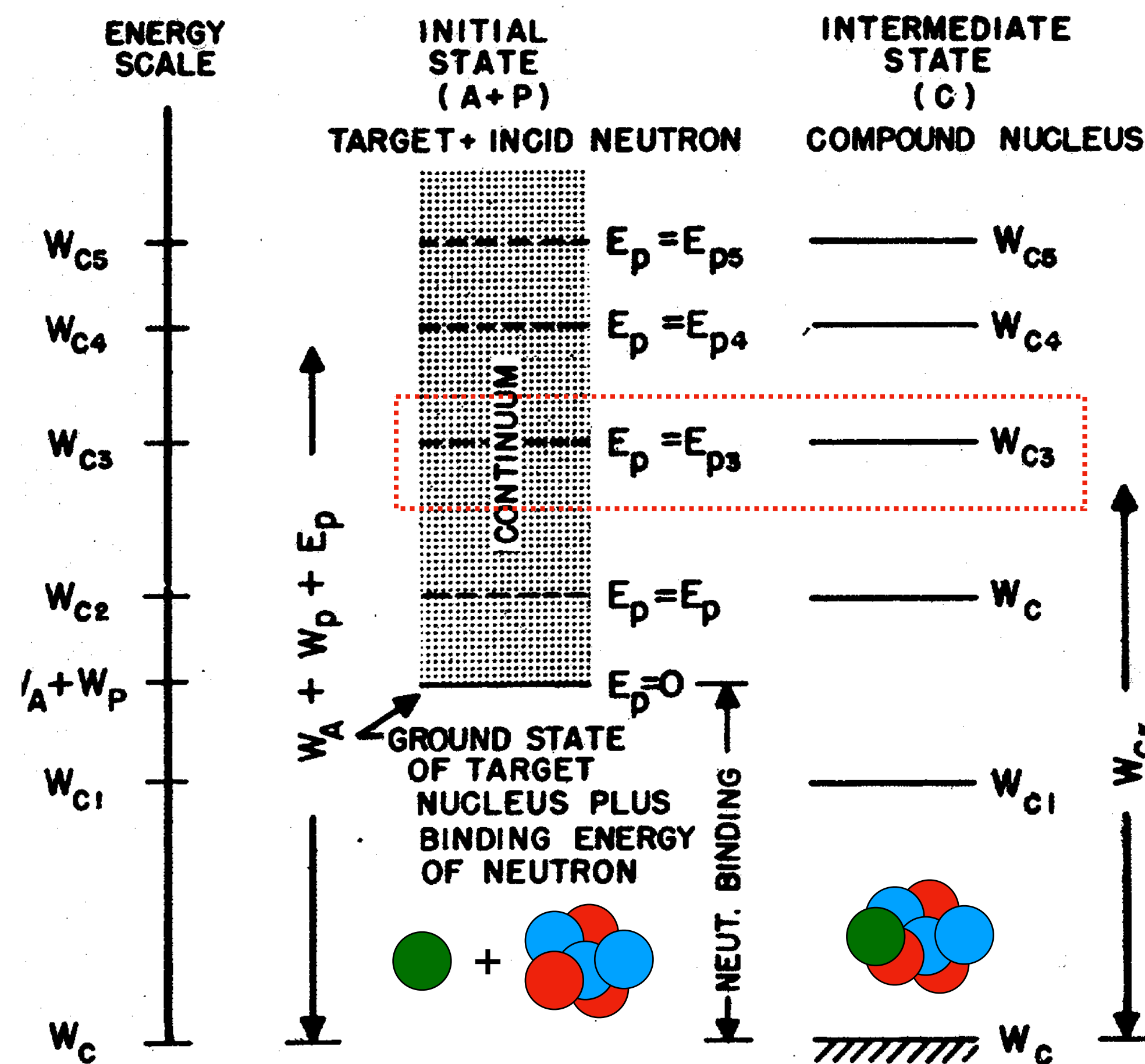
**Regione delle risonanze**

Alcuni elementi ( $^{238}\text{U}$ ) praticamente non sono più utilizzabili



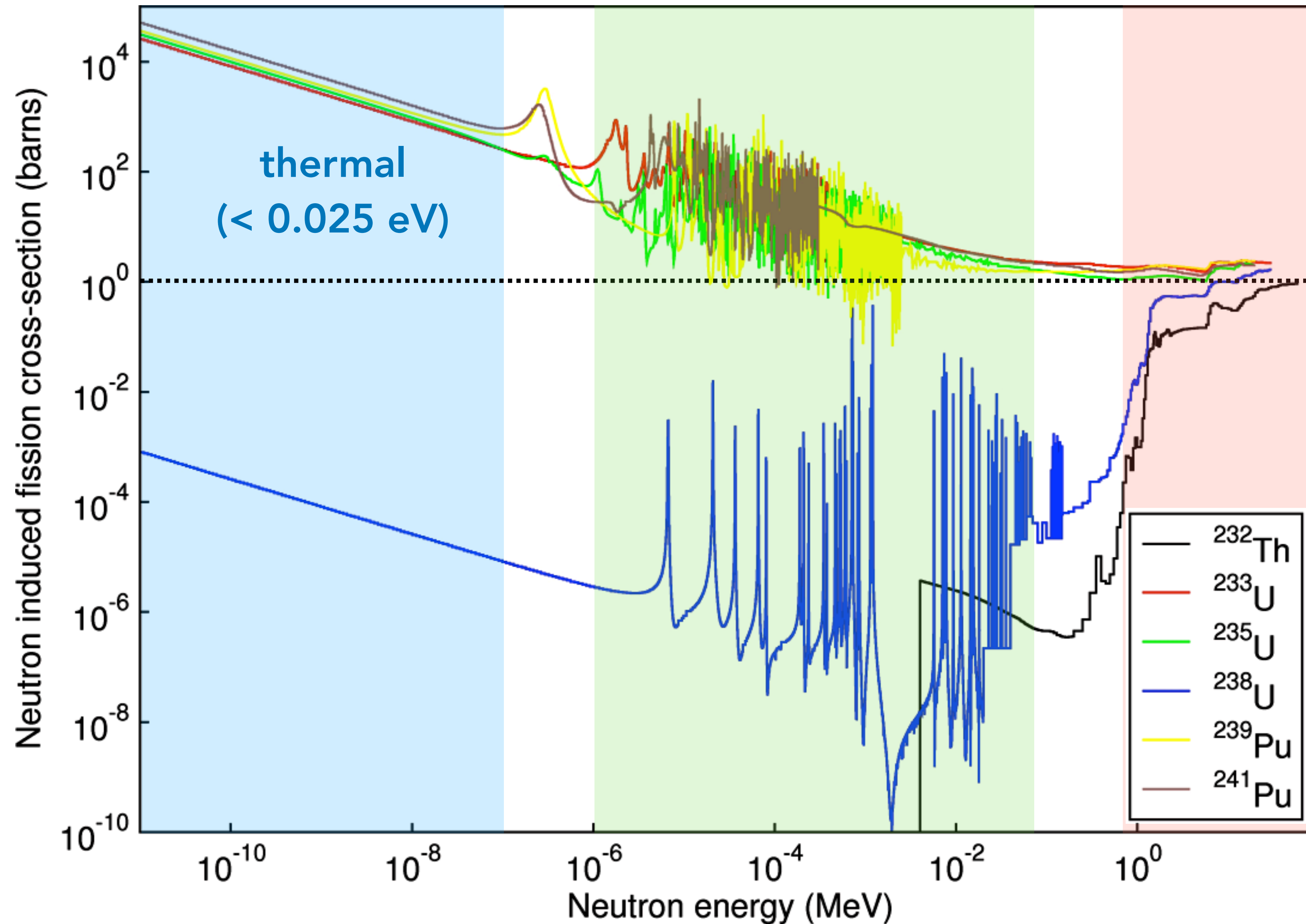
Le sezioni d'urto dipendono dai possibili stati del nucleo composto intermedio.

- Osserviamo picchi in  $\sigma$  tutte le volte in cui la somma dell'energia cinetica e dell'energia di legame della particella incidente è uguale (o quasi uguale) all'energia di un qualche stato eccitato del nucleo composto.
- A basse energie non osserviamo risonanze ma in generale la legge  $1/v$  dove  $v$  è la velocità della particella incidente



Copyrights: Fermi, Nuclear physics - N. Bohr, Nature, 137, 344 (1936)

# Sezione d'urto per fissione indotta da neutroni



## Regione dei neutroni termici.

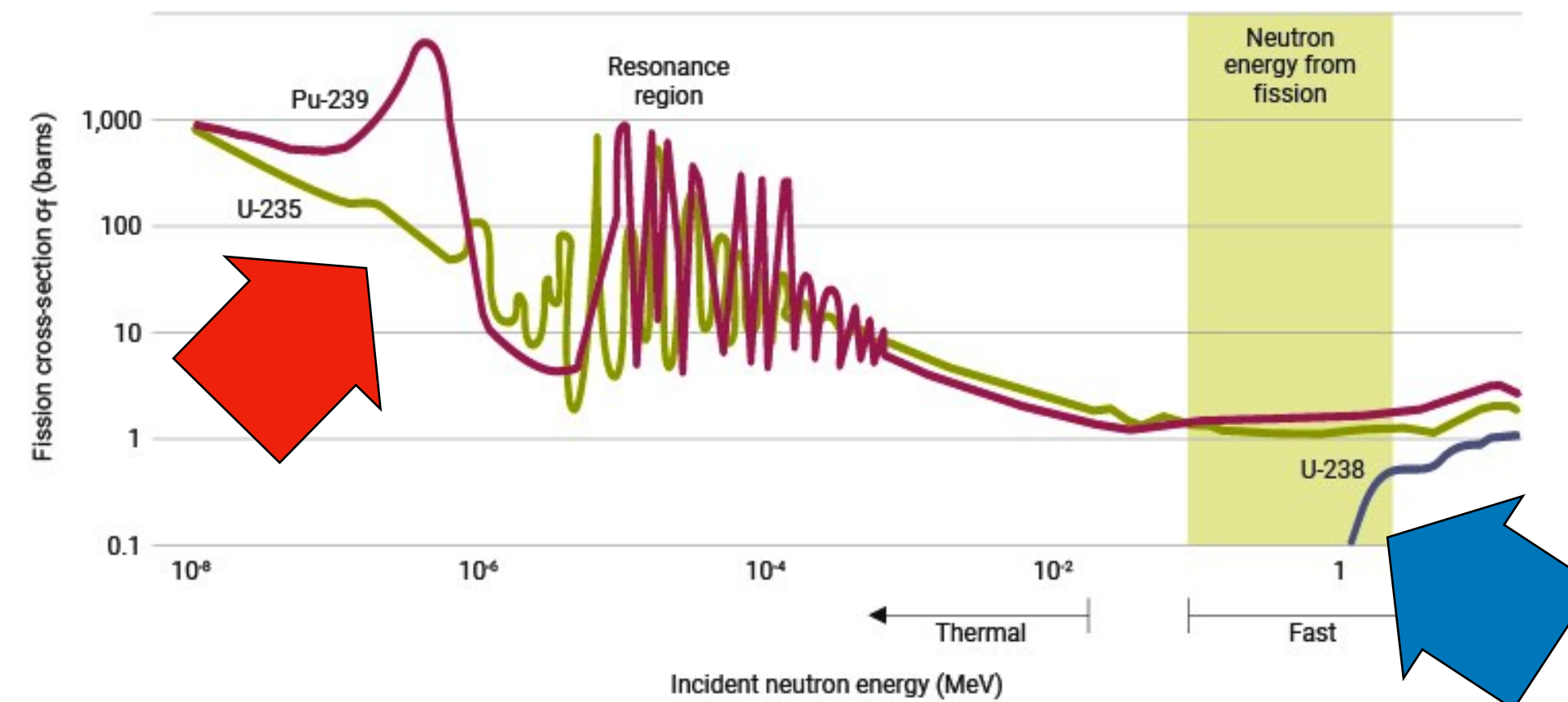
La sezione d'urto è massima e solitamente dominante rispetto ad altri canali di reazione.

Tutti (o quasi) i reattori commerciali lavorano nello spettro termico dei neutroni

# Elementi fissili, fissionabili e fertili

**Elementi Fissili** – possono fissionare con neutroni di qualsiasi energia, anche prossima alla zero, e sono capaci di sostenere una reazione a catena

$^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$

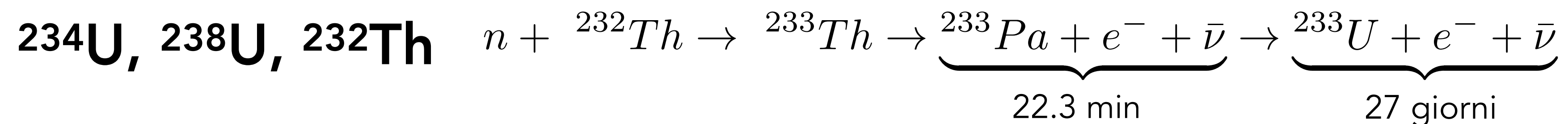


Copyrights: <https://world-nuclear.org/>

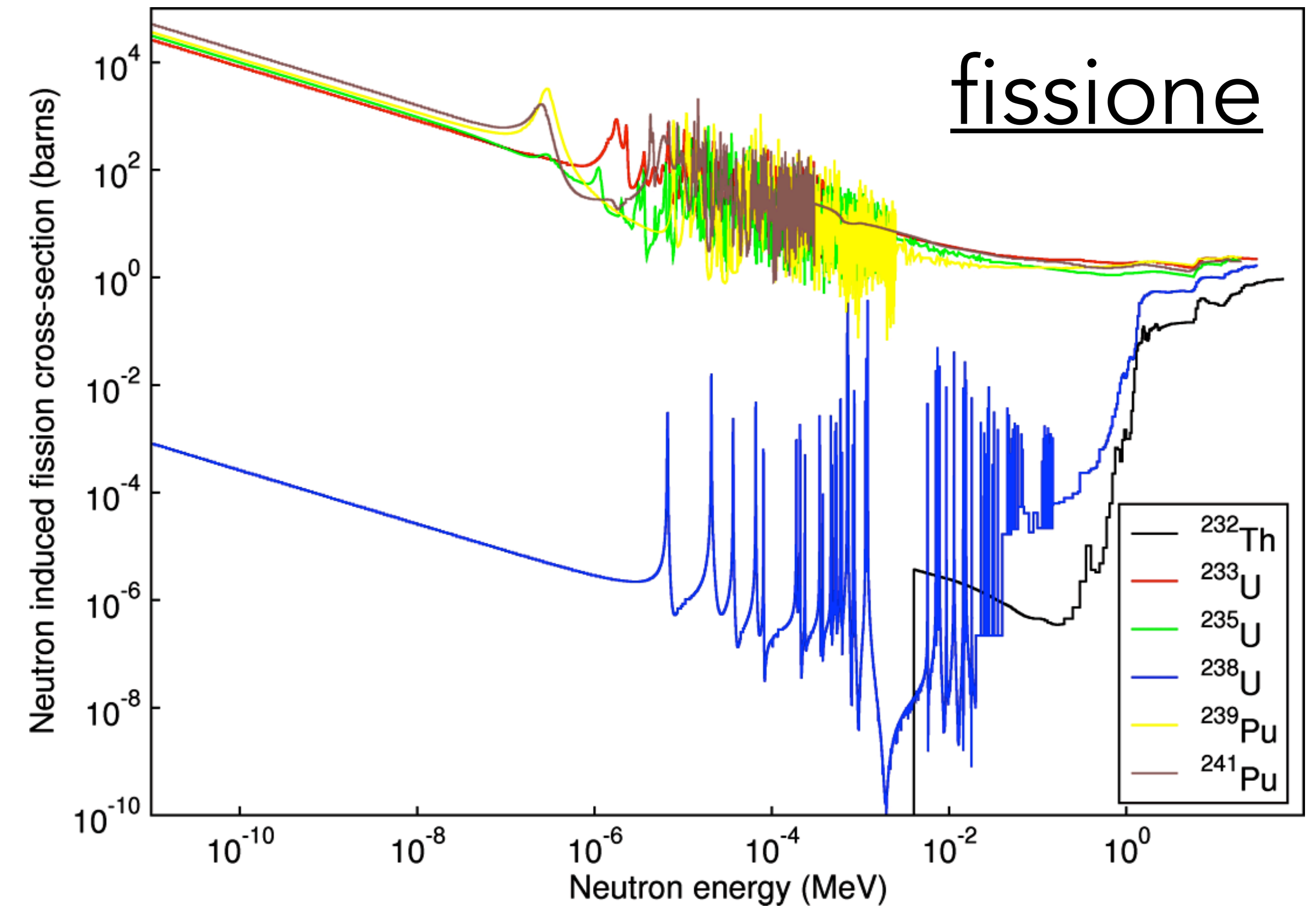
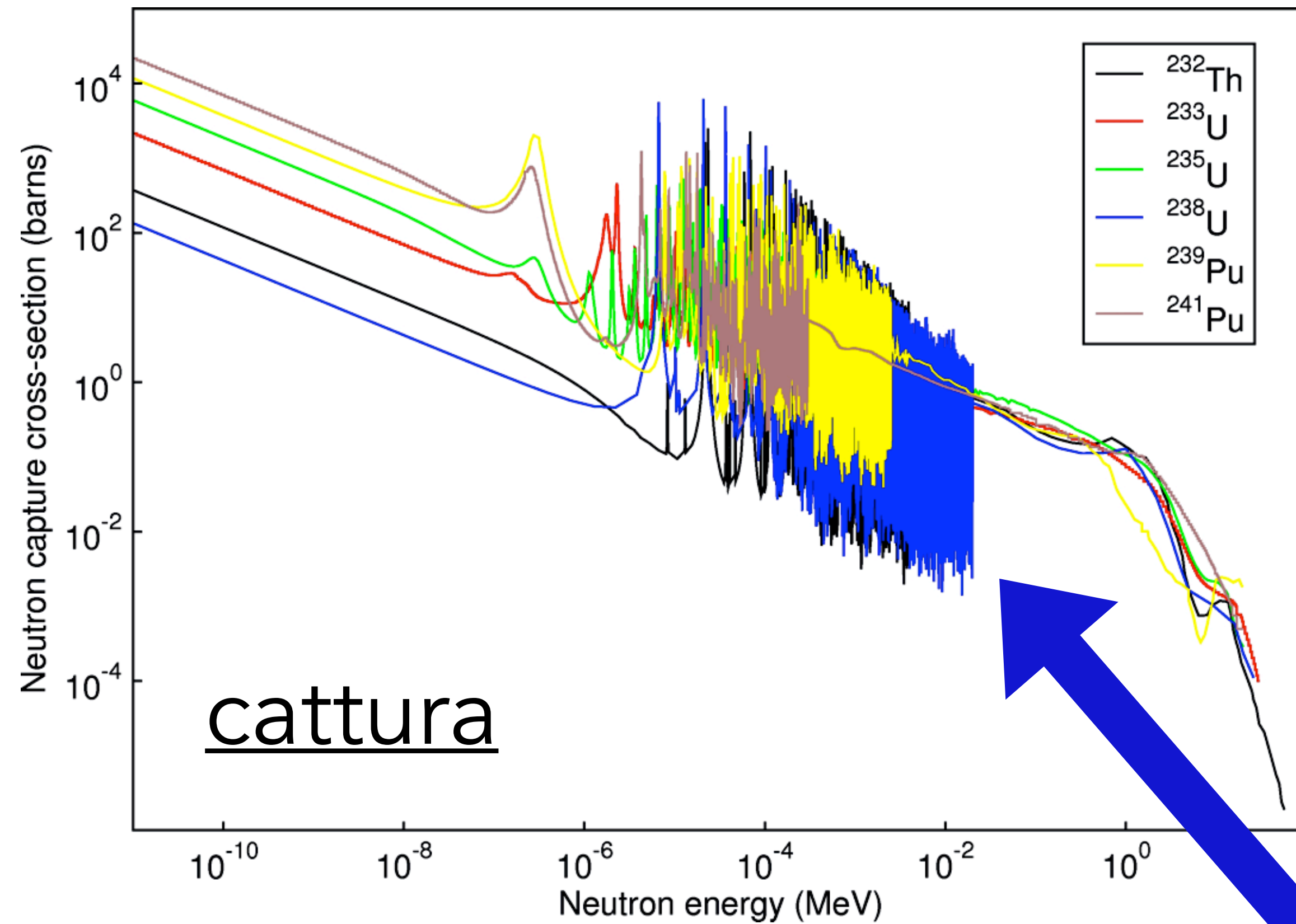
**Elementi fissionabili** – possono fissionare solo con neutroni di energia  $\sim 1\text{-}2\text{ MeV}$  sopra una determinata soglia energetica (non possono sostenere da soli una reazione a catena)

$^{238}\text{U}$ ,  $^{232}\text{Th}$

**Elementi fertili** – capaci di assorbire neutroni per generare materiale "fissile"



# La sezione d'urto di fissione può avere reazioni in competizione

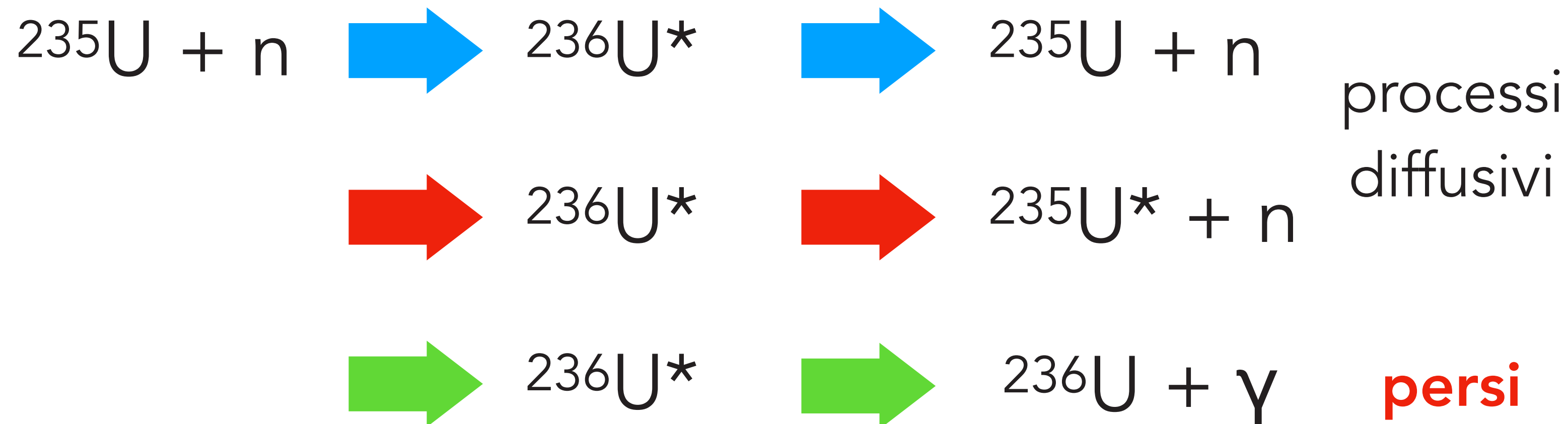


È importante ricordarsi che nei reattori il combustibile è formato da elementi i cui isotopi non sono tutti fissili

$$U_{\text{nat}} = 99,275\% \text{ } ^{238}\text{U} + 0,72\% \text{ } ^{235}\text{U} + 0,005\% \text{ } ^{234}\text{U}$$

# Che succede al neutrone emesso da un processo di fissione?

- Abbiamo una media di  $\nu$  neutroni emessi per reazione
- Non tutti i neutroni possono innescare un altro processo di fissione
  - ☑ Abbiamo altre reazioni che competono con la fissione
  - ☑ Non tutti i neutroni sono utilizzabili (o per meglio dire, efficaci)
  - ☑ Tutte le reazioni in competizione hanno una certa probabilità ( $\sim$  *cross section*)





# Quanti sono i neutroni realmente disponibili?

- Ogni processo di fissione da  $^{235}\text{U}$  produce una media di  $\nu \sim 2.4$  neutroni
- Alcuni neutroni sono persi per cattura (in particolare dall'isotopo  $^{238}\text{U}$ )

sezioni d'urto termiche

Supponiamo di avere **solo**  $^{235}\text{U}$ , i neutroni disponibili sono

$$\nu_a = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_c} = 2.06$$

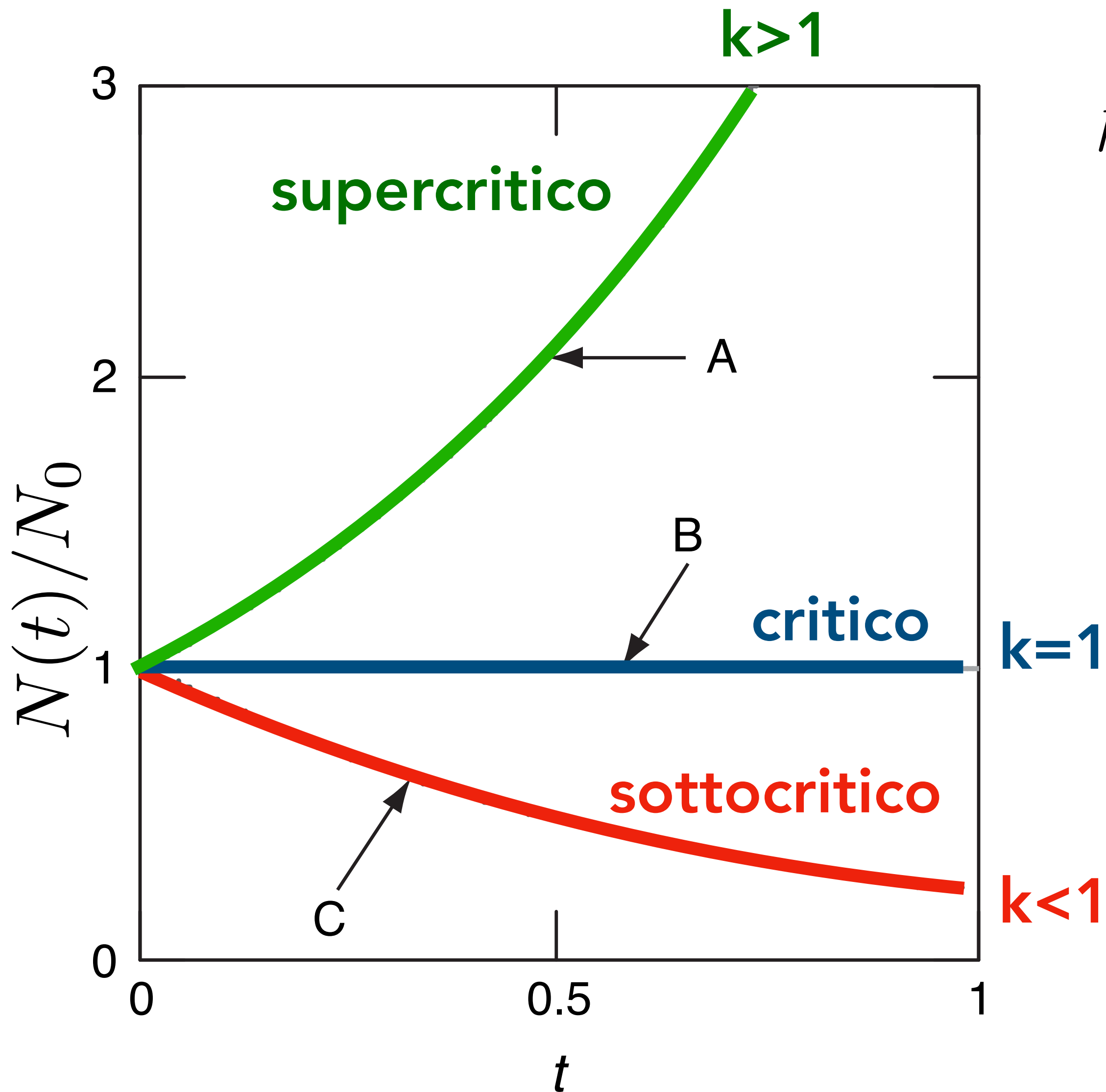
	$\sigma_f$	$\sigma_c$	$\sigma_a$	$\sigma_s$
$^{235}\text{U}$	584	96	680	10
$^{238}\text{U}$	-	$\sim 3$	$\sim 3$	$\sim 8$

Supponiamo di avere **Uranio naturale** (0.72%  $^{235}\text{U}$ , 99,28%  $^{238}\text{U}$ )

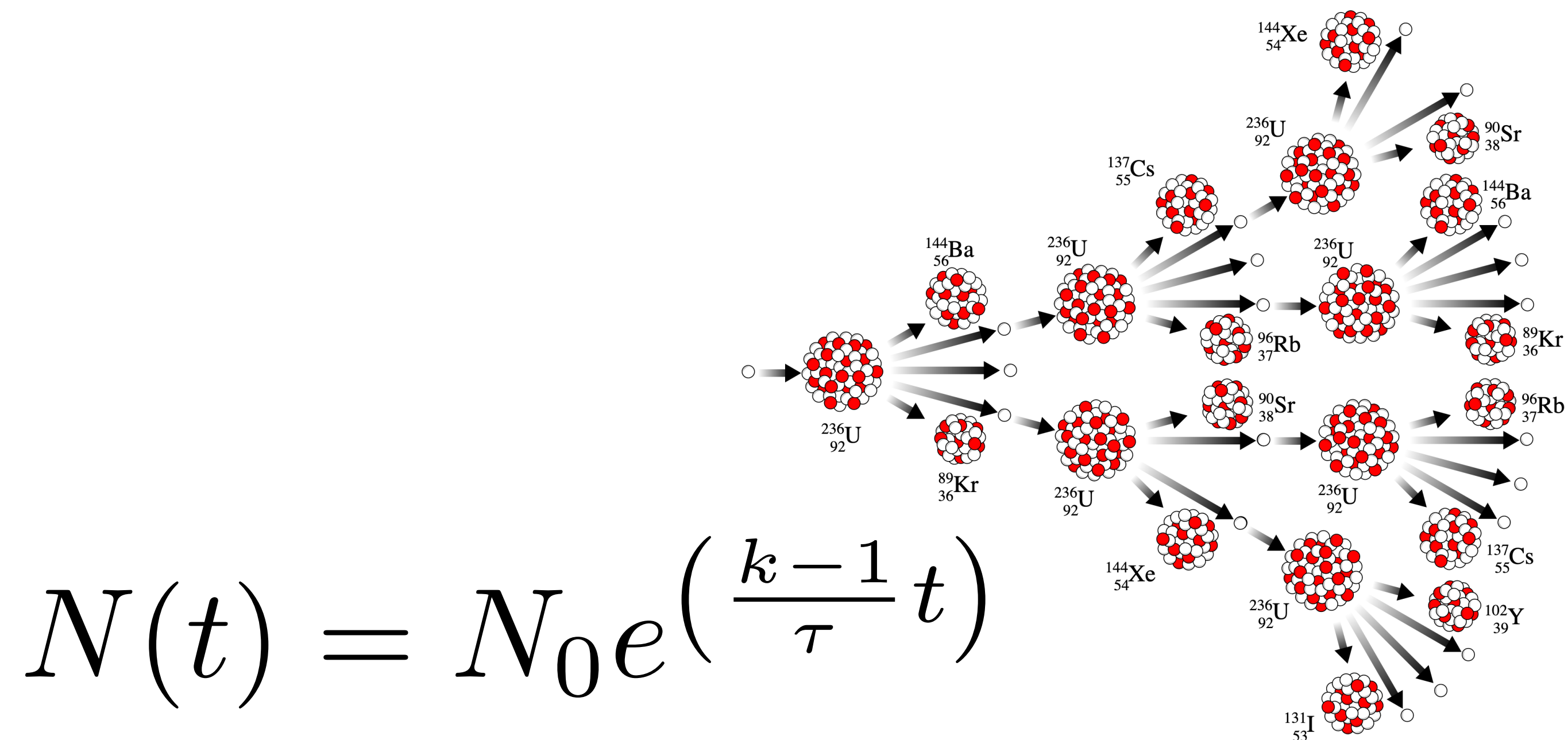
$$\nu_a \simeq \nu \left[ \frac{0.72 \times \sigma_f(^{235}\text{U})}{0.72 \times \sigma_a(^{235}\text{U}) + 99.28 \times \sigma_c(^{238}\text{U})} \right] = 1.328$$

Possiamo aumentarne il numero tramite **arricchimento** (percentuale di  $^{235}\text{U}$ )

# Reazione a catena



$$k = \frac{\text{numero di neutroni alla generazione } n + 1}{\text{numero di neutroni alla generazione } n}$$



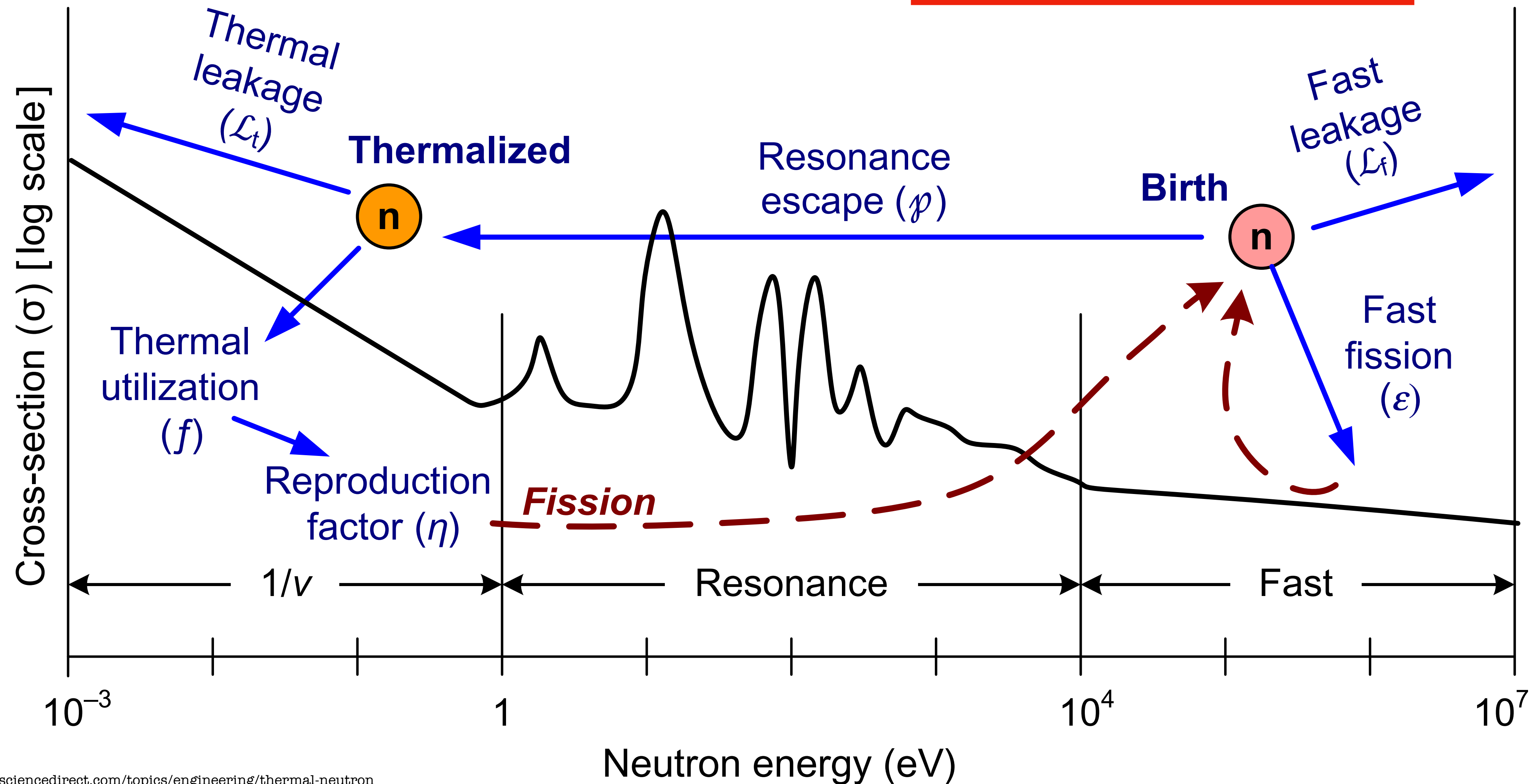
$$N(t) = N_0 e^{\left(\frac{k-1}{\tau} t\right)}$$

$\tau$  tempo caratteristico di emissione e cattura  
tra un processo di fissione e l'altro  
(neutroni veloci)

# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

$$k = \epsilon p f l \eta$$



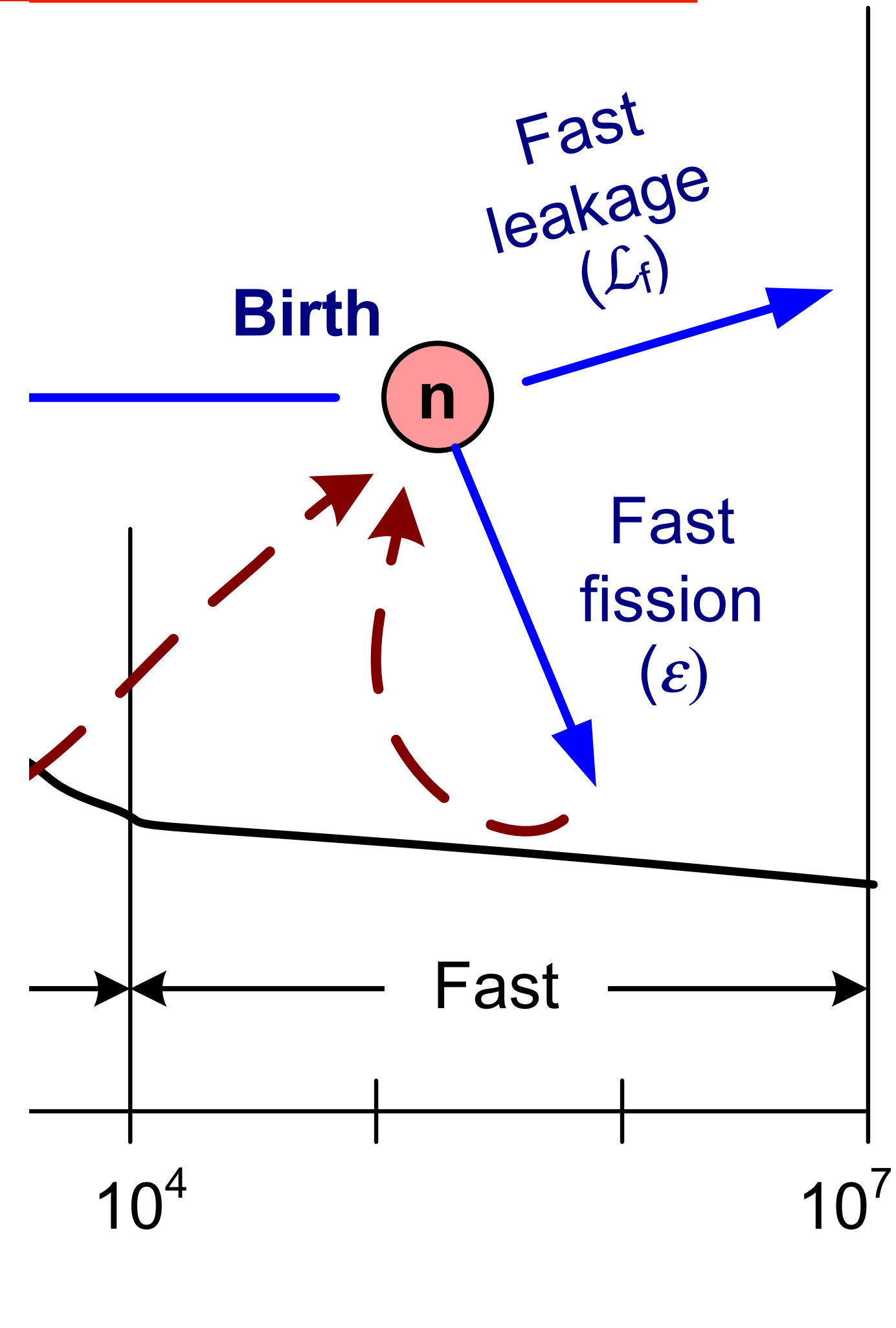
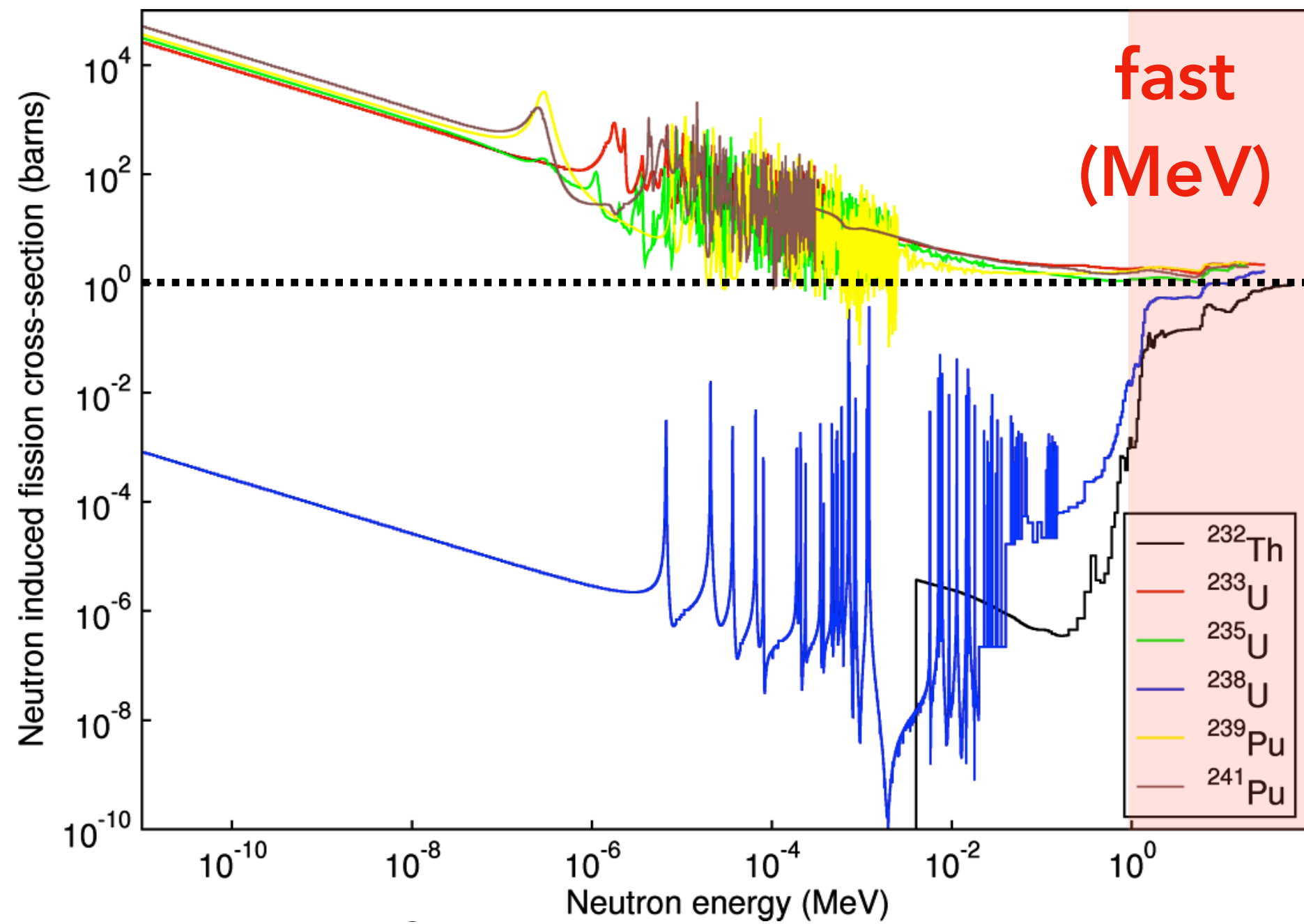
# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

$$k = \epsilon p f l \eta$$

## Fast fission factor $\epsilon = 1.03$

Prima della moderazione abbiamo alcuni eventi di fissione ad energie del MeV (anche  $^{238}\text{U}$ )



Neutron energy (eV)

Copyrights: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/thermal-neutron>

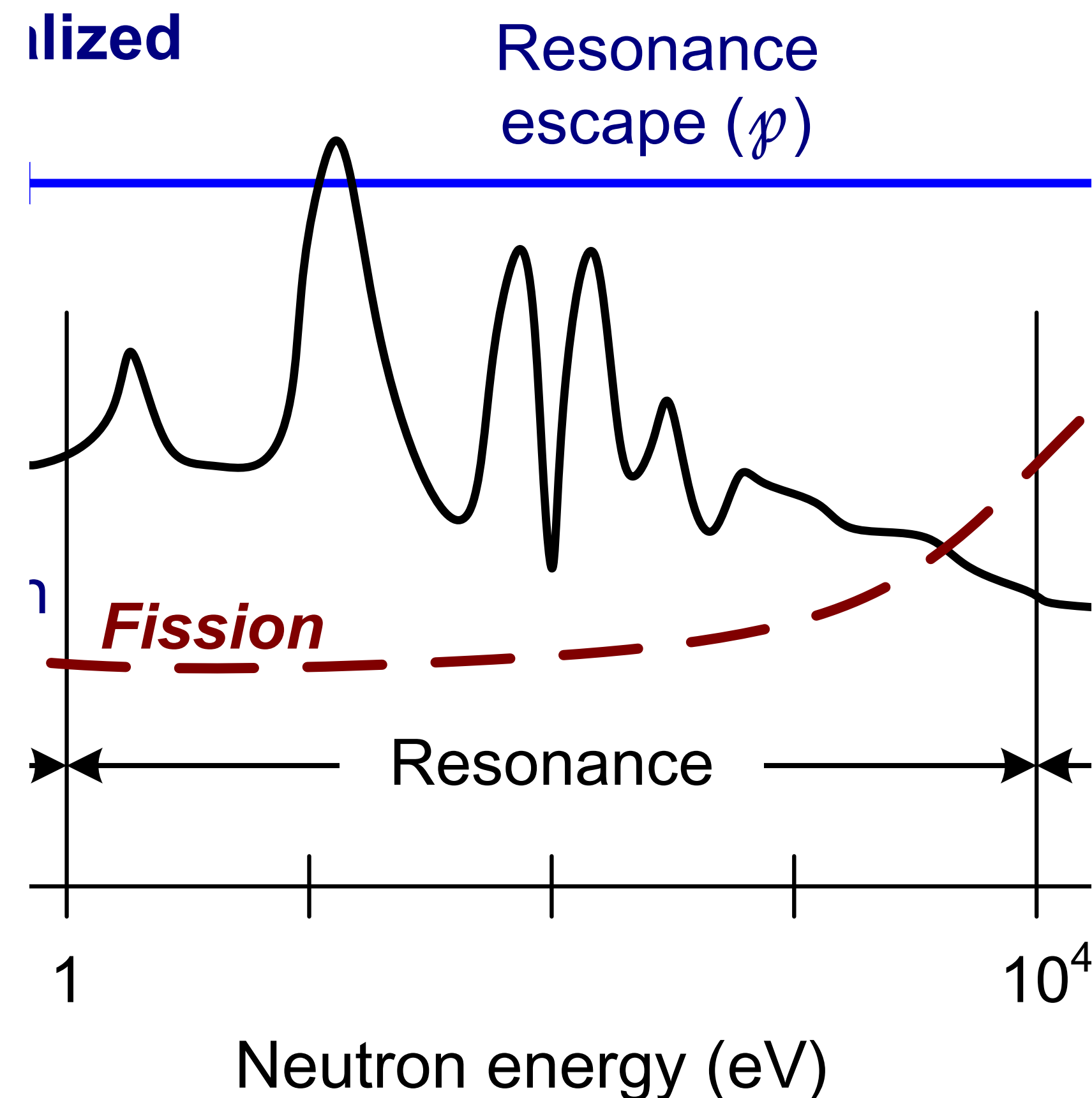
# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

$$k = \epsilon p f l \eta$$

Resonance escape probability  $p = 0.75$

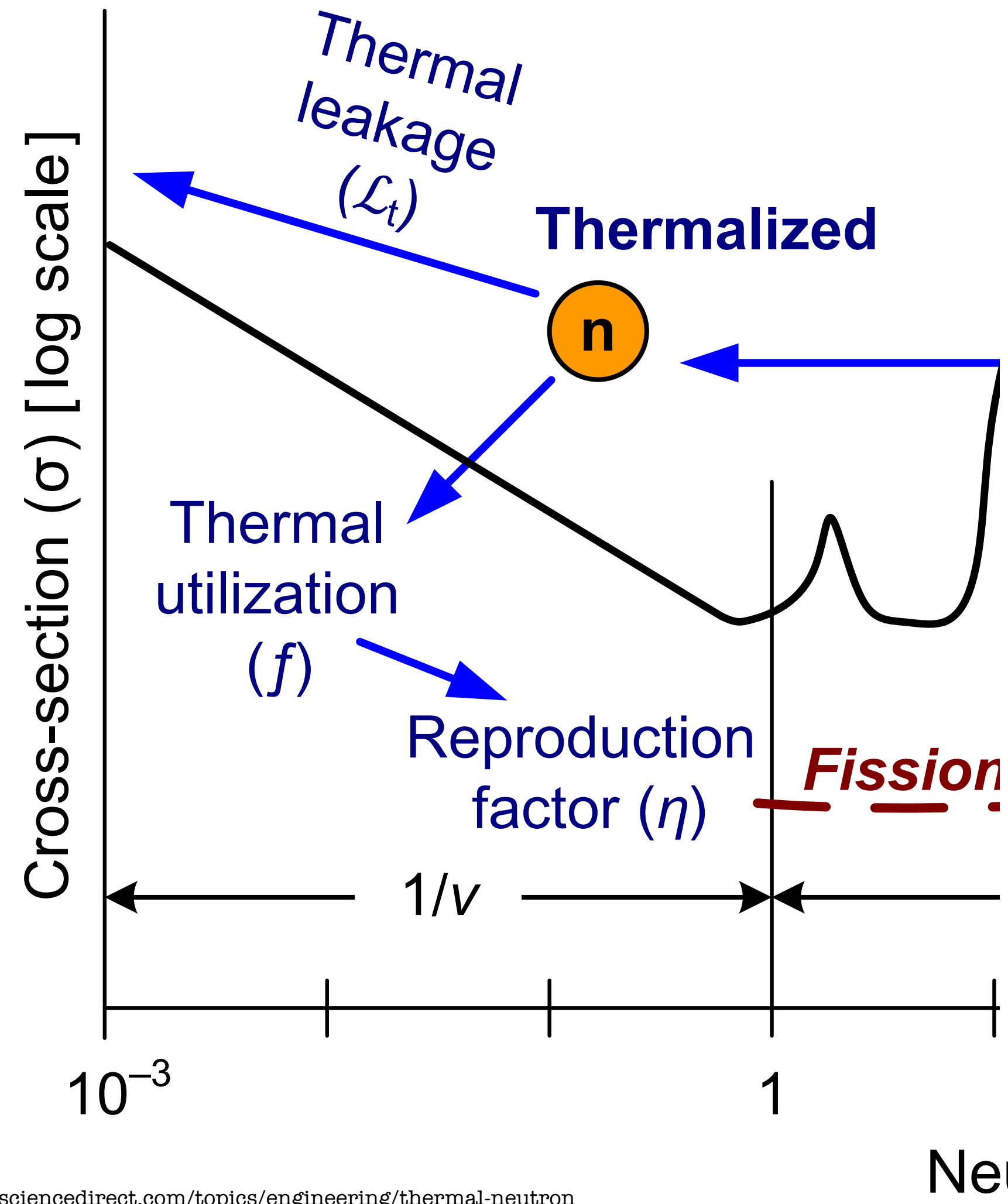
Durante la moderazione (rallentamento da MeV a eV) alcuni neutroni sono assorbiti dalle risonanze del combustibile e sono persi.



# Condizioni per ottenere $k=1$

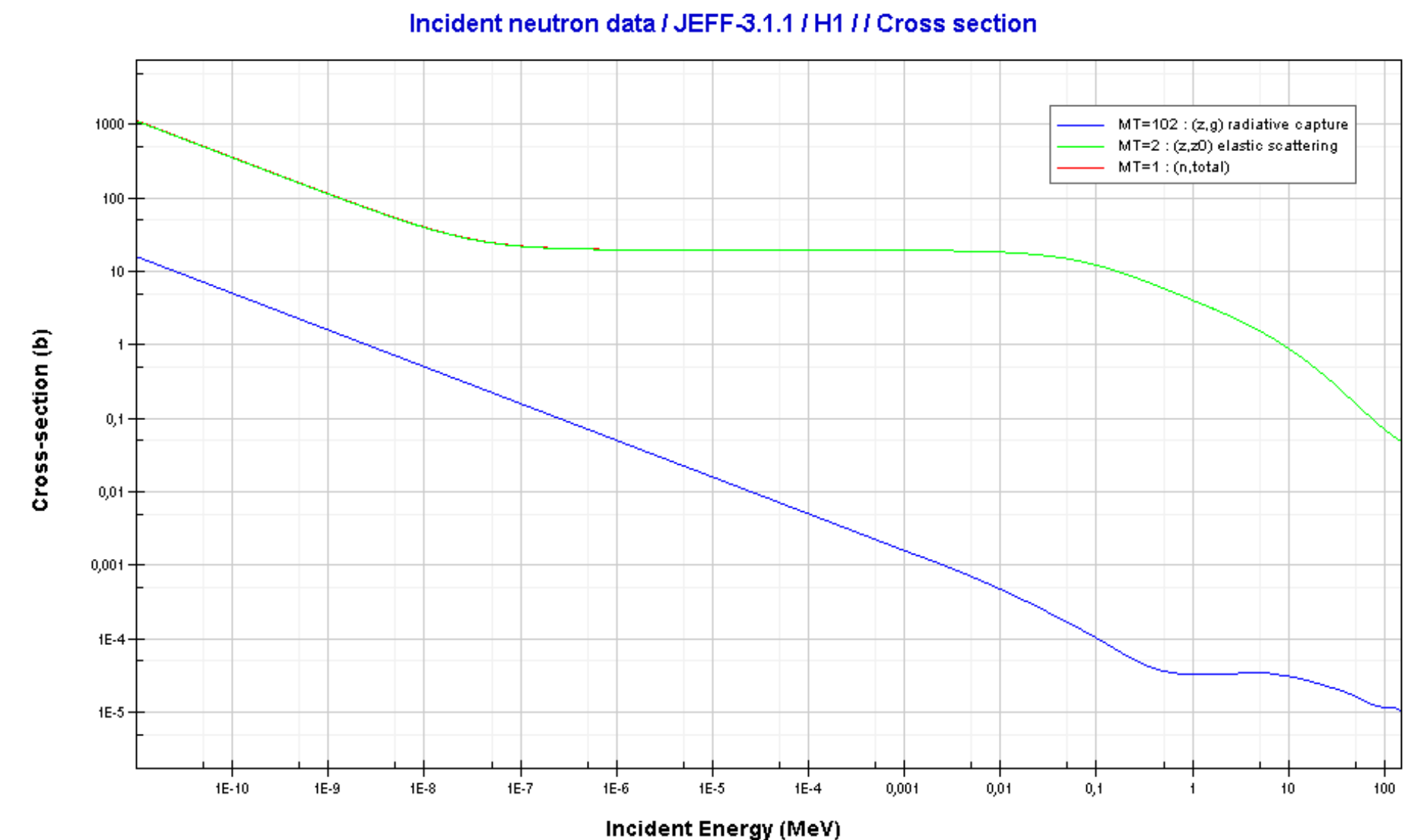
Formula dei quattro fattori

$$k = \epsilon p f l \eta$$



Thermal utilisation factor  **$f = 0.83$**

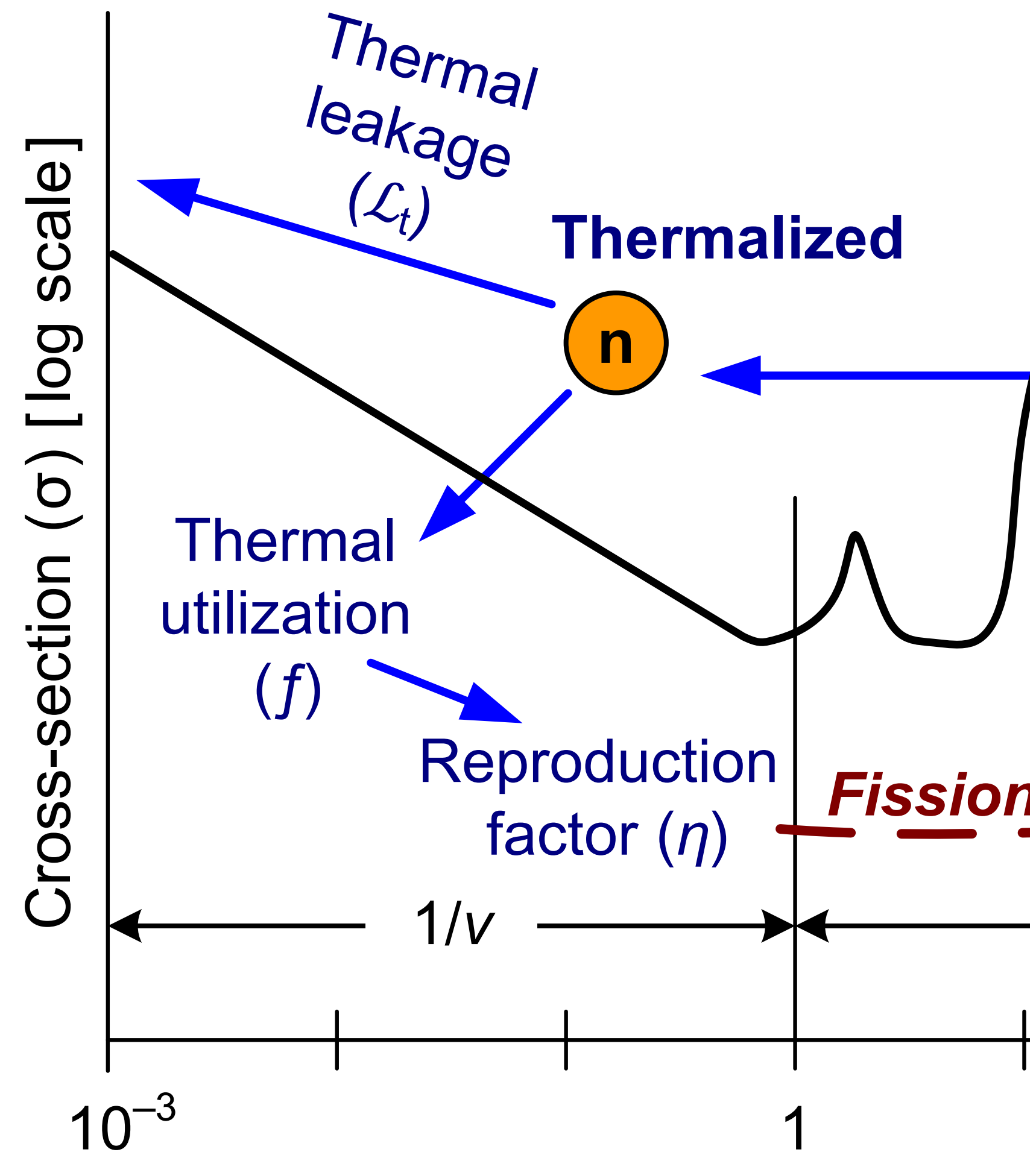
Alcuni neutroni sono catturati dal moderatore (solitamente  $H_2O$ )



# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

$$k = \epsilon p f l \eta$$

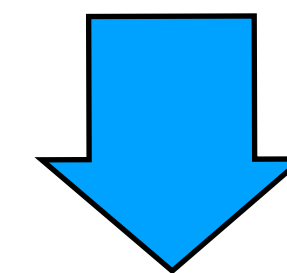


Reproduction factor  $\eta = \nu_a$

natural uranium  $\nu_a = 1.328$

Se vogliamo avere  $k=1$  (condizione di criticità)

$$\nu_a = \frac{k}{l \epsilon p f} \simeq 1.656$$



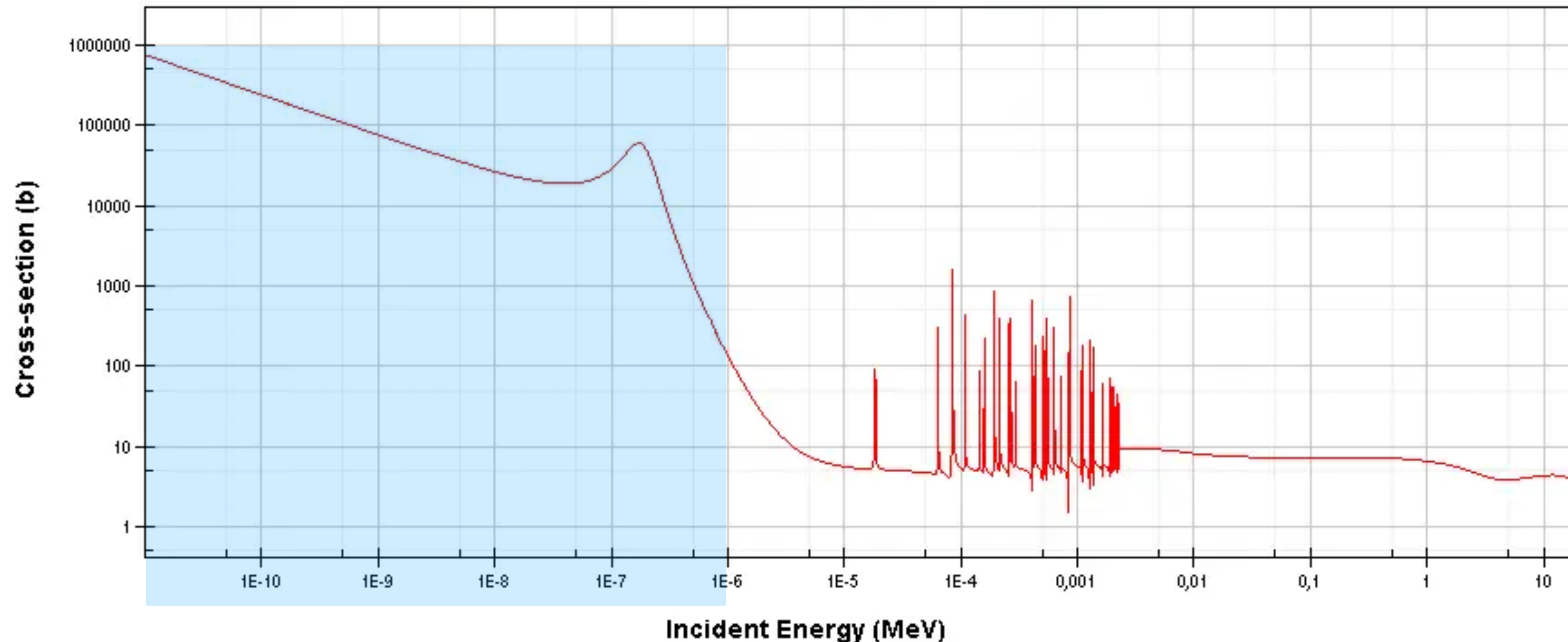
arricchimento del combustibile

Neutron energy (eV) (aumentare la percentuale di  $^{235}\text{U}$ )

# Le sezioni d'urto ci dicono anche materiale usare per controllare $k=1$

Nell'industria nucleare il cadmio è generalmente usato come assorbitore di neutroni termici a causa dell'altissima sezione d'urto di cattura neutronica per l'isotopo  $^{113}\text{Cd}$

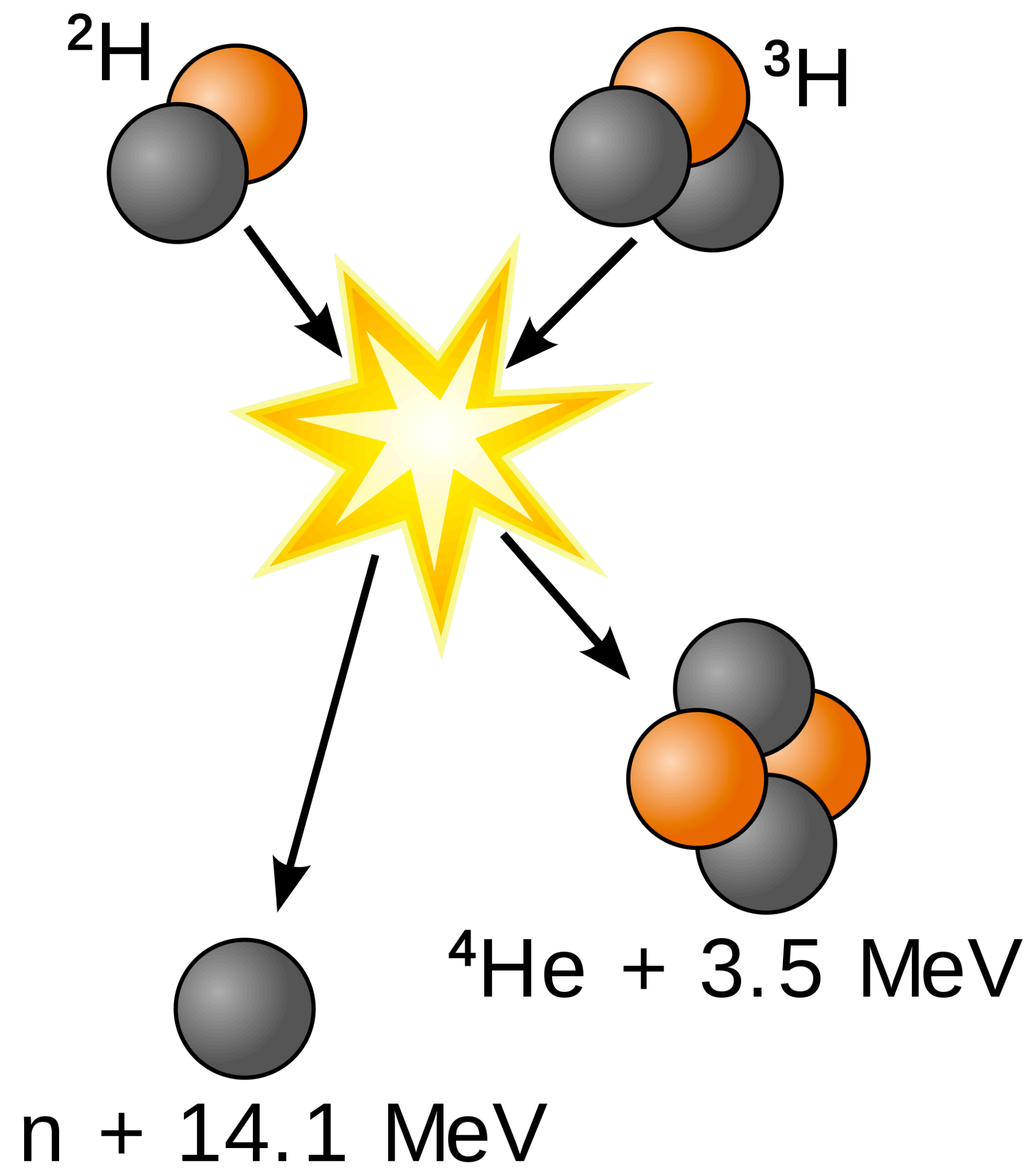
Incident neutron data / JEFF-3.1 / Cd113 / MT=1 : (n,total) / Cross section



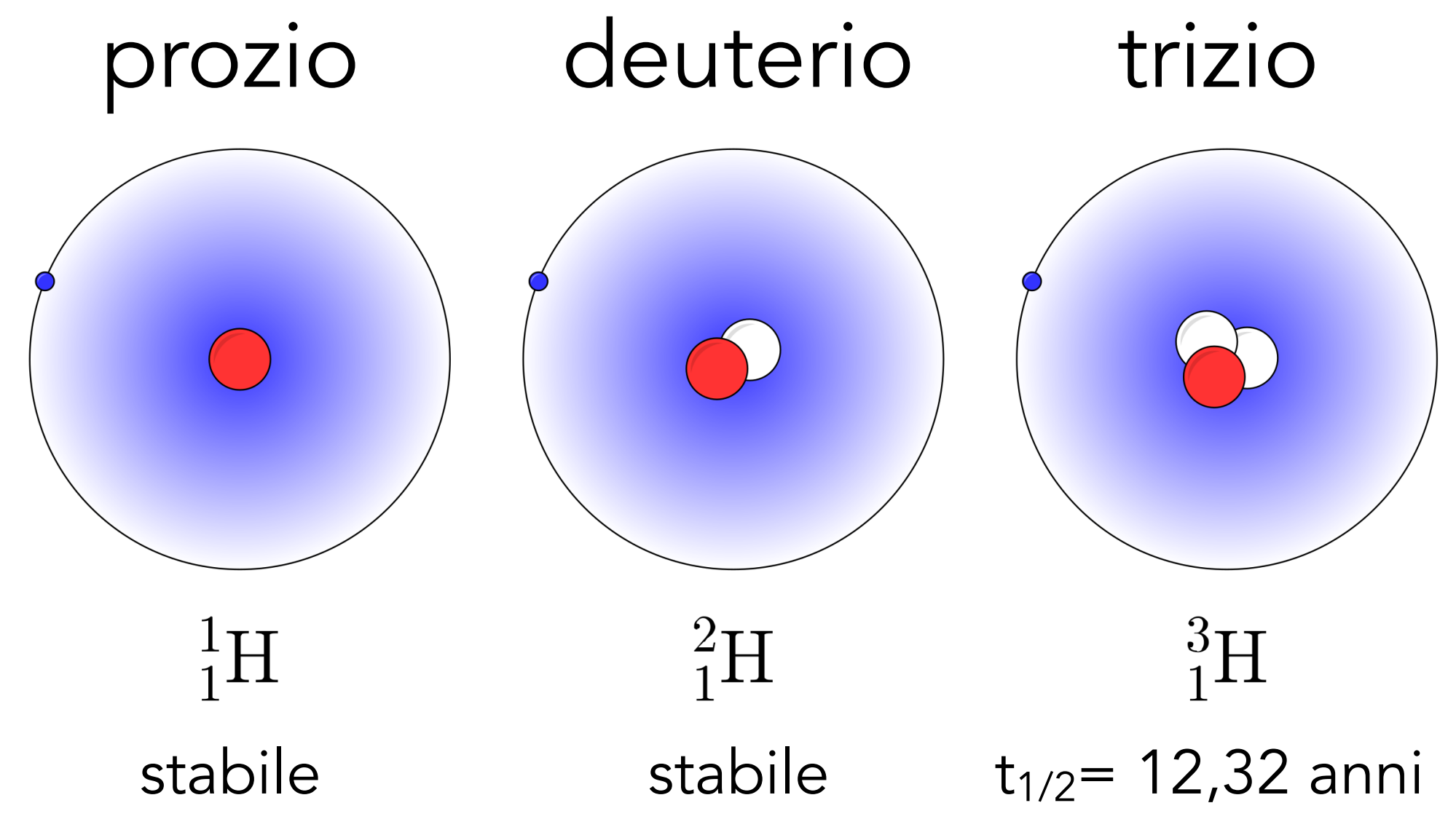


# Fusione nucleare

# Energia rilasciata da un singolo processo di fusione



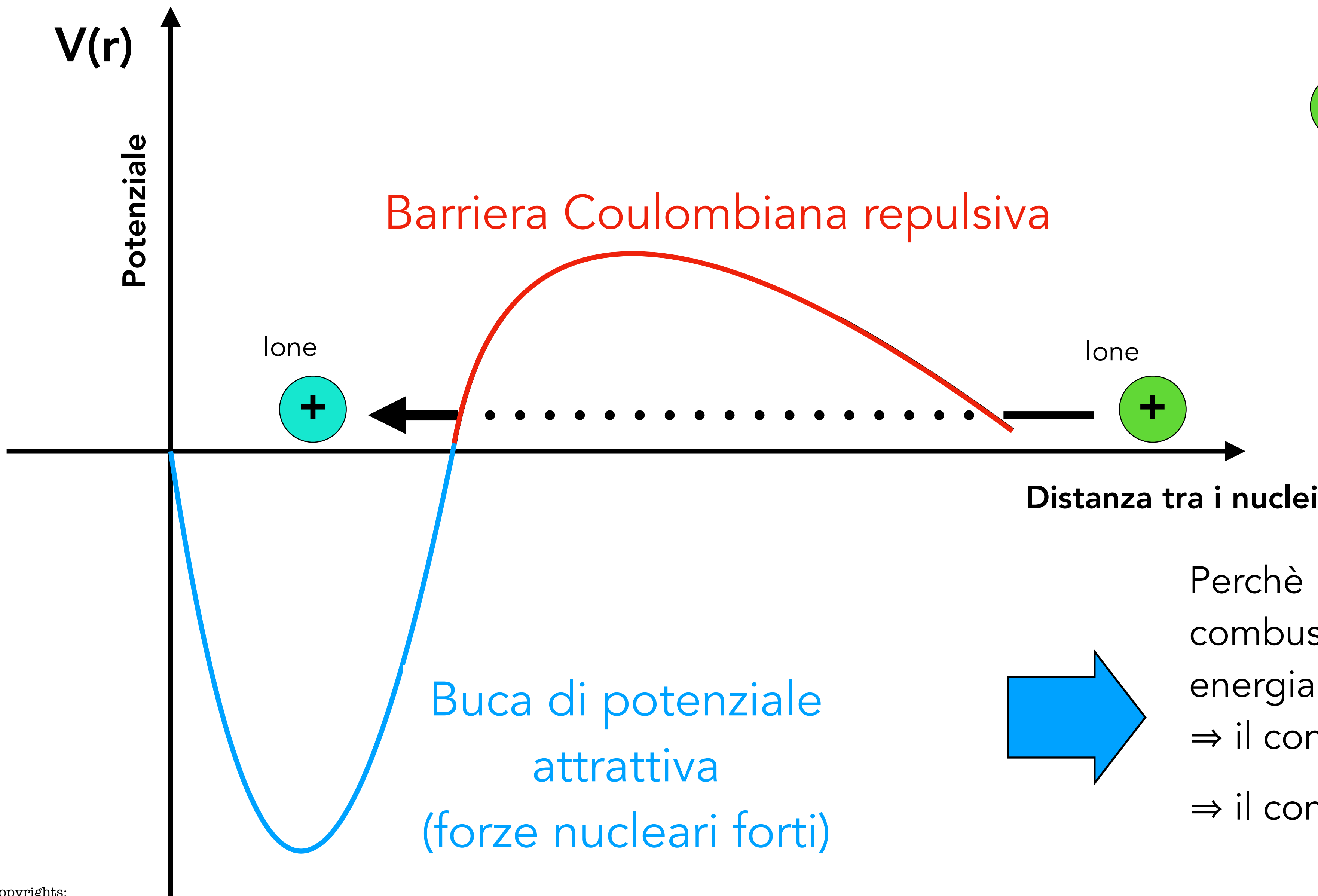
3 isotopi dell'idrogeno:



Energia rilasciata ~ 17.6 MeV

Se consideriamo l'energia rilasciata per particella **Q/A**, la fusione nucleare rilascia anche più energia dell'energia da fissione

Copyrights: Wikipedia



$$\text{+} \quad \text{+} \quad V_C \simeq 1.44 \frac{Z_1 Z_2}{R_1 + R_2} \text{ MeV}$$

Per  $p+p$  la barriera Coulombiana è di circa **700 keV**.

Per superare la barriera i due nuclei devono avere abbastanza energia,  $E=(3/2) kT$ .

La barriera aumenta con l'aumentare di  $Z$ , la probabilità di fusione decresce.

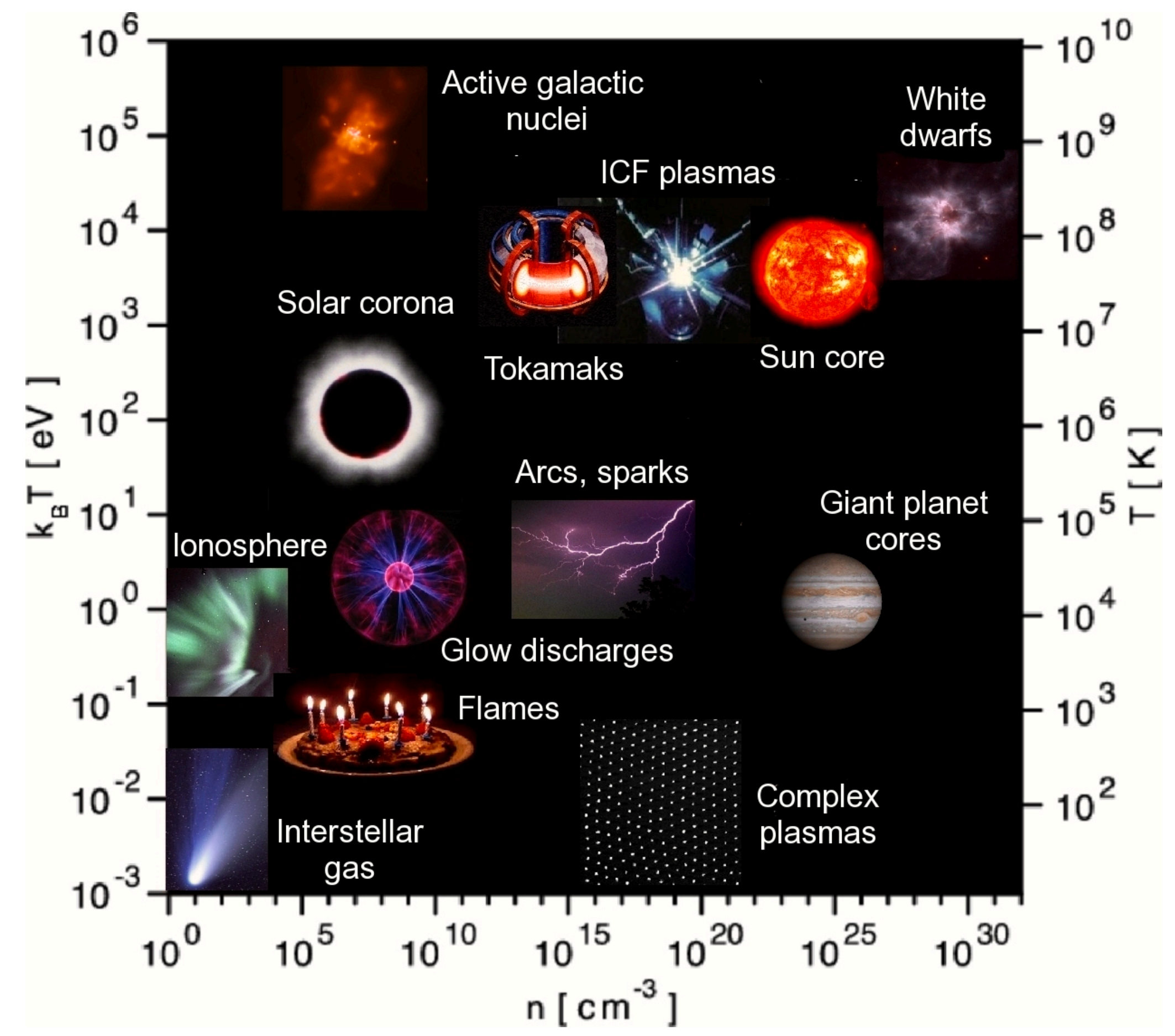
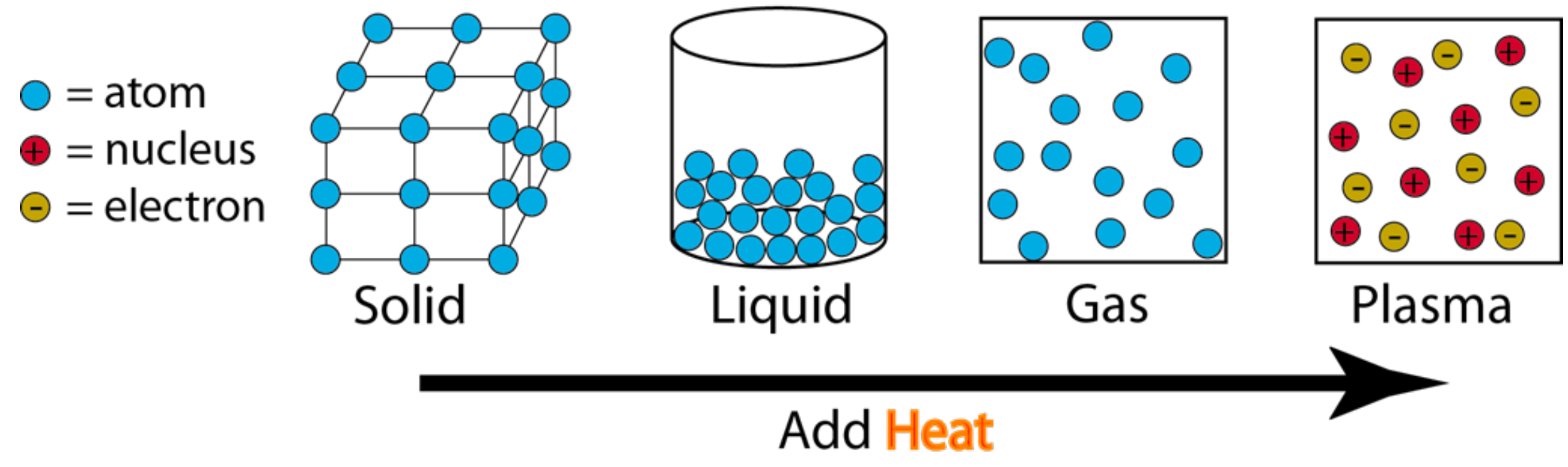
Per due nuclei di idrogeno, la temperatura corrispondente è dell'ordine di  $10^9 \text{ °K}$

Perchè la fusione avvenga il combustibile deve possedere una certa energia cinetica

⇒ il combustibile deve essere "caldo"

⇒ il combustibile è un plasma

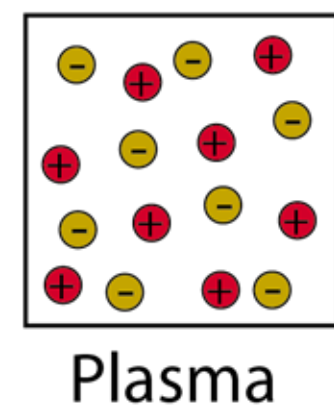
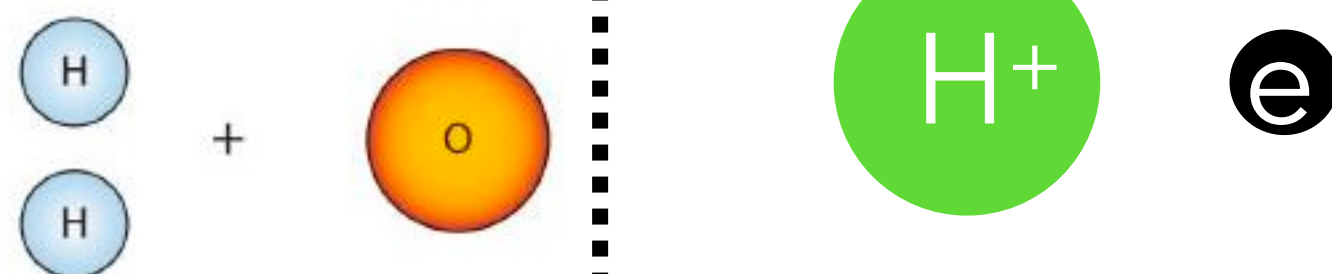
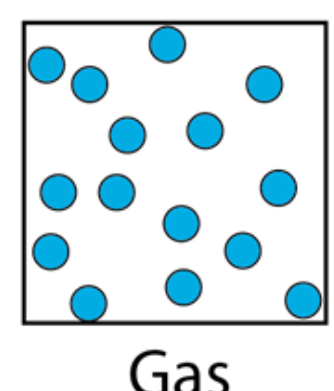
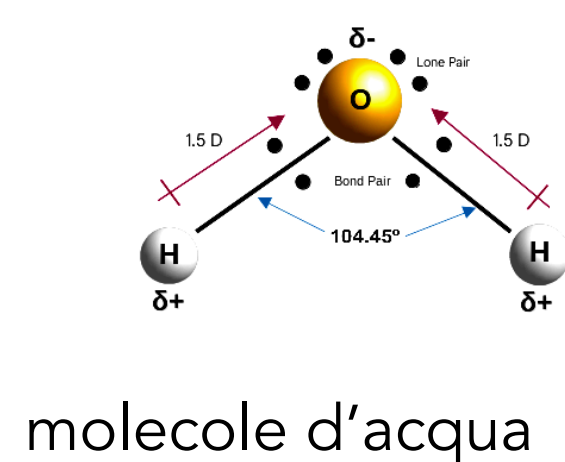
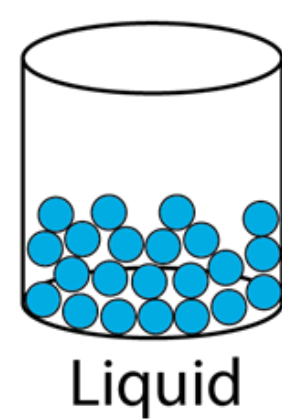
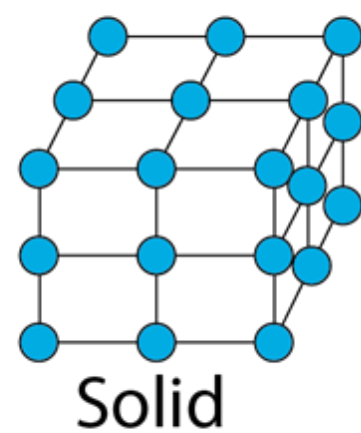
# A causa dell'energie coinvolte abbiamo un nuovo stato della materia, il plasma



Copyrights:

# Cosa è lo stato di plasma

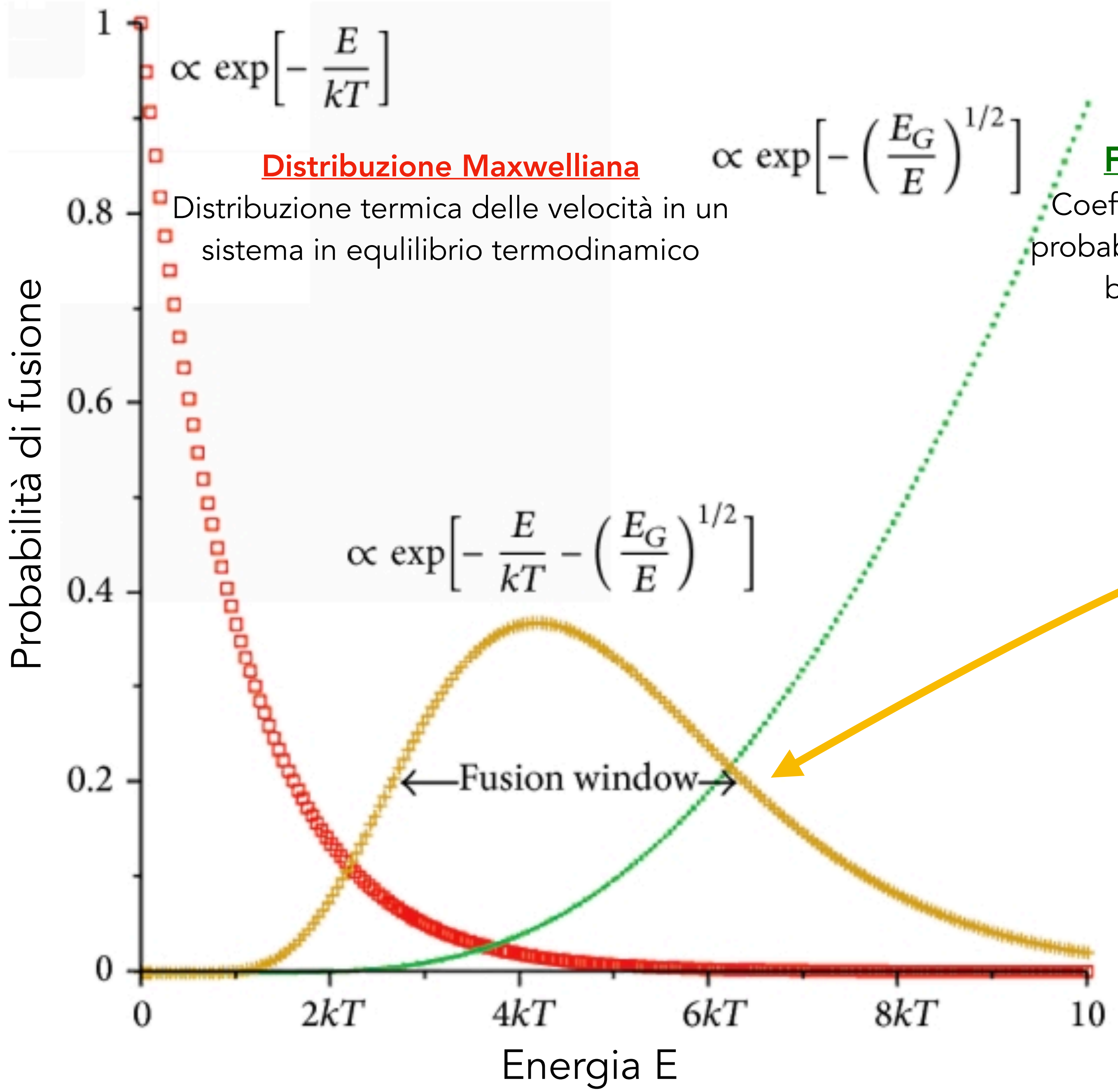
Prendiamo come esempio l'acqua H<sub>2</sub>O



$$1 \text{ eV} / k_B = \frac{1.602 \ 176 \ 634 \times 10^{-19} \text{ J}}{1.380 \ 649 \times 10^{-23} \text{ J/K}} = 11 \ 604.518 \ 12 \text{ K}$$

$k_B T$  is about 0.025 eV ( $\approx \frac{290 \text{ K}}{11604 \text{ K/eV}}$ ) at a temperature of 20 °C.

# Probabilità di fusione



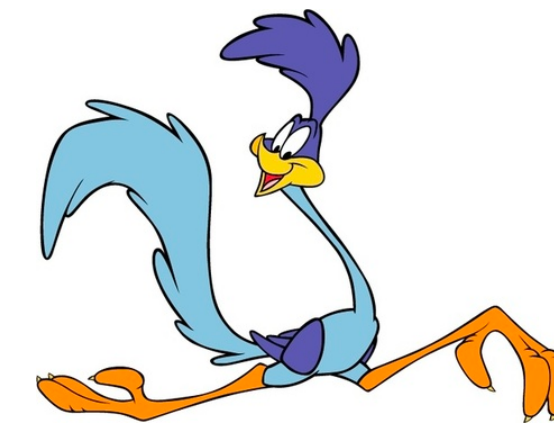
Migliori condizioni di temperatura (o energia) per innescare il processo di fusione.

# Necessità di un confinamento

Le componenti del plasma sono molto veloci...

Se  $T_i \sim 10 \text{ keV}$

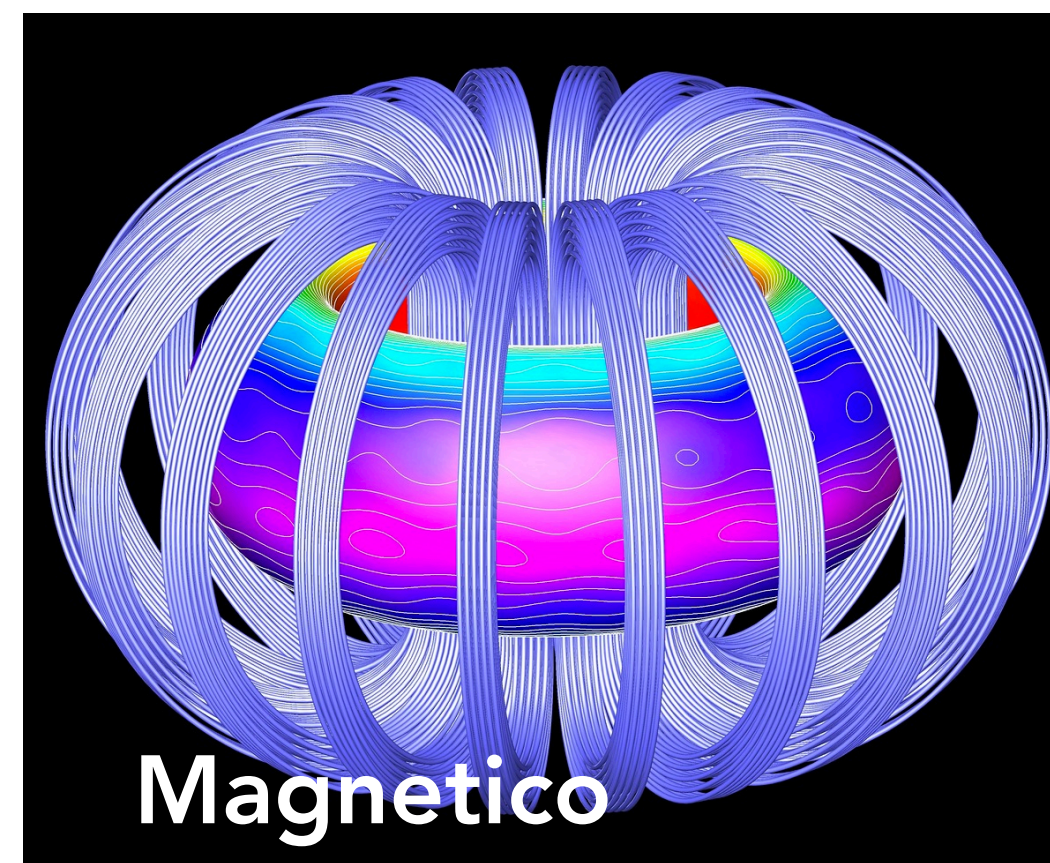
$$v_i = \sqrt{\frac{2T_i}{m}} \simeq 10^6 \text{ m/s}$$



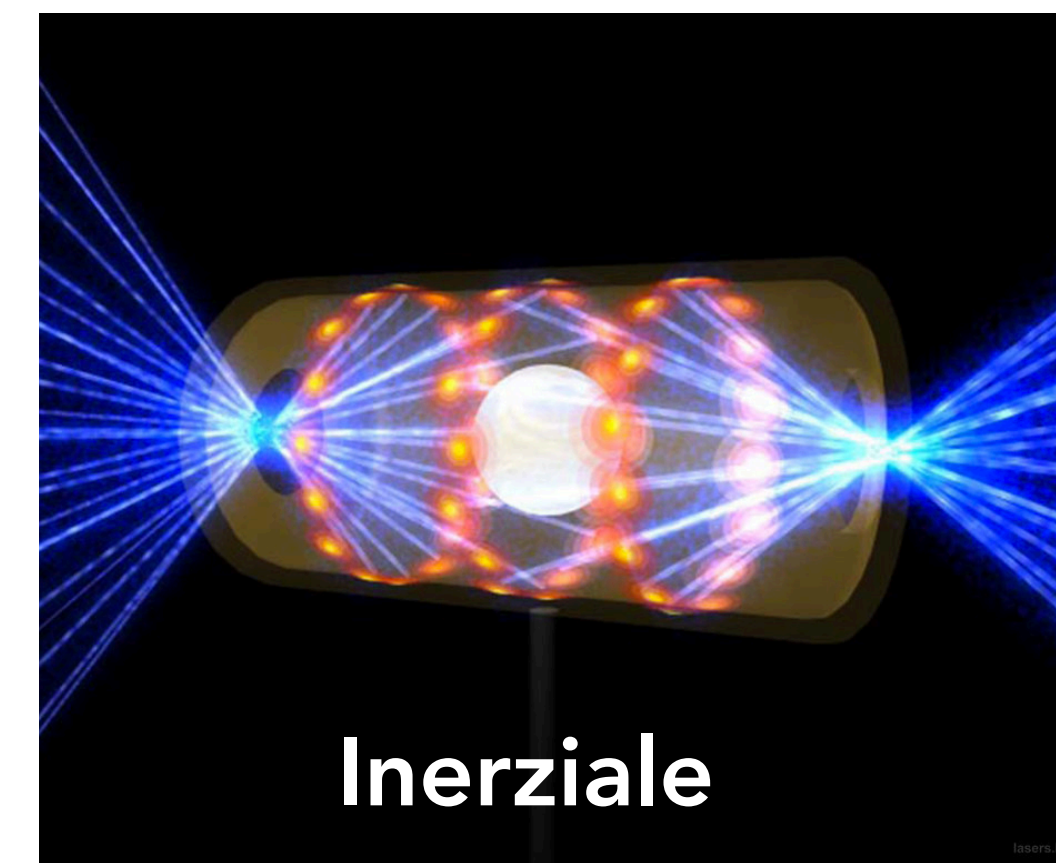
...devono essere confinate



Gravitazionale



Magnetico

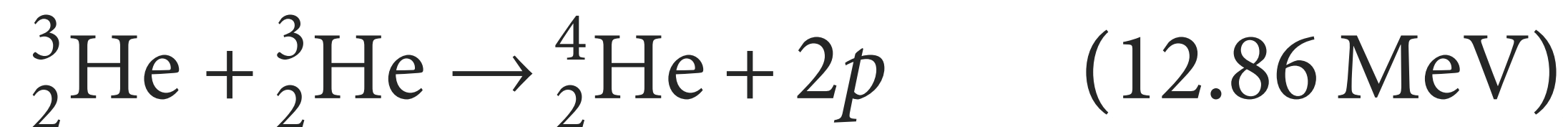
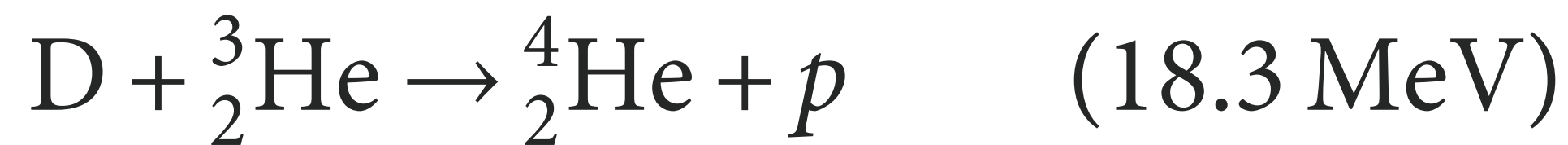
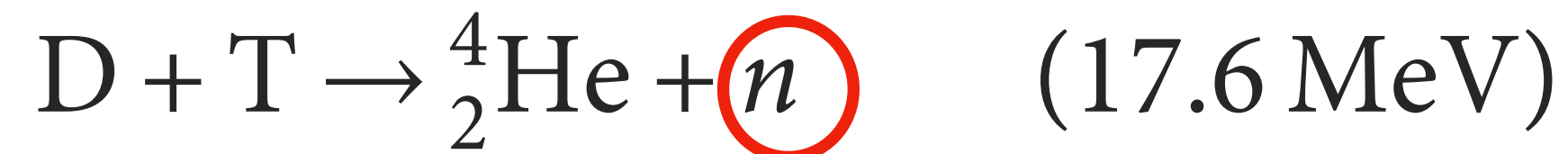
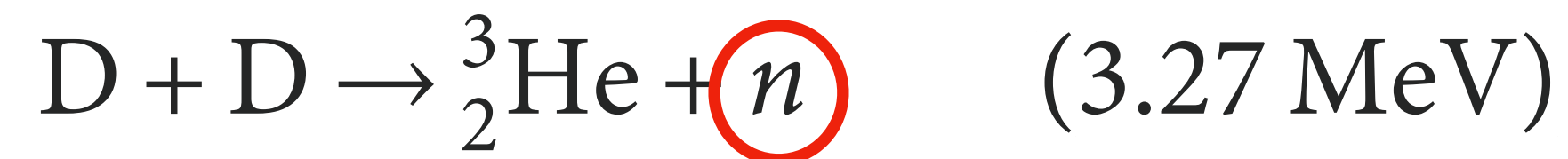


Inerziale

# Combustibili per la fusione nucleare



Degradazione dei materiali



solo per i test

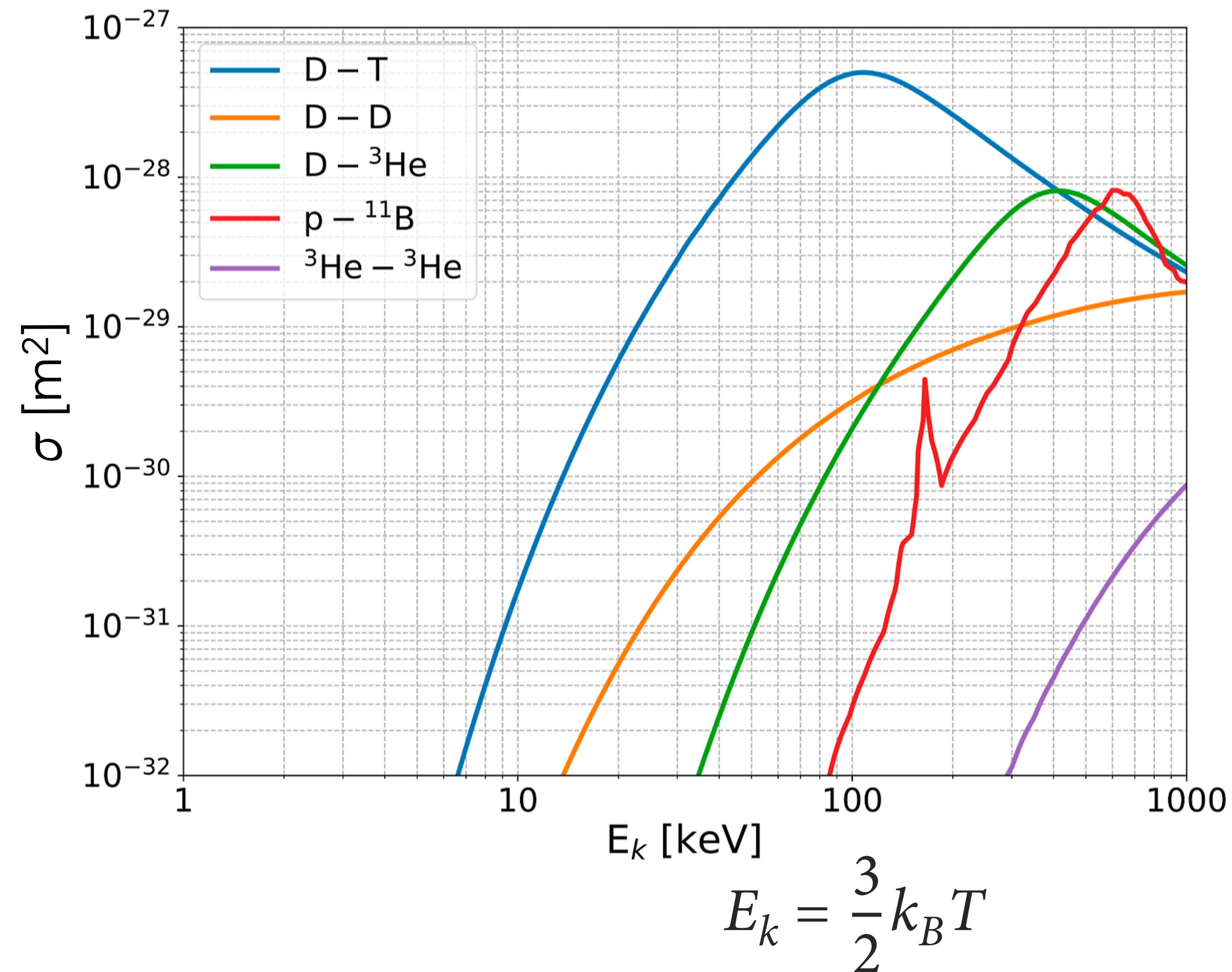
combustibili neutronici

Combustibili alternativi - aneutronici  
(per lo più settore privato)

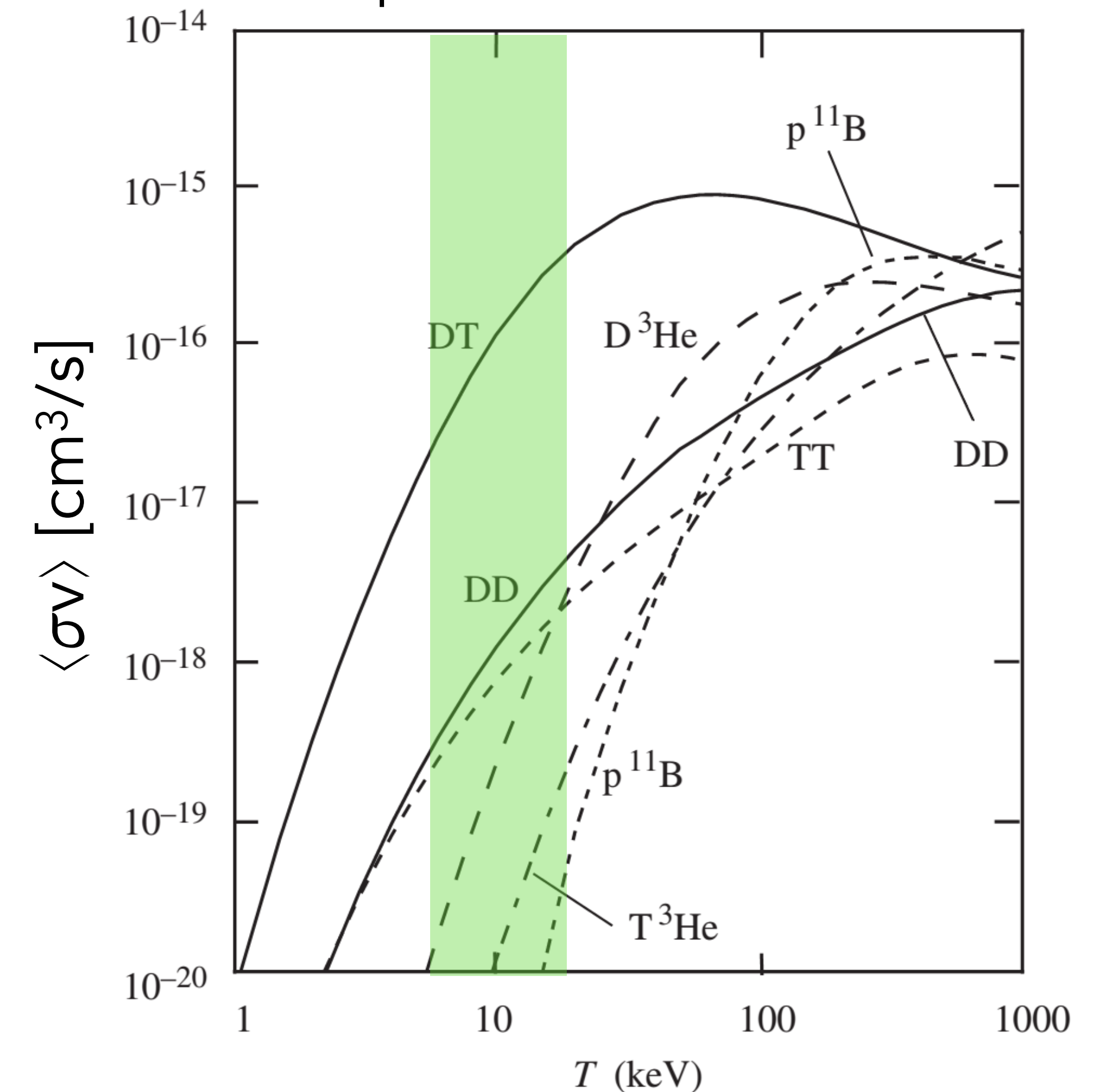
JET, ITER,...



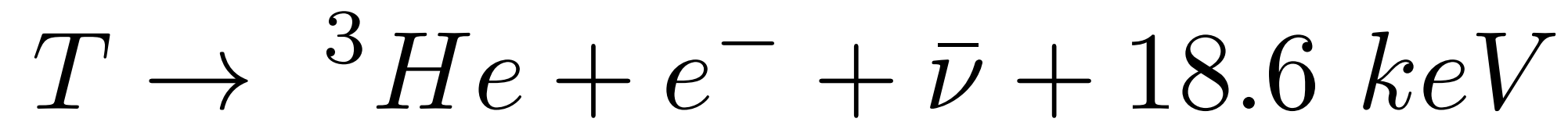
- Sezioni d'urto sperimentali ( $\sigma$ ) per i processi di fusione più rilevanti.
- La maggior parte dei progetti di ricerca sono basati su reazioni D-T, che mostrano le sezioni d'urto maggiori a basse energie.



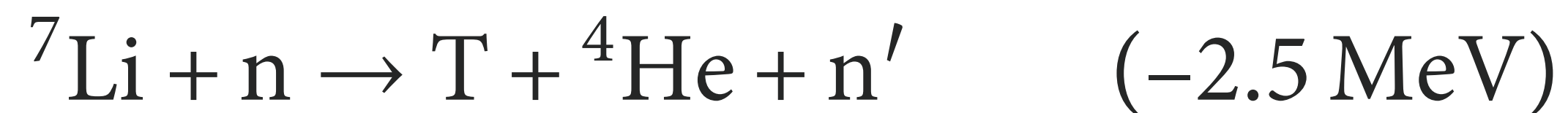
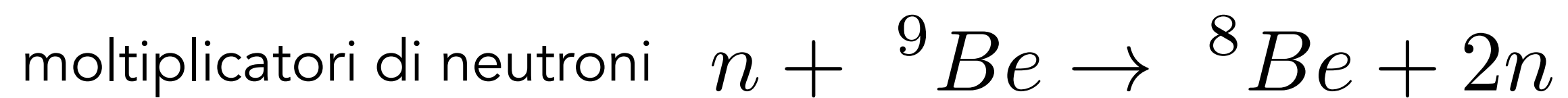
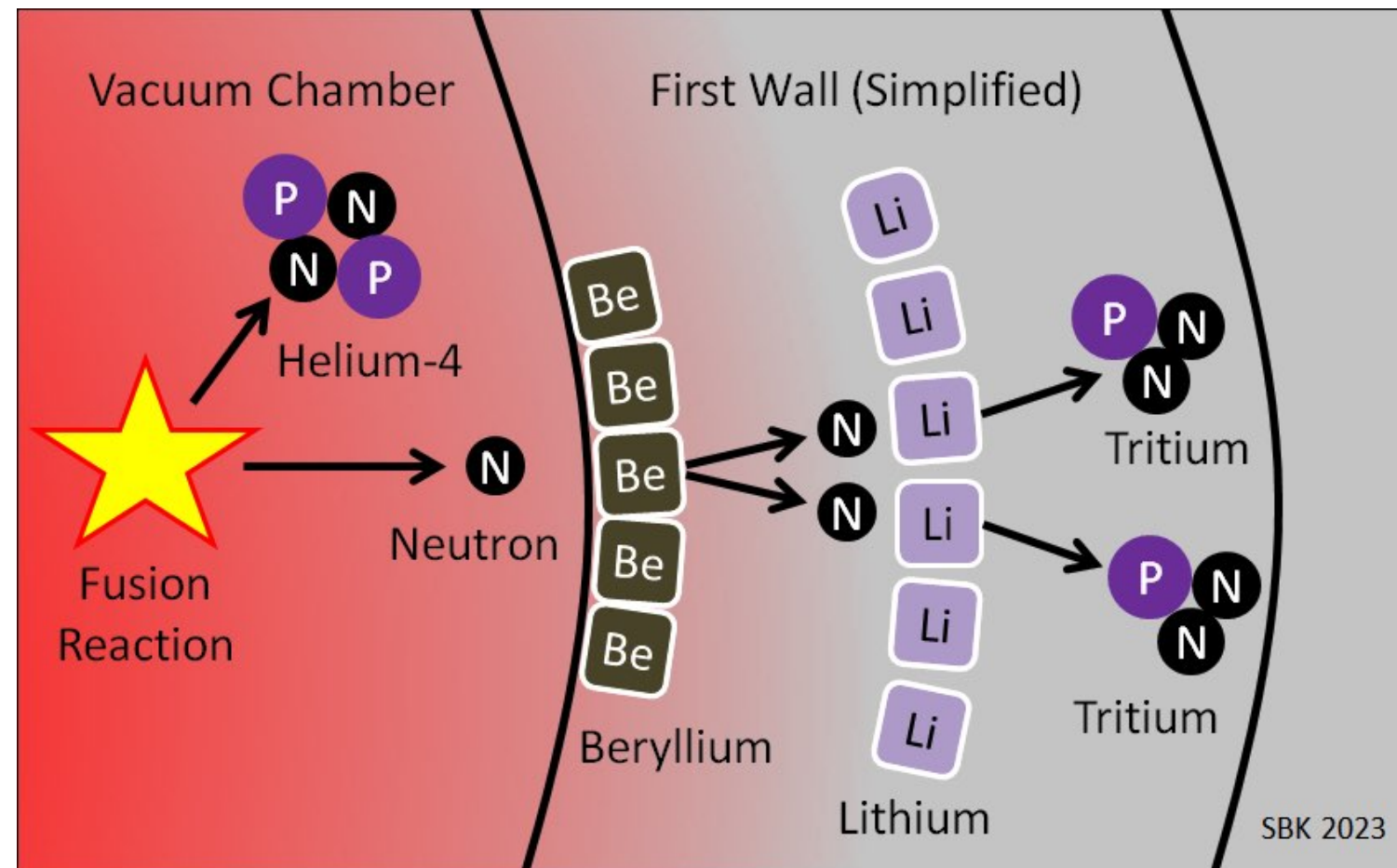
- Reattività  $\langle \sigma v \rangle$  per diversi tipi di combustibili



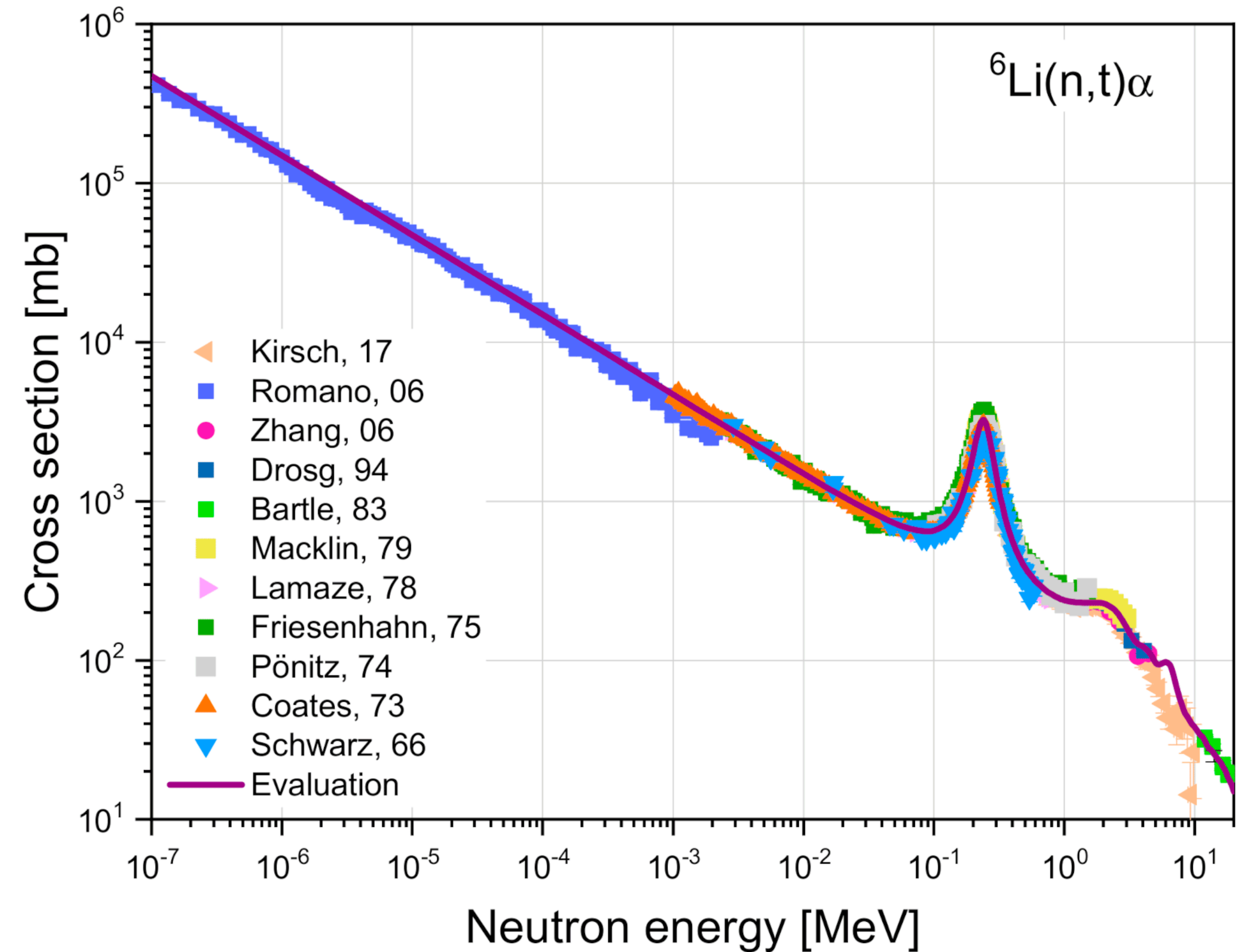
# Problema del trizio e di come produrlo



emivita: 12.33 anni



energia di soglia





1	1.0080		
1	<b>H</b> Hydrogen Nonmetal		
2	3 7.0	4 9.012183	
2	<b>Li</b> Lithium Alkali Metal	<b>Be</b> Beryllium Alkaline Earth Me...	
3	11 22.989...	12 24.305	
3	<b>Na</b> Sodium Alkali Metal	<b>Mg</b> Magnesium Alkaline Earth Me...	
4	19 39.0983	20 40.08	21 44.95
4	<b>K</b> Potassium Alkali Metal	<b>Ca</b> Calcium Alkaline Earth Me...	<b>Sc</b> Scandium Transition M...
5	37 85.468	38 87.62	39 88.90
5	<b>Rb</b> Rubidium Alkali Metal	<b>Sr</b> Strontium Alkaline Earth Me...	<b>Y</b> Yttrium Transition M...
6	55 132.90...	56 137.33	
6	<b>Cs</b> Cesium Alkali Metal	<b>Ba</b> Barium Alkaline Earth Me...	
7	87 223.01...	88 226.02...	
7	<b>Fr</b> Francium Alkali Metal	<b>Ra</b> Radium Alkaline Earth Me...	

<sup>3</sup>He

legato

0,000134 %  
He naturale

<sup>4</sup>He

legato

99,999866 %  
He naturale

<sup>5</sup>He

non legato

<sup>6</sup>He

legato con alone

sistema Borromeico

806 ms

<sup>7</sup>He

non legato

<sup>8</sup>He

legato con alone

Nucleo più esotico sulla Terra

$\frac{N}{Z} = 3$

1108 ms

18

2 4.00260

**He**  
Helium  
Noble Gas

**Isotopi conosciuti dell'elio (He)**

Stesse proprietà chimiche  
Diverse proprietà fisiche

72 178.49	73 180.9479	74 183.84	75 186.207	76 190.2	77 192.22	78 195.08	79 196.96...	80 200.59	81 204.383	82 207	83 208.98...	84 208.98...	85 209.98...	86 222.01...
<b>Hf</b> Hafnium Transition Metal	<b>Ta</b> Tantalum Transition Metal	<b>W</b> Tungsten Transition Metal	<b>Re</b> Rhenium Transition Metal	<b>Os</b> Osmium Transition Metal	<b>Ir</b> Iridium Transition Metal	<b>Pt</b> Platinum Transition Metal	<b>Au</b> Gold Transition Metal	<b>Hg</b> Mercury Transition Metal	<b>Tl</b> Thallium Post-Transition M...	<b>Pb</b> Lead Post-Transition M...	<b>Bi</b> Bismuth Post-Transition M...	<b>Po</b> Polonium Metalloid	<b>At</b> Astatine Halogen	<b>Rn</b> Radon Noble Gas
104 267.1...	105 268.1...	106 269.1...	107 270.1...	108 269.1...	109 277.1...	110 282.1...	111 282.1...	112 286.1...	113 286.1...	114 290.1...	115 290.1...	116 293.2...	117 294.2...	118 295.2...
<b>Rf</b> Rutherfordium Transition Metal	<b>Db</b> Dubnium Transition Metal	<b>Sg</b> Seaborgium Transition Metal	<b>Bh</b> Bohrium Transition Metal	<b>Hs</b> Hassium Transition Metal	<b>Mt</b> Meitnerium Transition Metal	<b>Ds</b> Darmstadtium Transition Metal	<b>Rg</b> Roentgenium Transition Metal	<b>Cn</b> Copernicium Transition Metal	<b>Nh</b> Nihonium Post-Transition M...	<b>Fl</b> Flerovium Post-Transition M...	<b>Mc</b> Moscovium Post-Transition M...	<b>Lv</b> Livermorium Post-Transition M...	<b>Ts</b> Tennessine Halogen	<b>Og</b> Oganesson Noble Gas
57 138.9055	58 140.116	59 140.90...	60 144.24	61 144.91...	62 150.4	63 151.964	64 157.2	65 158.92...	66 162.500	67 164.93...	68 167.26	69 168.93...	70 173.05	71 174.9668
<b>La</b> Lanthanum Lanthanide	<b>Ce</b> Cerium Lanthanide	<b>Pr</b> Praseodymium Lanthanide	<b>Nd</b> Neodymium Lanthanide	<b>Pm</b> Promethium Lanthanide	<b>Sm</b> Samarium Lanthanide	<b>Eu</b> Europium Lanthanide	<b>Gd</b> Gadolinium Lanthanide	<b>Tb</b> Terbium Lanthanide	<b>Dy</b> Dysprosium Lanthanide	<b>Ho</b> Holmium Lanthanide	<b>Er</b> Erbium Lanthanide	<b>Tm</b> Thulium Lanthanide	<b>Yb</b> Ytterbium Lanthanide	<b>Lu</b> Lutetium Lanthanide
89 227.02...	90 232.038	91 231.03...	92 238.0289	93 237.04...	94 244.06...	95 243.06...	96 247.07...	97 247.07...	98 251.07...	99 252.0830	100 257.0...	101 258.0...	102 259.1...	103 266.1...
<b>Ac</b> Actinium Actinide	<b>Th</b> Thorium Actinide	<b>Pa</b> Protactinium Actinide	<b>U</b> Uranium Actinide	<b>Np</b> Neptunium Actinide	<b>Pu</b> Plutonium Actinide	<b>Am</b> Americium Actinide	<b>Cm</b> Curium Actinide	<b>Bk</b> Berkelium Actinide	<b>Cf</b> Californium Actinide	<b>Es</b> Einsteinium Actinide	<b>Fm</b> Fermium Actinide	<b>Md</b> Mendelevium Actinide	<b>No</b> Nobelium Actinide	<b>Lr</b> Lawrencium Actinide

Copyrights: <https://pubchem.ncbi.nlm.nih.gov/periodic-table/>