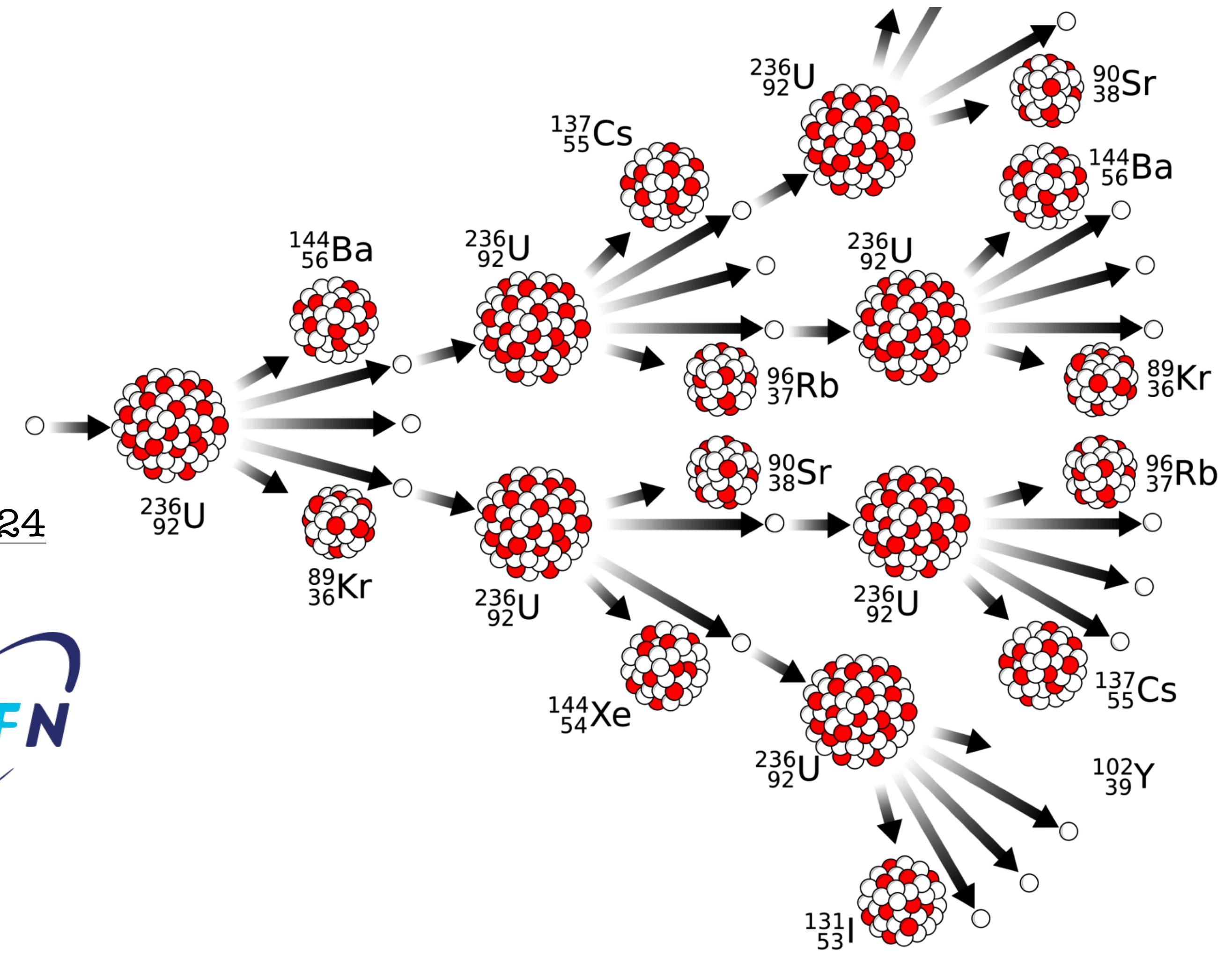


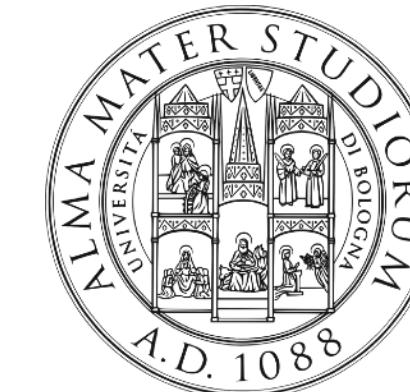
# Fisica delle reazioni nucleari

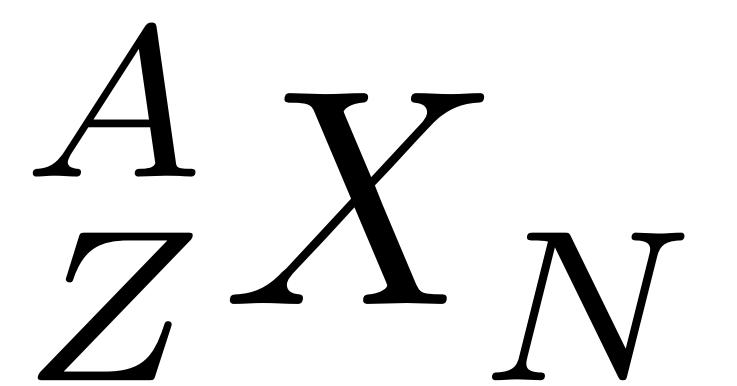
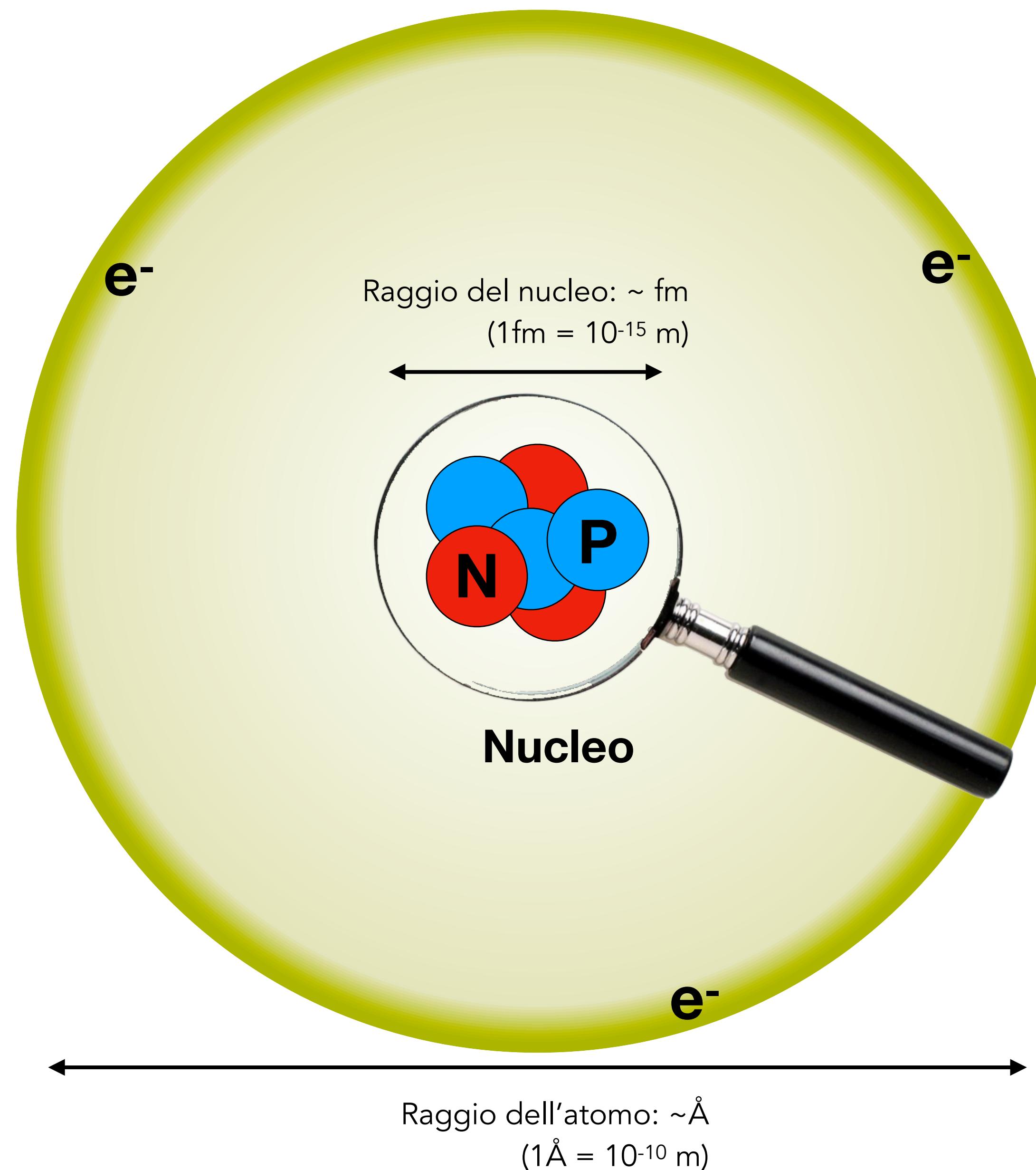
tutto (o quasi) ciò che serve per capire l'energia nucleare



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

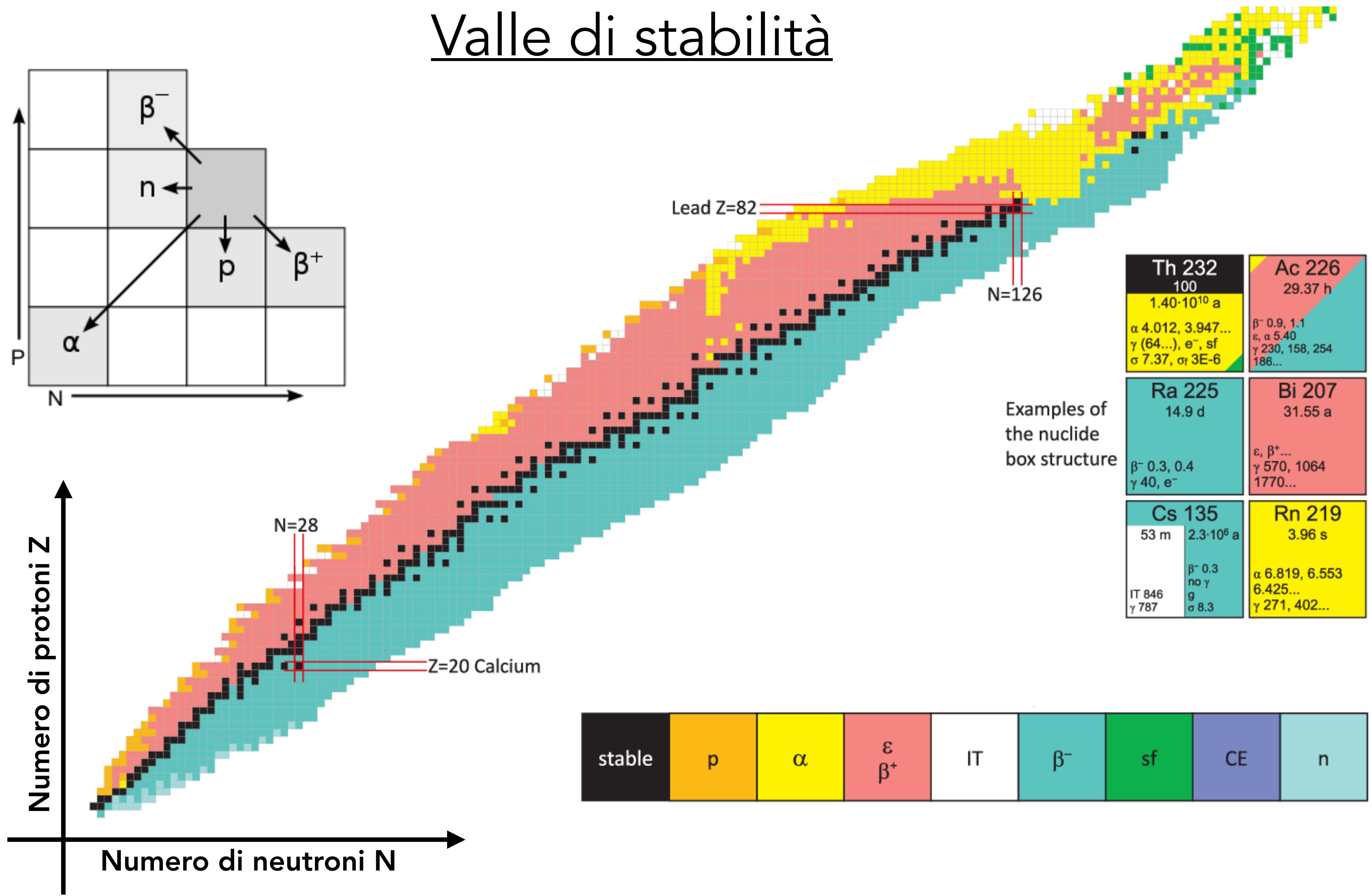
$$A = Z + N$$

## 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**.

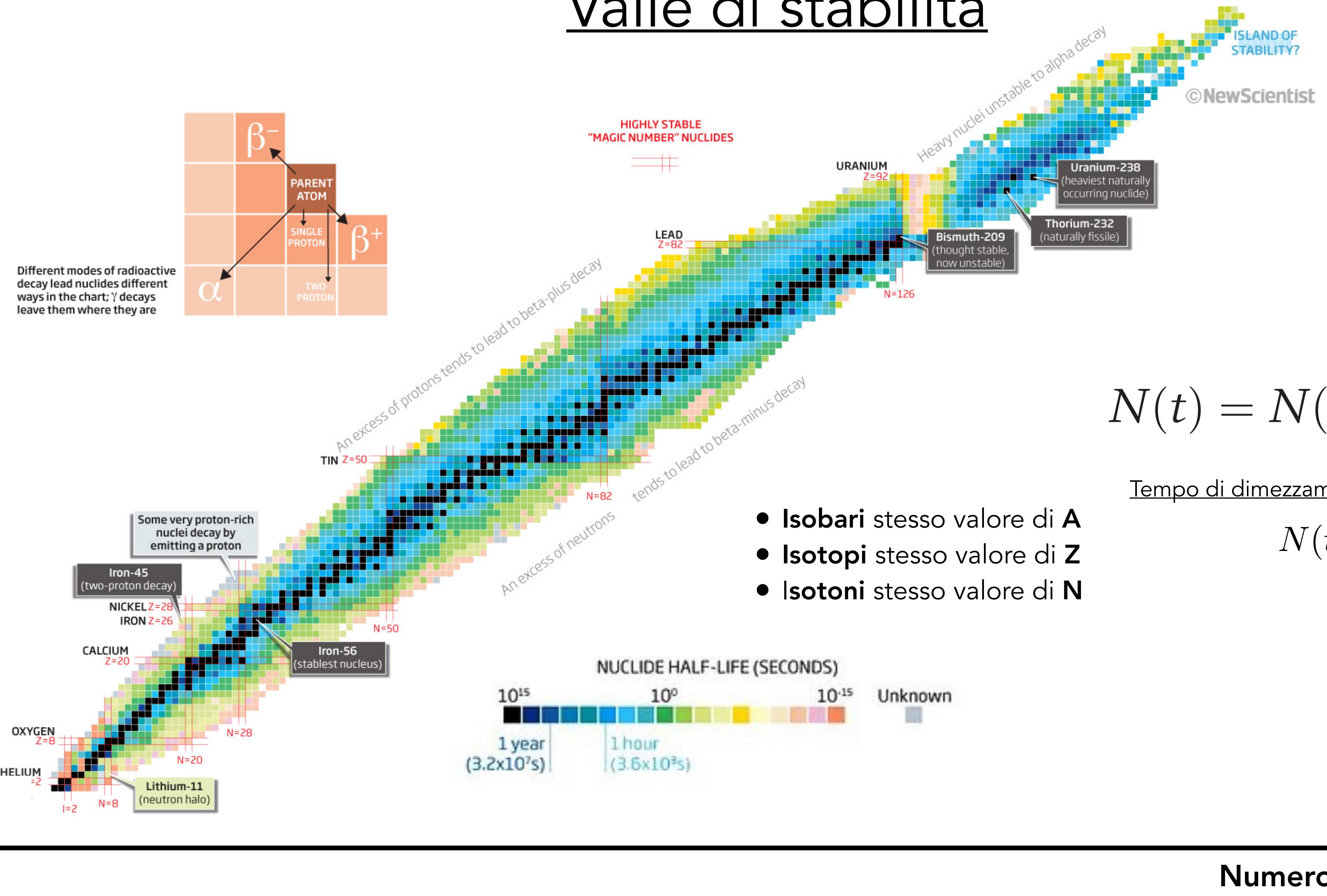
Particella	Simbolo	Carica elettrica (C)	Massa	
			(kg)	(u)
elettrone	<i>e</i>	$-1,60217653 \cdot 10^{-19}$	$9,10938 \cdot 10^{-31}$	$5,485799 \cdot 10^{-4}$
protone	<i>p</i>	$+1,60217653 \cdot 10^{-19}$	$1,67262 \cdot 10^{-27}$	1,007276
neutrone	<i>n</i>	0	$1,67493 \cdot 10^{-27}$	1,008665

# Valle di stabilità



# Valle di stabilità

Numeri di protoni Z



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

Tempo di dimezzamento (emivita, half-life)

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

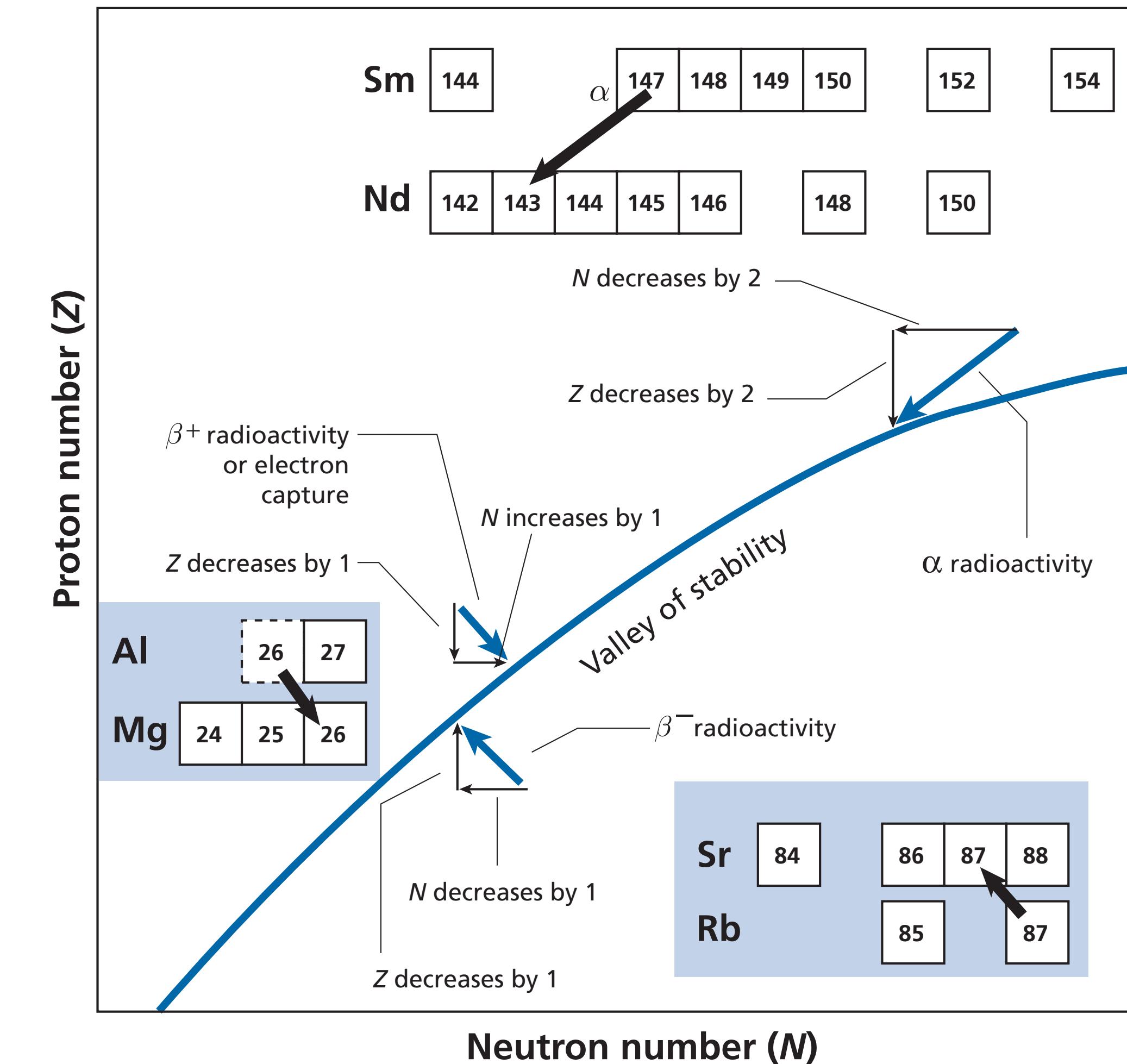
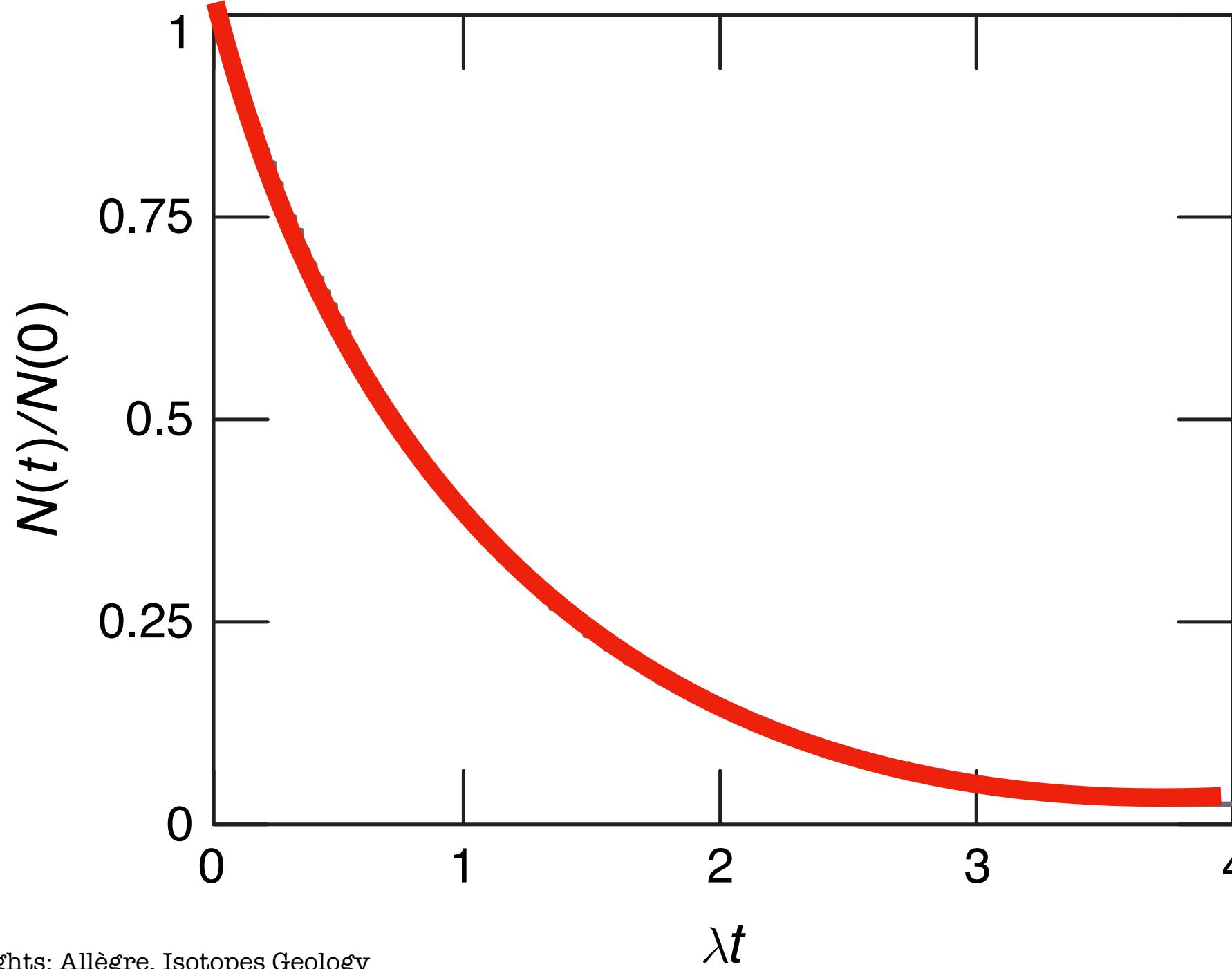
$$t_{1/2} = \frac{\log_e 2}{\lambda}$$

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

# 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



1	1 1.0080 <b>H</b> Hydrogen Nonmetal	2	18 <b>He</b> Helium Noble Gas
1	3 7.0 <b>Li</b> Lithium Alkali Metal	2	4 9.012183 <b>Be</b> Beryllium Alkaline Earth Me...
2	11 22.989... <b>Na</b> Sodium Alkali Metal	3	12 24.305 <b>Mg</b> Magnesium Alkaline Earth Me...
3	19 39.0983 <b>K</b> Potassium Alkali Metal	4	20 40.08 <b>Ca</b> Calcium Alkaline Earth Me...
4	21 44.95591 <b>Sc</b> Scandium Transition Metal	5	22 47.867 <b>Ti</b> Titanium Transition Metal
5	23 50.9415 <b>V</b> Vanadium Transition Metal	6	24 51.996 <b>Cr</b> Chromium Transition Metal
6	25 54.93804 <b>Mn</b> Manganese Transition Metal	7	26 55.84 <b>Fe</b> Iron Transition Metal
7	27 58.93319 <b>Co</b> Cobalt Transition Metal	8	28 58.693 <b>Ni</b> Nickel Transition Metal
8	29 63.55 <b>Cu</b> Copper Transition Metal	9	30 65.4 <b>Zn</b> Zinc Transition Metal
9	31 69.723 <b>Ga</b> Gallium Post-Transition M...	10	32 72.63 <b>Ge</b> Germanium Metalloid
10	33 74.92159 <b>As</b> Arsenic Metalloid	11	34 78.97 <b>Se</b> Selenium Nonmetal
11	35 79.90 <b>Br</b> Bromine Halogen	12	36 83.80 <b>Kr</b> Krypton Noble Gas
12	37 85.468 <b>Rb</b> Rubidium Alkali Metal	13	38 87.62 <b>Sr</b> Strontium Alkaline Earth Me...
13	39 88.90584 <b>Y</b> Yttrium Transition Metal	14	40 91.22 <b>Zr</b> Zirconium Transition Metal
14	41 92.90637 <b>Nb</b> Niobium Transition Metal	15	42 95.95 <b>Mo</b> Molybdenum Transition Metal
15	43 96.90636 <b>Tc</b> Technetium Transition Metal	16	44 101.1 <b>Ru</b> Ruthenium Transition Metal
16	45 102.9055 <b>Rh</b> Rhodium Transition Metal	17	46 106.42 <b>Pd</b> Palladium Transition Metal
17	47 107.868 <b>Ag</b> Silver Transition Metal	18	48 112.41 <b>Cd</b> Cadmium Transition Metal
18	49 114.818 <b>In</b> Indium Post-Transition M...	19	50 118.71 <b>Sn</b> Tin Post-Transition M...
19	51 121.760 <b>Sb</b> Antimony Metalloid	20	52 127.6 <b>Te</b> Tellurium Metalloid
20	53 126.9045 <b>I</b> Iodine Halogen	21	54 131.29 <b>Xe</b> Xenon Noble Gas
21	55 132.90... <b>Cs</b> Cesium Alkali Metal	22	56 137.33 <b>Ba</b> Barium Alkaline Earth Me...
22	57 178.49 <b>Hf</b> Hafnium Transition Metal	23	58 180.9479 <b>Ta</b> Tantalum Transition Metal
23	59 183.84 <b>W</b> Tungsten Transition Metal	24	60 186.207 <b>Re</b> Rhenium Transition Metal
24	61 190.2 <b>Os</b> Osmium Transition Metal	25	62 192.22 <b>Ir</b> Iridium Transition Metal
25	63 195.08 <b>Pt</b> Platinum Transition Metal	26	64 196.96... <b>Au</b> Gold Transition Metal
26	65 200.59 <b>Hg</b> Mercury Transition Metal	27	66 204.383 <b>Tl</b> Thallium Post-Transition M...
27	67 204.383 <b>Pb</b> Lead Post-Transition M...	28	68 207 <b>Bi</b> Bismuth Post-Transition M...
28	69 208.98... <b>Po</b> Polonium Metalloid	29	70 209.98... <b>At</b> Astatine Halogen
29	71 222.01... <b>Rn</b> Radon Noble Gas	30	72 223.01... <b>Fr</b> Francium Alkali Metal
31	73 226.02... <b>Ra</b> Radium Alkaline Earth Me...	32	74 226.1... <b>Rf</b> Rutherfordium Transition Metal
32	75 267.1... <b>Db</b> Dubnium Transition Metal	33	76 268.1... <b>Sg</b> Seaborgium Transition Metal
33	77 270.1... <b>Bh</b> Bohrium Transition Metal	34	78 269.1... <b>Hs</b> Hassium Transition Metal
34	79 277.1... <b>Mt</b> Meitnerium Transition Metal	35	80 282.1... <b>Ds</b> Darmstadtium Transition Metal
35	81 282.1... <b>Rg</b> Roentgenium Transition Metal	36	82 286.1... <b>Cn</b> Copernicium Transition Metal
36	83 286.1... <b>Nh</b> Nihonium Post-Transition M...	37	84 290.1... <b>Fl</b> Flerovium Post-Transition M...
37	85 290.1... <b>Mc</b> Moscovium Post-Transition M...	38	86 293.2... <b>Lv</b> Livermorium Post-Transition M...
38	87 294.2... <b>Ts</b> Tennessine Halogen	39	88 295.2... <b>Og</b> Oganesson Noble Gas
39	57 138.9055 <b>La</b> Lanthanum Lanthanide	40	58 140.116 <b>Ce</b> Cerium Lanthanide
40	41 140.90... <b>Pr</b> Praseodymium Lanthanide	41	42 144.24 <b>Nd</b> Neodymium Lanthanide
41	43 144.91... <b>Pm</b> Promethium Lanthanide	42	44 150.4 <b>Sm</b> Samarium Lanthanide
42	45 151.964 <b>Eu</b> Europium Lanthanide	43	46 157.2 <b>Gd</b> Gadolinium Lanthanide
43	47 158.92... <b>Tb</b> Terbium Lanthanide	44	48 162.500 <b>Dy</b> Dysprosium Lanthanide
44	49 164.93... <b>Ho</b> Holmium Lanthanide	45	50 167.26 <b>Er</b> Erbium Lanthanide
45	51 168.93... <b>Tm</b> Thulium Lanthanide	46	52 173.05 <b>Yb</b> Ytterbium Lanthanide
46	53 174.9668 <b>Lu</b> Lutetium Lanthanide	47	54 227.02... <b>Ac</b> Actinium Actinide
47	55 232.038 <b>Th</b> Thorium Actinide	48	56 231.03... <b>Pa</b> Protactinium Actinide
48	57 238.0289 <b>U</b> Uranium Actinide	49	58 237.04... <b>Np</b> Neptunium Actinide
49	59 244.06... <b>Pu</b> Plutonium Actinide	50	60 243.06... <b>Am</b> Americium Actinide
50	61 247.07... <b>Cm</b> Curium Actinide	51	62 247.07... <b>Bk</b> Berkelium Actinide
51	63 251.07... <b>Cf</b> Californium Actinide	52	64 252.0830 <b>Es</b> Einsteinium Actinide
52	65 257.0... <b>Fm</b> Fermium Actinide	53	66 258.0... <b>Md</b> Mendelevium Actinide
53	67 259.1... <b>No</b> Nobelium Actinide	54	68 266.1... <b>Lr</b> Lawrencium Actinide

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

# 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.)**

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

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

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

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

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

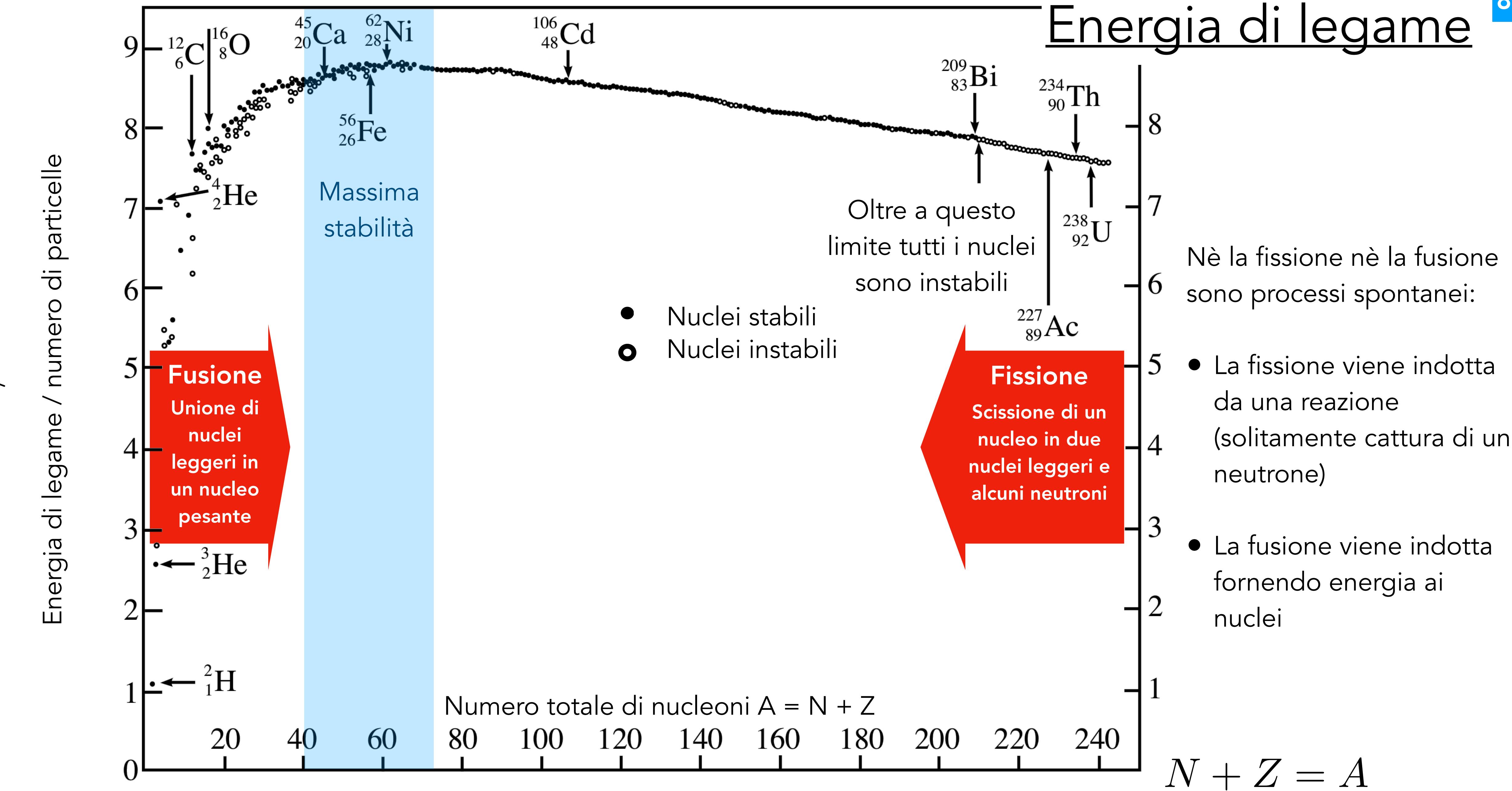
**Equivalenza massa-energia**

$$E = mc^2$$

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

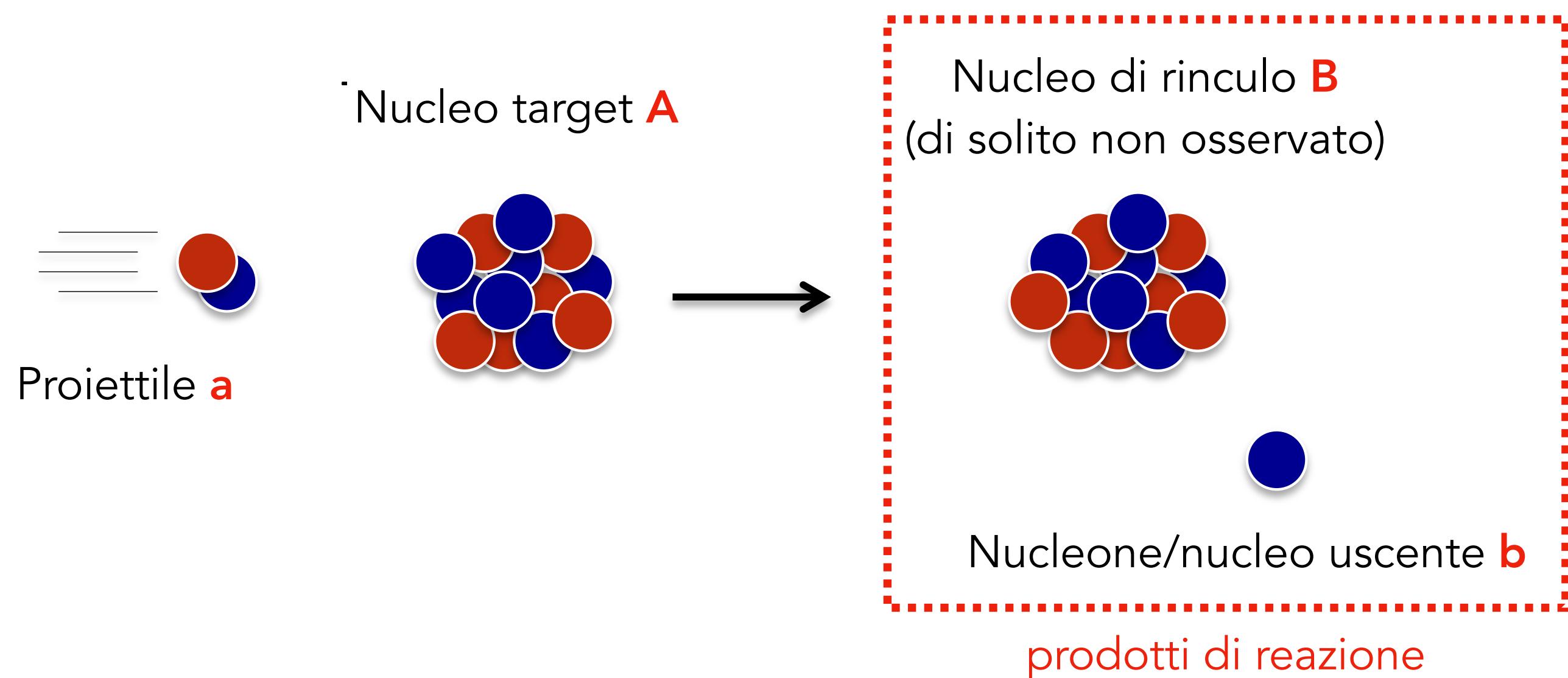
L'**elettronvolt** è definito come l'energia acquistata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, che si muove nel vuoto tra due punti in una regione tra cui esiste una differenza di potenziale elettrostatico di 1 volt.  $1 \text{ eV} = 1,602\ 176\ 46 \times 10^{-19} \text{ J}$

# Energia di legame



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

Una tipica reazione nucleare può essere scritta come segue

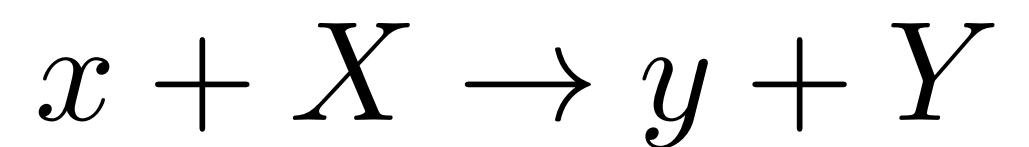


**Reazione diretta:** solo pochi nucleoni prendono parte alla reazione. I rimanenti nucleoni del bersaglio fungono da spettatori

**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

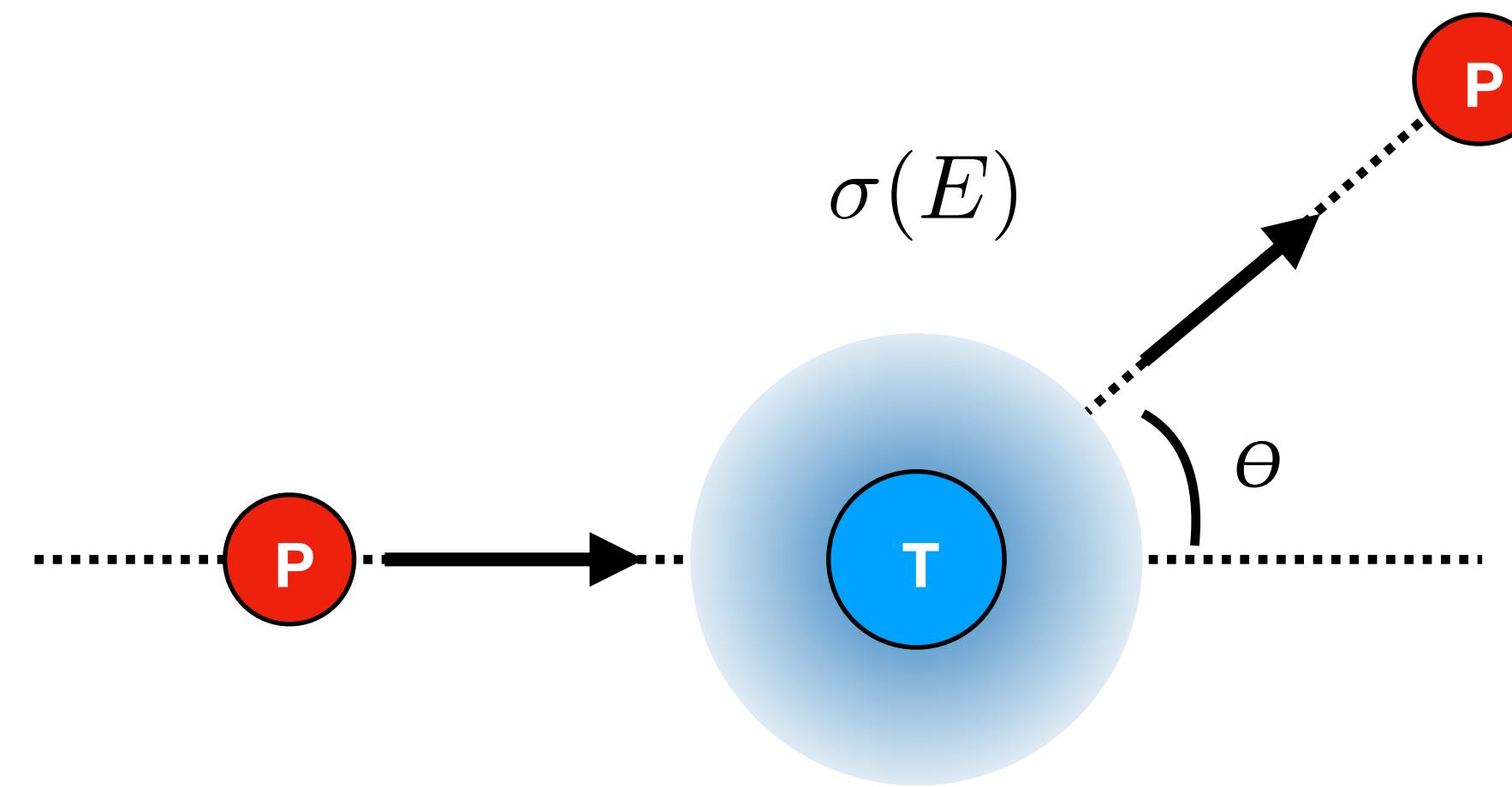
**Sezione d'urto:** grandezza che caratterizza una reazione nucleare (di qualsivoglia genere) interpretabile come area effettiva di un target (obiettivo) nucleare. Definiamo la sezione d'urto totale come segue:

flusso incidente  
*incident flux*

$$\Phi = \frac{dN_{in}}{dSdt}$$

tasso di interazione  
*reaction rate*

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



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

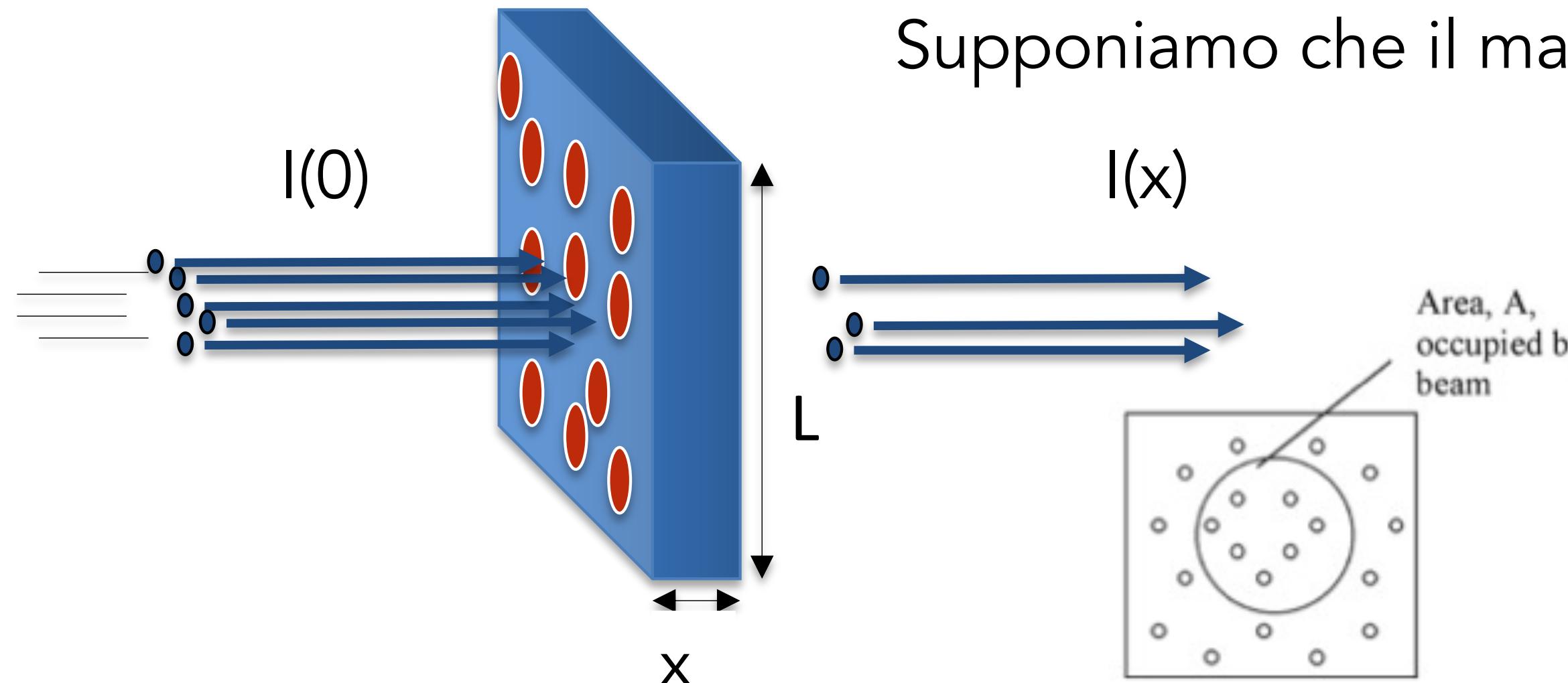
$$\sigma = \frac{\frac{dN_r}{dt}}{\Phi}$$

Poiché il raggio nucleare è di circa  $10^{-12}$  cm, l'area geometrica della sezione trasversale del nucleo è di circa  **$10^{-24} \text{ cm}^2 = 1 \text{ barn}$** , 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

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

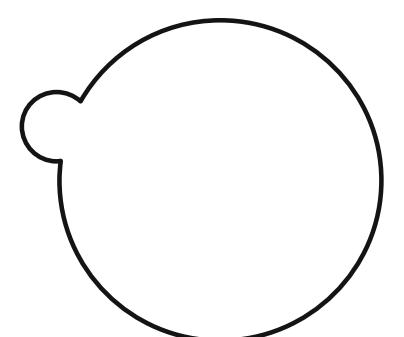
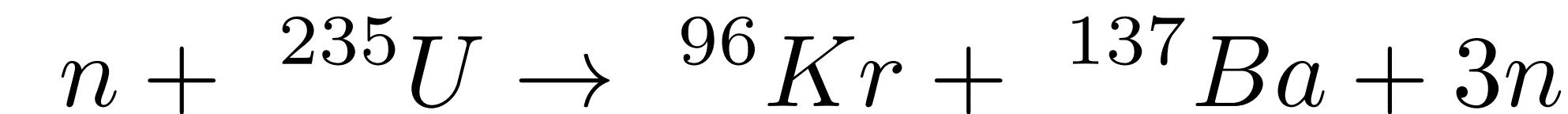
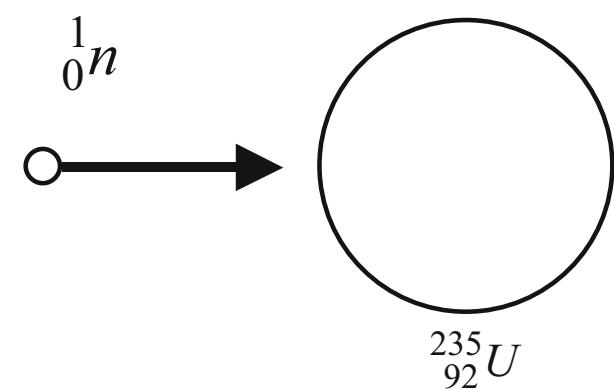
$$\Sigma = \frac{\rho}{A} N_A \sigma$$

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

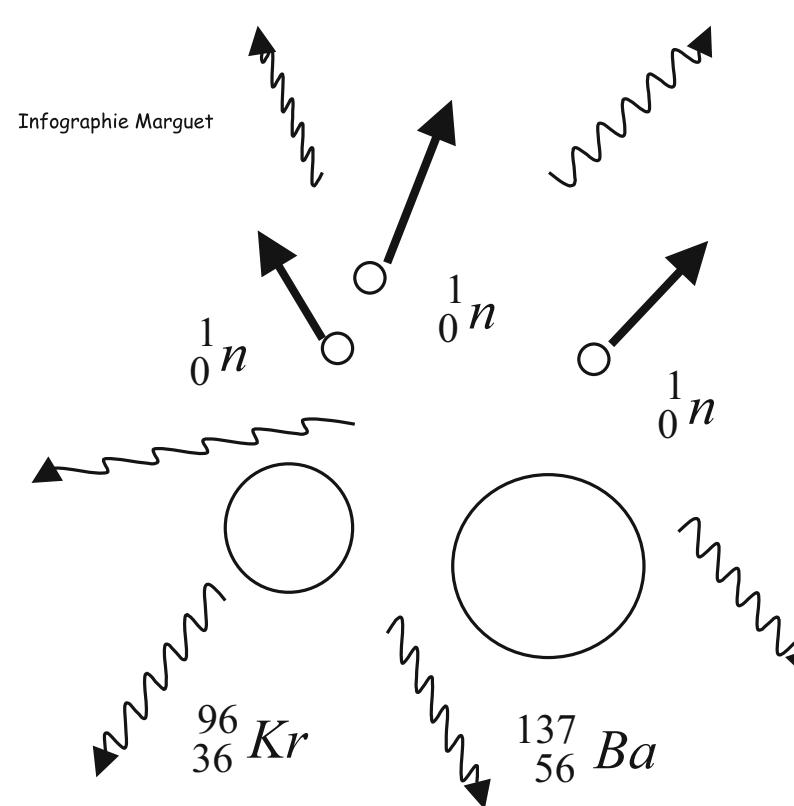
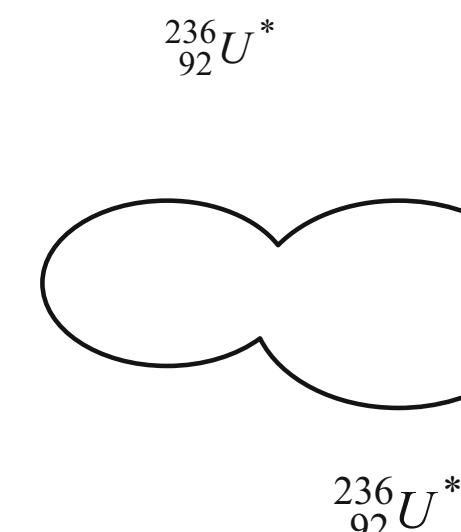
$1/\Sigma$  **cammino libero medio**  
*mean free path*

# Fissione nucleare

# Quanta energia viene rilasciata da un processo di fissione?



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



Energia cinetica dei prodotti di fissione	<b><math>166.2 \pm 1.3 \text{ MeV}</math></b>
Energia raggi $\gamma$ immediati (prompt)	$8.0 \pm 0.8 \text{ MeV}$
Energia raggi $\gamma$ ritardati (delayed)	$7.2 \pm 1.1 \text{ MeV}$
Energia raggi $\beta$	$7.0 \pm 0.3 \text{ MeV}$
Energia cinetica dei neutroni	$4.8 \pm 0.1 \text{ MeV}$
...	...

# 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)
Fissione nucleare (dell'U 235 puro)	88.250.000
Fusione nucleare deuterio-trizio	337.000.000
Benzina	46,9
Gas naturale (compresso) a 200 bar	53,6
Gasolio da riscaldamento	45,8

# Dinamica di un processo di fissione (I)

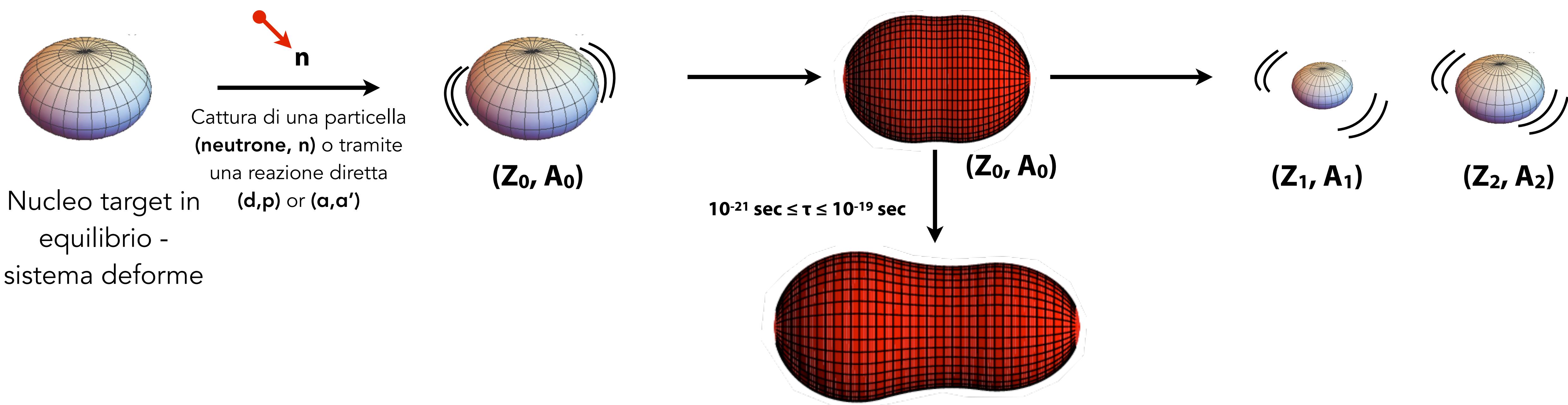


**Partenza**

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

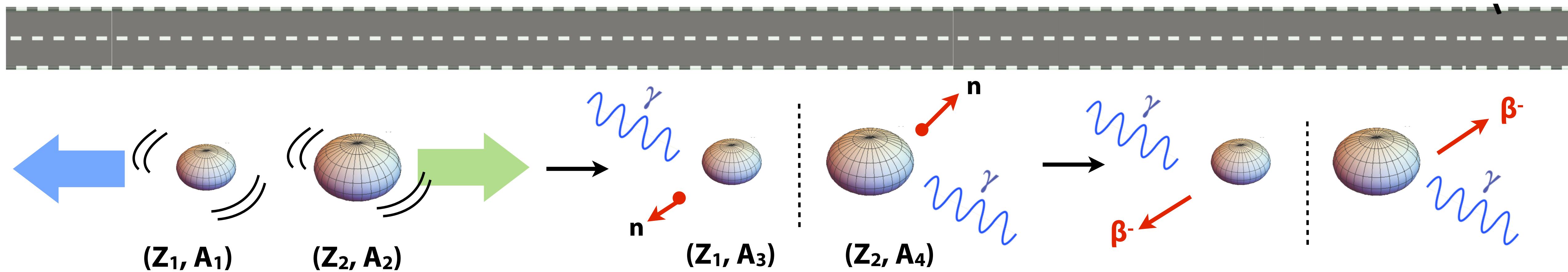
Stato transizionale con  
deformazione  
asimmetrica di massa  
(se il neutrone è di  
bassa energia)

Configurazione di fissione con  
frammenti deformati; energie  
cinetiche inizialmente piccole



Nucleo target in  
equilibrio -  
sistema deforme

# Dinamica di un processo di fissione (II)

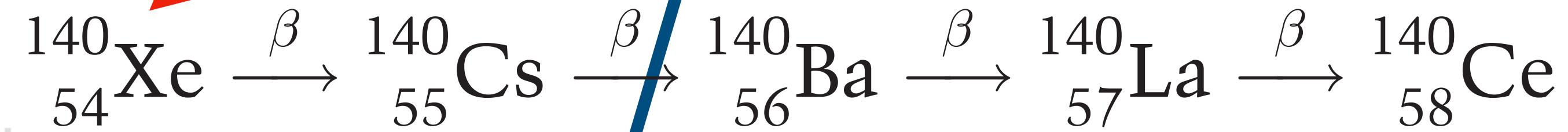
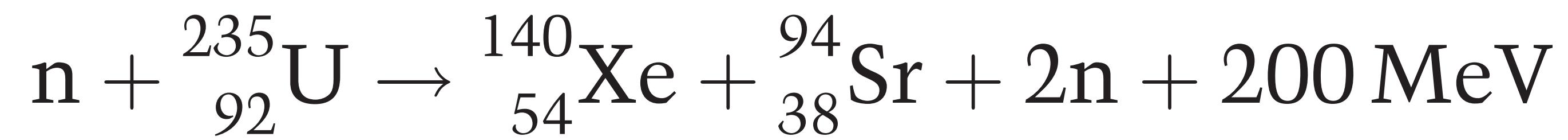
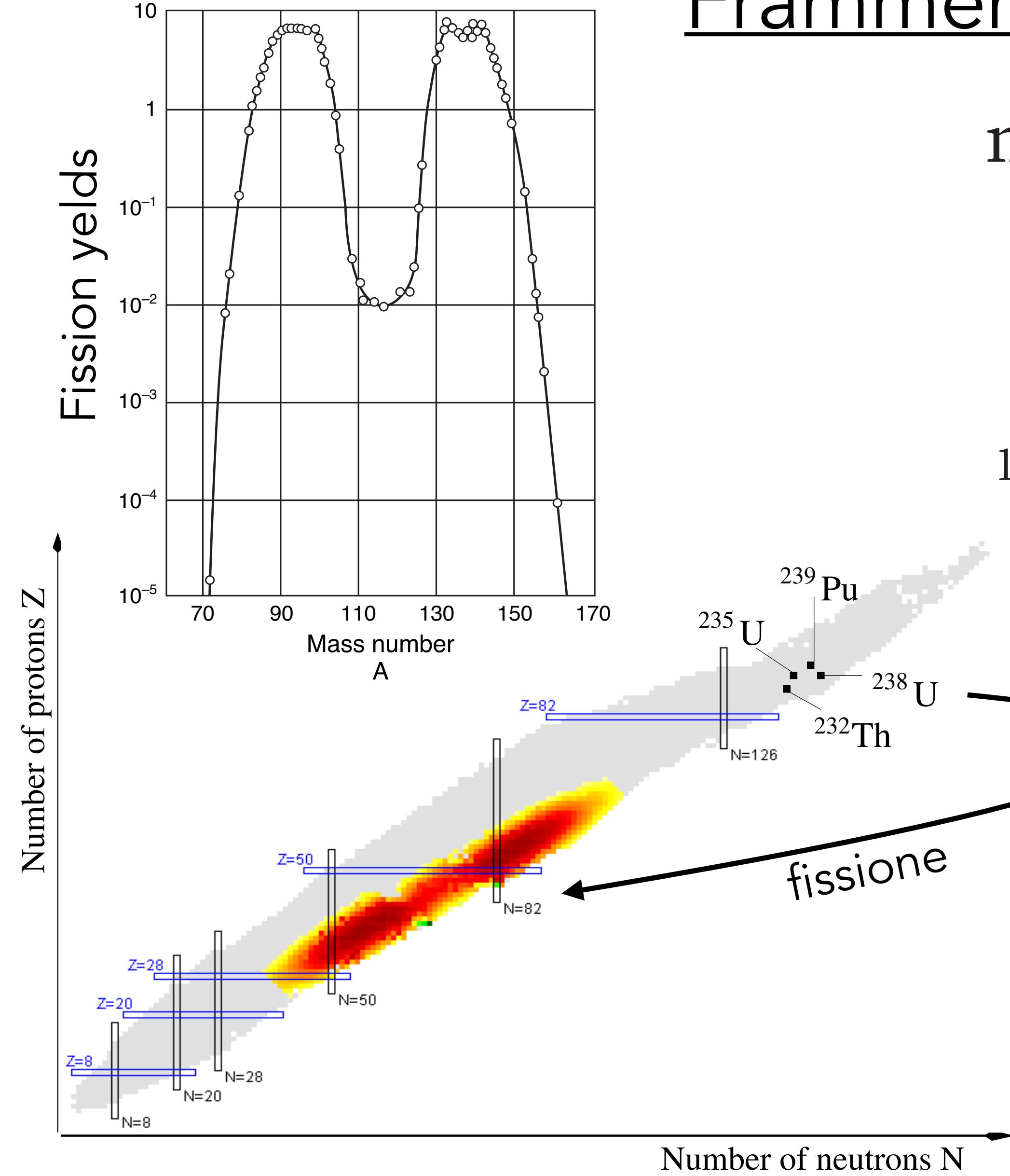


Per effetto dell'interazione coulombiana i frammenti si respingono, in circa  $10^{-20}$  sec raggiungono il 90% della loro energia cinetica finale

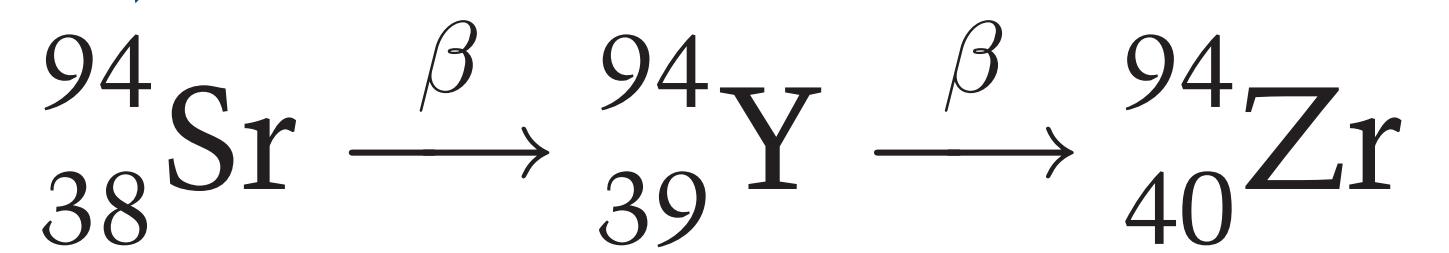
Tempo di emissione dei **neutroni veloci** (prompt neutrons)  
 $10^{-18}$  sec -  $10^{-16}$  sec.  
 Emissione dei raggi  $\gamma$  in tempi dell'ordine  $\sim 10^{-14}$  sec -  $10^{-12}$  sec

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

## Frammenti di fissione

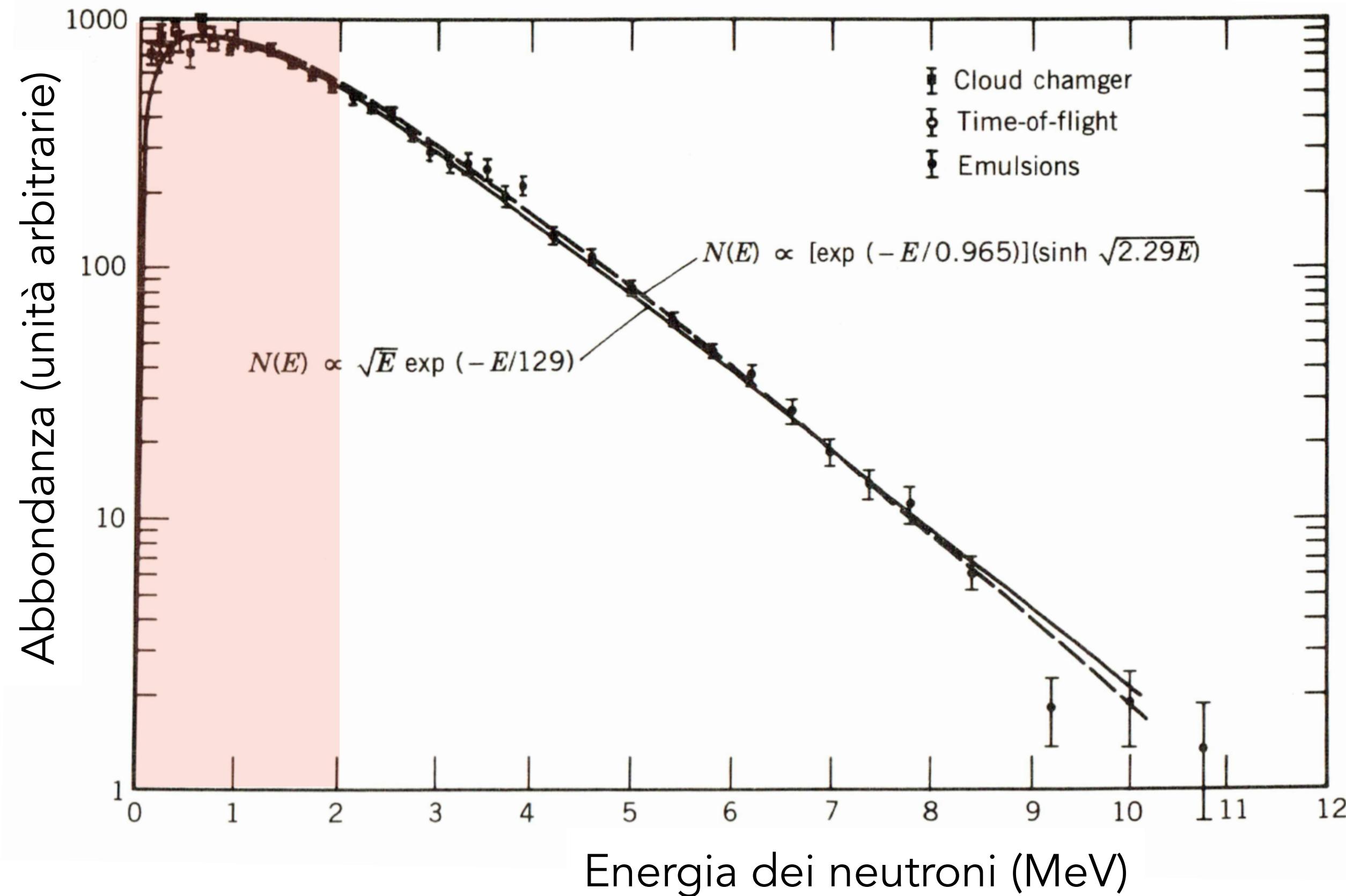
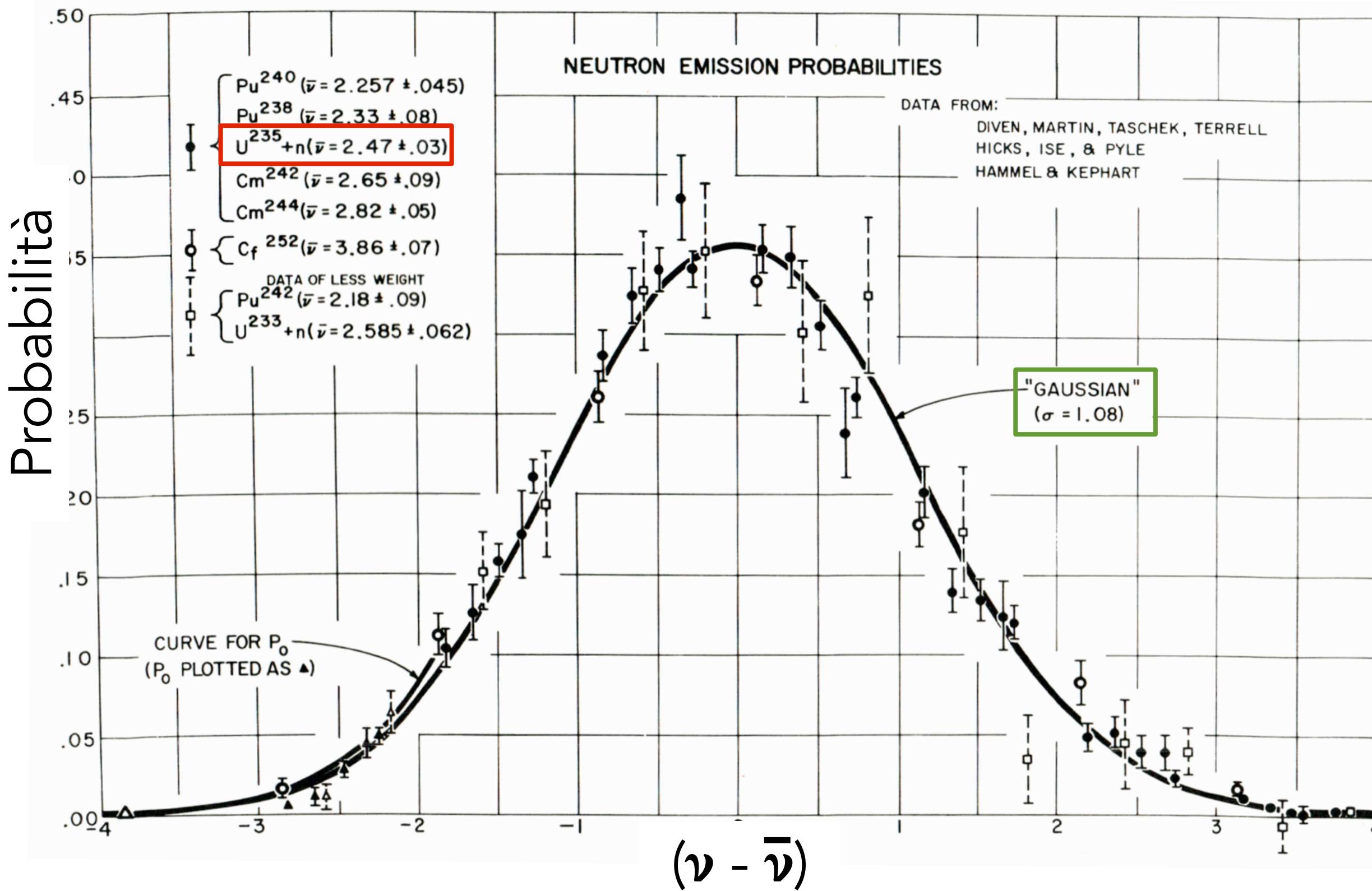


grande energia cinetica → calore  
radioattivi → no dispersione



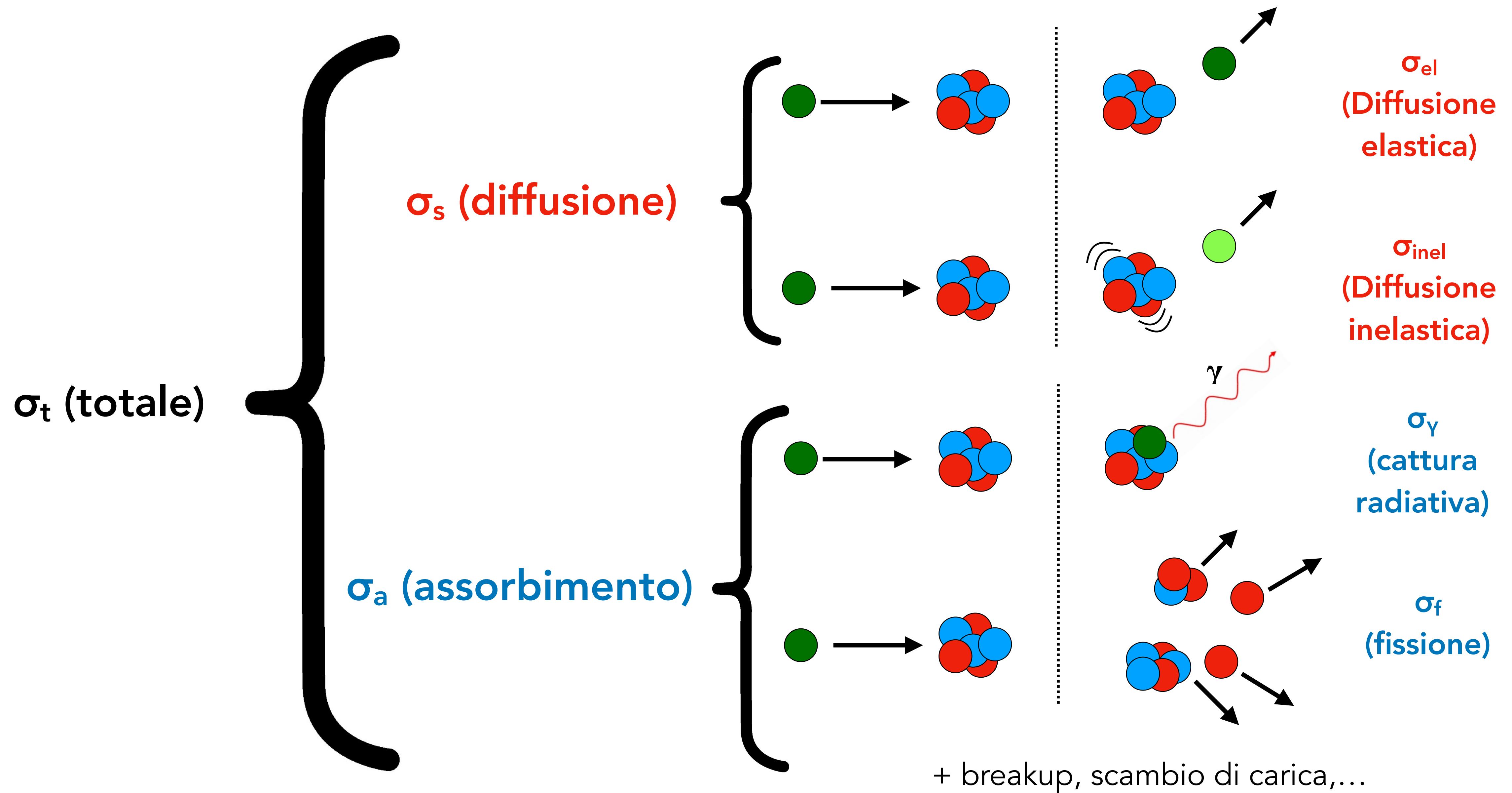
Il processo di fissione origina coppie di frammenti distribuiti *asimmetricamente* rispetto ad A, con due picchi a  $A \approx 95$  e  $A \approx 140$

# 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

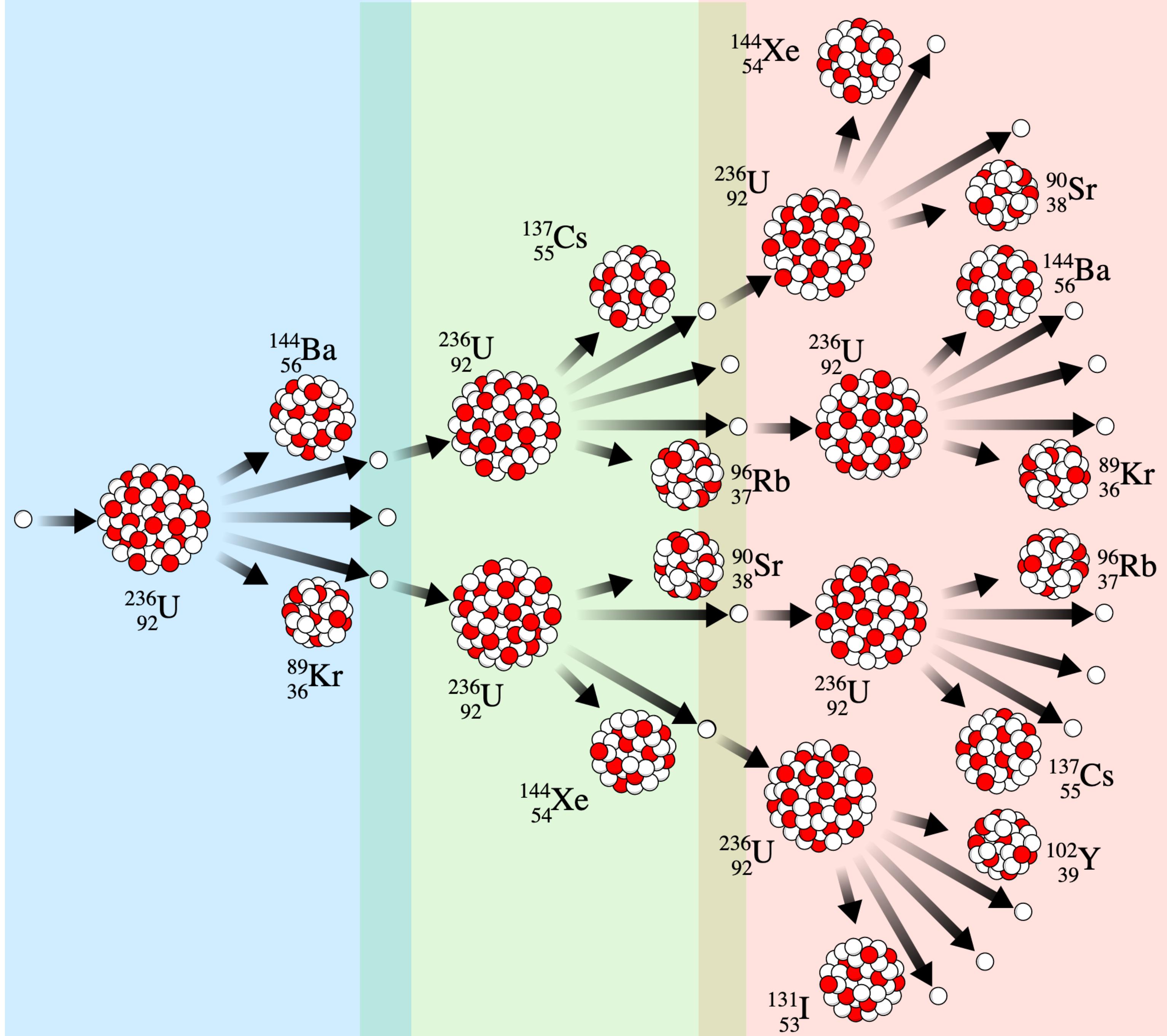
# Reazioni indotte da neutroni rilevanti per capire la dinamica di un reattore



# Reazione a catena

L'idea alla base della produzione di energia tramite fissione 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

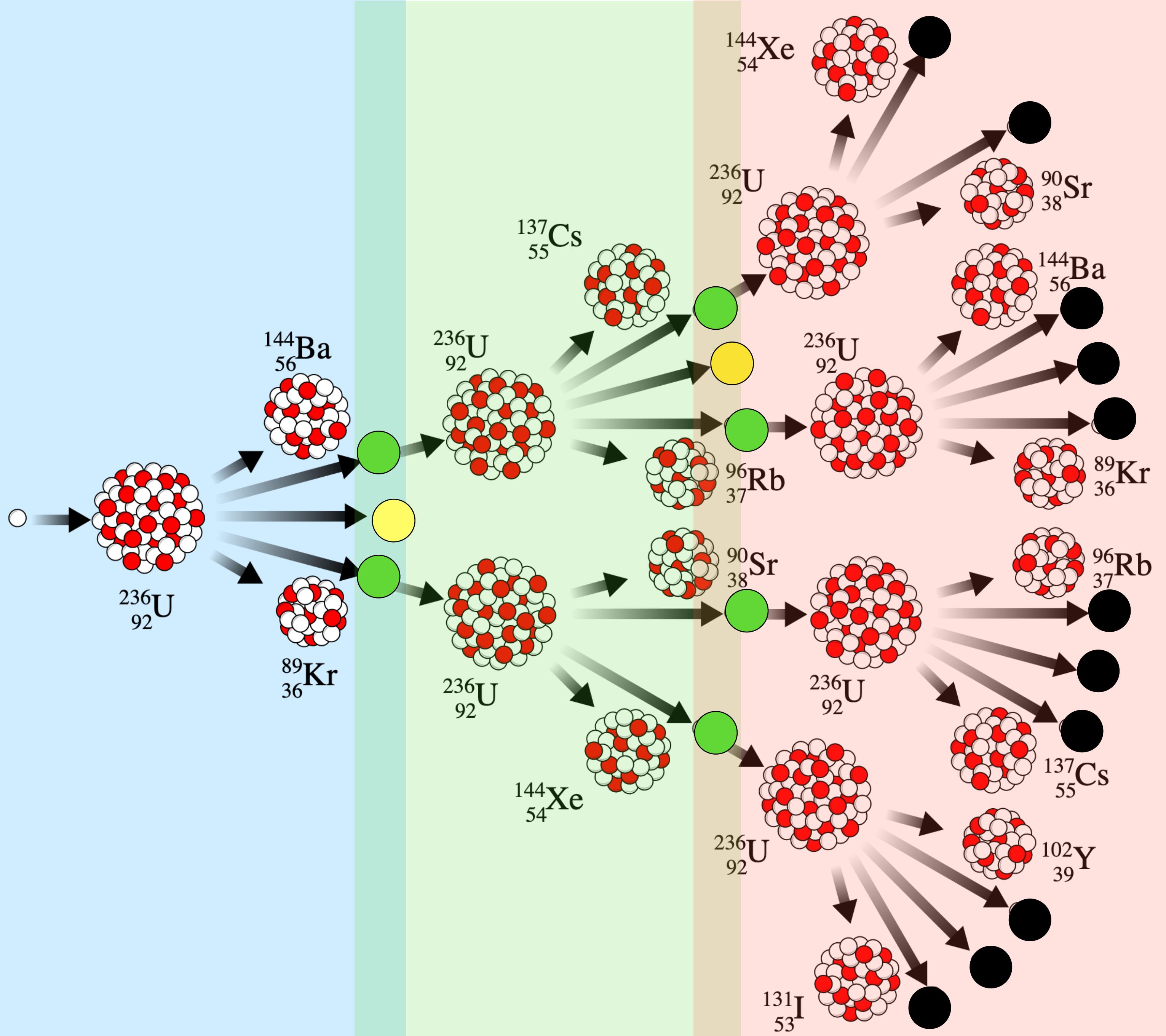


Copyrights: Wikipedia

# Reazione a catena

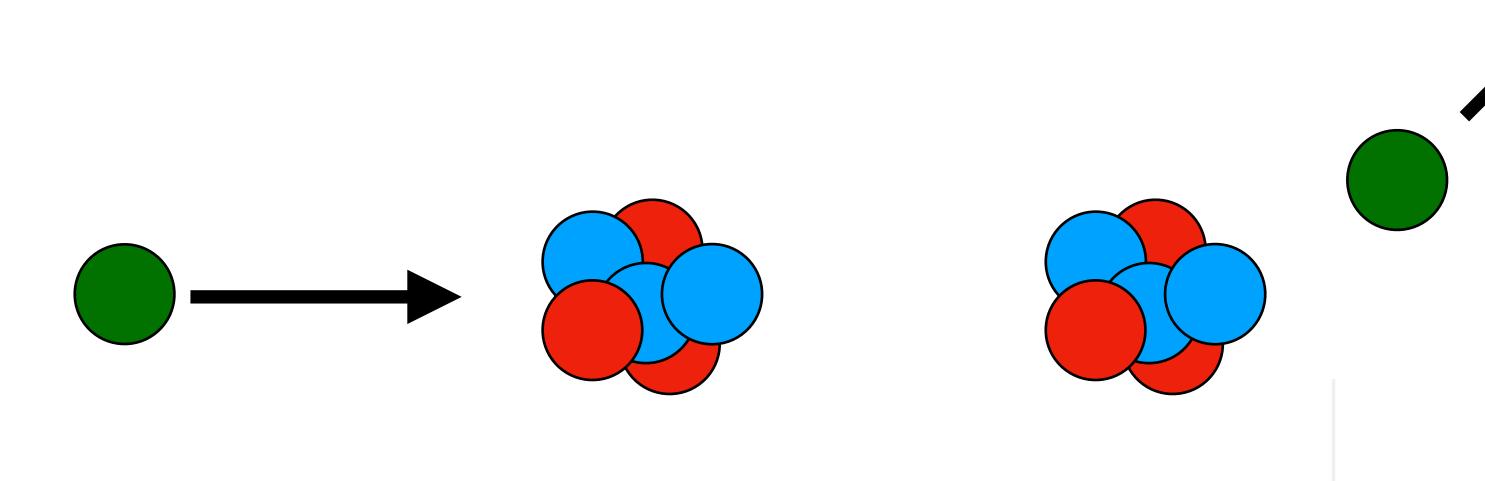
Non tutti i neutroni sono utilizzabili, alcuni vanno persi (🟡). Alcuni vanno persi perché ci sono altre reazioni in competizione, altri perché assorbiti dagli elementi del reattore.

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



# Sezione d'urto elastica indotta da neutroni

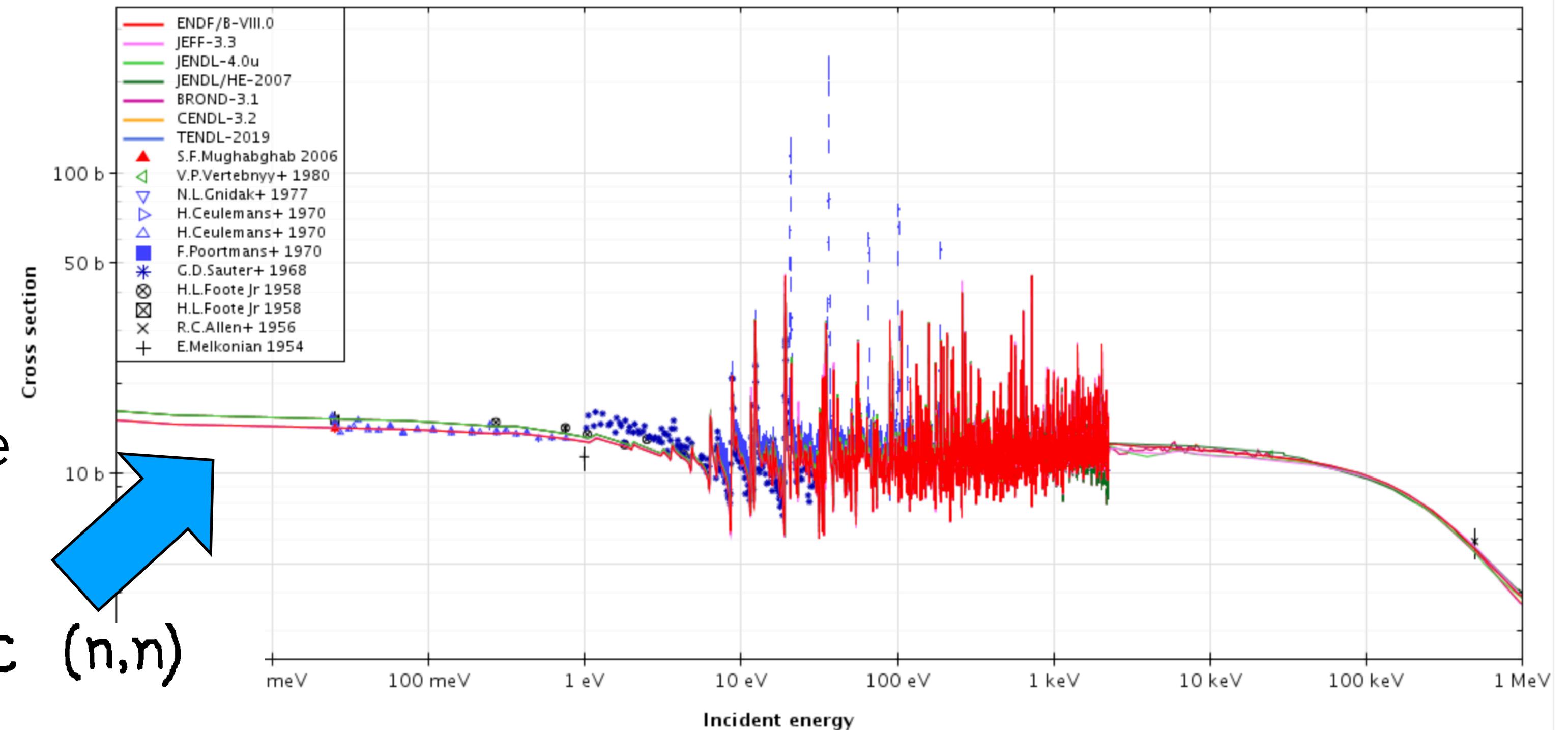
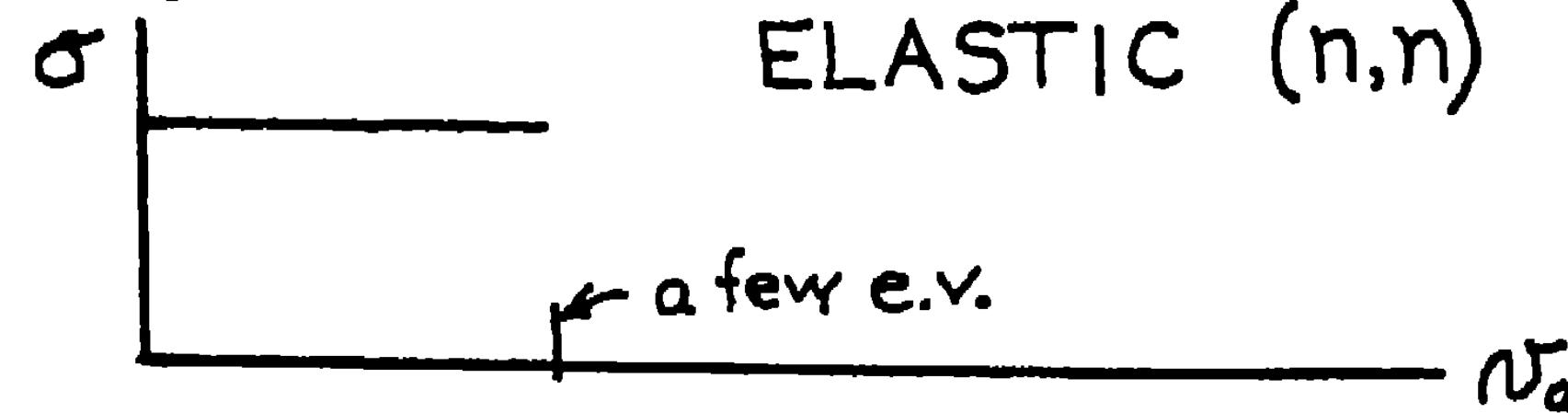
$$\sigma_{A \rightarrow B} = \frac{1}{\pi \hbar^4} |M_{fi}|^2 \frac{p_b^2}{v_a v_b} (2I_b + 1)(2I_B + 1)$$



L'energia cinetica del proiettile rimane invariata

$$v_a = v_b$$

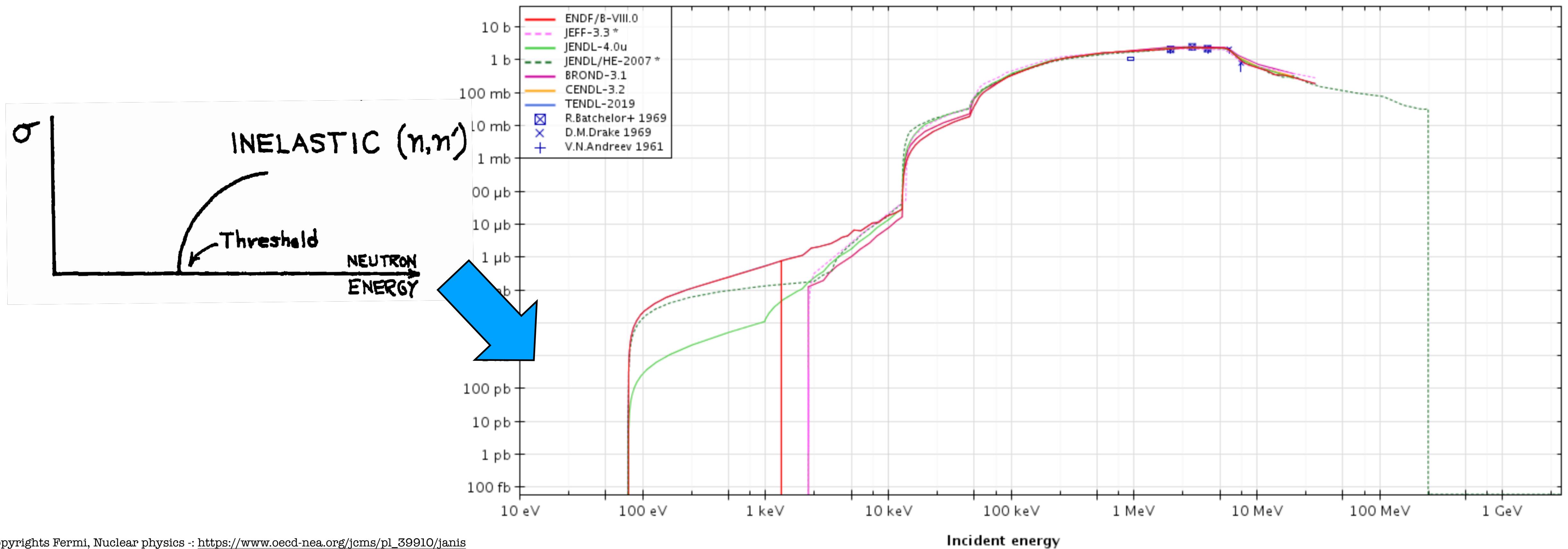
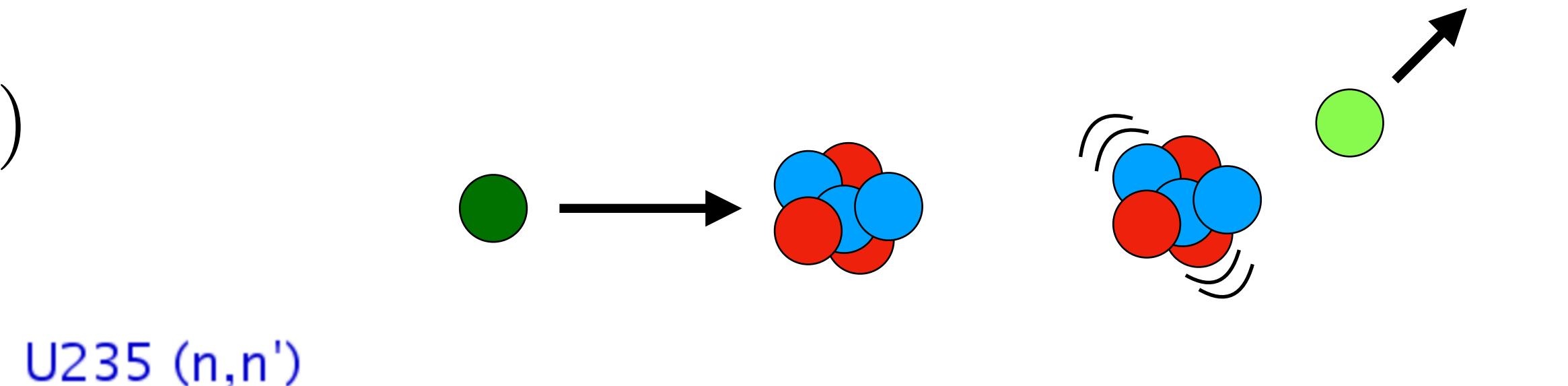
$\sigma$  è costante a basse energie



# Sezione d'urto inelastica indotta da neutroni

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

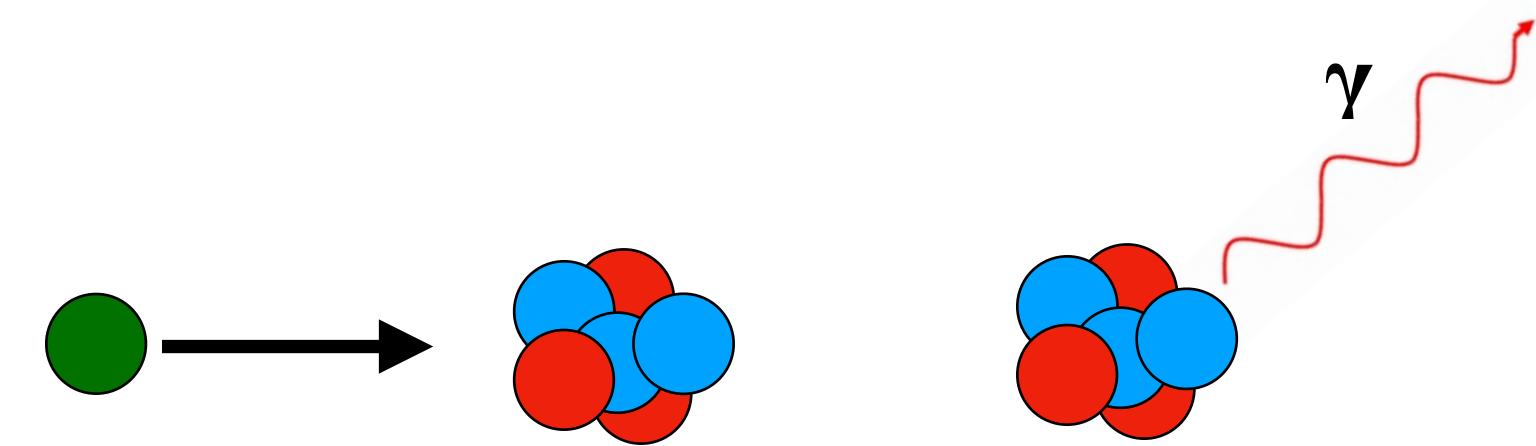
$$p_{n'}^2 / v_n v_{n'} \propto v_{n'} \propto \sqrt{E \text{ above threshold}}$$



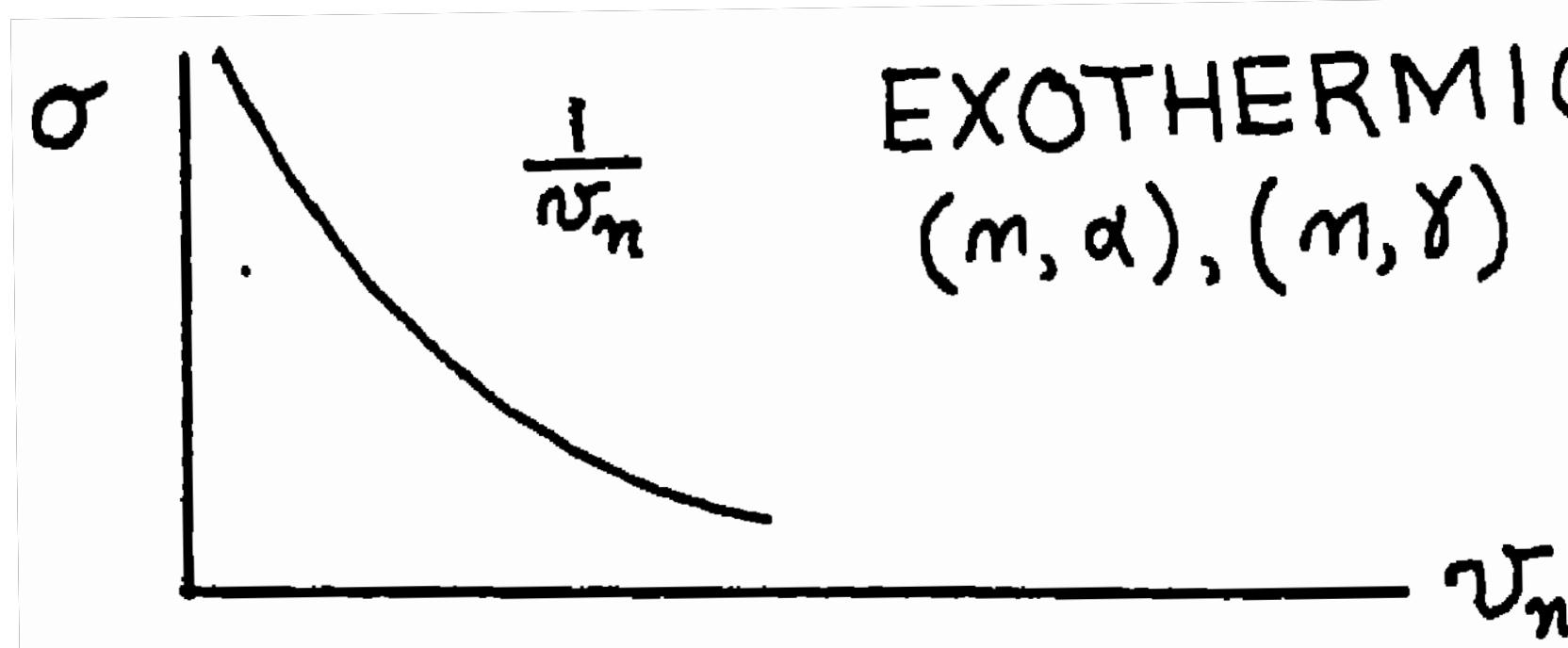
# Sezione d'urto ( $n,\gamma$ )

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

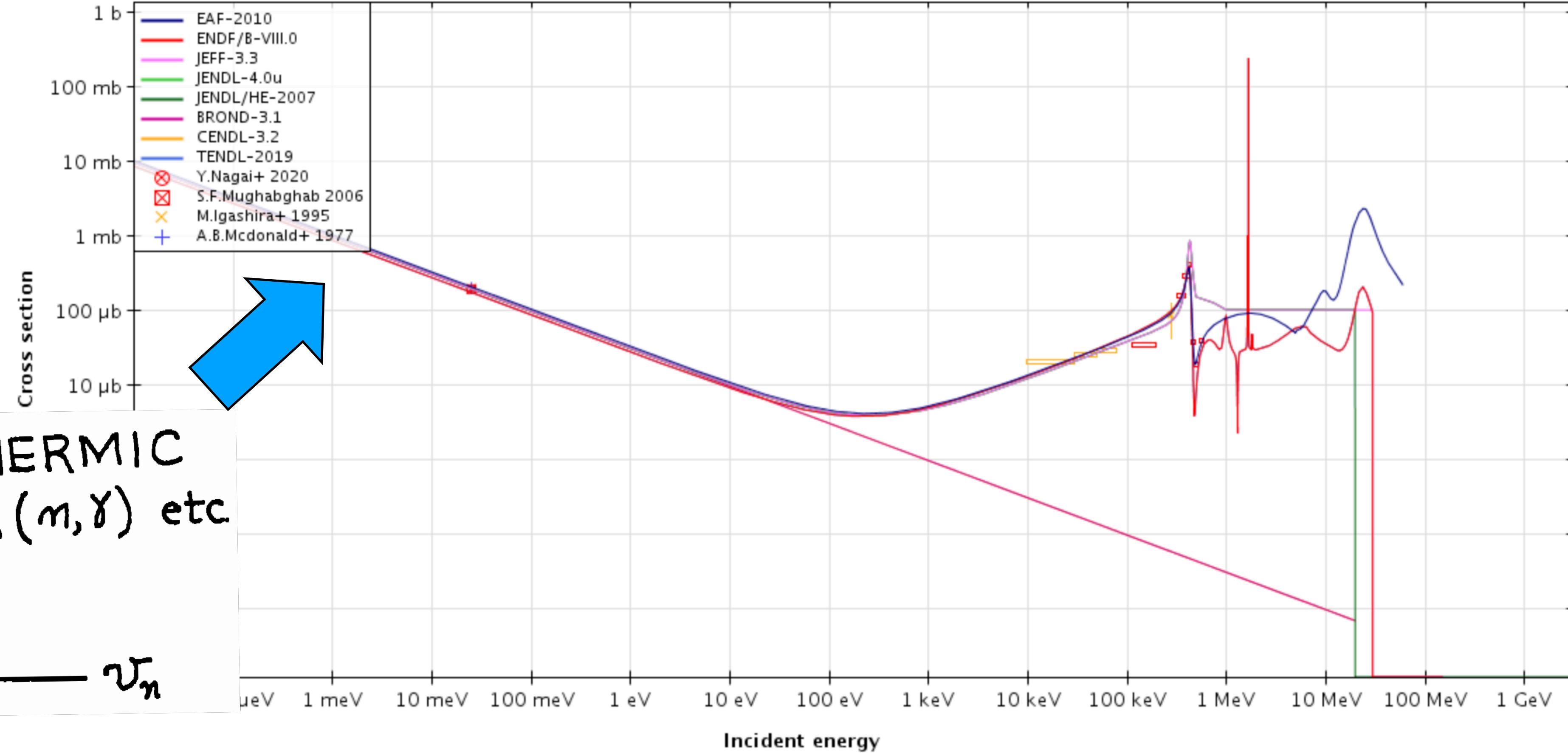
O16 ( $n,\gamma$ ) or O17 production



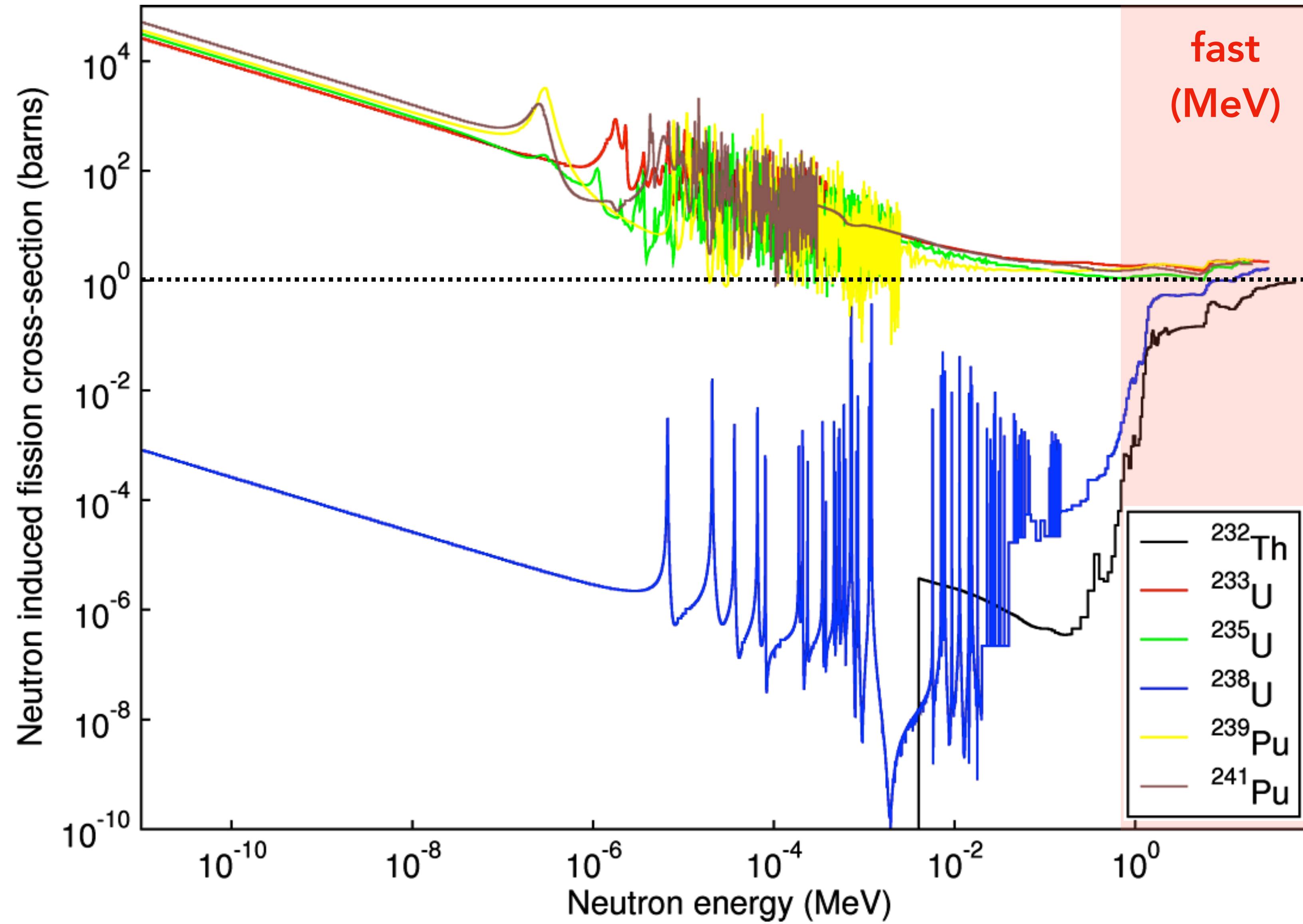
$$p_b^2/v_a v_b \propto 1/v_a$$



EXOTHERMIC  
( $m,\alpha$ ), ( $m,\gamma$ ) etc



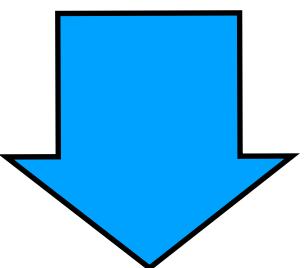
# Sezione d'urto per fissione indotta da neutroni



**Regione dei neutroni veloci.**

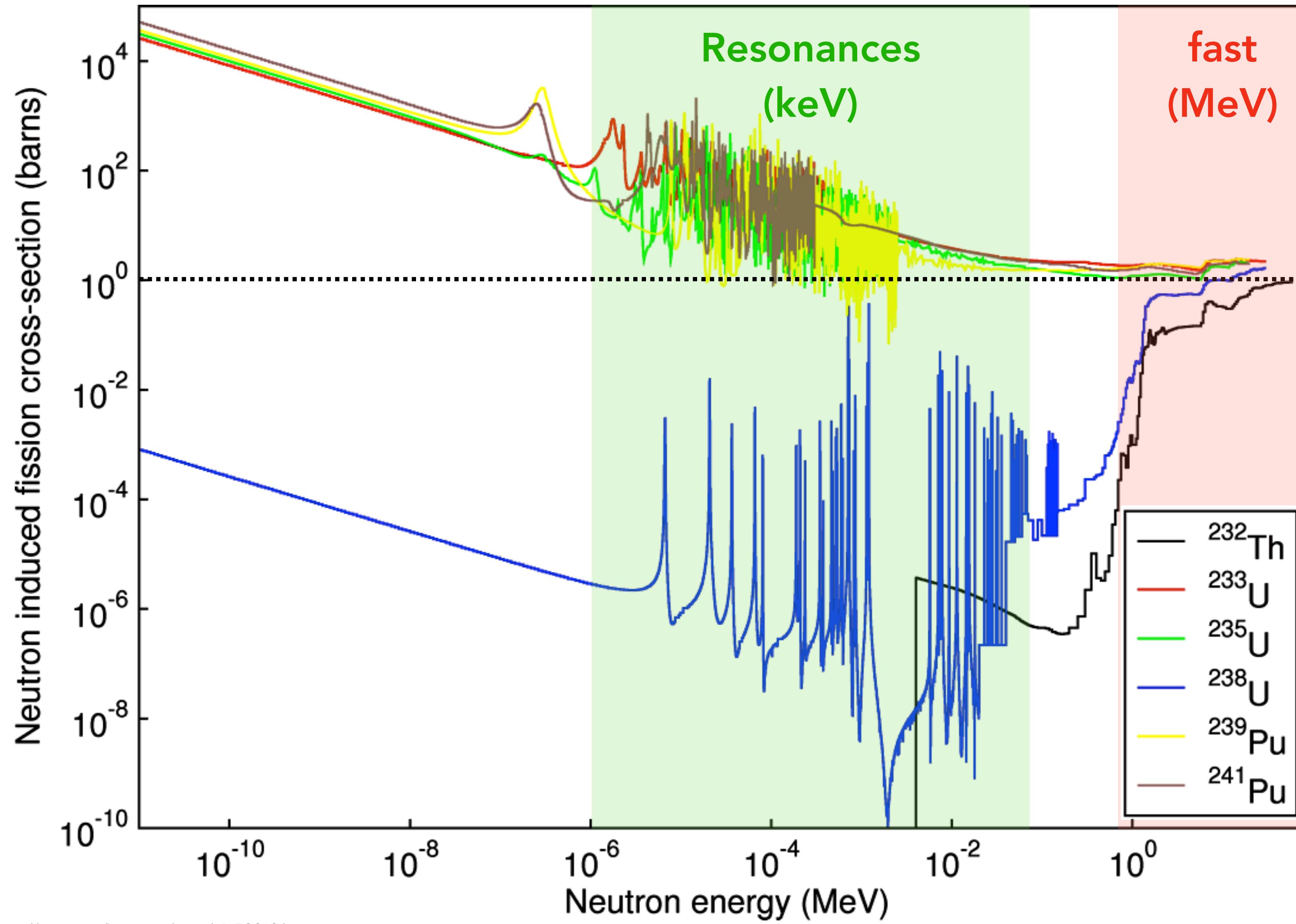
All'energia con cui di solito i neutroni vengono emessi le sezioni d'urto non sono particolarmente alte ( $\sim$  barn).

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



**moderazione dei neutroni**

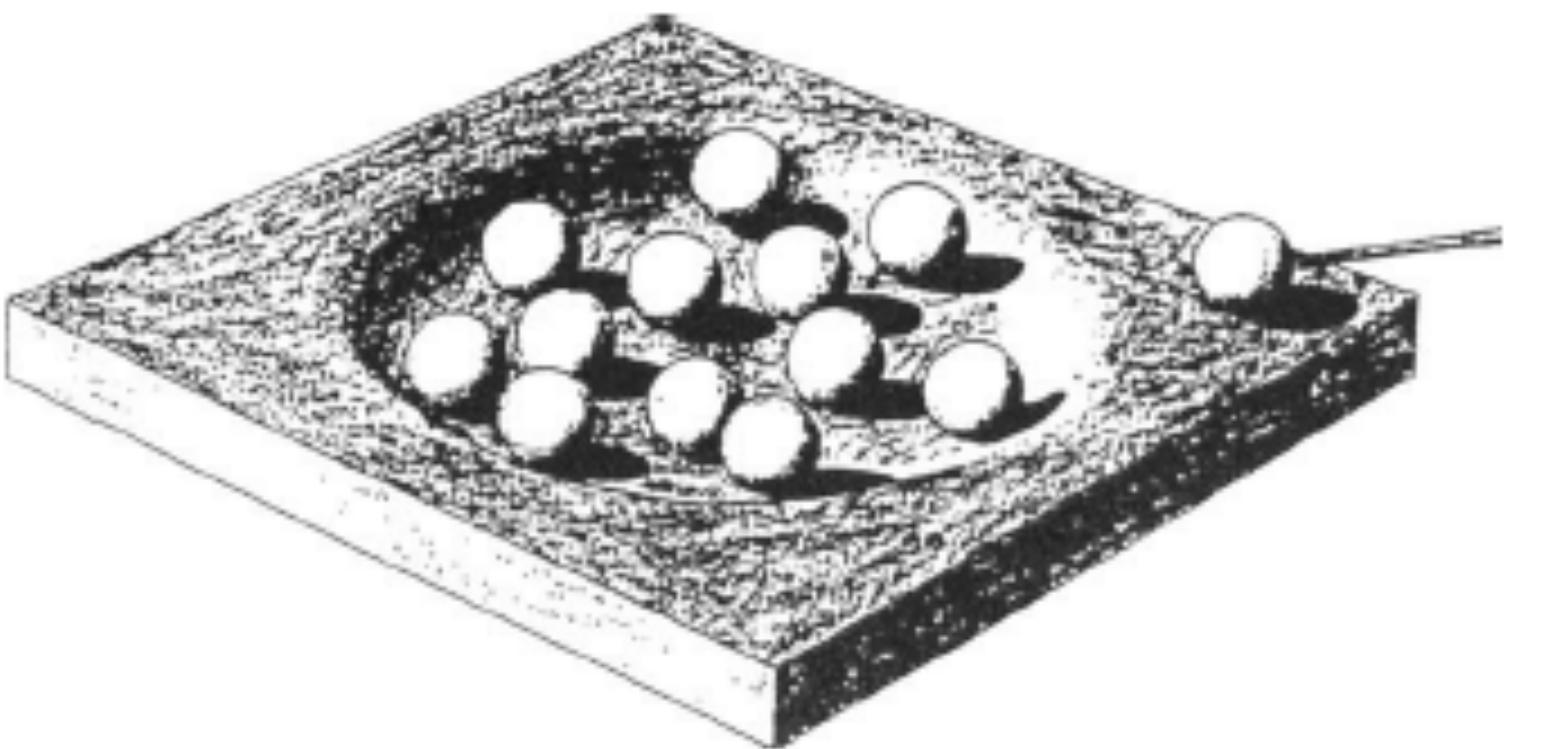
# Sezione d'urto per fissione indotta da neutroni



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

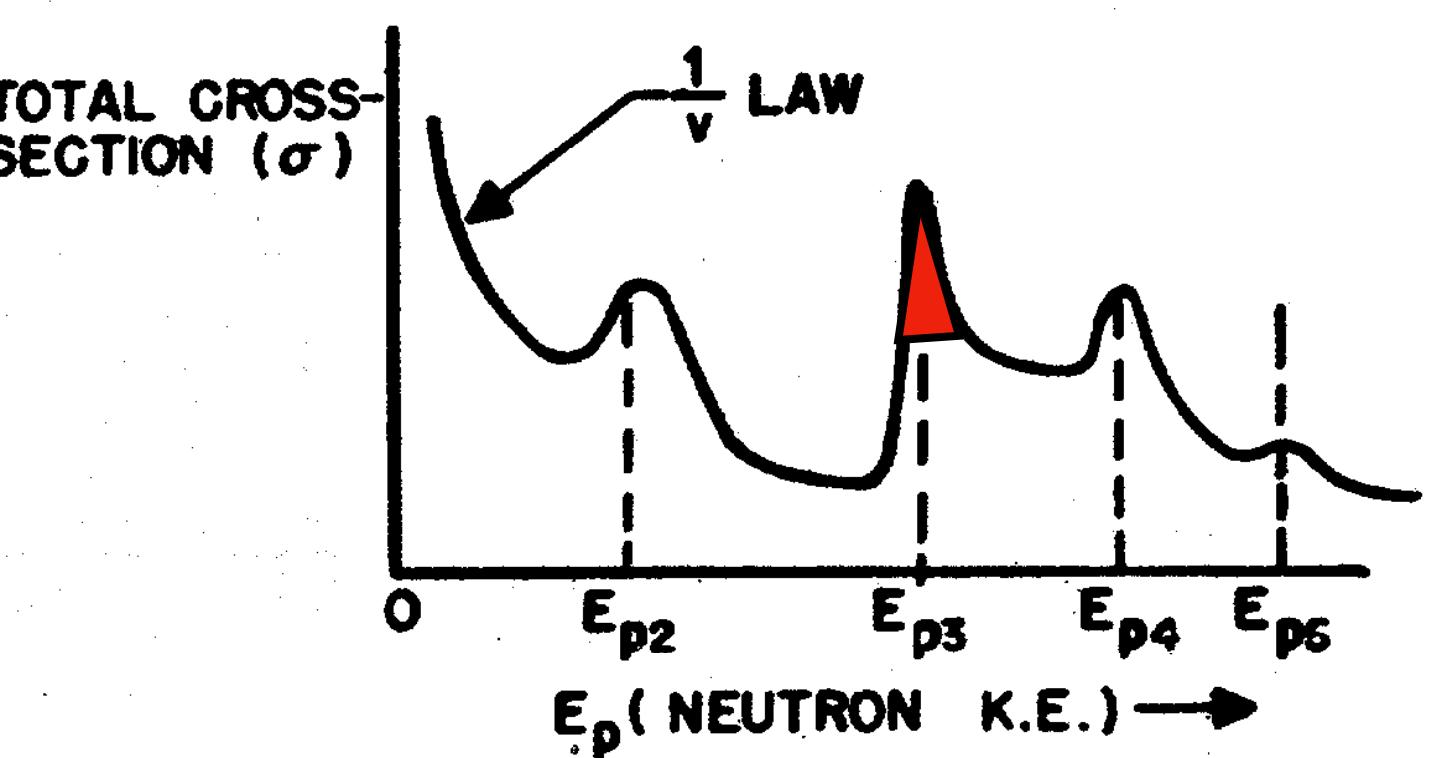
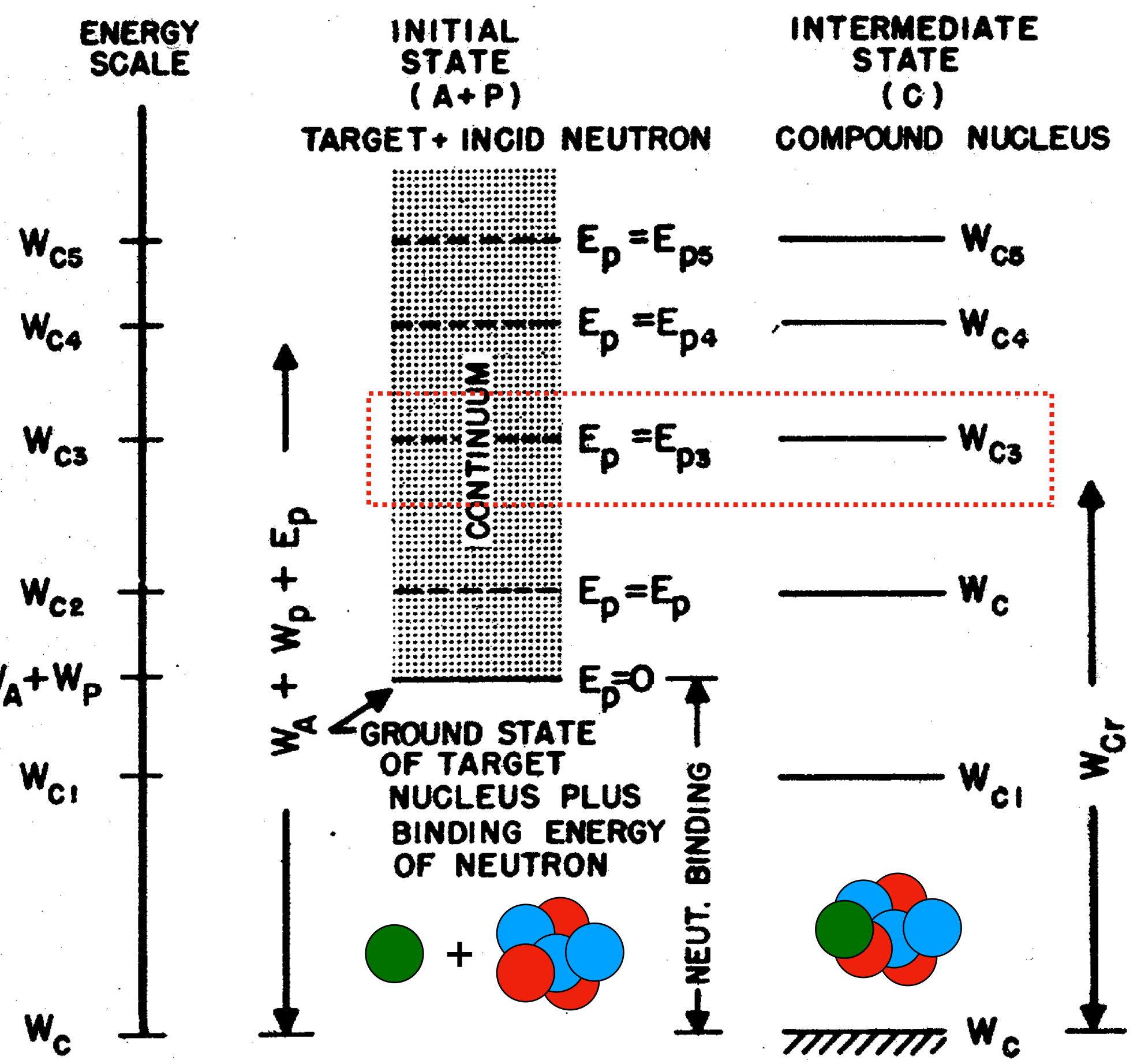
## Regione delle risonanze

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

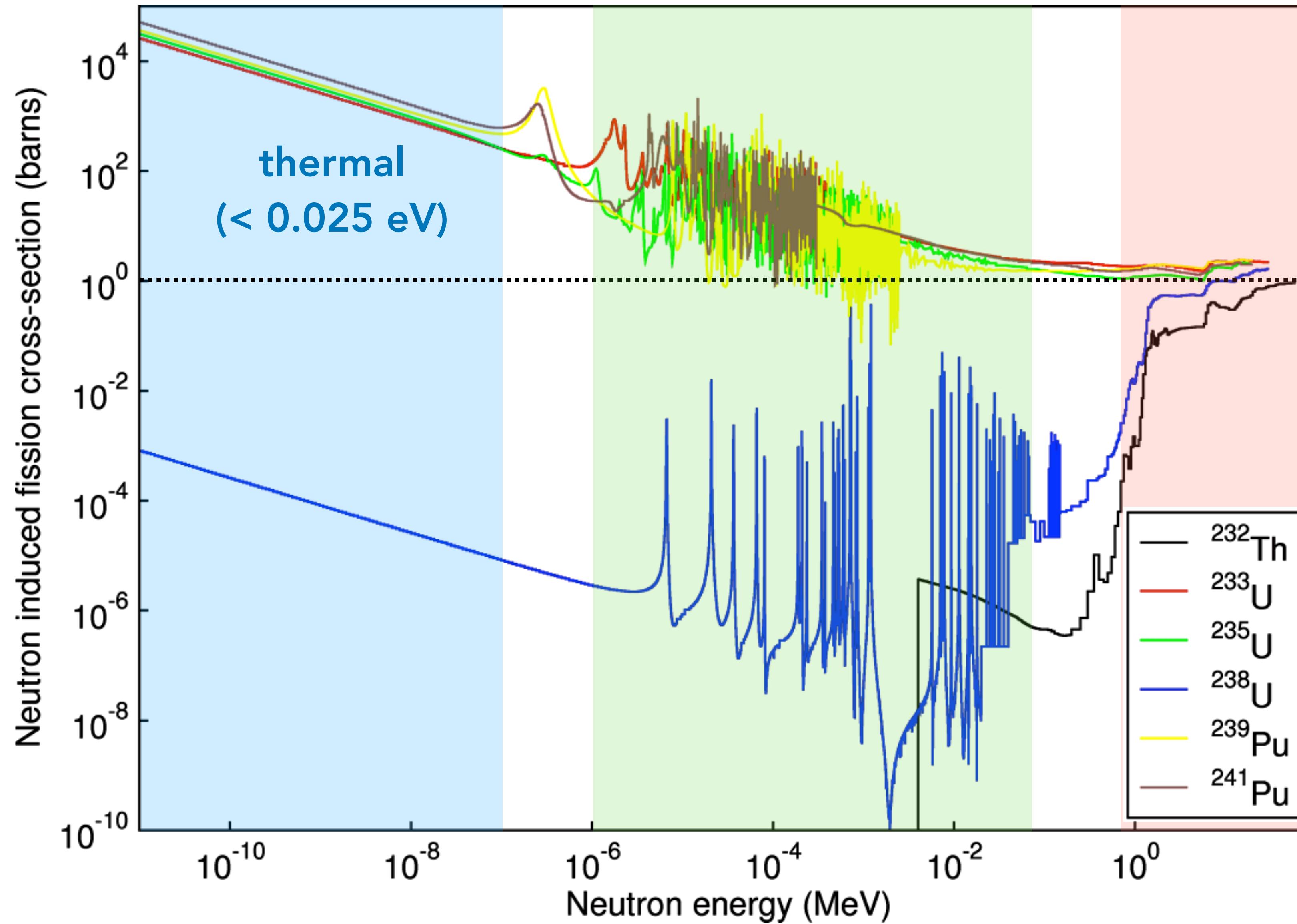


Le sezioni d'urto dipendono dai possibili stati del nucleo composto intermedio.

- 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



# Sezione d'urto per fissione indotta da neutroni



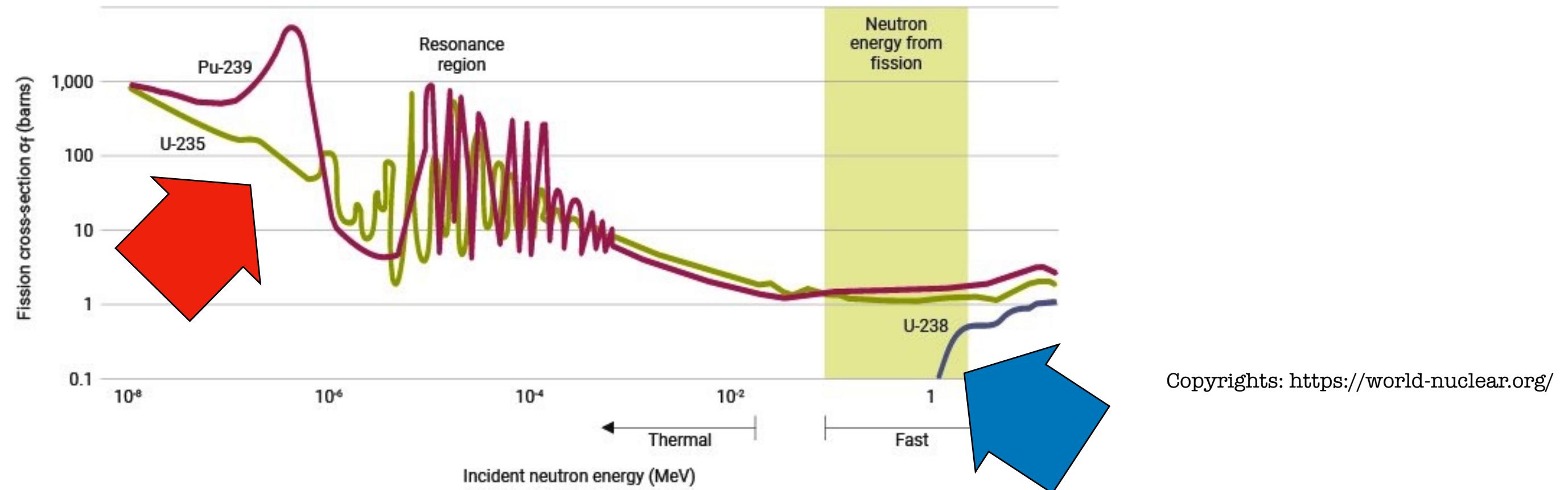
**Regione dei neutroni termici.**  
La sezione d'urto è massima e solitamente dominante rispetto ad altri canali di reazione.

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

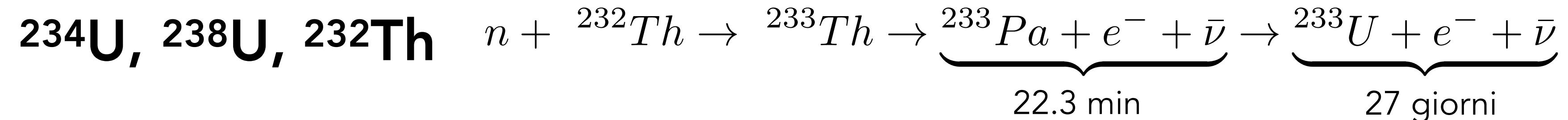
$^{233}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$



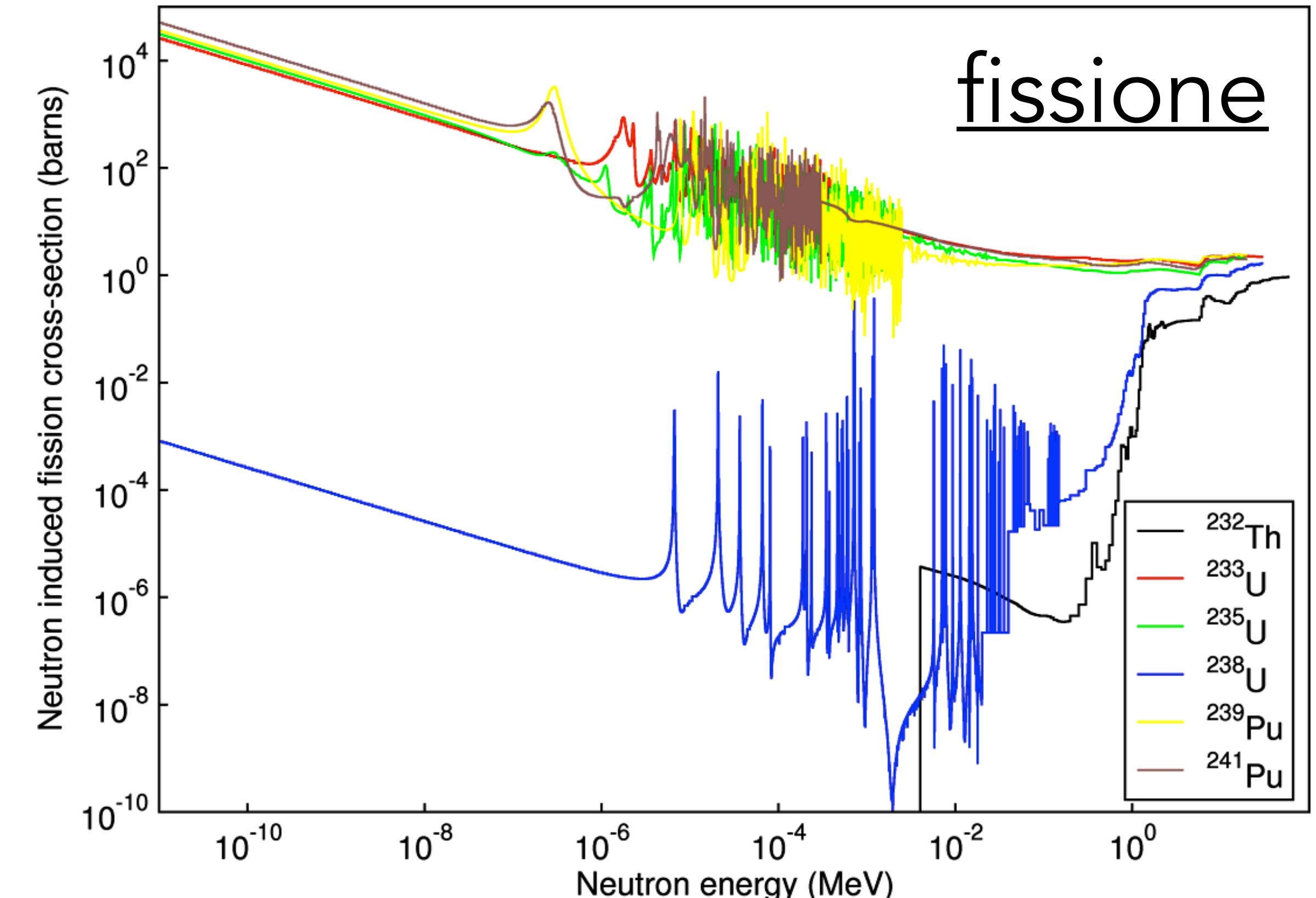
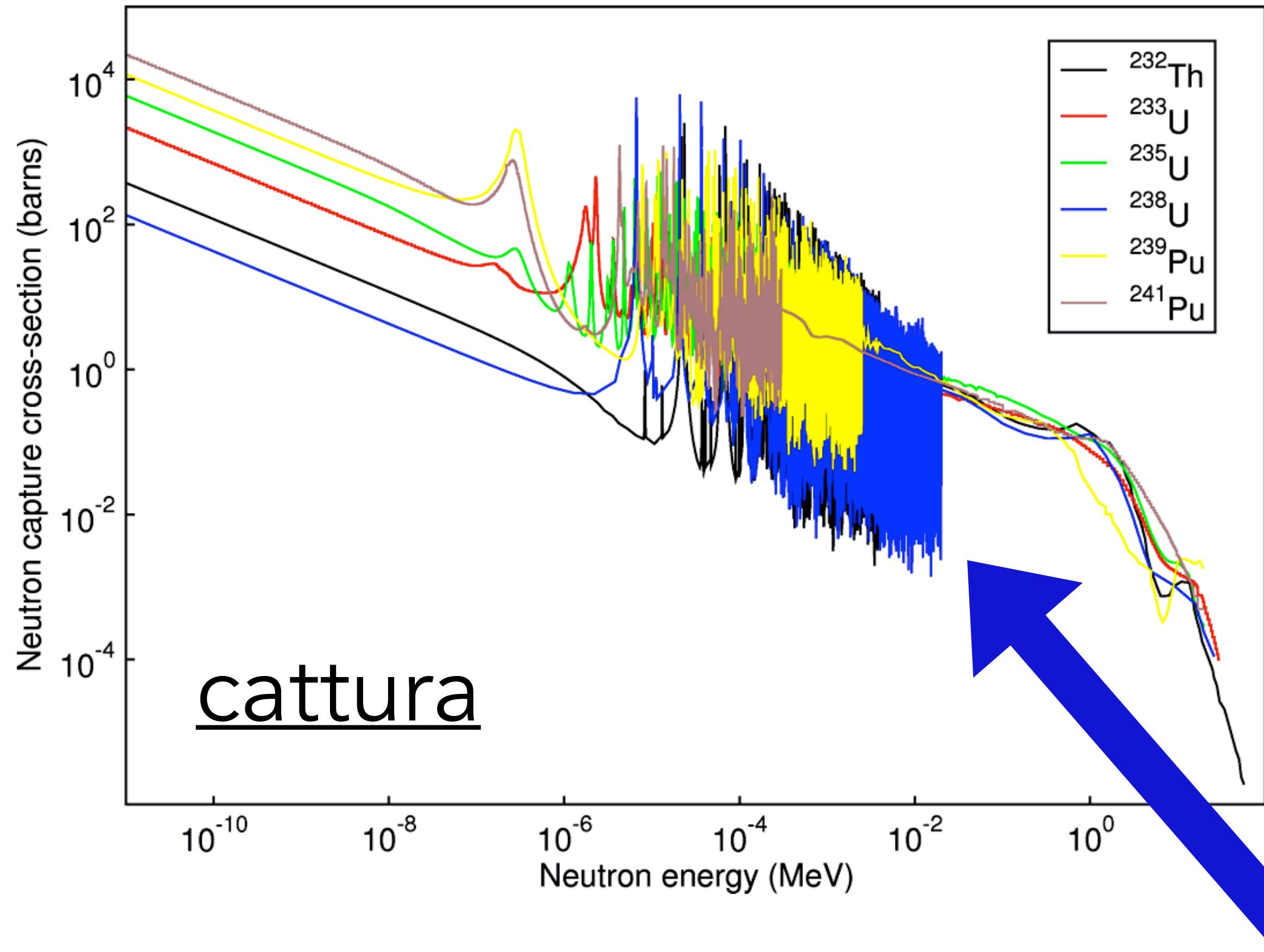
**Elementi fissionabili** – possono fissionare solo con neutroni di energia  $\sim 1\text{-}2 \text{ MeV}$  sopra una determinata soglia energetica (non possono sostenere da soli una reazione a catena)

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

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



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

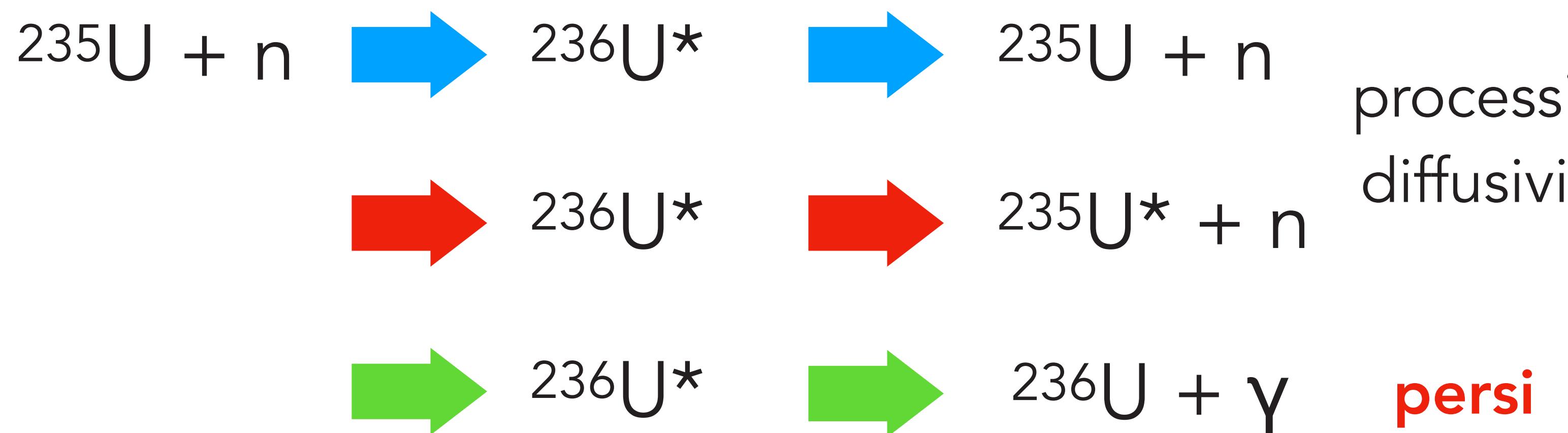


È importante ricordarsi che nei reattori il combustibile è formato da elementi i cui isotopi non sono tutti fissili

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

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

- Abbiamo una media di  $\bar{\nu}$  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 (~ 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

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

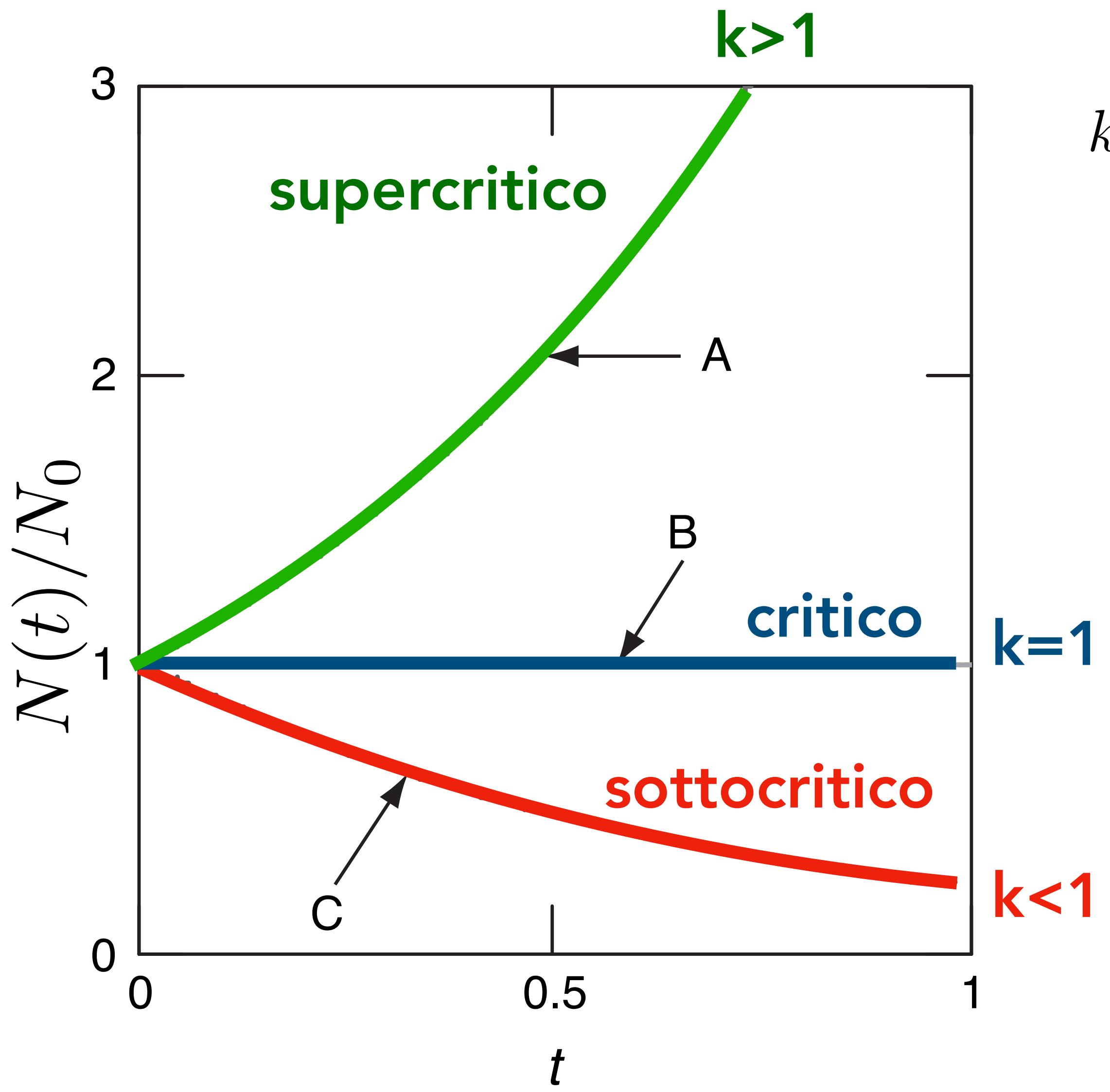
	$\sigma_f$	$\sigma_c$	$\sigma_a$	$\sigma_s$
$^{235}\text{U}$	584	96	680	10
$^{238}\text{U}$	-	~3	~3	~8

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  $^{235}\text{U}$ )

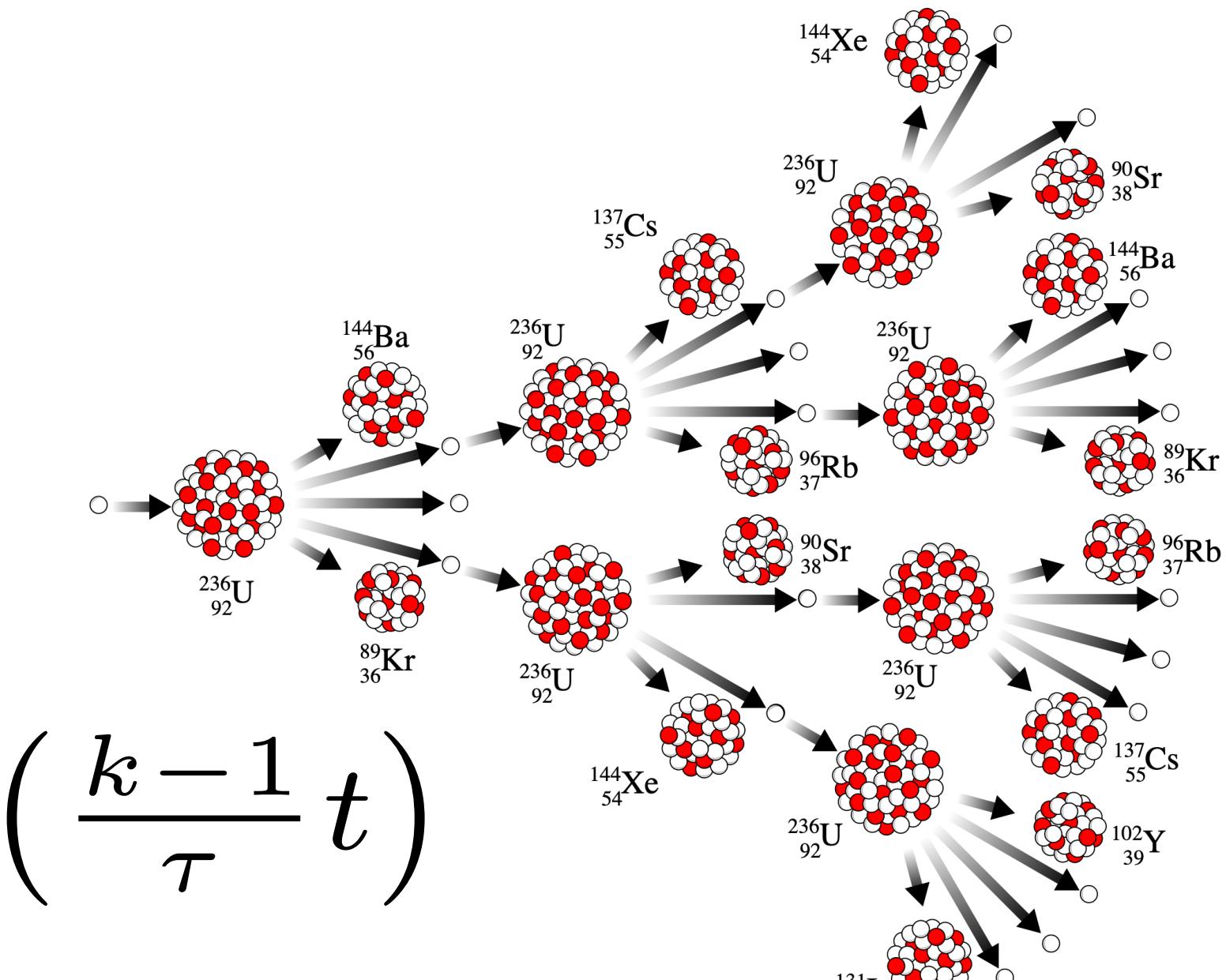
# Reazione a catena



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

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

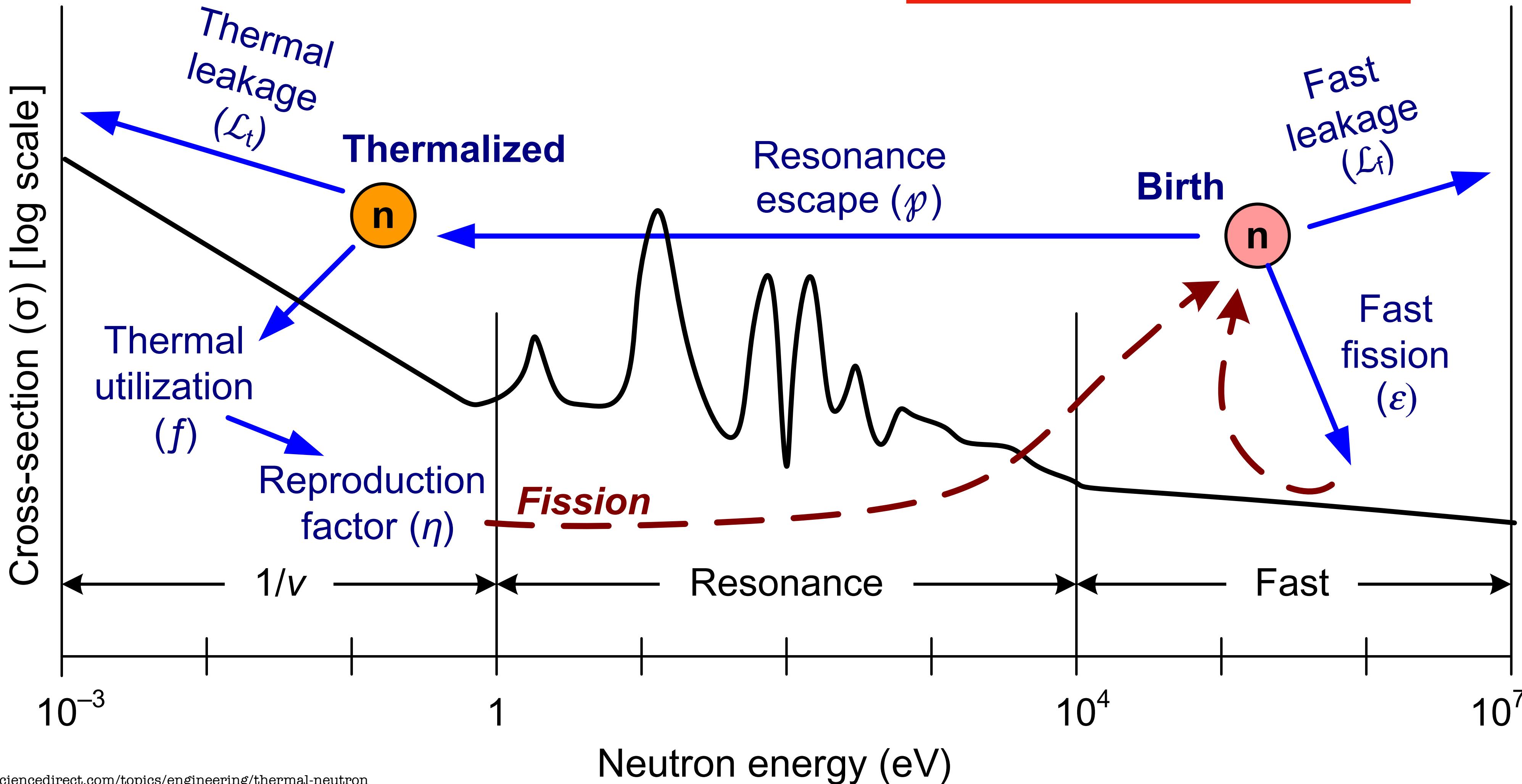
$\tau$  tempo caratteristico di emissione e cattura  
tra un processo di fissione e l'altro  
(neutroni veloci)



# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

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



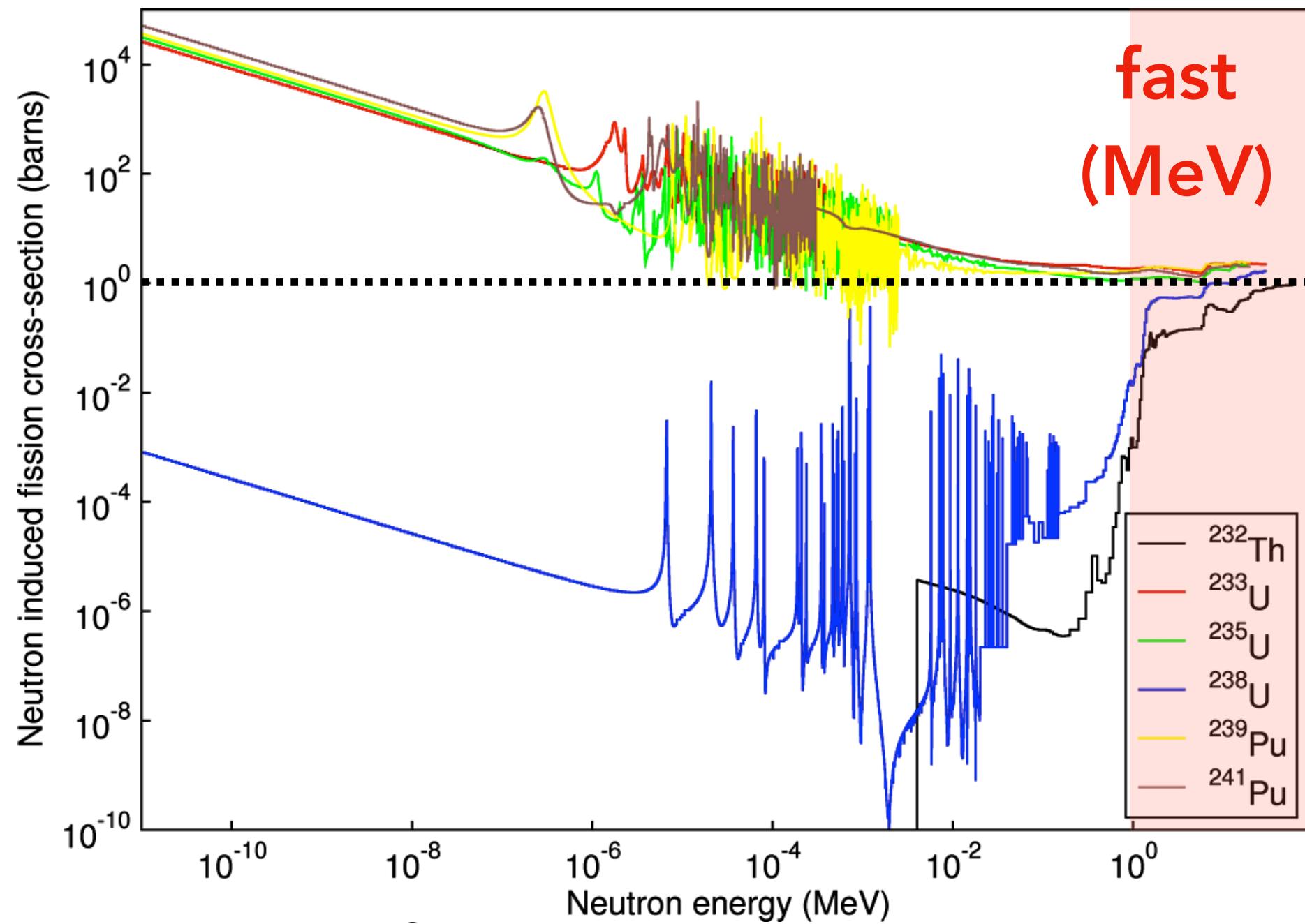
# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

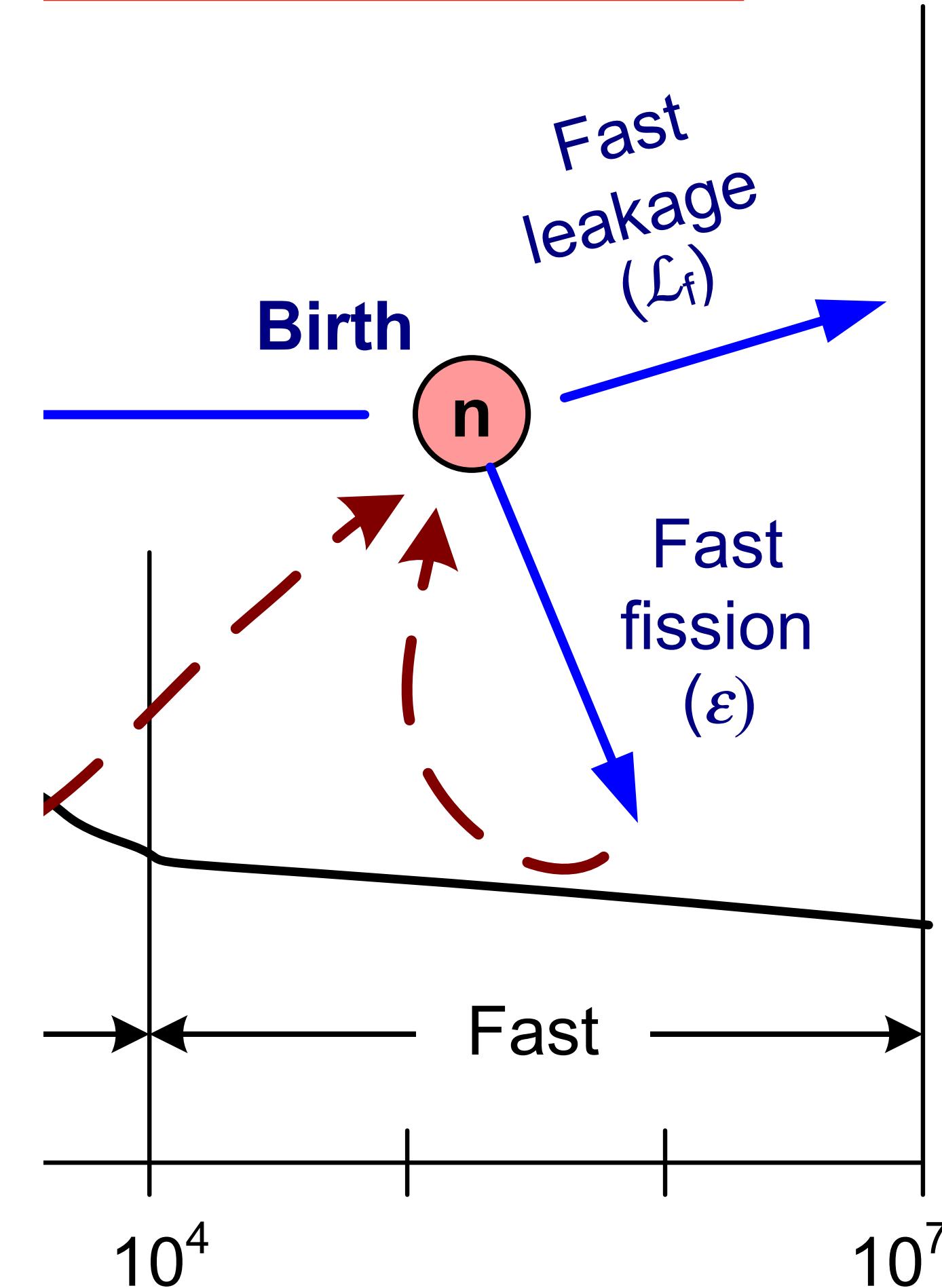
$$k = \epsilon p f l \eta$$

## 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)



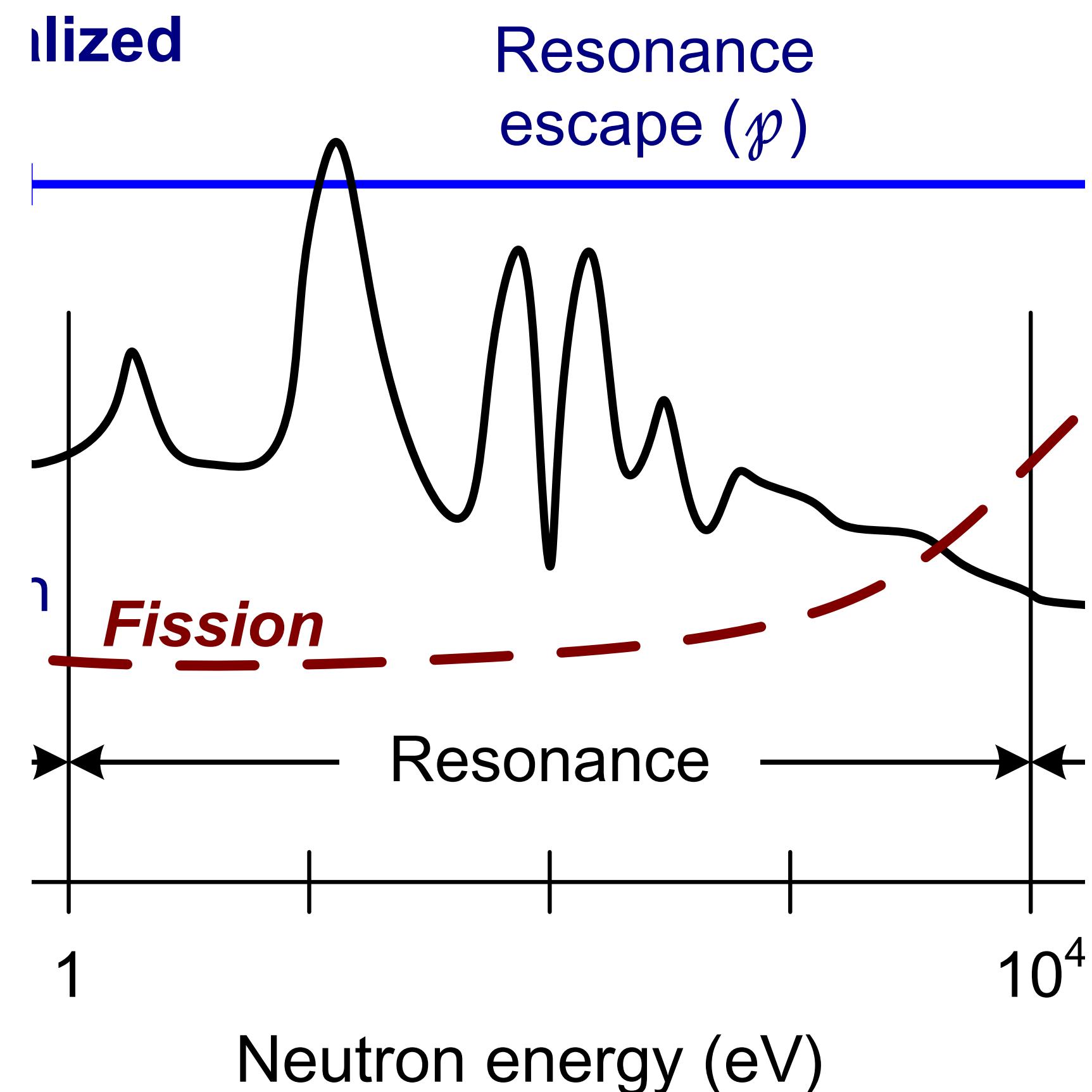
# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

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

**Resonance escape probability  $p = 0.75$**

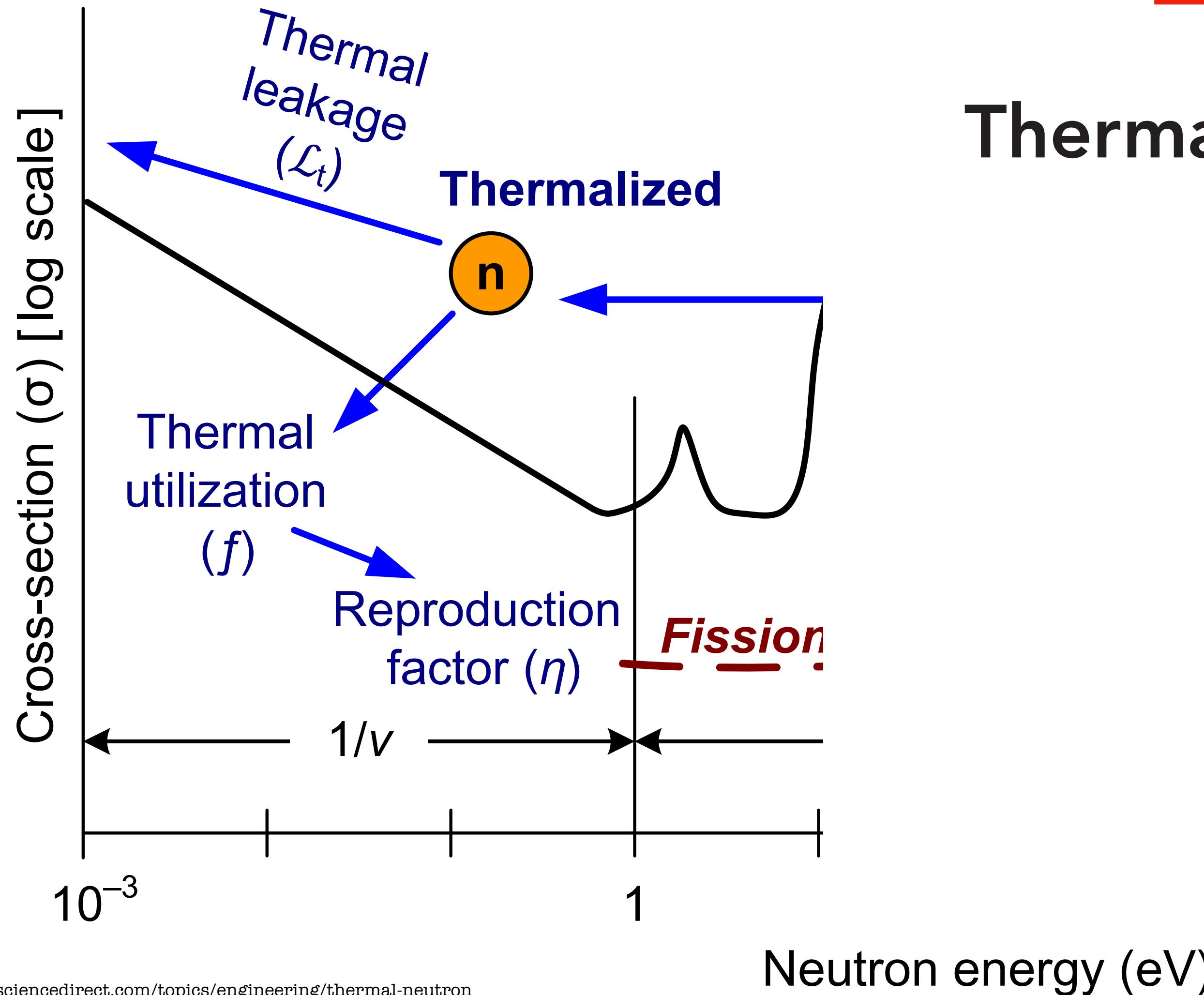
Durante la moderazione  
(rallentamento da MeV a eV)  
alcuni neutroni sono  
assorbiti dalle risonanze del  
combustibile e sono persi.



# Condizioni per ottenere $k=1$

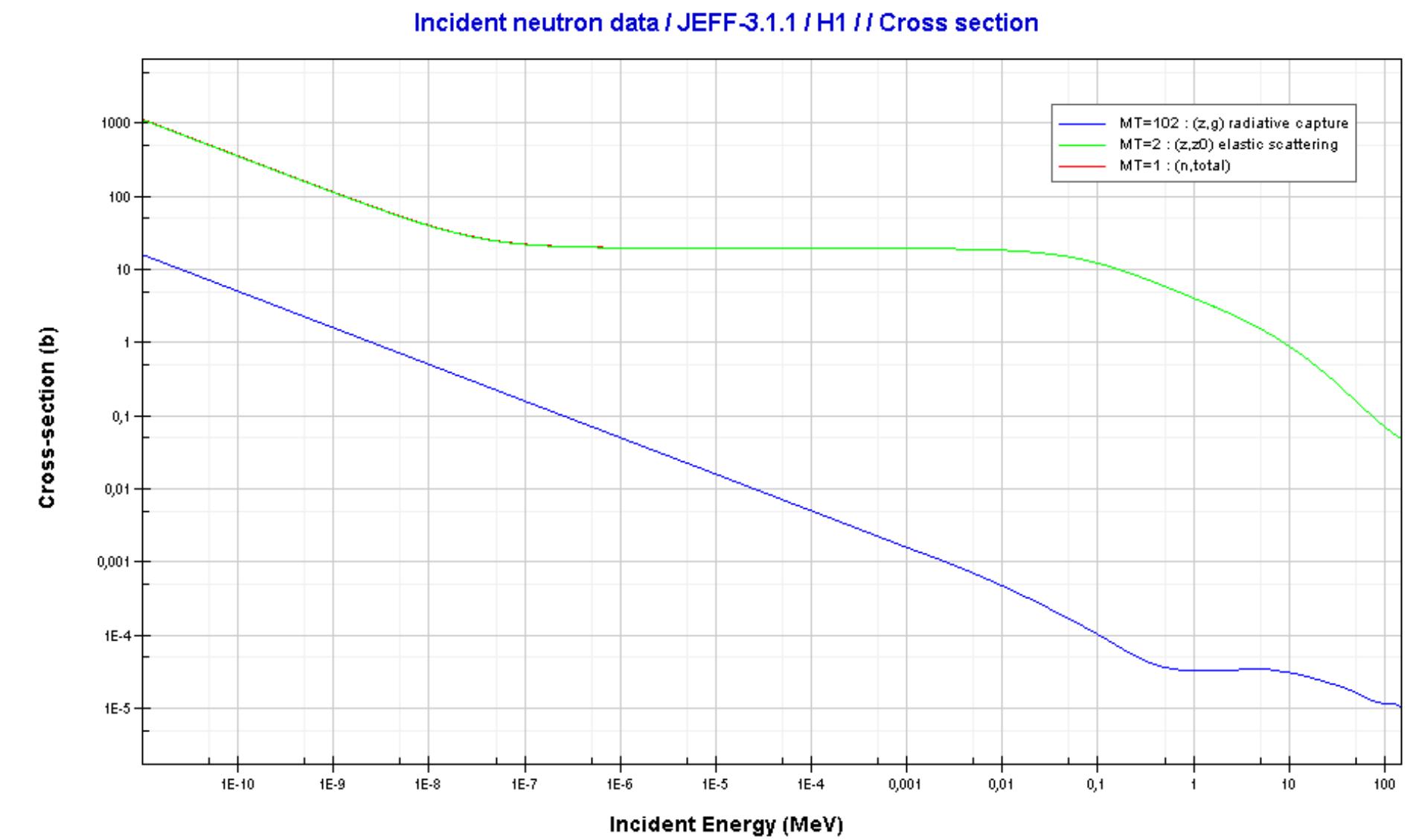
Formula dei quattro fattori

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



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

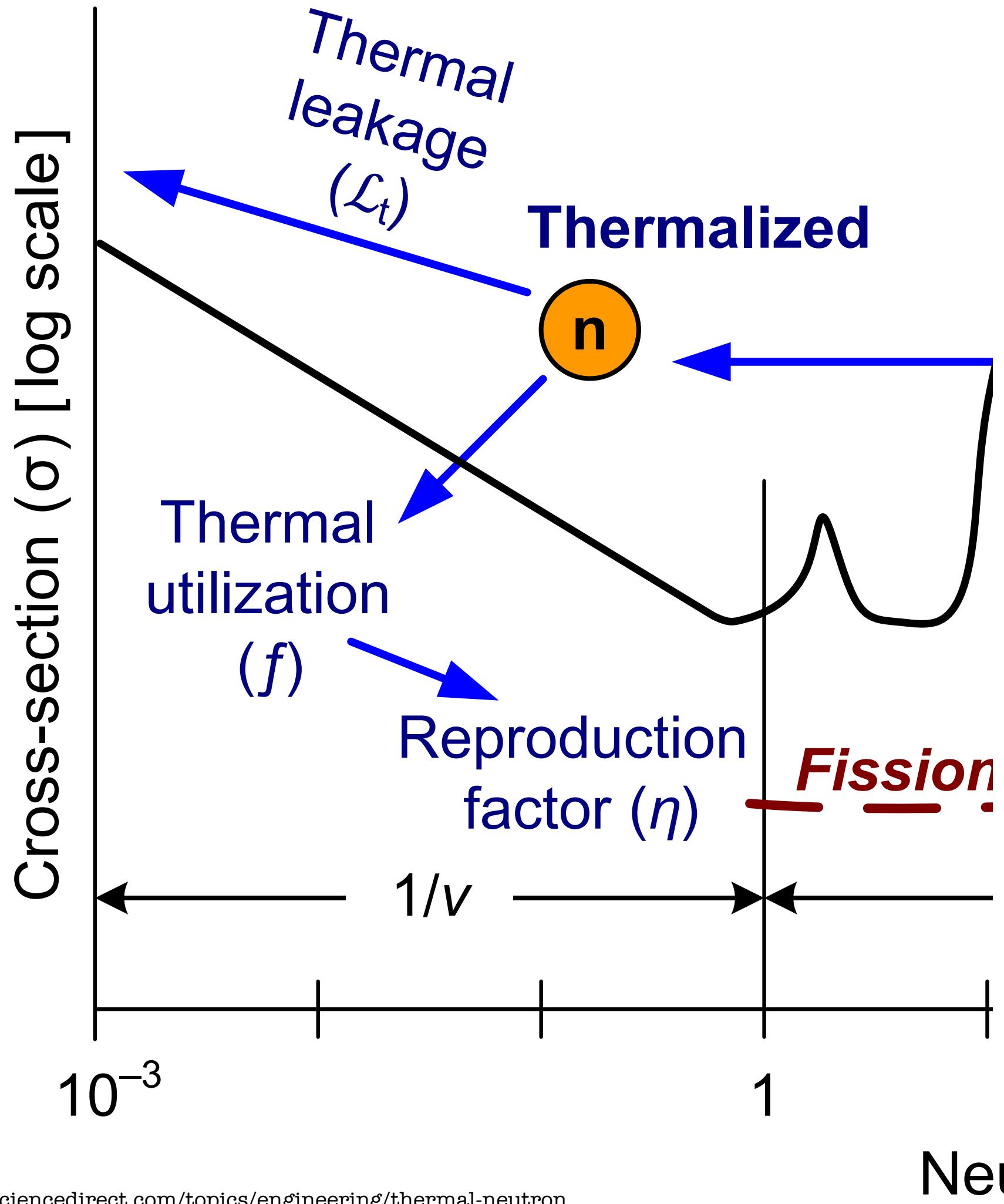
Alcuni neutroni sono catturati dal moderatore (solitamente  $H_2O$ )



# Condizioni per ottenere $k=1$

Formula dei quattro fattori

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

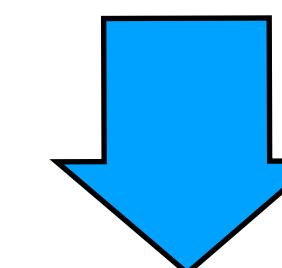


**Reproduction factor  $\eta = \nu_a$**

natural uranium  $\nu_a = 1.328$

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

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

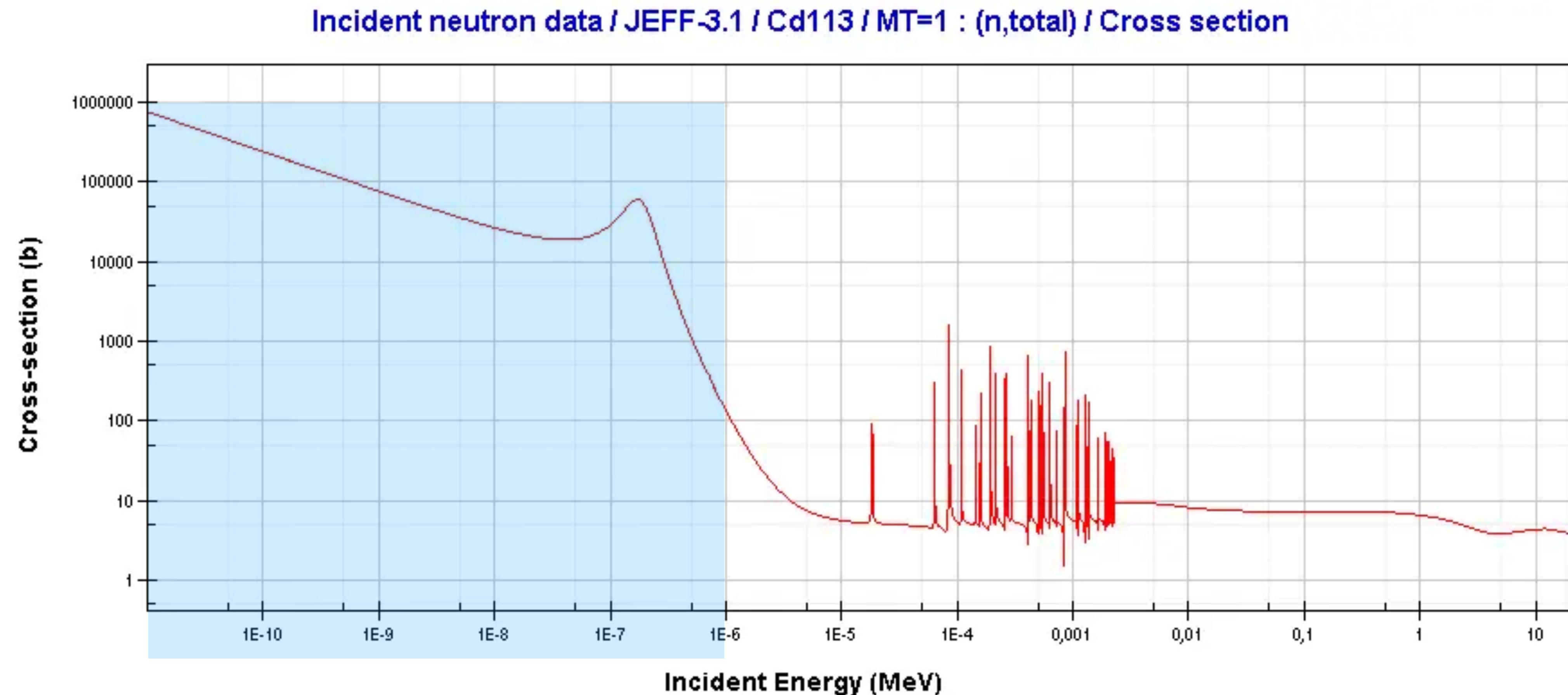


arricchimento del combustibile

aumentare la percentuale di  $^{235}\text{U}$

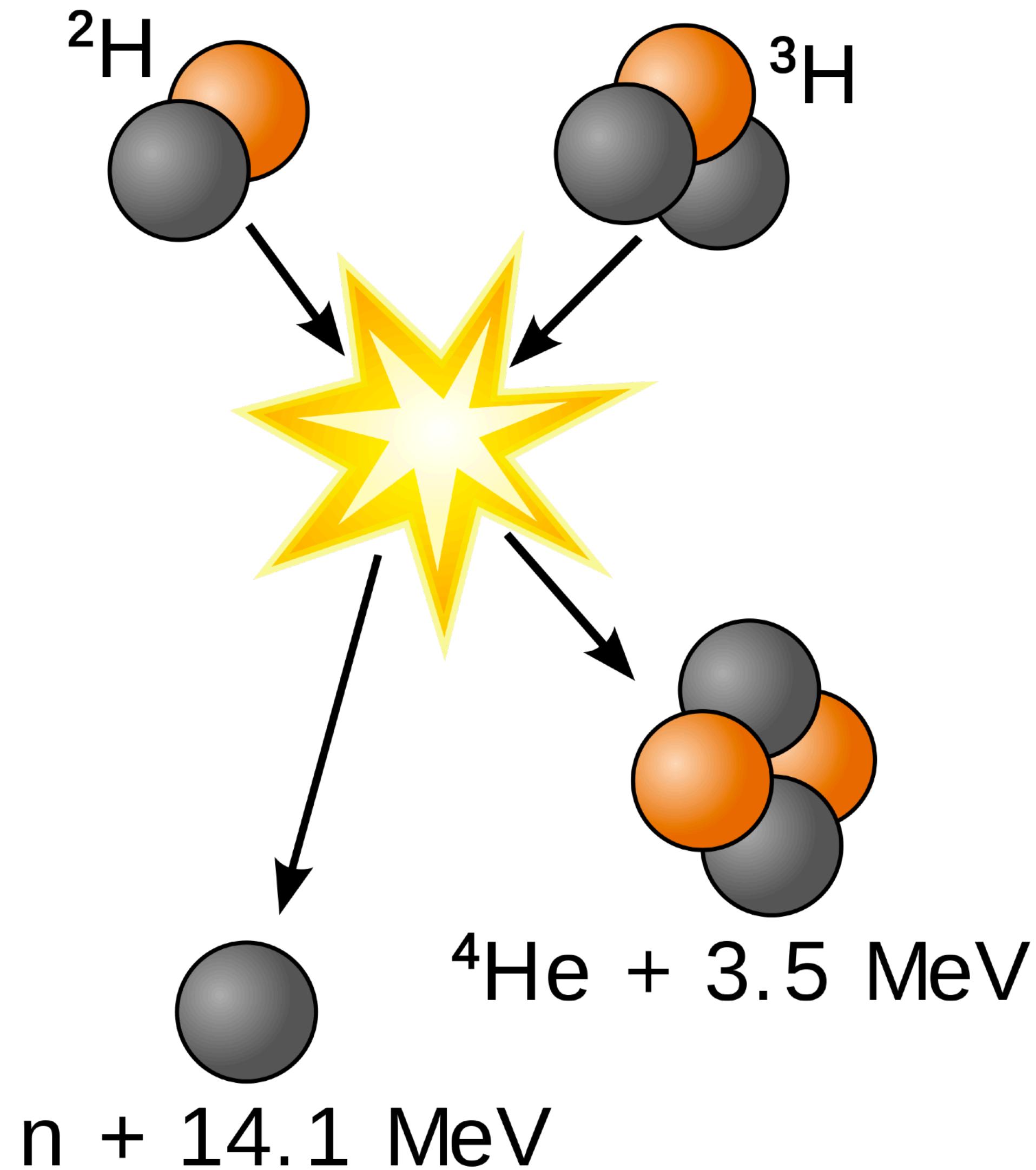
# Le sezioni d'urto ci dicono anche quale materiale usare per controllare $k=1$

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  $^{113}\text{Cd}$



# Fusione nucleare

# Energia rilasciata da un singolo processo di fusione

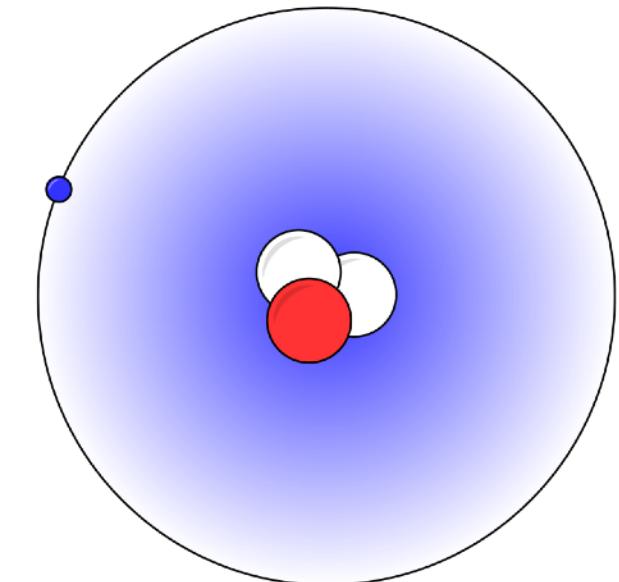
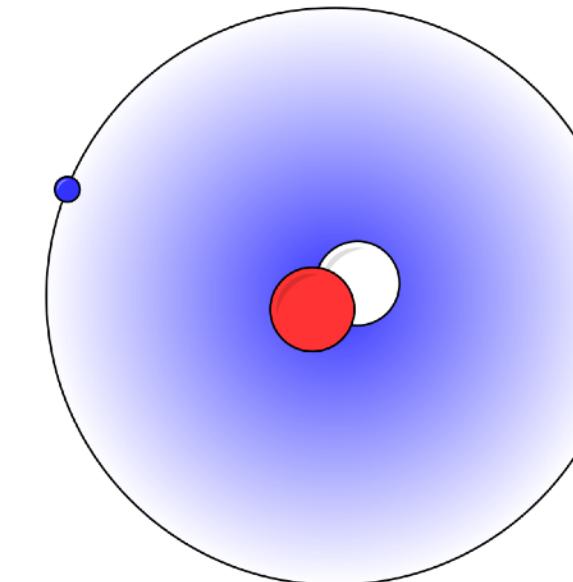
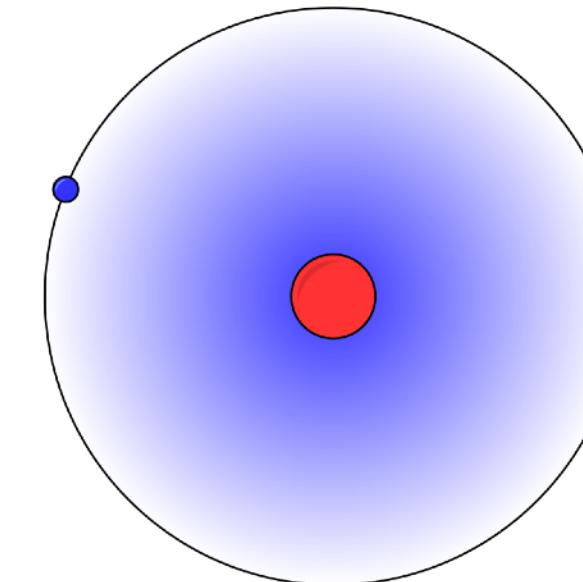


3 isotopi dell'idrogeno:

prozio

deuterio

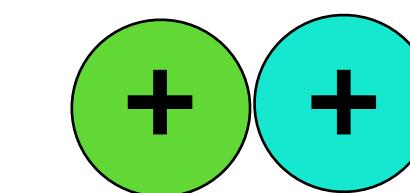
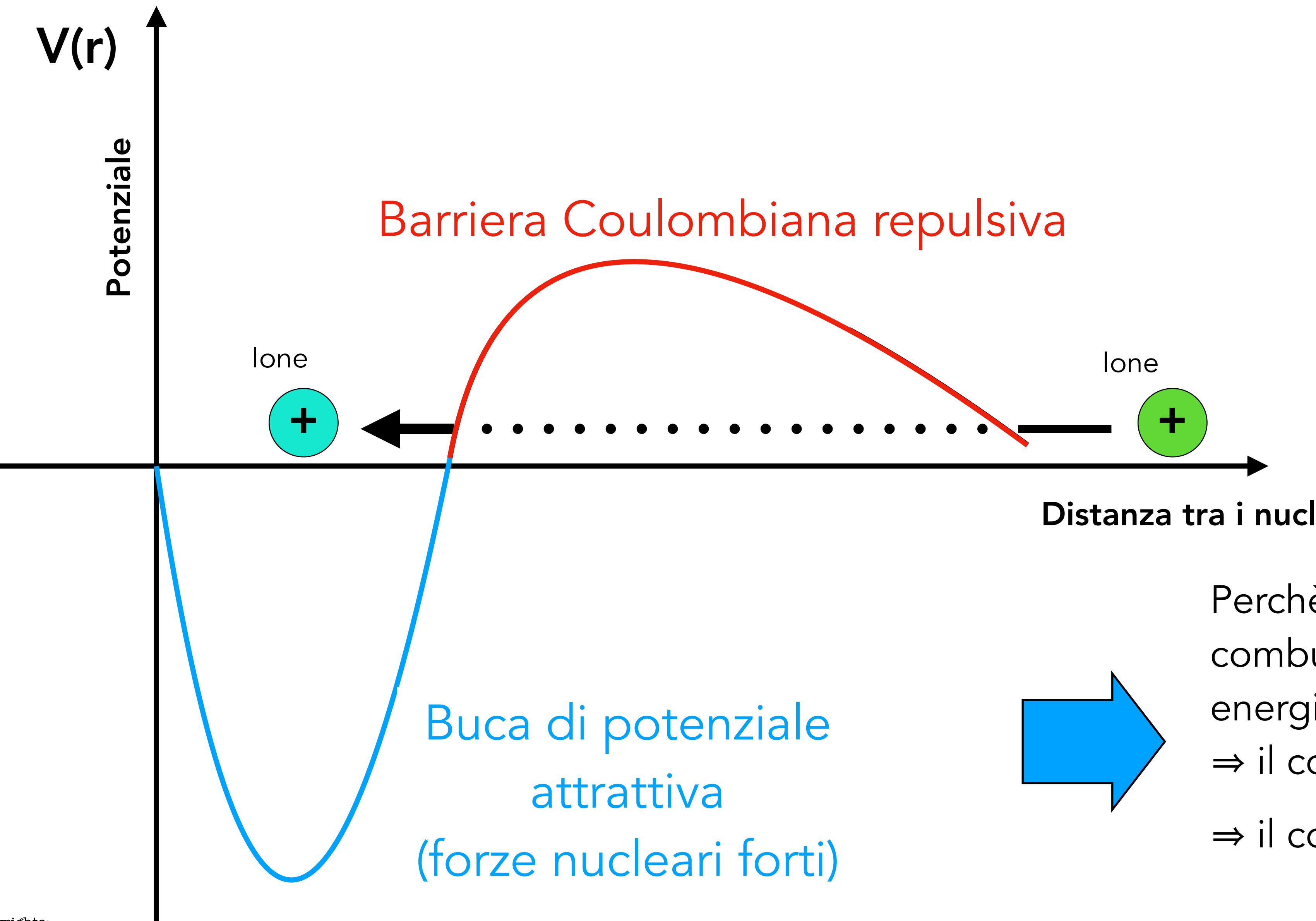
trizio



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

# Dinamica della fusione - Tunneling della barriera coulombiana



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

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

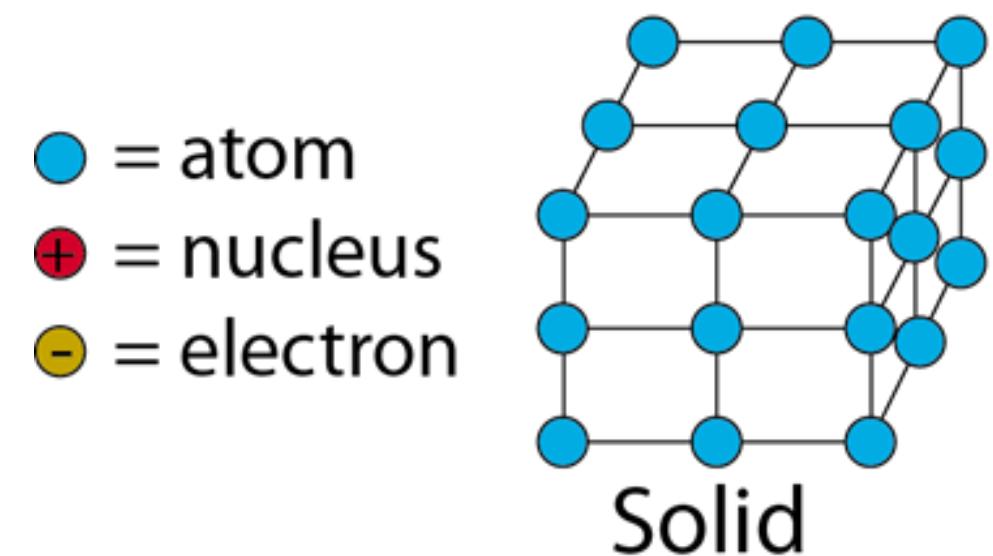
Per superare la barriera i due nuclei devono avere abbastanza energia,  $E=(3/2) kT$ .

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

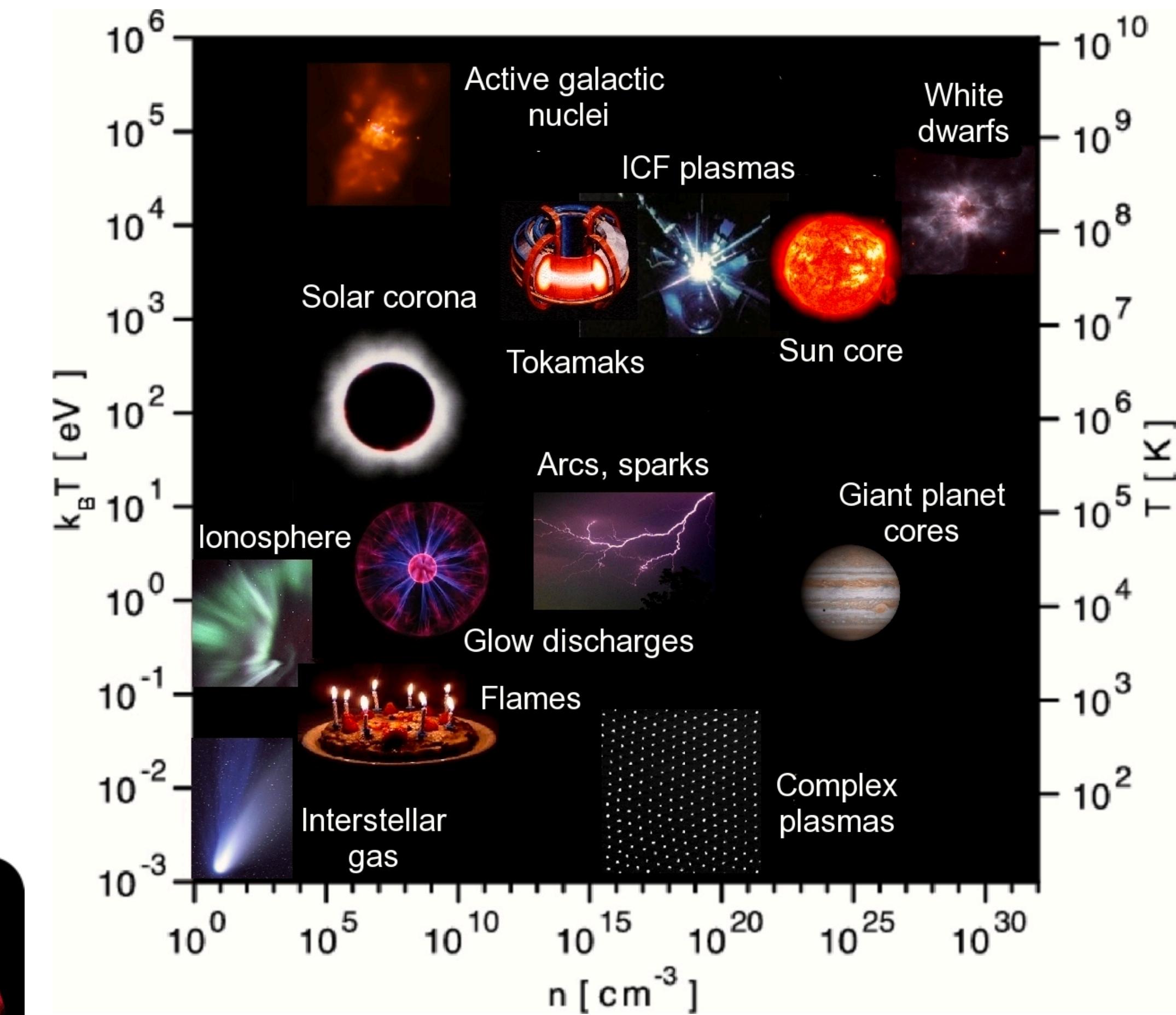
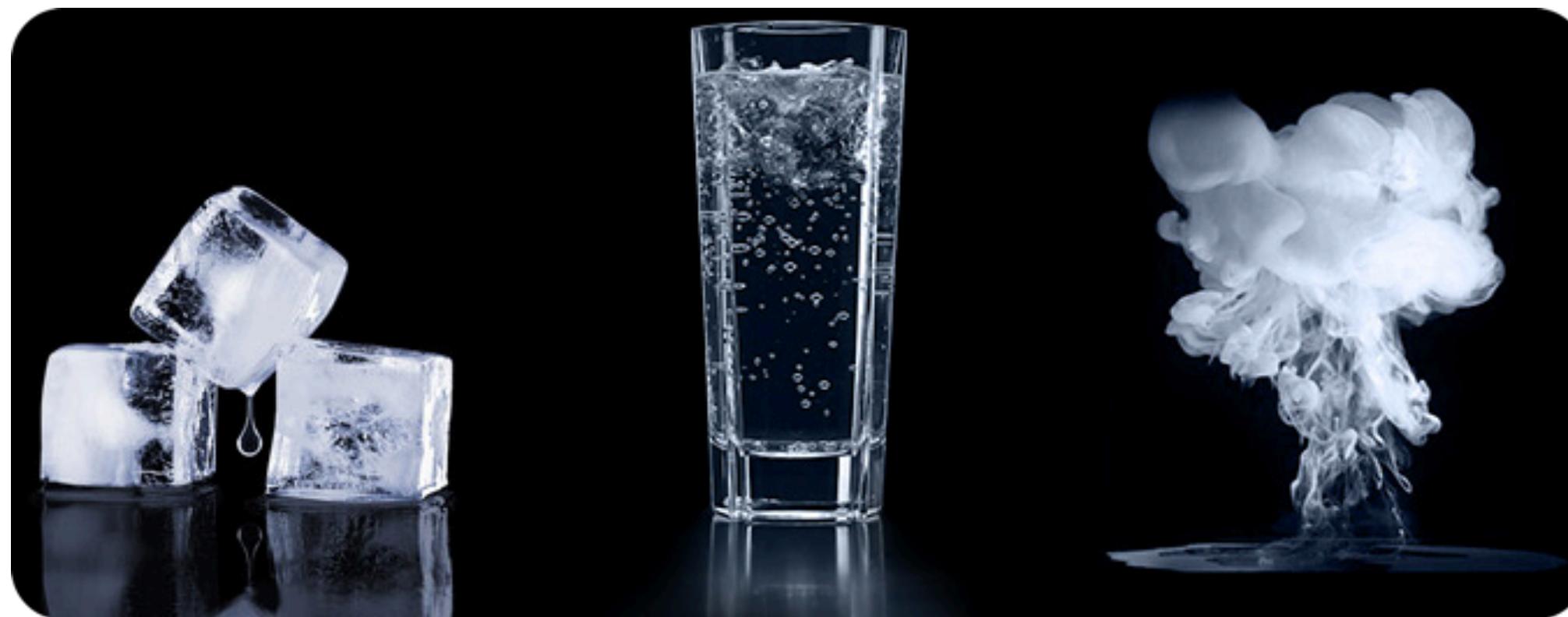
Per due nuclei di idrogeno, la temperatura corrispondente è dell'ordine di  $10^9$  °K

Perchè la fusione avvenga il combustibile deve possedere una certa energia cinetica  
 $\Rightarrow$  il combustibile deve essere "**caldo**"  
 $\Rightarrow$  il combustibile è un plasma

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



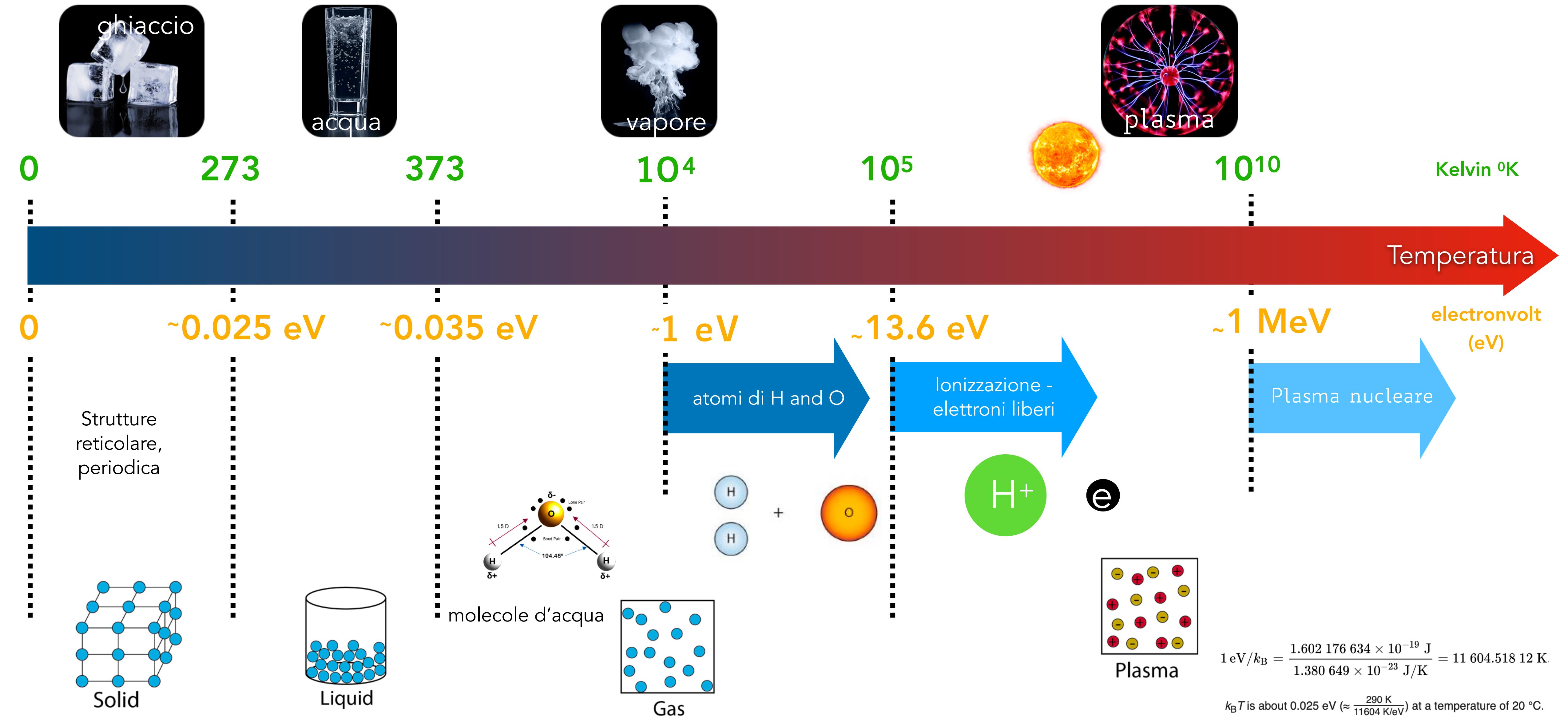
Add **Heat**



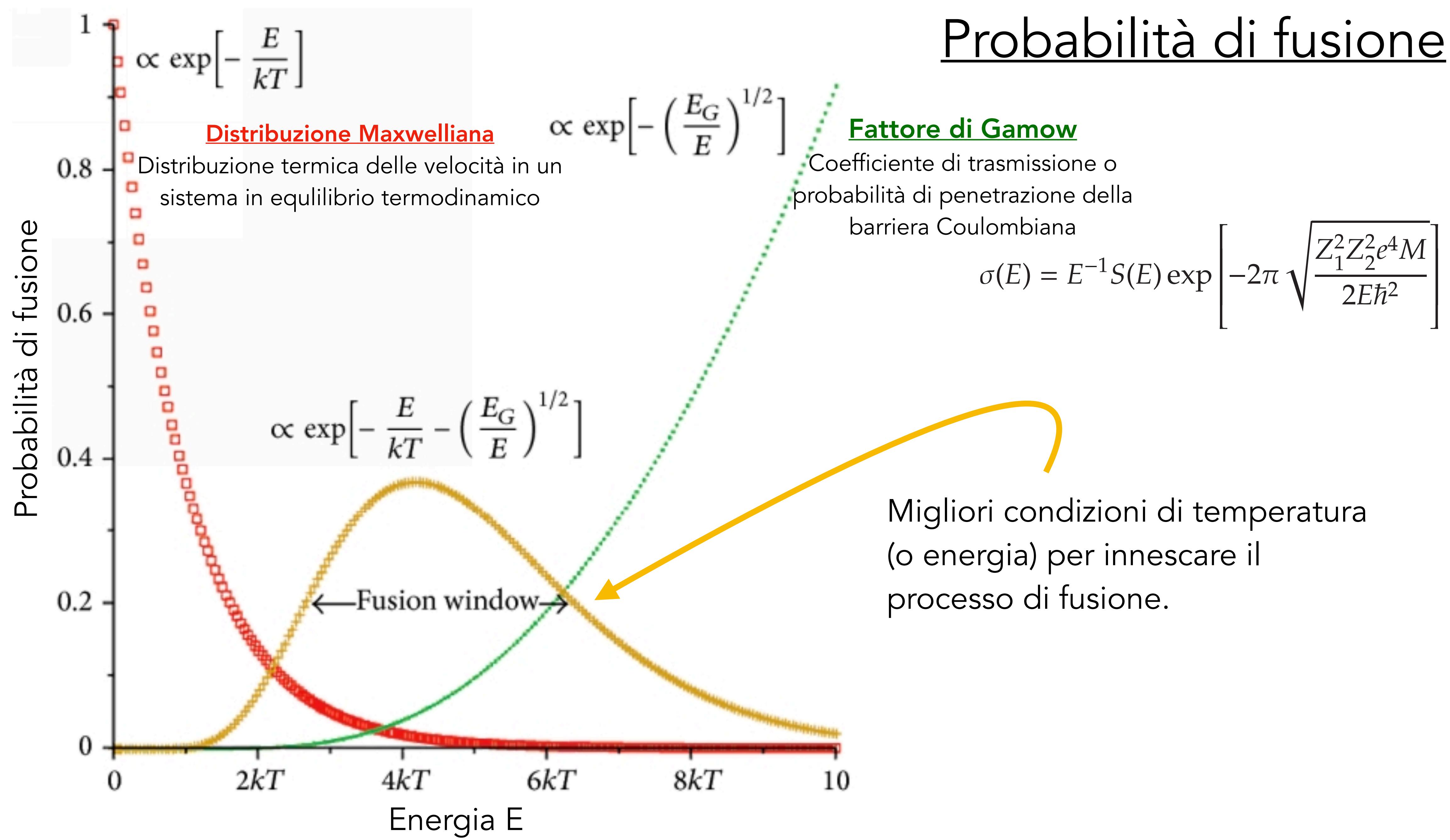
Copyrights:

# Cosa è lo stato di plasma

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



# Probabilità di fusione



# Necessità di un confinamento

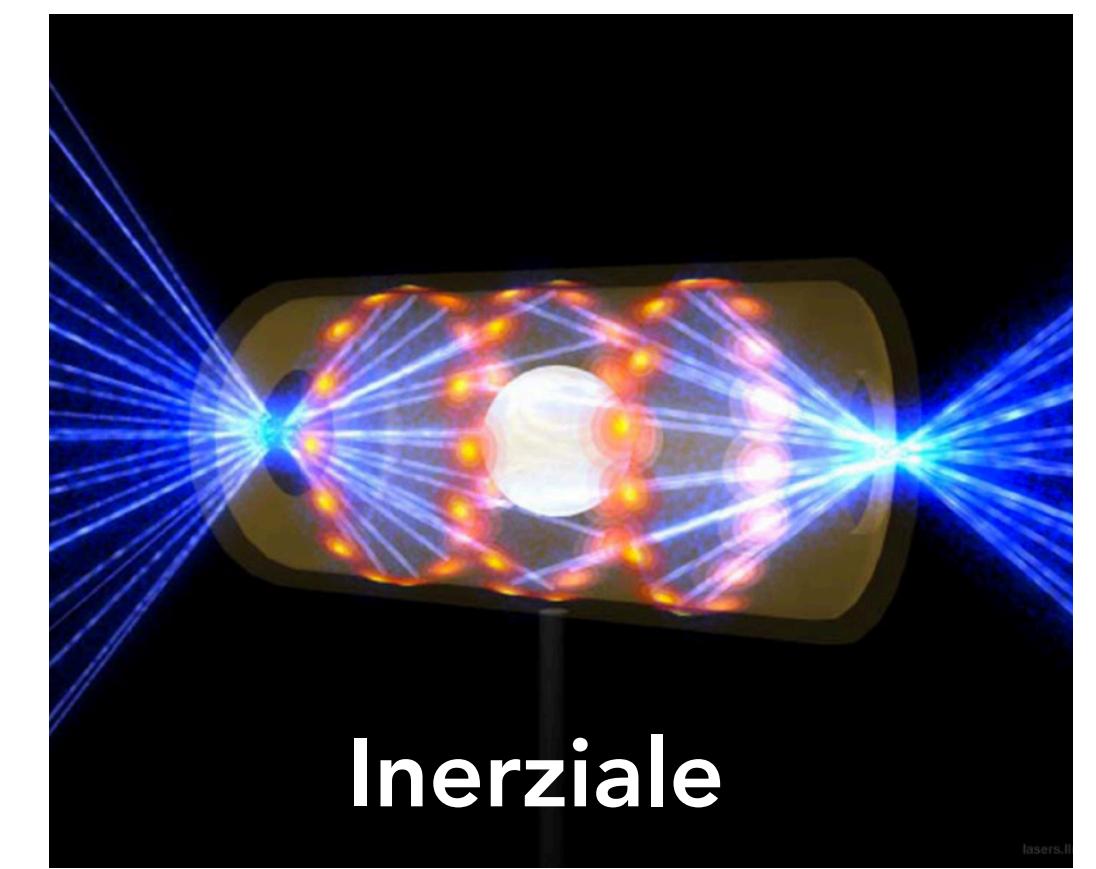
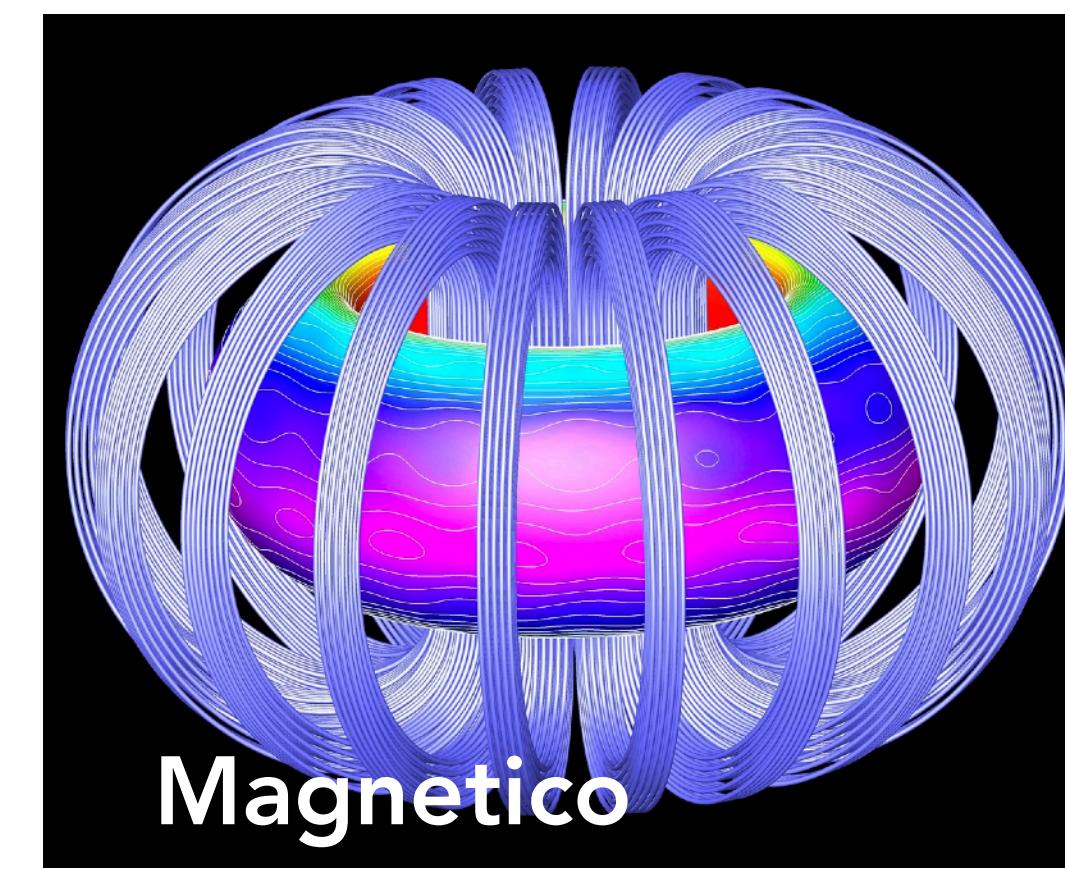
Le componenti del plasma sono molto veloci...

Se  $T_i \sim 10$  keV

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



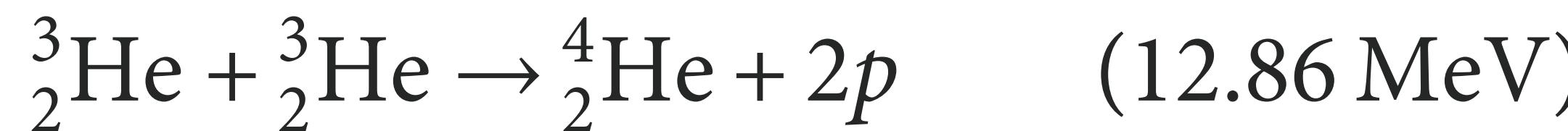
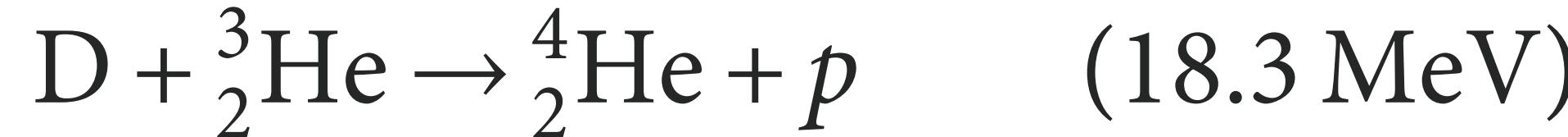
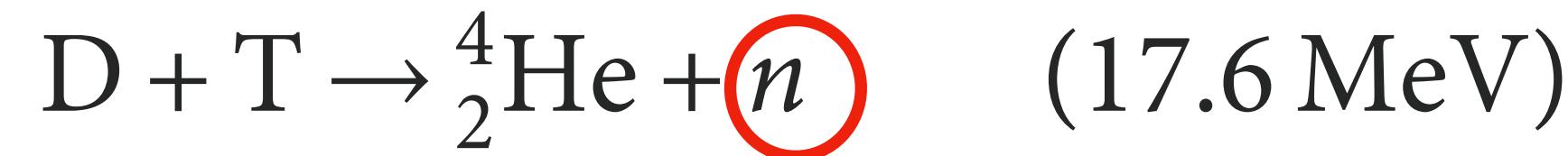
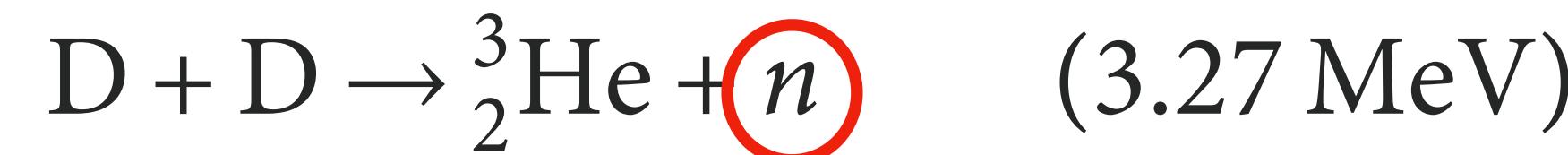
...devono essere confinate



# Combustibili per la fusione nucleare



Degradazione dei materiali



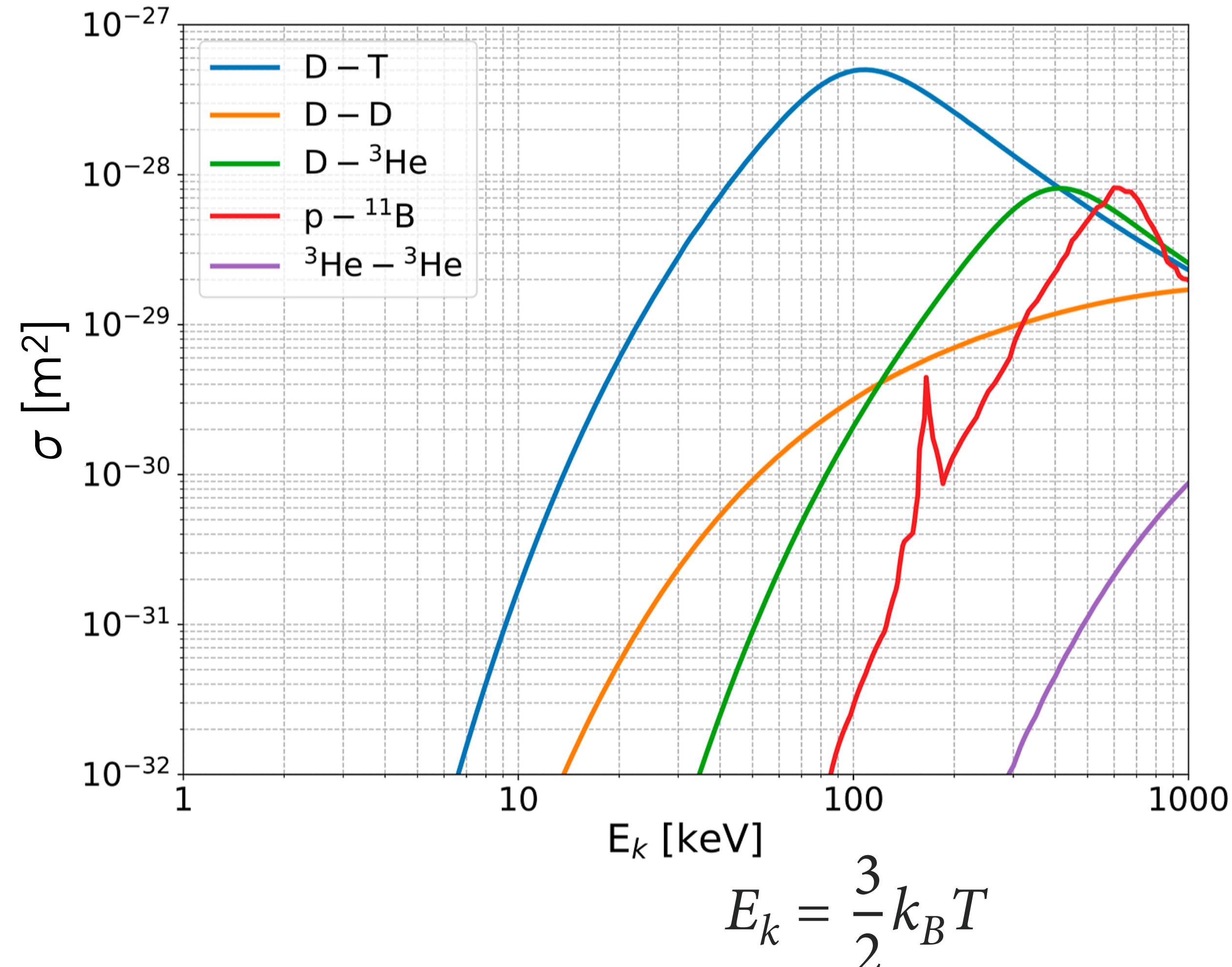
} solo per i test

JET, ITER,...

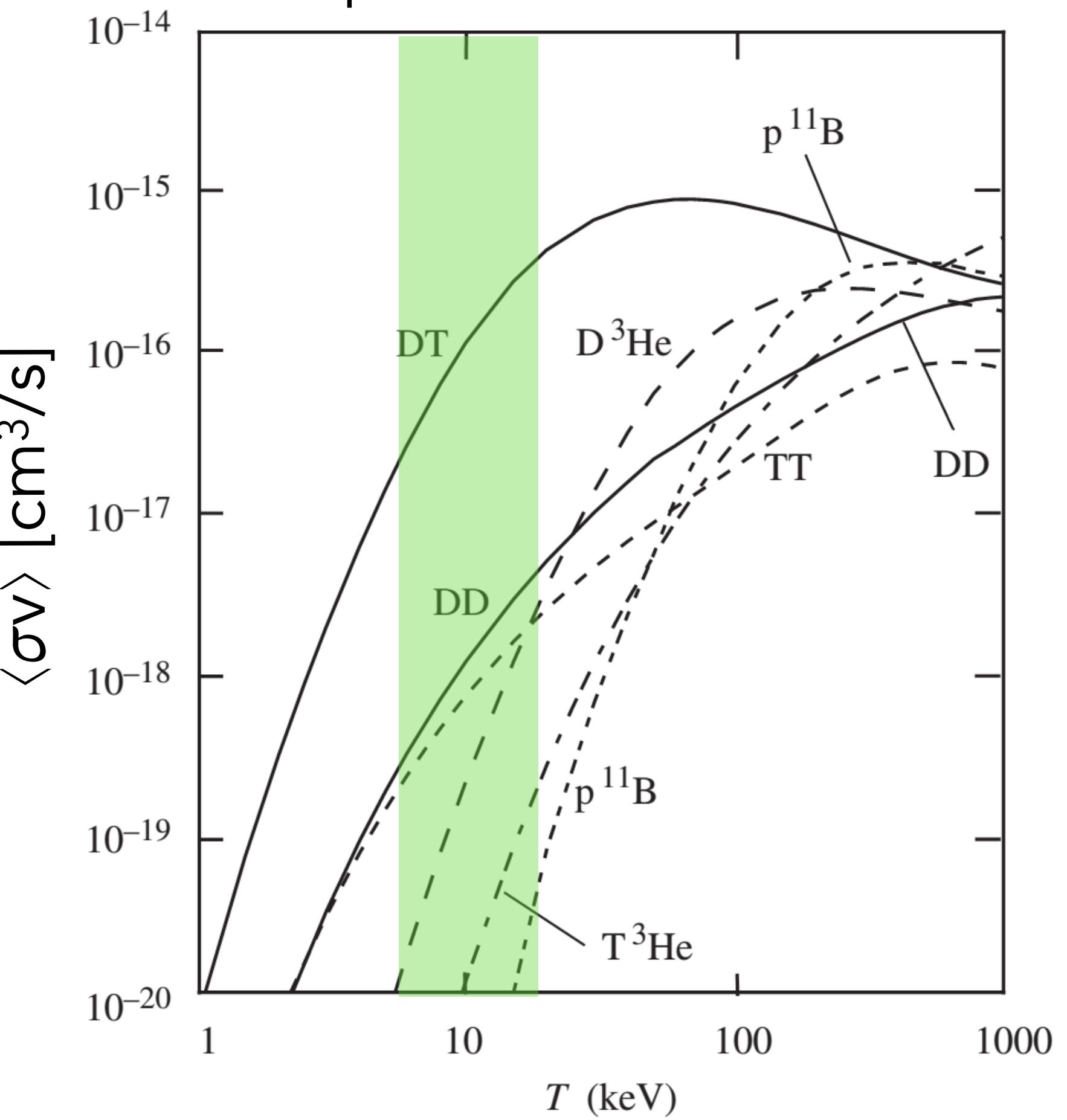
} combustibili neutronici

Combustibili alternativi - aneutronici  
(per lo più settore privato)

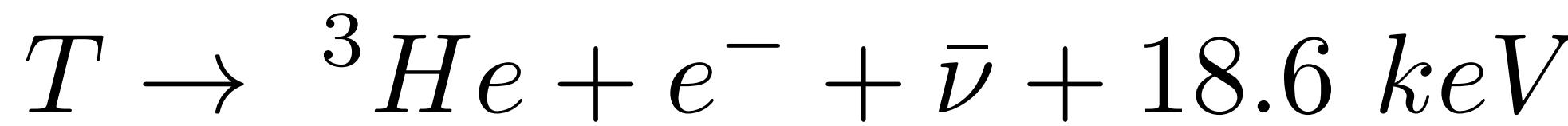
- Sezioni d'urto sperimentali ( $\sigma$ ) per i processi di fusione più rilevanti.
- La maggior parte dei progetti di ricerca sono basati su reazioni D-T, che mostrano le sezioni d'urto maggiori a basse energie.



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



# Problema del trizio e di come produrlo



emivita: 12.33 anni

