

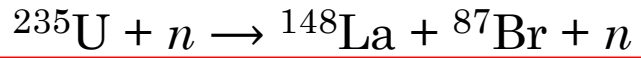
# FISICA NUCLEARE

## Fissione nucleare

- **Teoria elementare della fissione**
- **Sezioni d'urto di fissione**
- **Reazione a catena controllata (1)**

## Fissione nucleare

- $n$  si avvicinano ai nuclei e li penetrano anche con bassissime energie; interagendo coi nuclei formano stati legati
- Si pensò di sfruttare cattura  $n$  a bassa energia per produrre nuovi nuclei con più alti valori di  $A$
- Spesso  $n$  termici su nuclei con  $A$  dispari (...  $^{235}\text{U}$ ), non davano nuclei più pesanti ma **frammentazione** del genitore in due figli di massa inferiore (**fissione nucleare**):

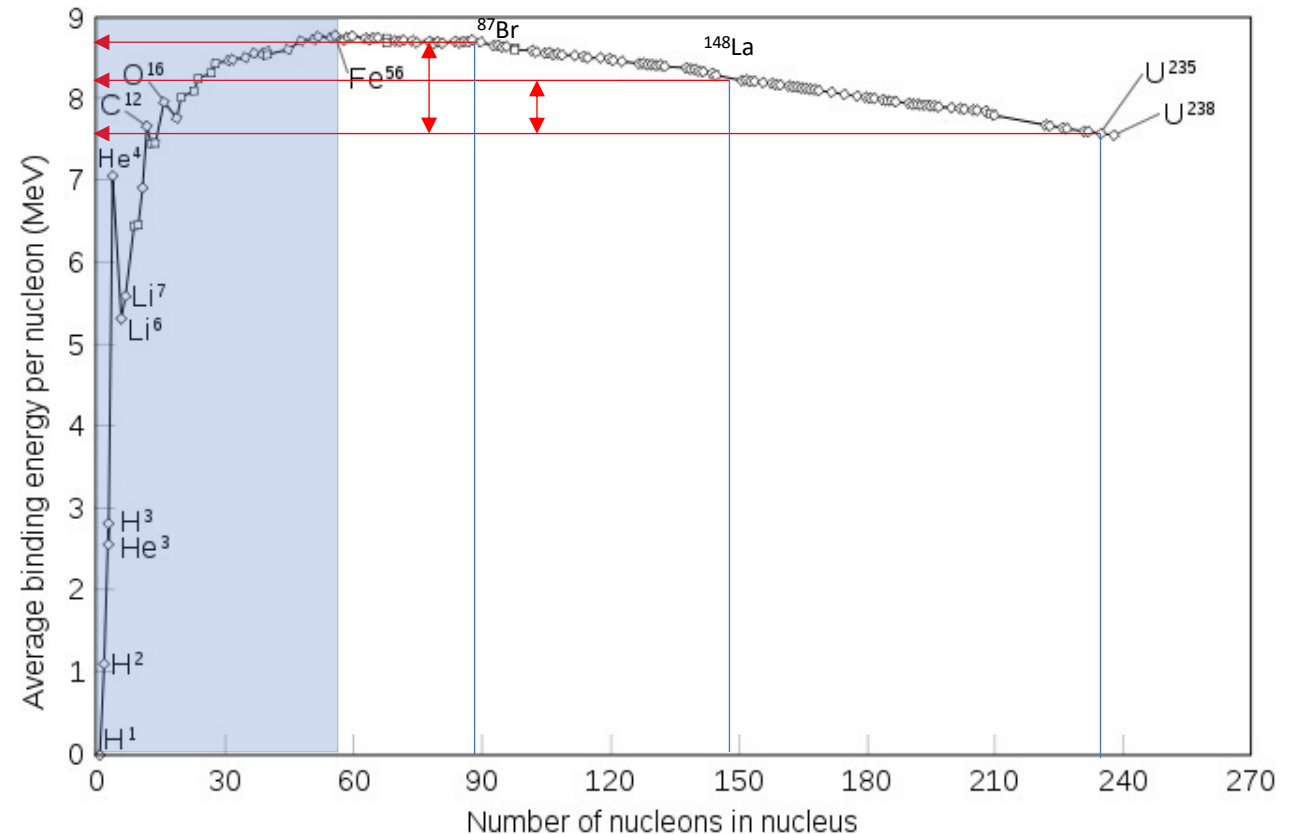


### Alcuni nuclei fissionano spontaneamente

- $n$ -termici su nuclei con  $A$  pari (... $^{238}\text{U}$ ), non frammentano il genitore. Ci vogliono  $n$  d'energie superiori, almeno di 2 MeV
- Fissione **caratteristica di nuclei di grossa taglia**; stima energia rilasciata da energia media di legame per nucleone.  $^{235}\text{U}$  rilascia  $\sim 0.9$  MeV/nucleone  $\Rightarrow$

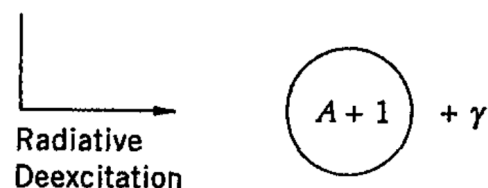
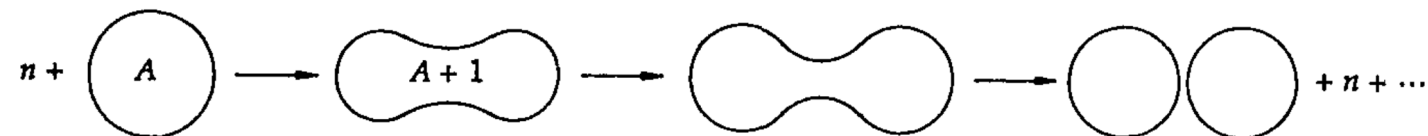
$$E_{fisU} \approx (235 \times 0.9) \text{ MeV} = 211.5 \text{ MeV}$$

( 235 g di  $^{235}\text{U}$  (12.34 cm<sup>3</sup>)  $\rightarrow$   $\sim$ 2 kton )



## Teoria elementare della fissione

- Modello a **goccia di liquido**  $\Rightarrow$  nuclei sferici negli stati iniziale e finale
- Perturbazione ( $n$  incidente) può creare onde “**superficiali**” che modificano forma goccia
- Se questa si dilata allungandosi abbastanza, repuls. coulomb. fra porzioni elongate può produrre struttura a due lobi che induce ulteriore repulsione fino a determinare completa separazione: **fissione goccia in due più piccole**



Se separazione iniziale troppo ridotta, goccia deformata può dar luogo a stato eccitato del nucleo composto da fusione del  $n$  col nucleo genitore di massa  $A$ . Questo poi si diseccita, emettendo  $\gamma$ , verso stato a minore energia del nucleo ( $A + 1$ ).

- Modello a goccia  $\Rightarrow$  formula **Weizsäcker** : 3 termini semi-classici dipendono dalla forma della goccia: **volume**, **superficie** e **coulombiano**

### Calcolo classico per valutare stabilità goccia in risposta a stimolo perturbativo esterno

- Goccia sferica di raggio  $R$  che per stimolo esterno si deforma leggermente, a **volume costante** (materia nucleare è liquido  $\sim$  incompressibile), verso ellissoide con semiasse maggiore  $a$  e minore  $b$

$$a = R(1 + \epsilon), \quad b = \frac{R}{(1 + \epsilon)^{1/2}}, \quad \epsilon \text{ parametro deformazione. Invarianza volume} \Rightarrow V = \frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi ab^2$$

e assicura invarianza termine volume in formula Weizsäcker fra goccia sferica e deformata

- **Sono però diversi nei due casi i termini di superficie e coulombiano**

Con  $\epsilon \ll 1$  e  $Z(Z-1) \approx Z^2$ , diventano:

$$B_S(A) = b_S A^{2/3} \longrightarrow B_S^*(A) \approx b_S A^{2/3} \left(1 + \frac{2}{5}\epsilon^2\right)$$

$$B_C(A, Z) \approx b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \longrightarrow B_C^*(A, Z) \approx b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} \left(1 - \frac{1}{5}\epsilon^2\right)$$

$$\Delta B^*(A, Z) = B_S(A) + B_C(A, Z) - B_S^*(A) - B_C^*(A, Z) =$$

$$= \frac{1}{5}\epsilon^2 A^{2/3} \left(2b_S - b_C \frac{Z^2}{A}\right)$$

Ricordando che  $b_S \approx 17.23 \text{ MeV}$  e  $b_C \approx 0.697 \text{ MeV}$ , si trova  $\Delta B^*(A, Z) > 0$  per

$$2b_S - b_C \frac{Z^2}{A} > 0 \quad \text{cioè} \quad \frac{Z^2}{A} < 49$$

Deformazione accresce energia di superficie e riduce quella coulombiana. **Stabilità goccia dipende da come i due termini competono fra loro**

**Variazione tot. en. legame per deformazione:**

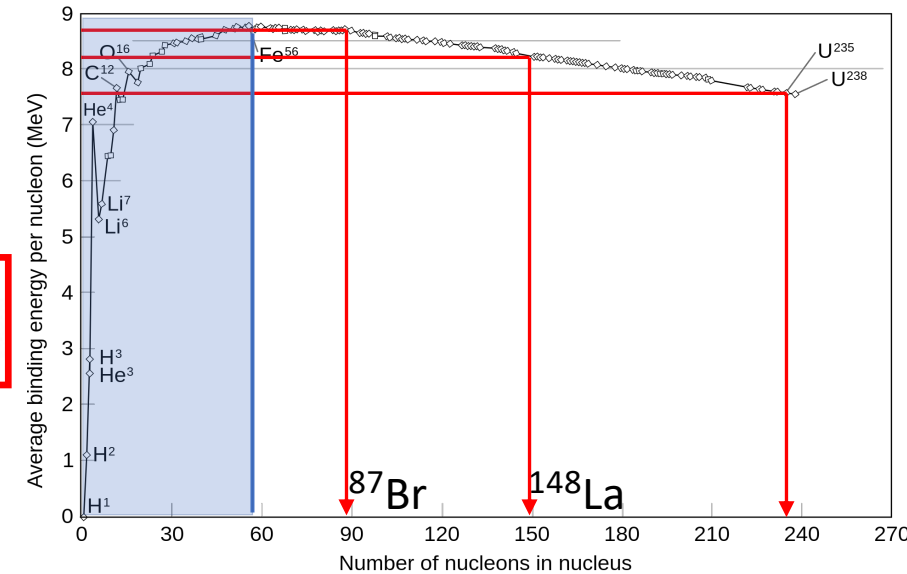
Se  $\Delta B^*(A, Z) > 0$  la goccia sferica è più legata, cioè è stabile per piccole perturbazioni esterne

- In nuclei grandi  $Z < A/2 \Rightarrow$  soddisfano condizione  $Z^2 < 49A$  e dovrebbero mostrare massima energia di legame con forma sferica. Ma somma energie legame di due figli può superare quella del genitore che anche se sferico può quindi fissionare trasformandosi in stati più legati

- Es.: genitore frammenta in due figli identici  $\Rightarrow A$  e  $Z$  del genitore pari  
Diff. en. legame genitore e prodotti di fissione a distanza  $\infty$  uno dall'altro

$$B(A, Z) - 2 \times B(A/2, Z/2) \simeq b_S A^{2/3} (1 - 2^{1/3}) + b_C \frac{Z^2}{A^{1/3}} (1 - 2^{-2/3})$$

$$\simeq 0.26 A^{2/3} \left( \frac{Z^2}{A} - 17.2 \right) \text{ MeV}$$



Questa è  $> 0$  per  $Z^2 > 17.2 A$  (*i due frammenti in configurazione più stabile del genitore*)

- Unendo condizioni  $\Rightarrow$  in regione nuclidi con  $17.2A \lesssim Z^2 \lesssim 49.4A$ , anche se config. sferica del genitore è stabile per piccole perturbazioni, **fissione in 2 frammenti uguali è energeticamente favorevole**
- Deformazione sufficiente può dunque portare il nucleo a limite scissione e sua forma è allora compatibile con una configurazione di equilibrio instabile  $\Rightarrow$  **basta lavoro infinitesimo per spostarlo da lì**

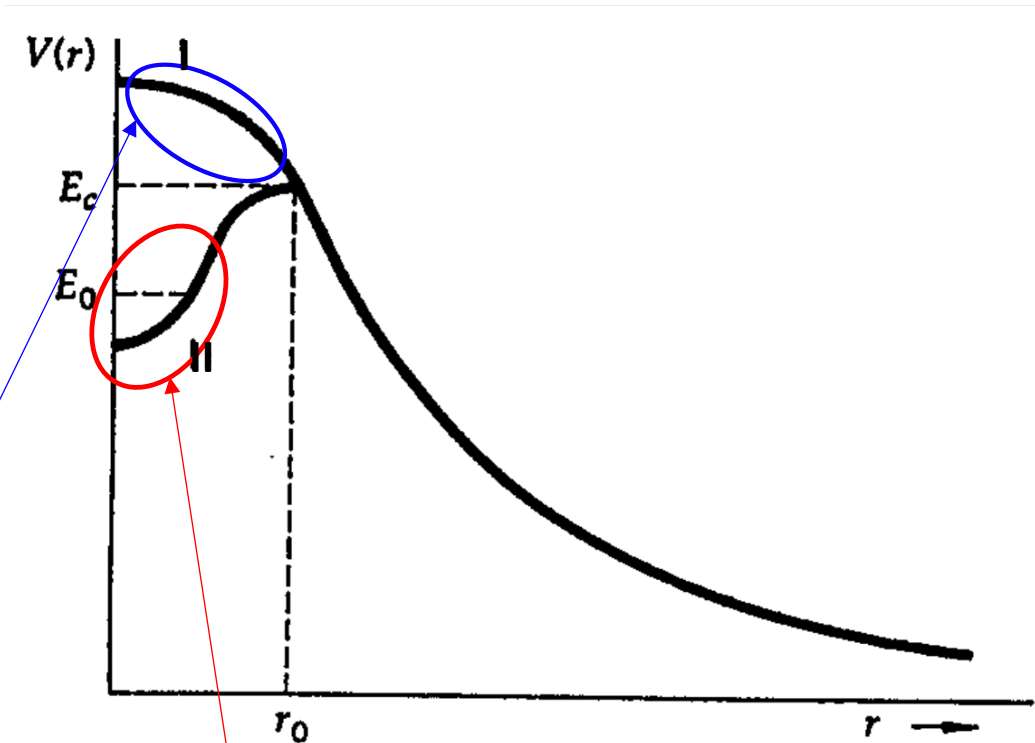
## Energia potenziale dei due frammenti di fissione in funzione della mutua distanza

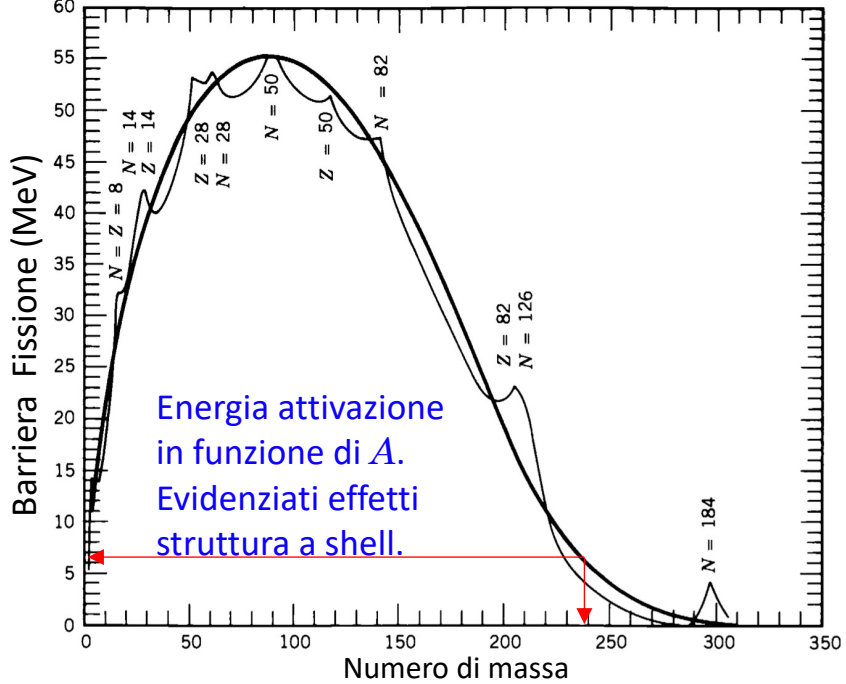
- Con  $A \approx 200$  e  $Z \approx 92$  si hanno  $\approx 200$  MeV per due frammenti di taglia comparabile. Repulsione coul. cresce al diminuire della mutua distanza
- Pot. coulomb. è max. ( $\approx 250$  MeV) quando i due frammenti si **toccano**, a distanza  $r_g$  pari  $\sim$  somma rispettivi raggi
- Frammenti asimmetrici  $\Rightarrow$  en. pot. può essere inferiore

Con  $Z^2 > 49A$  forma sferica instabile ed energia decresce quadraticamente con deformazione  $\epsilon$ , come **ramo-I** del grafico e nella formula per  $\Delta B^*(A, Z)$

In tal caso genitore sferico evolve in due frammenti separati in risposta alla più lieve perturbazione, energeticamente favorevole per qualunque valore di  $r$ . Si dice che il nucleo rotola rapidamente dalla collina di potenziale e fissiona spontaneamente

Per  $Z^2 < 49A$ , genitore sferico  $\propto$  a stato legato stabile la cui energia cresce quadraticamente con la deformazione, come nel **ramo-II** del grafico. Il genitore è in questo caso nella buca, a energia  $E_0 >$  del fondo della buca ma  $<$  della barriera coulombiana  $E_C$



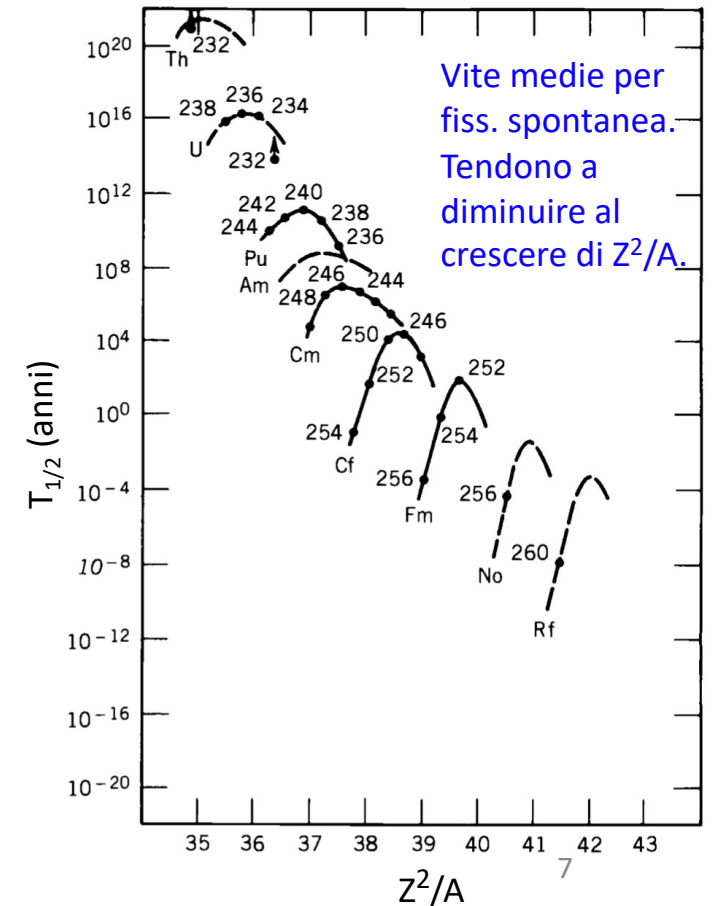


Nucleo può allora fissionare per **effetto tunnel**. Probabilità molto bassa, per grande massa  $M$  del frammento e dipendenza del **fattore  $G$  di Gamow** da  $\sqrt{M}$

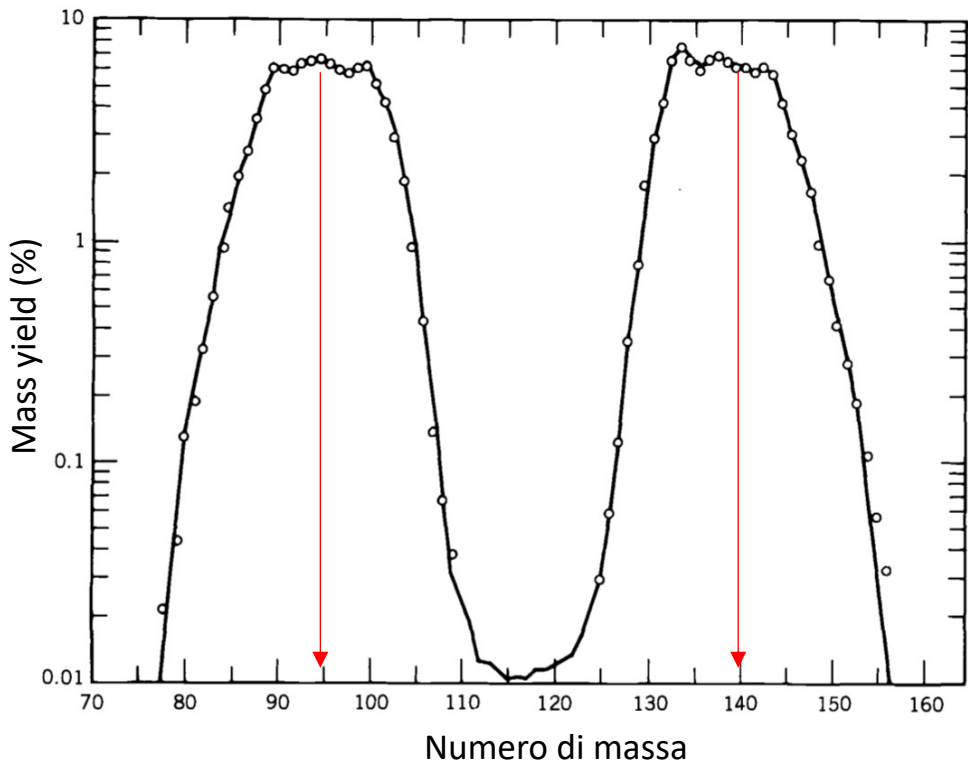
- **Vita media per fissione tunnel è molto lunga**. Fissione nel **ramo-I** è invece molto rapida, perchè sempre energeticamente favorevole

- Modello a goccia spiega come  **$n$ -termici** inducono fissione in  $^{235}\text{U}$  ma servono  **$n$  energetici** per fissionare  $^{238}\text{U}$

- $^{235}\text{U}$  è **pari-dispari**,  $^{238}\text{U}$  **pari-pari**: diff. en. legame fra stato fond. di  $^{235}\text{U}$  e quella dei suoi frammenti è **maggiore** della corrispondente per  $^{238}\text{U}$
- $^{235}\text{U}$  cattura  **$n$**   $\rightarrow$  nuc. composto **pari-pari**, più legato  $\Rightarrow$  processo rilascia energia: en. legame dell'ultimo  **$n$**  è  $-6.5$  MeV, sufficienti ad attivare fissione  
En. cinetica  **$n$**  è in tal caso **ininfluente**, e processo su  $^{235}\text{U}$  può essere innescato da  **$n$  termici**
- Cattura  **$n$**  su  $^{238}\text{U}$  lo trasforma invece in **pari-dispari**, con en. legame ultimo  **$n$**  di soli  $-4.8$  MeV,  $<$  in  $|\dots|$  ai 6 MeV richiesti per attivare la fissione  
**Per fissionare in questo caso en. cinetica  $n > 1.2$  MeV**



Vite medie per fiss. spontanea. Tendono a diminuire al crescere di  $Z^2/A$ .



**Nell'es. precedente fissione in due framm. uguali.**

In generale framm. asimmetrici  $\Rightarrow$  riduce barriera coul.

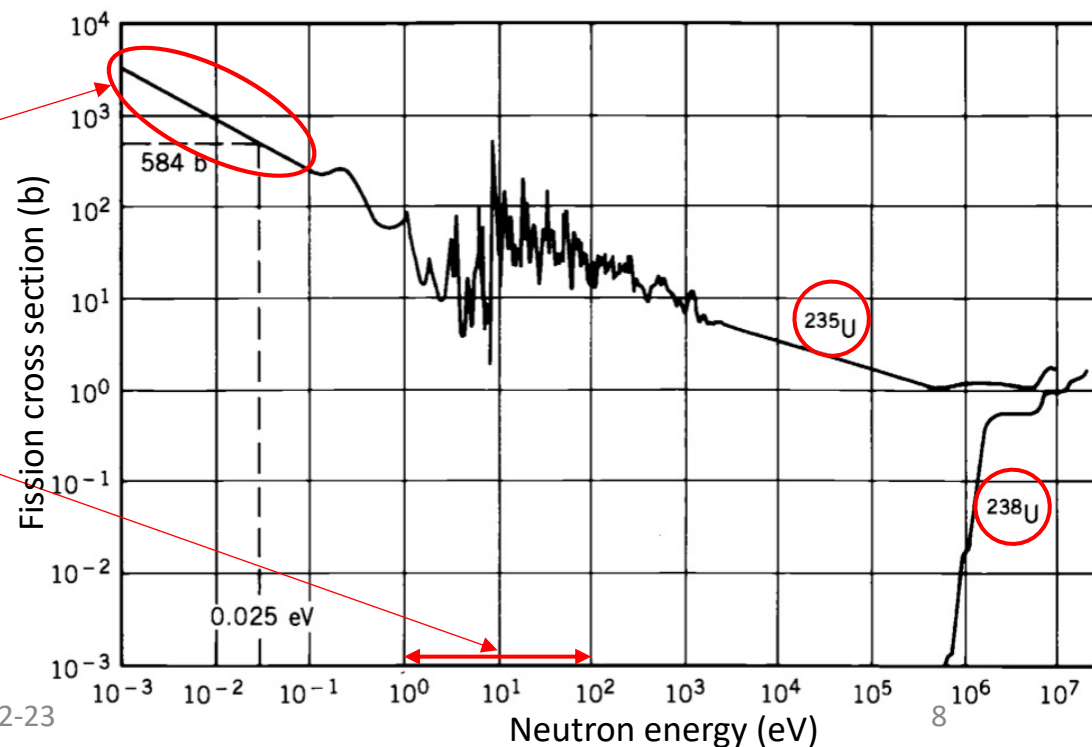
Sperimentalmente masse frammenti  $^{235}\text{U}$  si raggruppano attorno  $A \approx 95$  e  $A \approx 140$ ; **non trovata ragione fondam. per questa particolare asimmetria**

- Frammenti sono isotopi pesanti ed eccitati di nuclei più stabili e raggiungono stato fond. **evaporando  $n$**  e decadendo  **$\beta^-$**

## Sezioni d'urto di fissione

Regione termica  $\Rightarrow$  tipica dipendenza  $1/v$  per  $n$  a bassissima energia e svariate risonanze nell'intervallo  $1 \text{ eV} \div 100 \text{ eV}$

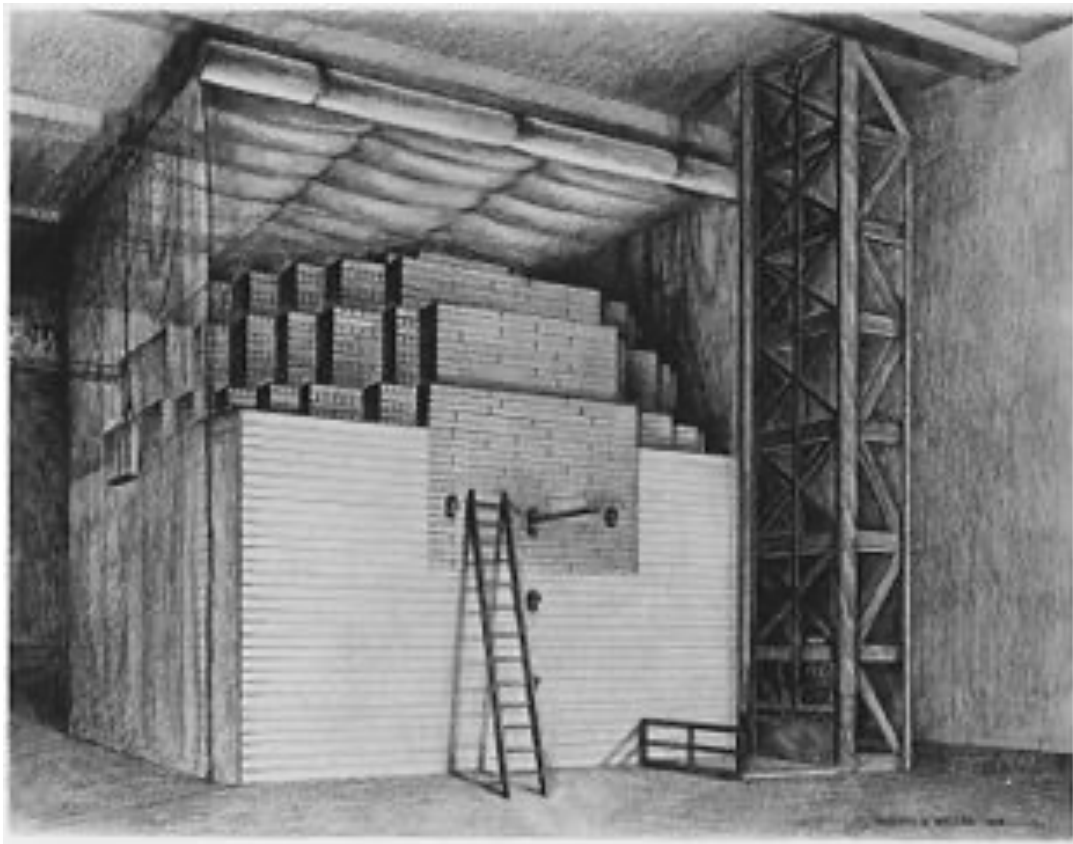
- Utilizzando  **$n$  veloci** per indurre fissione su  $^{235}\text{U}$  bisogna prima **moderarli** fino a energie termiche  
In  $^{238}\text{U}$  sezione d'urto di fissione **praticamente nulla** per  $n$  sotto il MeV





## Reazione a catena controllata (1)

- Massa  $\infty$  estesa di **uranio naturale** (0.72 %  $^{235}\text{U}$ , 99.28 %  $^{238}\text{U}$ )
- Singola fissione  $\Rightarrow \sim 2.5$   **$n$** , *ognuno può stimolare ulteriore fissione*, e così via: **reazione a catena**
- Ogni fissione libera  $\sim 200$  MeV in energia cinetica di frammenti, e radiazione
- **Fattore moltiplicazione**  $k_{\infty}$  nel mezzo  $\infty$  esteso (trascuando perdite da superficie) dà numero medio nuovi  **$n$ -termici** prodotti da ogni  **$n$ -termico**
- Reazione a catena **non si spegne** se  $k_{\infty} \geq 1$ .  $2.5$   **$n$**  prodotti in media da ogni fissione sono però **veloci** (piccola sez. d'urto di fissione). *Per favorire reazione a catena bisogna moderarli, fino a velocità termiche*, per le quali sezione d'urto, **in regime  $\sim 1/v$** , vale  $\sim 580$  b
- Molti  **$n$**  prodotti da fissione possono venir assorbiti o distolti da reazione a catena  $\Rightarrow$  può restarne disponibile **meno di 1 termico** per fissione, determinando lo stop della reazione a catena
- Possibile moderatore è il carbonio (**grafite**). Moderatore più efficiente ha nuclei più leggeri, idrogeno, ma carbonio buona scelta per facilità di disporre, sicurezza d'uso, forma solida e sagomabile, basso costo e alta densità
- Reticolo blocchi uranio alternati a grafite primo prototipo di pila realizzato da Fermi a Chicago nel 1942

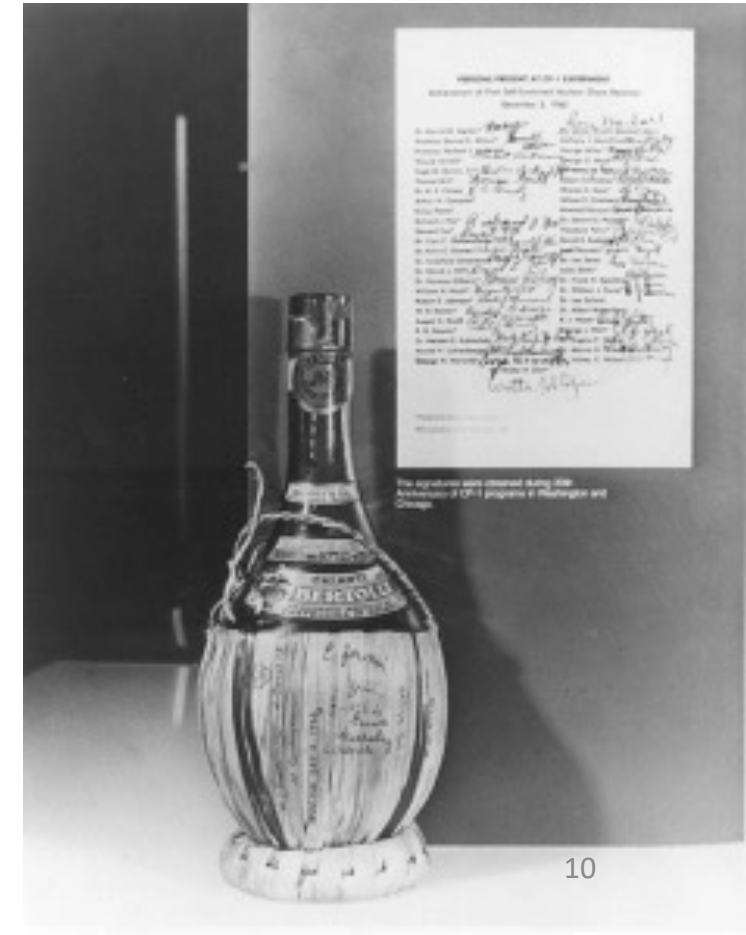


### ... Il navigatore italiano è sbarcato nel Nuovo Mondo ...

Il 2 dicembre 1942, attorno alle 15.25 si cominciò ad udire il rapido ticchettio prodotto da un contatore Geiger: all'interno del CP-1, acronimo di *Chicago Pile 1*, un reattore nucleare costituito da una pila di uranio e blocchi di grafite aveva iniziato a funzionare in fase critica

La dimostrazione che era possibile controllare l'energia atomica durò 28 minuti, dopodiché Fermi arrestò il reattore

Un fisico ungherese naturalizzato statunitense, Eugene Wigner, stappò un fiasco di vino *Chianti* e tutti gli scienziati brindarono in silenzio: Fermi, per immortalare quella l'occasione, chiese a tutti di firmare il fiasco di vino, ancora oggi custodito all'interno dell'*Argonne National Laboratory*



- Con pila di volume finito, se  $k = 1$  pila in condizione **critica** ; **sottocritica** se  $k < 1$  ; **supercritica** se  $k > 1$

La **condizione di criticità garantisce un rilascio costante d'energia**

- $k_{\infty}$  si calcola seguendo evoluzione d'un insieme di **n-termici** da una generazione all'altra
  - **N n-termici** in una generazione, con  $\nu$  numero medio di **n-veloci** da ogni fissione, una frazione dei quali assorbiti in  $^{235}\text{U}$  e in  $^{238}\text{U}$  da processi **(n,  $\gamma$ )**
  - $\eta$  numero medio di **n** utili a fissione, prodotti da ogni **n-termico**, con  $\eta < \nu$ . Se  $\sigma_f$  e  $\sigma_a$  sez. d'urto di "fissione" e "altri processi" d'assorbimento per **n-termici**  $\Rightarrow$  la probabilità che **n** dia fissione è

$$\frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a}$$

da cui

$$\eta = \nu \frac{\sigma_f}{\sigma_f + \sigma_a}$$

Per  $^{235}\text{U}$   $\sigma_f = 584$  b e  $\sigma_a = 97$  b  $\Rightarrow \eta = 2.14$  **n-veloci** per ogni **n-termico**. Ma  $^{238}\text{U}$  non è fissionabile da **n-termici**  $\Rightarrow \sigma_f = 0$ , mentre  $\sigma_a = 2.75$  b. Per **miscela naturale** di  $^{235}\text{U}$  e  $^{238}\text{U}$  le sezioni d'urto efficaci di fissione e assorbimento sono

$$\sigma_f = \frac{0.72}{100} \sigma_f(235) + \frac{99.28}{100} \sigma_f(238) = 4.20 \text{ barn}$$

$$\sigma_a = \frac{0.72}{100} \sigma_a(235) + \frac{99.28}{100} \sigma_a(238) = 3.43 \text{ barn}$$

da cui  $\eta = 1.38$ , prossimo ad 1; per cui controllando e contenendo perdite di **n** si ottiene **reattore critico**

Arricchire al **3%** di  $^{235}\text{U}$   $\Rightarrow \eta = 1.84$  e permette di tollerare perdite di **n** mantenendo condizioni critiche