

# Lezione Fermi 5

*Luciano Maiani, AA 14-15*

## Reazioni nucleari a bassa energia

### Sommario

1. La barriera coulombiana
2. Trasmutazioni “naturalì” e “artificiali”
3. Fusione nucleare nelle stelle
4. Radioattività indotta dai Neutroni
5. Neutroni freddi
6. La scoperta della fissione nucleare

# 1. Barriera Coulombiana

- Le forze nucleari e le forze deboli agiscono solo tra nucleoni “a contatto”, a distanza  $< 1 \text{ fermi} = 10^{-13} \text{ cm}$
- ma i nuclei hanno carica elettrica positiva, quindi per portarli “a contatto” occorre superare l’ostacolo posto dalla repulsione di Coulomb, la “barriera coulombiana”.

- due protoni a distanza di 1 fermi hanno una energia potenziale

$$V = e^2 \frac{1}{R} = \frac{e^2 \hbar c}{\hbar c R} = \alpha \frac{\hbar c}{R} \sim$$
$$\sim \frac{1}{137} \frac{200 \text{ MeV} \cdot \text{fermi}}{R} \sim 1.4 \text{ MeV}$$

- in termini di temperatura,  $V$  corrisponderebbe ad energie (letteralmente) astronomiche:

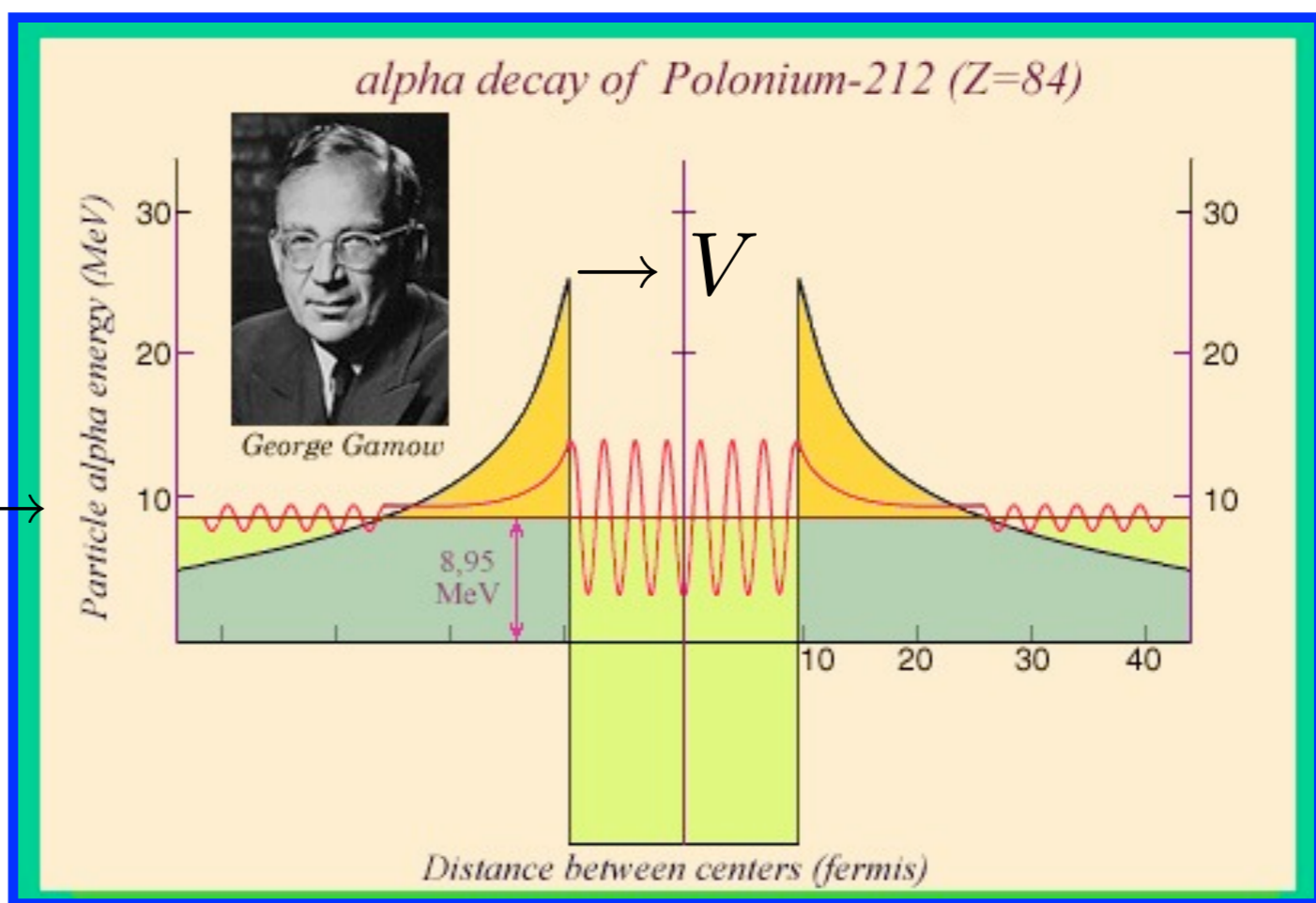
$$T = \frac{V}{k} \sim \frac{1.4 \cdot 10^6}{10^{-4}} \text{ } ^\circ K \sim 10^{10} \text{ } ^\circ K$$

- la temperatura nel centro del Sole raggiunge i 10 milioni di  $^\circ K$ , e la barriera si supera con l’aiuto dell’ “effetto tunnel” che cresce fortemente con la temperatura

L'effetto tunnel, e' stato scoperto da G. Gamow per spiegare la situazione opposta

$$E \ll V$$

come fa la particella alfa ad uscire dal cratere se ha energia  $E \ll V$  ??



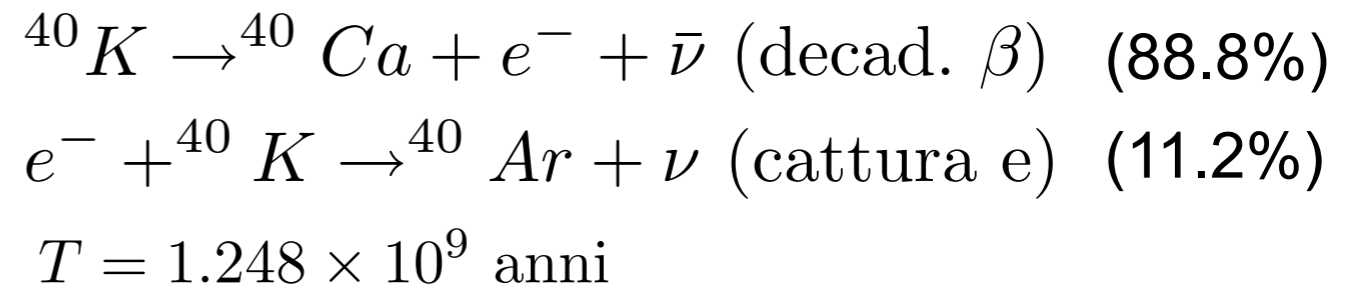
- The alpha particle = mountain climber, trapped in a crater.
- The barrier to cross reflects the competition between the attractive nuclear force and the electrostatic repulsion. In classical mechanics, the alpha particle can not cross the barrier because it does not have the necessary energy: it is either inside or outside the nucleus.
- In quantum mechanics, the wave, which represent an alpha particle in the nucleus, is not strictly localized and slightly overlaps the other side of the fence. There is a probability of observing the particle outside the nucleus, where the nuclear force is no longer felt. As if the climber could dig a tunnel through the barrier.
- An empirical law says that higher is the potential barrier, larger is the thickness to cross the smaller the probability to cross and greater is the nucleus lifetime. This explains some particularly long lifetimes.
- Per le reazioni di fusione, la probabilita' di trovarsi "dentro il cratere" cresce fortemente all'aumentare dell'energia E, ovvero della temperatura T

## 2. Trasmutazioni nucleari

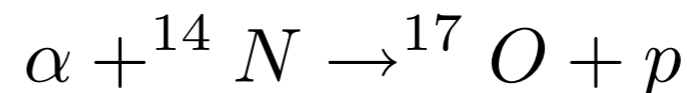
- “trasmutazione” e’ la trasformazione di un elemento chimico in un altro, il sogno degli antichi alchimisti
- nelle disintegrazioni nucleari alfa e beta, i valori di  $Z$  dei nuclei iniziale e finale sono diversi e si ha una trasmutazione naturale: es.  $^{40}\text{K} \rightarrow ^{40}\text{Ar}$  per cattura elettronica (K-Ar datazione delle rocce)

$$\left[ \begin{array}{l} Z = 20 \\ Z = 19 \\ Z = 18 \end{array} \right]$$

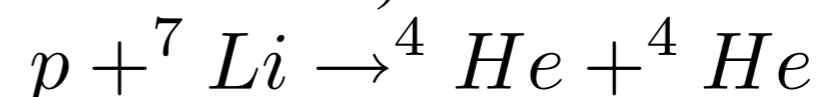
Ca40 0+ 99.941	Ca41 1.22E+5 y 72- EC	Ca42 0+ 0.647
K39 3/2+ 93.2581	K40 1.277E+9 y 4- EC, $\beta^-$ 10.47	K41 3/2+ 6.7302
Ar38 0+ 0.063	Ar39 269 y 72- $\beta^-$	Ar40 0+ 99.600



- per ottenere trasmutazioni artificiali occorre superare la barriera coulombiana con particelle di energia sufficiente:
- Rutherford e Soddy (1919, particelle alfa da radioattivit  naturale):



- Cockroft e Walton (1932, acceleratore elettrostatico):

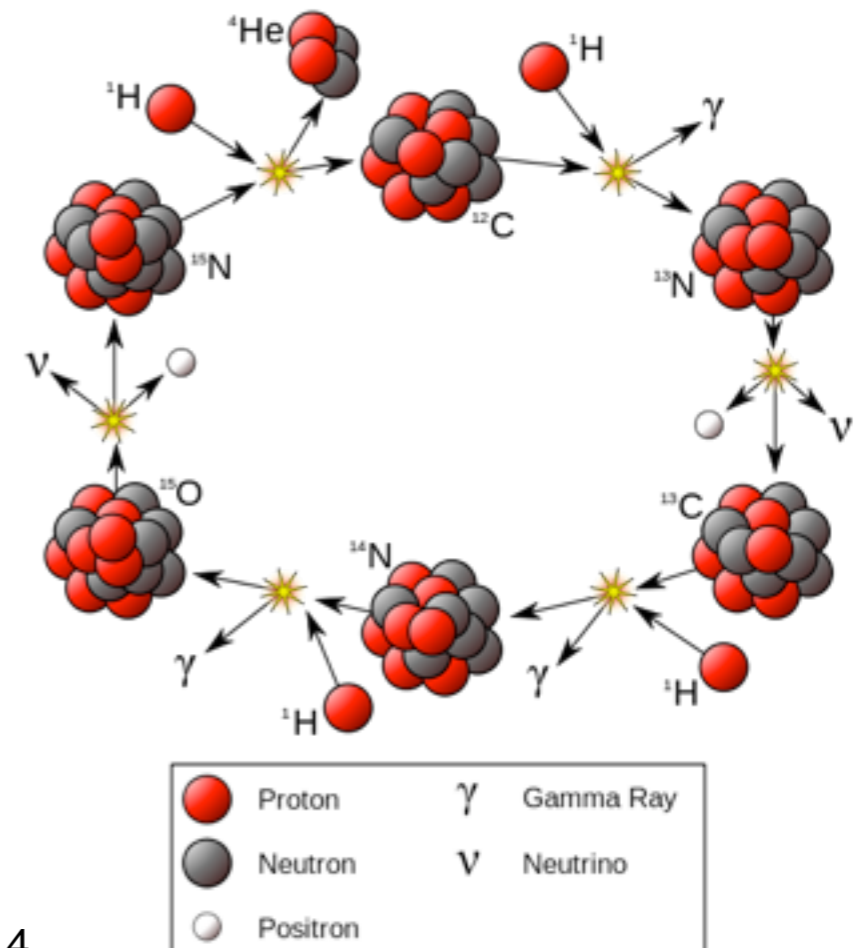
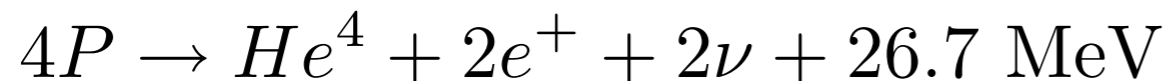


# 3. Fusione nucleare nelle stelle

- Protostelle si formano da nubi diffuse di gas per collasso gravitazionale
- nel collasso si libera energia (il meccanismo proposto da Lord Kelvin per il Sole) e il gas si scalda
- fino ad innescare le reazioni di fusione...
- che liberano ancora maggiore energia: la pressione della radiazione che si produce bilancia l'attrazione gravitazionale
- il collasso si ferma e, finché c'è combustibile per la fusione, la stella è in equilibrio stabile:
  - se si comprime: aumenta  $T$ , quindi la velocità di reazione, la potenza liberata e quindi la pressione gravitazionale  $\rightarrow$  la stella si espande;
  - se si espande, diminuisce  $T$ , quindi la velocità di reazione, meno potenza, meno pressione  $\rightarrow$  la stella si riduce
- (in alcune stelle, Cefeidi, si possono innescare meccanismi di oscillazione periodica: ne parleremo più avanti)

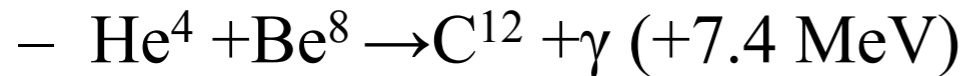
# Fusione dell' Idrogeno in Elio

- Reazioni che bruciano idrogeno
- La reazione P+P:  $T > 4 \cdot 10^6 \text{ K}$ , domina nel Sole e simili
  - $P+P \rightarrow H^2 + e^+ + \nu$  (forze deboli, molto lenta)
  - $H^2 + P \rightarrow He^2 + \gamma$
  - $He^3 + He^3 \rightarrow He^4 + P + P$
- Ciclo CNO:  $T > 17 \cdot 10^6 \text{ K}$ , domina in stelle piu' massive del Sole
  - $C^{12} + P \rightarrow N^{13} + \gamma$
  - $N^{13} \rightarrow C^{13} + e^+ + \nu$
  - $C^{13} + P \rightarrow N^{14} + \gamma$
  - $N^{14} + P \rightarrow O^{15} + \gamma$
  - $O^{15} \rightarrow N^{15} + e^+ + \nu$  (forze deboli, molto lenta)
  - $N^{15} + P \rightarrow C^{12} + He^4$
- il bilancio complessivo e' lo stesso:

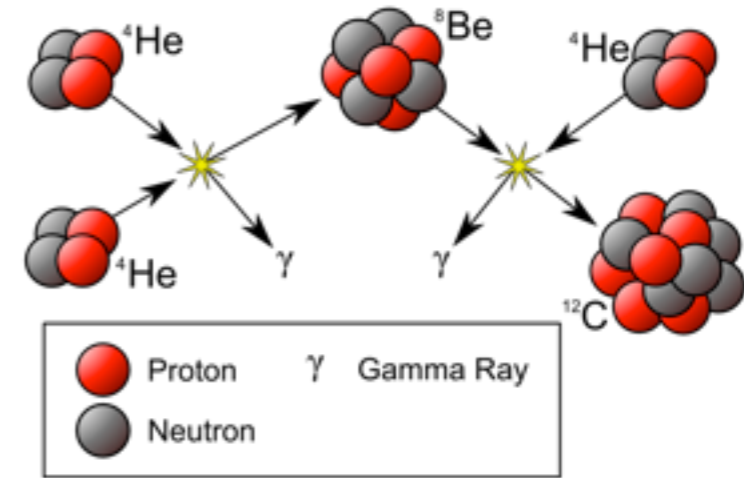


# Fusione dell'Elio

- Quando l'idrogeno finisce, il core collassa, la temperatura sale
- $T > 10^8 \text{ K}$  : si innesca la fusione dell'Elio (Triple Alpha Process)



- il Be si forma in uno stato eccitato, che decade rapidamente. Affinche' il secondo passo si produca, Hoyle ipotizzò l'esistenza di uno stato eccitato del C che facesse da intermediario (1952). La risonanza fu scoperta successivamente in laboratorio !



- Come effetto secondario, alcuni nuclei di  $\text{C}^{12}$  fondono con He producendo  $\text{O}^{16}$ 
  - $\text{C}^{12} + \text{He}^4 \rightarrow \text{O}^{16} + \gamma$  (+7.16 MeV)

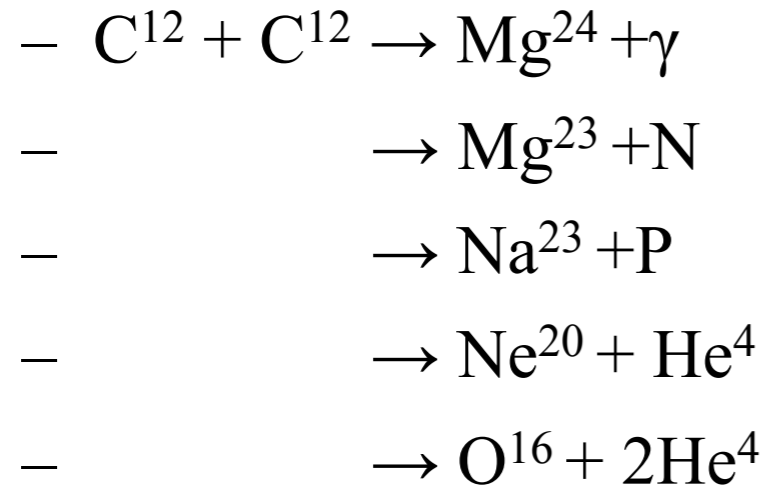
# Risonanze e principio antropico-Wiki

- The triple alpha process is highly dependent on carbon-12 and beryllium-8 having resonances with the same energy as helium-4, and before 1952, no such energy levels were known. The astrophysicist Fred Hoyle used the fact that carbon-12 is abundant in the universe as evidence for the existence of a carbon-12 resonance.
- This could be considered to be an example of the application of the anthropic principle: we are here, and we are made of carbon, thus the carbon must have been produced somehow. The only physically conceivable way is through a triple alpha process that requires the existence of a resonance in a given very specific location in the spectra of carbon-12 nuclei.
- Hoyle suggested this idea to the nuclear physicist William Alfred Fowler, who conceded that it was possible that this energy level had been missed in previous investigations. By 1952, Fowler had discovered the beryllium-8 resonance, and Edwin Salpeter calculated the reaction rate taking this resonance into account.
- This helped to explain the rate of the process, but the rate calculated by Salpeter was still somewhat too low. A few years later, after a project by his research group at the Kellogg Radiation Laboratory at the California Institute of Technology, Fowler discovered a carbon-12 resonance near 7.65 MeV. This eliminated the final discrepancy between the nuclear theory and the theory of stellar evolution.



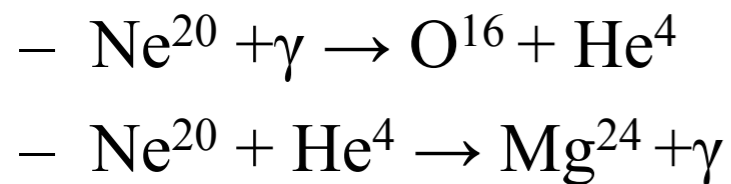
# Fusione del C

- stelle massive, oppure nane bianche che superano per accrezione la massa limite di Chandrasekar

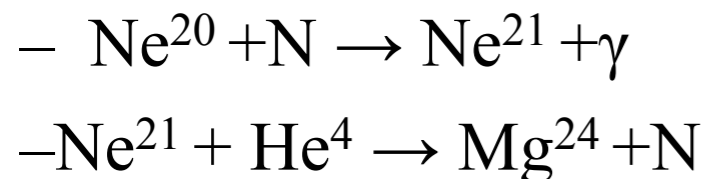


# Fusione del Ne

- stelle massive ( $M > 8$  Solar),  $T > 10^9$  K



oppure:



# 4. La Radioattività indotta dai neutroni

- All'inizio del 1934, I. Curie e F. Joliot Curie scoprono la radioattività artificiale bombardando elementi leggeri con particelle alfa.
- Immediatamente, Fermi comprende i vantaggi di usare i neutroni come proiettili: in assenza della barriera coulombiana, il neutrone può essere facilmente assorbito dal nucleo e produrre nuovi isotopi.
- Fermi si mette al lavoro, dapprima da solo, costruendo un sistema per produrre neutroni:
  - radio in una fiala di vetro, accanto a berillio
  - il radio produce radon che emette particelle alfa energetiche
  - le alfa colpiscono berillio e liberano i neutroni
  - il radio è fornito dall'Istituto del Radio, che si trova all'interno dell'Istituto di Via Panisperna: il direttore, Trabacchi, è la “Divina Provvidenza”
- Fermi coinvolge i ragazzi di Via Panisperna (Rasetti, Amaldi, Segre', Pontecorvo) in una esplorazione sistematica degli elementi, per  $Z$  crescenti
- $(Z, A) + N \rightarrow (Z, A+1)$ , in genere beta instabile  $\rightarrow (Z+1, A+1)$
- in pochi mesi scoprono molti nuovi radioisotopi e arrivano all'Uranio.

- la radioattività indotta in U non è quella di elementi con Z minore e fa quindi pensare alla produzione di un nuovo elemento transuranico...chissà'
- Estate 1934: Amaldi e Segre' vanno a Cambridge per un giro nel laboratorio di Rutherford
- Fermi fa un lungo viaggio in Sudamerica
- al ritorno a Roma, Amaldi trova risultati discrepanti nell'Al
- Fermi al ritorno, è irritato per i nuovi risultati che smentiscono i vecchi dati, i ragazzi si mettono al lavoro e le provano tutte
- Segre': 

Shortly afterwards I caught a cold and could not go to the laboratory for several days. Amaldi tried to repeat our experiments and found a different [half-life] for irradiated aluminum which showed that our so-called (n, $\gamma$ ) reaction [i.e., neutron in, gamma photon out] did not occur. This was hurriedly relayed to Fermi who resented having communicated a result which now looked to be in error. He strongly criticized us and did not conceal his displeasure. The whole business was becoming very troublesome because we could not find any fault with the various experiments which gave inconsistent results.
- si trovano risultati differenti tra radioattività indotta lavorando su tavoli di marmo o tavoli di legno.

# Ottobre 1934: nel racconto di Fermi

quoted in:

R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*,

Simon&Schuster, 1986

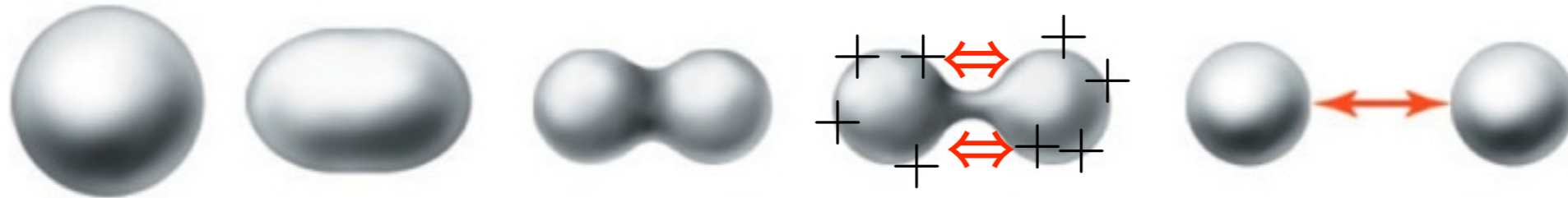
I will tell you how I came to make the discovery which I suppose is the most important one I have made. We were working very hard on the neutron-induced radioactivity and the results we were obtaining made no sense. One day, as I came into the laboratory, it occurred to me that I should examine the effect of placing a piece of lead before the incident neutrons. Instead of my usual custom, I took great pains to have the piece of lead precisely machined. I was clearly dissatisfied with something: I tried every excuse to postpone putting the piece of lead in its place. When finally, with some reluctance, I was going to put it in its place, I said to myself: "No, I do not want this piece of lead here; what I want is a piece of paraffin." It was just like that with no advance warning, no conscious prior reasoning. I immediately took some odd piece of paraffin and placed it where the piece of lead was to have been.

- nel pomeriggio, Fermi aveva già una proposta: la paraffina contiene idrogeno, negli urti con l'idrogeno i neutroni perdono energia, si raffreddano, i neutroni lenti hanno maggiore probabilità di essere assorbiti
- questo spiegherebbe perché il legno (che contiene idrogeno) è meglio del marmo!
- tornato in Istituto, tutti insieme provano l'acqua, mettendo la sorgente di neutroni nella fontana del giardino con i pesci rossi: l'effetto aumenta
- la sera dopo cena tutti insieme a casa di Amaldi scrivono un lavoro: *Influence of hydrogenous substances on the radioactivity produced by neutrons*.
- Ginestra Amaldi batte a macchina, tutti sono così eccitati che la cameriera, il giorno dopo chiede se non avessero bevuto troppo.
- Corbino insiste per un brevetto e commenta: Fermi prenderà il Nobel, Rasetti sarà eletto ai Lincei, Segre avrà una cattedra e Amaldi diventerà assistente.
- Bethe, anni dopo: se in Italia non ci fosse marmo in abbondanza, nessuno avrebbe notato l'effetto.

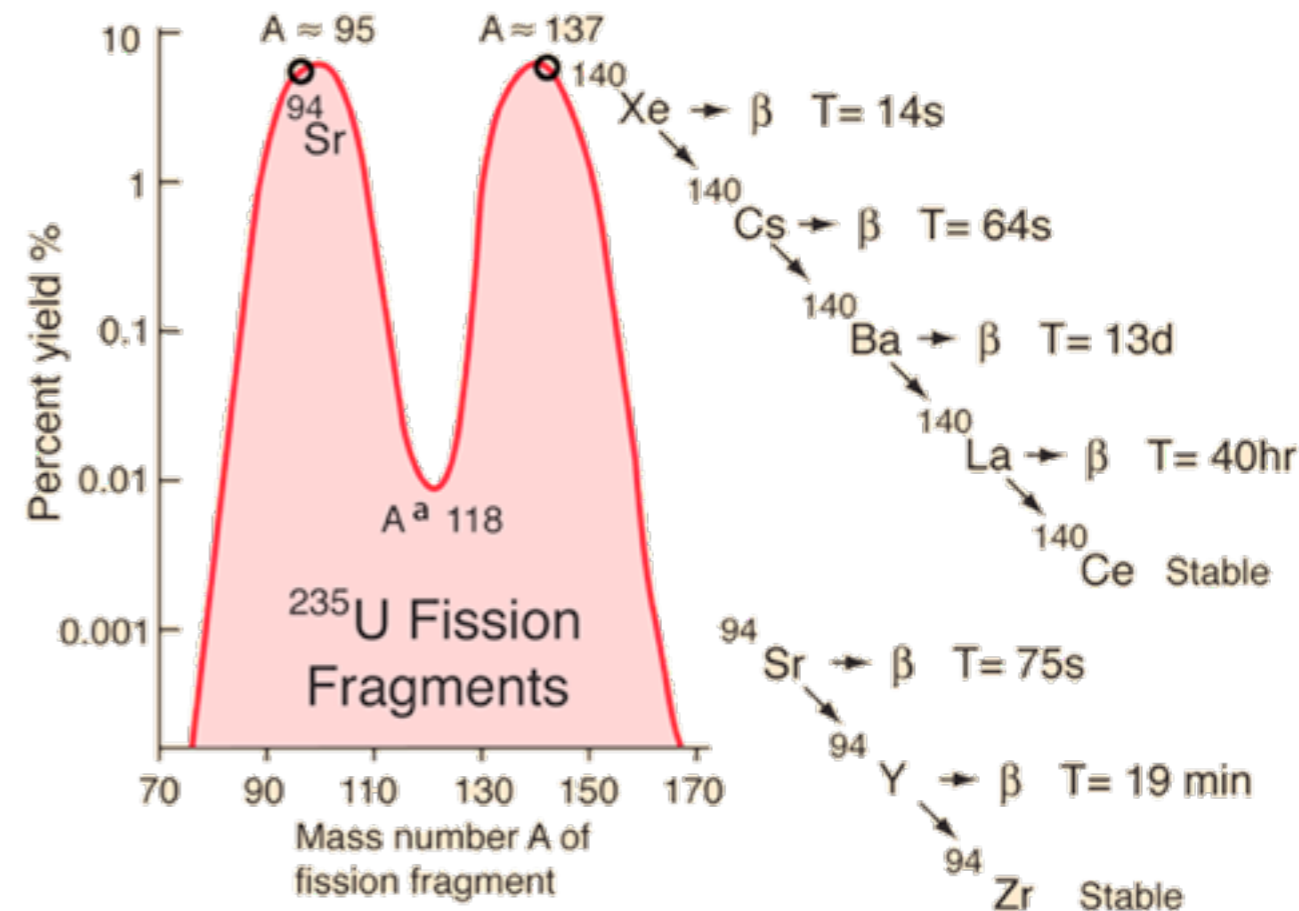
# 6. Hahn e Strassmann non sono convinti

- Nel 1935, Amaldi riconsidera la radioattività indotta nello U e cerca emissione alfa energica
- per schermare dalla radioattività alfa naturale mette un foglio di alluminio tra U e rivelatore: una radioattività naturale avrebbe alfa con vita media più breve, quindi energia maggiore, e potrebbero passare. Nessun effetto osservato.
- Hahn e Strassmann, a Berlino, seguono la via della chimica e analizzano con cura la composizione del campione di U irraggiato; Hahn è, senza discussione, il miglior radiochimico in Germania
- Fine del 1938. H&S concludono che il risultato non può essere separato dal Bario, elemento di massa tra 114 e 150, circa la metà di U: è un dato che sovverte tutto quello che si sa in fisica nucleare
- Si pensa che nei decadimenti vengano via schegge nucleari di piccola taglia, rompere così tanti legami forti non sarebbe immaginabile
- Hahn è in contatto con Lisa Meitner che sta fuggendo dalla Germania in Svezia, dove si stabilisce in Dicembre, e le chiede se ci possono essere spiegazioni fisiche del loro risultato
- nelle vacanze di Natale, Hahn e Strassman si decidono a pubblicare il lavoro che indica la formazione di Bario.
- Lisa, in vacanza con il nipote Otto Frisch, riflette sul modello a goccia dei nuclei, proposto recentemente da Bohr.

# Le idee di Bohr, Meitner e Frisch danno una base teorica ai risultati di Hahn e Strassman (Dicembre 1938)



- N. Bohr: un nucleo pesante come U si comporta come una goccia di liquido, tenuta insieme dalle forze nucleari e sotto tensione per la repulsione coulombiana.
- Lisa Meitner e Otto Frisch: l'assorbimento di un neutrone mette la goccia in vibrazione;
- se si forma un collo, la repulsione coulombiana lo allunga, finché la goccia si spezza in due parti circa uguali: i frammenti di fissione, con peso atomico circa 1/2 del peso atomico di U.
- Meitner e Frisch calcolano che la variazione di energia è di circa 200 MeV, un'energia enorme, rispetto all'energia liberata dalle reazioni chimiche
- si capisce subito che, se nella fissione si liberano neutroni, questi potrebbero portare ad una reazione a catena
- Bohr viene informato mentre è in partenza per gli USA.



## Bohr porta la notizia negli USA (Washington, Gennaio 1939)

- Bohr riferisce ad un convegno organizzato da Gamow. Due giovani si incaricano di fornire una conferma immediata mettendo Uranio in una camera a ionizzazione e bombardandolo con neutroni lenti: la camera mostro' subito tracce fortemente ionizzanti, ben piu' lunghe delle tracce delle particelle alfa del decadimento radioattivo dell'U.

R. Rhodes, *The Making of the Atomic Bomb*, Simon&Schuster, 1986

Roberts and Meyer ran every test they could think of. "We promptly tried the effect of paraffin (for slow neutrons) and then cadmium to remove the slow neutrons. We also tried all the other heavy elements available [to determine if they would split] and saw the same [i.e., fission] with thorium." Having made that original discovery (Frisch had made it independently in Copenhagen before them) they stopped to eat. "I told Tuve after supper and he immediately called Bohr and Fermi and they came out Saturday night."

Not only Bohr and Fermi came, in heavy, dark, pin-striped three-piece suits, Fermi swarthy with a day's growth of beard, but also Tuve; Rosenfeld; Teller; Erik Bohr, handsome in a heavy overcoat over a decorative Danish sweater; Gregory Breit, owlish in spectacles; and John A. Fleming, the conservative director of the DTM, who had the presence of mind to bring along a photographer. All except Teller posed in the target room with Meyer and Roberts for a historic photograph.

Fermi had been amazed at the ionization pulses on the oscilloscope and had insisted they check for equipment malfunctions: he had never seen such pulses in Rome (they were captured by the aluminum foil Amaldi had wrapped around his uranium to block its alpha background).

As Herbert

Anderson remembers it, "Fermi . . . rushed back to Columbia and straightaway called me into his office. My notebook lists the experiments he felt we should do right away. The date was January 29, 1939." They had already agreed, says Anderson, that "I would teach him Americana, and he would teach me physics." Both lessons began in earnest.

1939. Guerra in Europa,  
E' l'alba dell'era atomica