

Fissione e Fusione Nucleare

F. Cappella

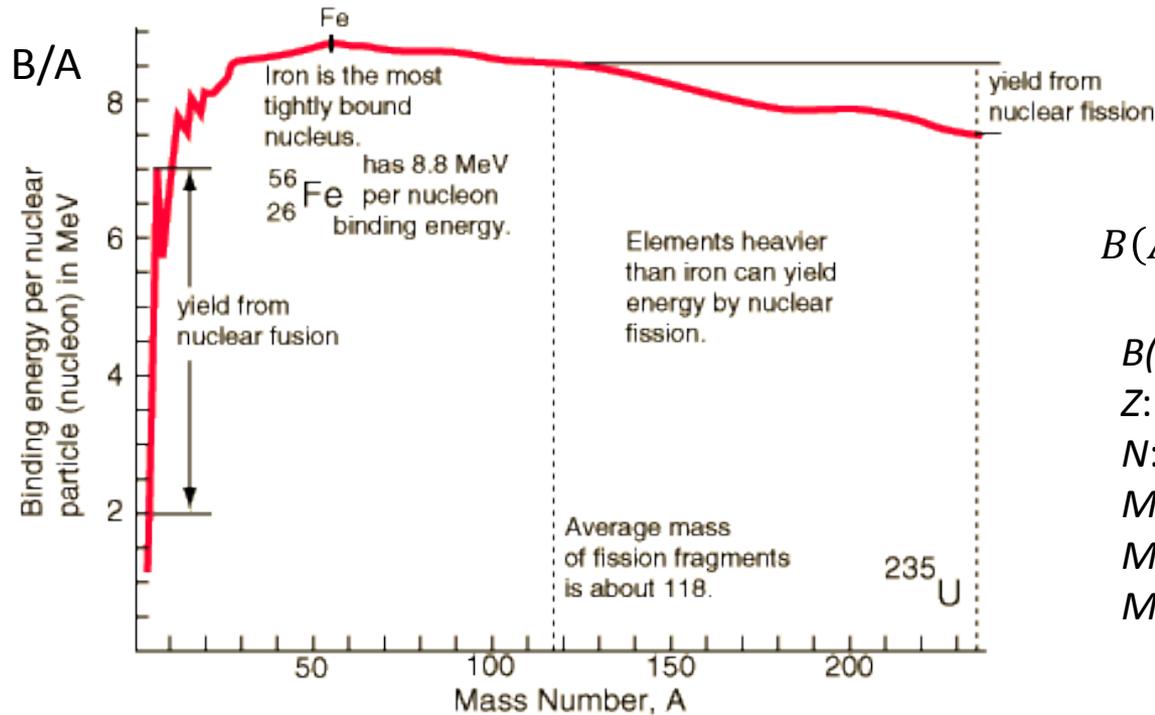
Università di Roma La Sapienza

(nell'ambito del corso di *Fisica Nucleare e Subnucleare I*, A.A. 2013/14, Prof. S. Gentile)

Energia Nucleare

Le reazioni nucleari rilasciano energia quando la massa totale dei prodotti è inferiore alla somma delle masse dei nuclei iniziali.

La massa mancante è restituita sotto forma di energia cinetica dei prodotti ($E=mc^2$).



$$B(A, Z) = Z M_p + N M_n - M(A, Z)$$

$B(A, Z)$: Energia di legame

Z : numero di protoni

N : numero di neutroni

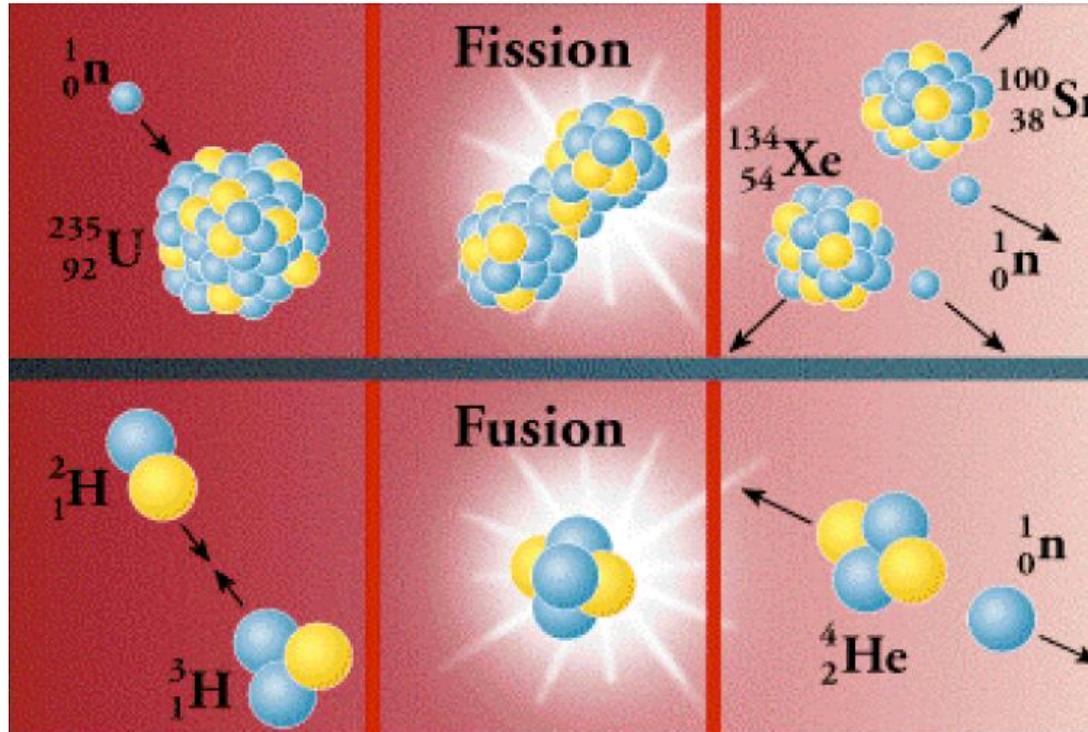
M_p : massa del protone

M_n : massa del neutrone

M_{nuc} : massa del nucleo

La curva dell'energia di legame per nucleone ha un massimo per i nuclei medi (gruppo del Fe)
 \Rightarrow E' quindi possibile ricavare energia dalla **fissione** di nuclei pesanti o dalla **fusione** di nuclei leggeri

Energia Nucleare

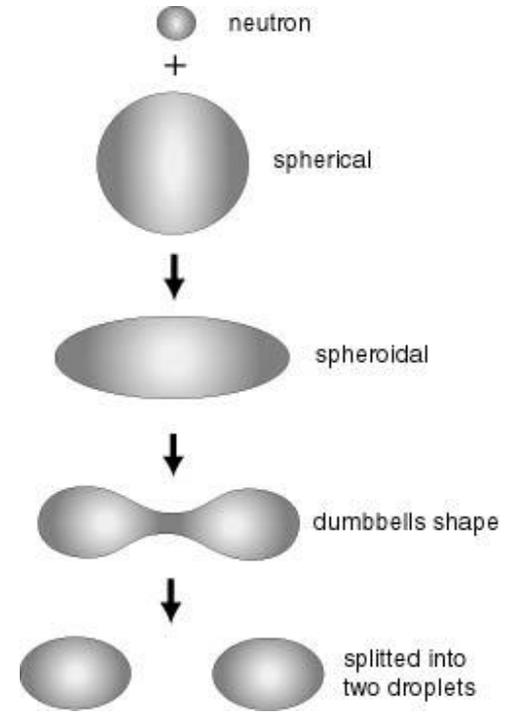
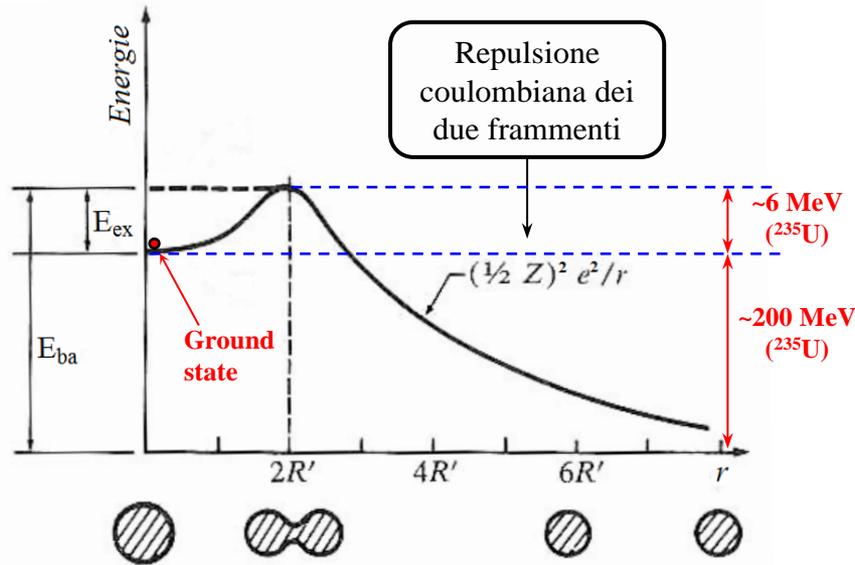
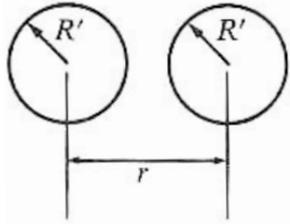


Fissione: un nucleo massivo si divide dando luogo a due frammenti di massa simile, con emissione di uno o più neutroni.

Fusione: nuclei di piccola massa si combinano per formare un nucleo di massa più grande, con emissione di una o più particelle (neutroni, protoni, fotoni, particelle alfa)

Fissione Nucleare

Esempio con
fissione simmetrica



Fissione spontanea

- Avviene per effetto tunnel
- Teoricamente possibile ($E_{ba} > 0$) per molti nuclei pesanti: $A \geq 100$
- Sperimentalmente osservata solo per nuclei con $A \geq 230$ (lunghi tempi di decadimento)

Fissione indotta

- Si fornisce al nucleo un'energia pari ad E_{ex}
- Si può fare tramite l'assorbimento di un neutrone:



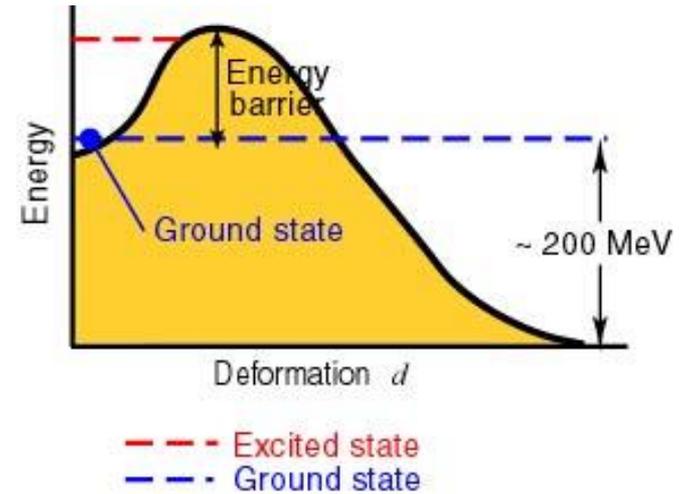
con T_n = energia cinetica del neutrone; B_n = energia di legame del n nel nucleo $(A+1, Z)$

- Anche l'assorbimento di un γ con l'opportuna energia può indurre la fissione: fotofissione

Energia critica

Energia Critica: Energia necessaria per superare la barriera di potenziale e far avvenire la fissione

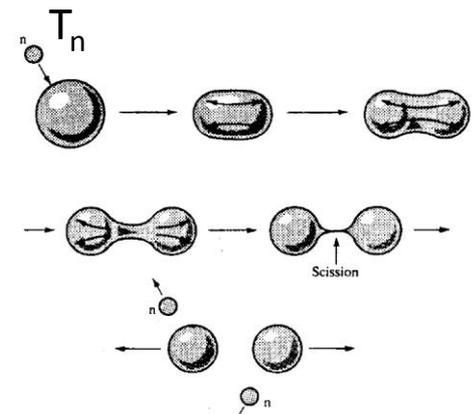
Nucleo (A,Z)	Energia Critica E_{cr} (MeV)	Energia di legame ultimo neutrone di (A,Z) B_n (MeV)
Th ²³²	5.9	*
Th ²³³	6.5	5.1
U ²³³	5.5	*
U ²³⁴	4.6	6.6
U ²³⁵	5.75	*
U ²³⁶	5.3	6.4
U ²³⁸	5.85	*
U ²³⁹	5.5	4.9
Pu ²³⁹	5.5	*
Pu ²⁴⁰	4.0	6.4



In un nucleo di ²³⁵U: $E_{cr} = 5,3$ MeV è fornita dall'energia di legame del neutrone catturato $B_n = 6.4$ MeV (il nucleo che si fissiona è ²³⁶U)
 \Rightarrow La fissione è indotta da neutroni termici (energia cinetica ≈ 0)

In un nucleo di ²³⁸U: $B_n = 4.9$ MeV e $E_{cr} = 5,5$ MeV (si fissiona il ²³⁹U)
 \Rightarrow La fissione può essere indotta solo da neutroni con $T_n \geq 0.6$ MeV

Infatti nei nuclei con configurazione Z-N **pari-pari** l'energia di legame dell'ultimo neutrone è maggiore: $B_n(^{236}\text{U}) > B_n(^{239}\text{U})$



Isotopi Fissili e Fissionabili

Fissili: nuclei che producono fissione a seguito di assorbimento di neutroni con $T_n \approx 0$ (basta l'energia di legame del neutrone assorbito per superare la barriera):



L'unico presente in natura è l' ${}^{235}\text{U}$ (abbondanza isotopica $\delta=0.72\%$)

${}^{233}\text{U}$ prodotto per assorbimento di neutroni in ${}^{232}\text{Th}$, che è detto isotopo fertile

${}^{239}\text{Pu}$ prodotto per assorbimento di neutroni in ${}^{238}\text{U}$, che è detto isotopo fertile

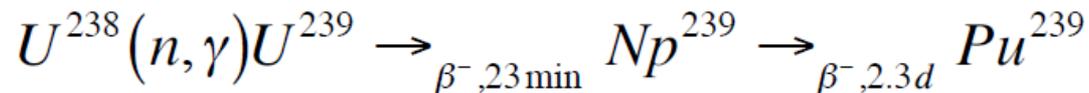
${}^{241}\text{Pu}$ prodotto per assorbimento di neutroni in ${}^{239}\text{Pu}$

Fissionabili: Nuclei, come ${}^{232}\text{Th}$ e ${}^{238}\text{U}$, per i quali sono necessarie $T_n > 0$ ($\sim \text{MeV}$)

Per indurre la fissione in ${}^{238}\text{U}$ ($\delta=99.28\%$) si deve avere $T_n \geq 0.6\text{MeV}$, ma i neutroni prodotti nella fissione del ${}^{238}\text{U}$ non sono abbastanza efficienti* per indurre ulteriori fissioni

\Rightarrow non sono possibili reazioni a catena per questo isotopo

Per neutroni lenti la produzione di ${}^{239}\text{Pu}$ domina sulla fissione del ${}^{238}\text{U}$:



*La sezione d'urto di fissione scende rapidamente con l'energia del neutrone incidente, quindi la soglia di **0.6 MeV** riduce molto l'efficienza del meccanismo di fissione auto-indotta nel ${}^{238}\text{U}$

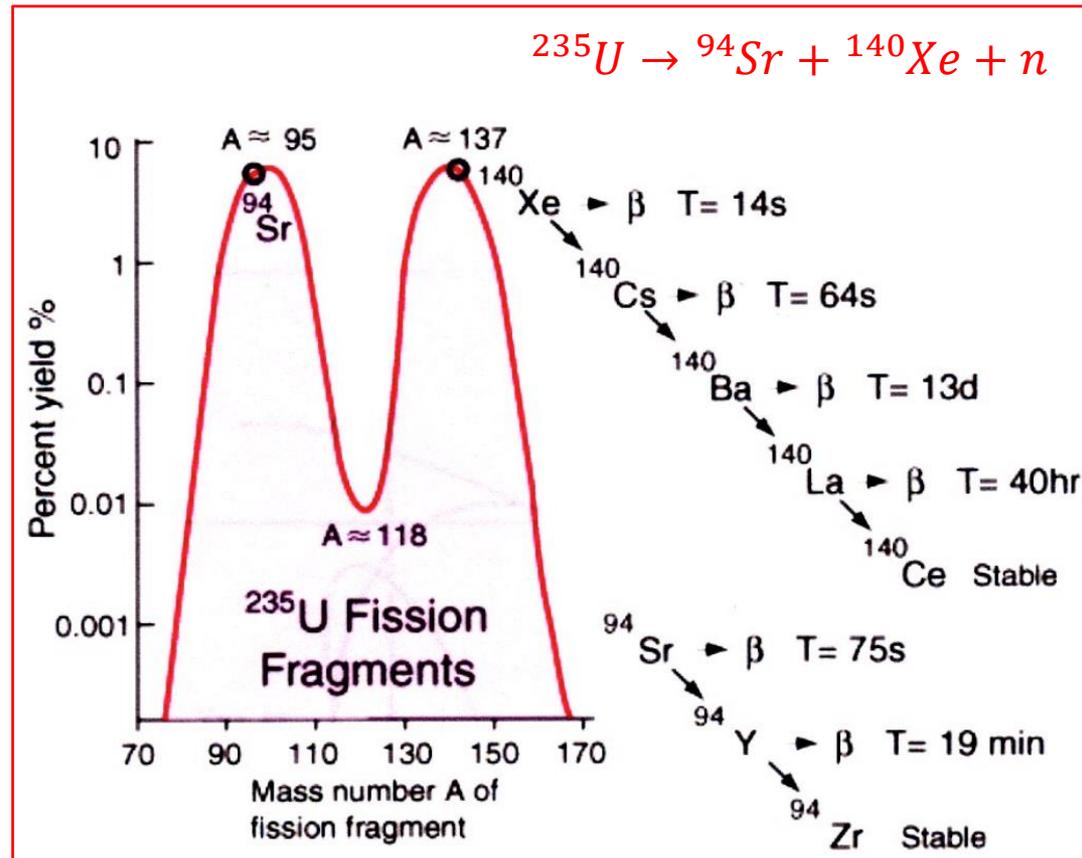
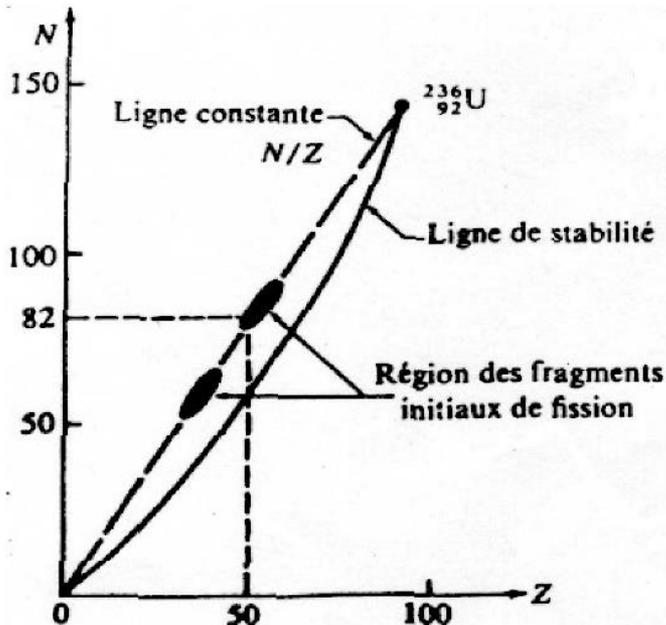
Prodotti della fissione (caso ^{235}U)

Distribuzione continua con due massimi in corrispondenza di $A \approx 95$ e 137 .

La fissione simmetrica è un evento raro

I frammenti di fissione conservano il rapporto neutroni-protoni (N/Z) del nucleo padre

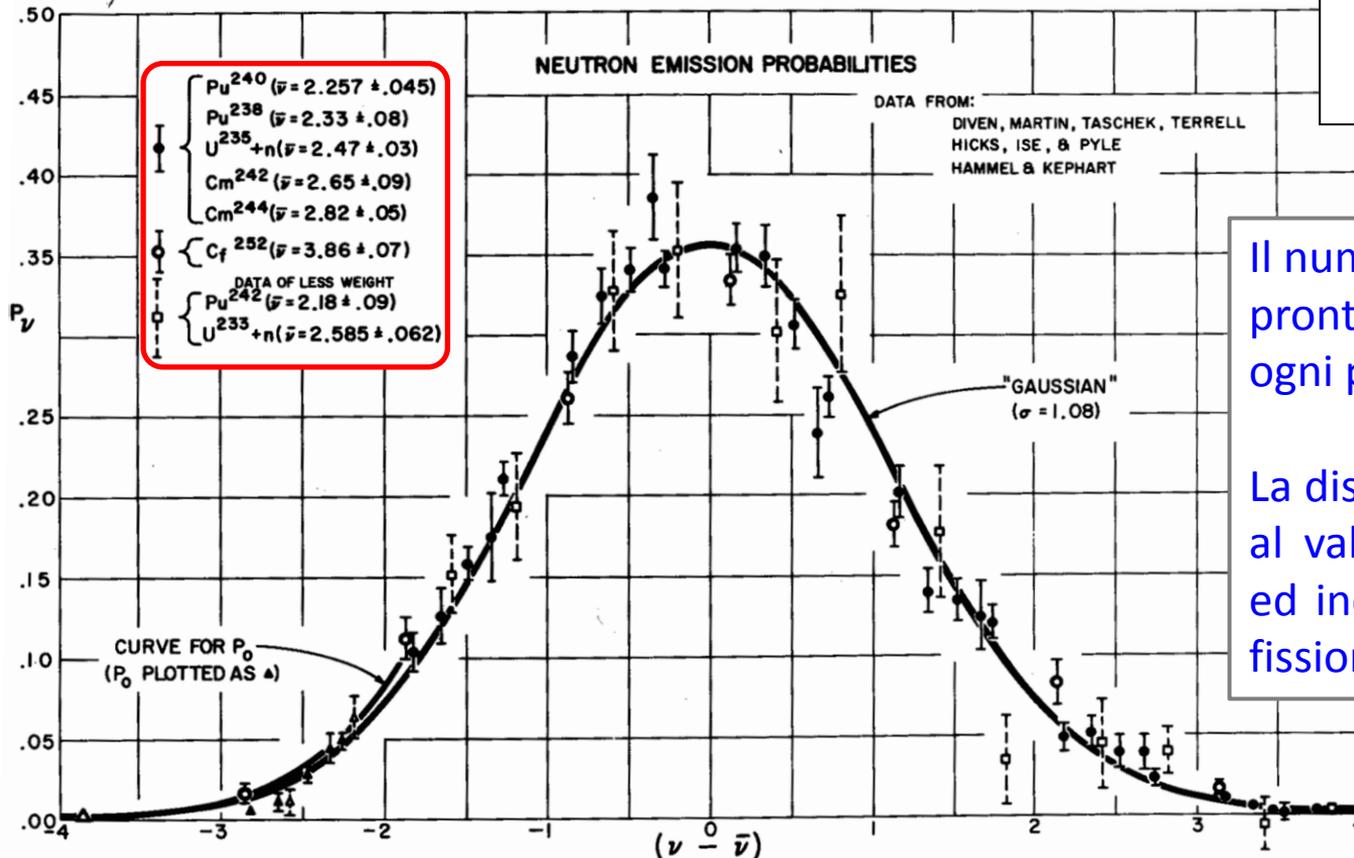
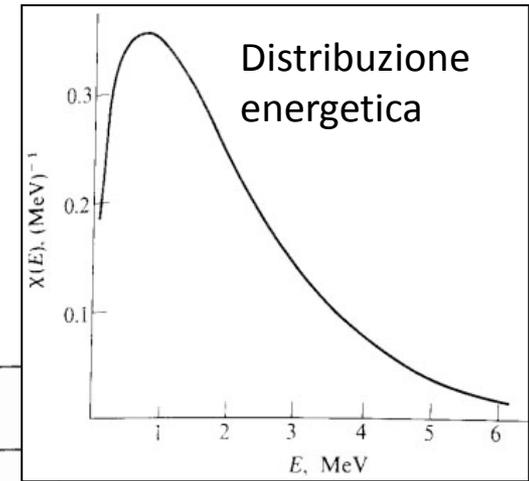
⇒ ecceso di neutroni nei frammenti



- **Emissione istantanea** (10^{-16} s) di n (in media 2.5) e γ
- **Emissione ritardata**: i prodotti di fissione si muovono verso la linea di stabilità tramite decadimenti β^- : $(A, Z) \rightarrow (A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e$ associati anche all'emissione di n e γ ritardati.

Emissione istantanea: neutroni pronti

- **Neutroni pronti:** oltre il 99% dei neutroni di fissione è emesso in 10^{-16} s
- L'emissione dei neutroni pronti avviene nel 99% delle fissioni
- La loro energia è dell'ordine del MeV ➔



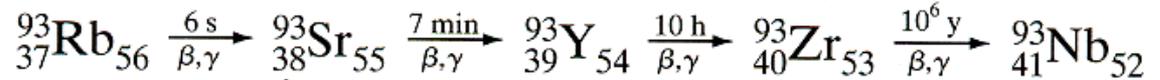
Il numero medio di neutroni pronti $\bar{\nu}$ è caratteristico di ogni processo di fissione

La distribuzione di ν attorno al valor medio è gaussiana ed indipendente dal nucleo fissionato

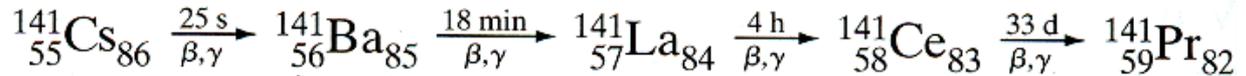
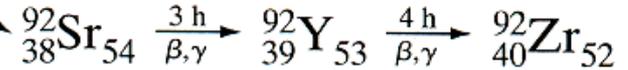
Figure 13.7 Distribution of fission neutrons. Even though the average number of neutrons $\bar{\nu}$ changes with the fissioning nucleus, the distribution about the average is independent of the original nucleus. From J. Terrell, in *Physics and Chemistry of Fission*, Vol. 2 (Vienna: IAEA, 1965), p. 3.

Emissione ritardata

I frammenti di fissione sono inizialmente altamente radioattivi e decadono in catena verso isobari stabili. Esempio:



n(1.4%)



n(0.03%)



Si formano così i prodotti radioattivi che costituiscono le scorie dei reattori nucleari

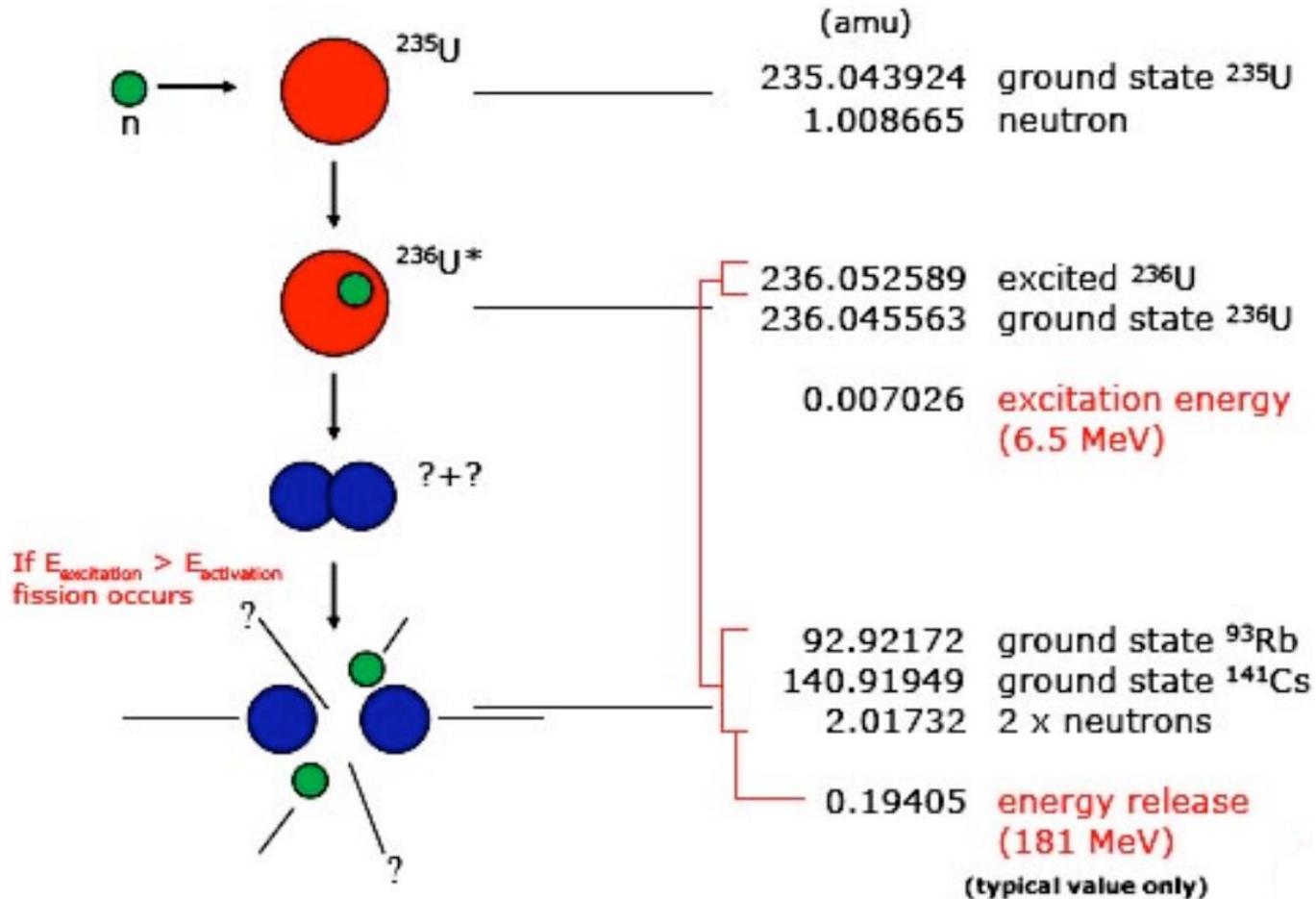
Molti decadono in tempi brevi altri hanno vite medie molto lunghe

Neutroni ritardati: Una piccola frazione ($\leq 1\%$) dei neutroni prodotti nella fissione è emessa in questa fase, con un ritardo dell'ordine di 10 secondi rispetto ai neutroni pronti

Tali neutroni sono emessi in seguito a decadimenti β dei frammenti di fissione

Come vedremo in breve, essi sono fondamentali per il controllo di un reattore nucleare

Energia rilasciata nella fissione: un esempio



$$\begin{aligned}
 Q &= [M({}^{235}\text{U}) + M_n - M({}^{93}\text{Rb}) - M({}^{141}\text{Cs}) - 2M_n]c^2 = B({}^{93}\text{Rb}) + B({}^{141}\text{Cs}) - B({}^{235}\text{U}) \\
 &= 93 \times 8.54 + 141 \times 8.30 - 235 \times 7.59 = 794 + 1170 - 1784 = \mathbf{180 \text{ MeV}}
 \end{aligned}$$

Distribuzione dell'energia di fissione

Circa l'80% della Q viene spesa in energia cinetica dei frammenti di fissione per la repulsione coulombiana, il resto va in emissione di n o radiazione

	(MeV/fissione)		
	U^{235}	Pu^{239}	Pu^{241}
Energia istantanea			
- Energia cinetica dei frammenti di fissione	169	175	177
- Energia raggi gamma	8	8	8
- Energia cinetica neutroni	5	6	6
<i>Totale parziale</i>	182	189	191
Energia ritardata			
- β dai prodotti di fissione	8	8	9
- γ dai prodotti di fissione	7	6	7
- γ da cattura di neutroni	7	10	10
<i>Totale parziale</i>	22	24	26
Totale	204	213	217

L'energia cinetica dei frammenti di fissione si trasforma in calore quando questi nuclei collidono con gli atomi vicini

Energia da fissione nucleare

1 Tonnellata di Petrolio produce per combustione 42.4 GJ

⇒ 1 g di Petrolio produce $4.24 \cdot 10^4$ J

1 fissione di ^{235}U produce circa 200 MeV = $3.2 \cdot 10^{-11}$ J

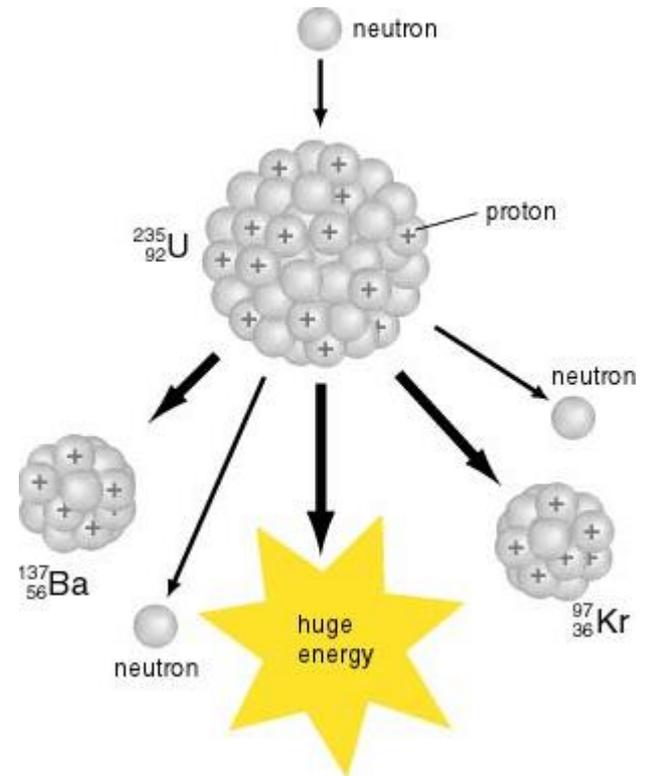
La massa dell' ^{235}U è: $\frac{A}{N_A} = \frac{235 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{6.022 \cdot 10^{23} \frac{1}{\text{mol}}} = 3.90 \cdot 10^{-22}$ g

⇒ 1 g di ^{235}U produce $8.21 \cdot 10^{10}$ J

$$\frac{\text{Energia Nucleare/g}}{\text{Energia chimica/g}} = \frac{8.21 \cdot 10^{10} \text{ J}}{4.24 \cdot 10^4 \text{ J}} = 1.9 \cdot 10^6$$

Nei reattori nucleari di potenza si utilizzano reazioni a catena controllate per produrre energia elettrica sfruttando il calore generato dalle reazioni nucleari

L'energia termica prodotta è prima trasformata in energia meccanica attraverso l'uso di turbine, poi in energia elettrica con degli alternatori



Reazione a catena: Massa Critica

E' la massa di materiale fissile (*il combustibile dei reattori nucleari*) richiesta per ottenere la condizione di criticità ($k = 1$) e la reazione a catena possa autosostenersi in maniera autonoma

La massa critica **dipende sia dalle proprietà del materiale fissile che da altri fattori:**

- ✓ le proprietà nucleari (per esempio la sezione d'urto per la fissione);
- ✓ le proprietà fisiche (in particolare la densità);
- ✓ la purezza isotopica del materiale fissile (materiali impuri contengono assorbitori neutronici, come il ^{238}U nel ^{235}U);
- ✓ la geometria del reattore (la forma del materiale fissile);
- ✓ la presenza un riflettore di neutroni intorno al materiale fissile (meno neutroni persi);
- ✓ la presenza di materiali assorbitori di neutroni;
- ✓ la presenza di moderatori di neutroni (vedi dopo)

Massa critica per elementi isotopicamente puri in chilogrammi kg

Involucro	nessuno	10 cm U	10 cm Be
M_C (U^{235})	47	16	14
M_C (Pu^{239})	10	4,5	4

Il primo reattore nucleare: due miliardi di anni fa

Il primo reattore nucleare si azionò naturalmente in un deposito minerario di uranio circa 2 miliardi di anni fa nel Gabon (Africa)

Questa reazione è stata possibile grazie all'abbondanza dell'isotopo 235 dell'uranio che all'epoca ammontava a circa il 3%, grazie all'aumentare dell'ossigeno nell'atmosfera terrestre, che rese l'uranio solubile in acqua e grazie alla presenza di acqua nella miniera

Infatti un fiume passava in prossimità dei giacimenti di uranio della zona. Il giacimento venne eroso poco alla volta e finì in circolo con l'acqua e i sedimenti, fino a depositarsi nuovamente in un punto, magari un'ansa del fiume, liberato dai detriti che sono più leggeri del metallo. A questo punto si raggiunse la **massa critica**, grazie all'acqua stessa che ebbe la funzione di **moderatore dei neutroni**, e il processo di fissione ebbe inizio.

Il calore generato fece evaporare l'acqua e il processo si fermò, fino a riprendere quando l'acqua fosse tornata a scorrere. Questo accendi-spegni andò avanti almeno una dozzina di volte per circa un milione di anni, fino all'impovertimento dell' 235 U.

Quando nel 1972 furono effettuati dei rilevamenti sul materiale inviato dal Gabon, ci si accorse che la concentrazione degli isotopi era minore del previsto, come se il minerale fosse già stato usato, destando preoccupazione e sconcerto nel *Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives* (CEA), fino a che non vennero scoperti nella miniera **circa 30 elementi che sono sottoprodotti caratteristici di una reazione di fissione nucleare**, fugando ogni dubbio.

Controllo della reazione a catena

k è anche: il numero di neutroni di una fissione che producono un'altra fissione

⇒ in media dei 2.4 neutroni prodotti $(2.4 - k)$ sfuggiranno o subiranno altri processi

Alla generazione n-esima il numero totale di fissioni sarà: $S_n = \sum_{i=0}^n k^i = \frac{1-k^{n+1}}{1-k}$

⇒ se $k > 1$ (sistema supercritico) questo numero diverge rapidamente: $\frac{k^n}{k-1}$

⇒ se $k < 1$ (sistema sottocritico) converge verso un numero finito $\lim_{n \rightarrow \infty} S_n = \frac{1}{1-k}$

Il tempo medio tra due generazioni è quello che impiega un neutrone per passare dal nucleo che ha fissionato al successivo: $\sim 1\text{ns}$ (10^{-9} s)

Se $k=1.1$ nel tempo $t=0.5 \mu\text{s}$ ($n \sim 500$) si svilupperanno $\frac{k^n}{k-1} = 5.0 \cdot 10^{21}$ fissioni (circa 2g di ^{235}U) per un energia totale di circa $1.6 \cdot 10^{11}$ J (~ 40 ton di tritolo!!)

Possibile solo un impiego come esplosivo?

Una piccola frazione (0,65%) dei neutroni prodotti nella fissione sono emessi con un ritardo di una decina di secondi provenendo dal decadimento radioattivo dei prodotti della fissione

⇒ si può ottenere una reazione a catena lenta e controllabile dall'esterno realizzando un sistema che sia sottocritico ($k < 1$) per i neutroni pronti e diventi supercritico ($k > 1$) solo considerando anche i neutroni ritardati

Controllo della reazione a catena

Barre di controllo

Il controllo del sistema è effettuato mediante l'inserimento tra gli elementi di combustibile di barre (in genere leghe di argento, cadmio e indio o carburi di boro) che hanno una elevata sezione d'urto di cattura neutronica:

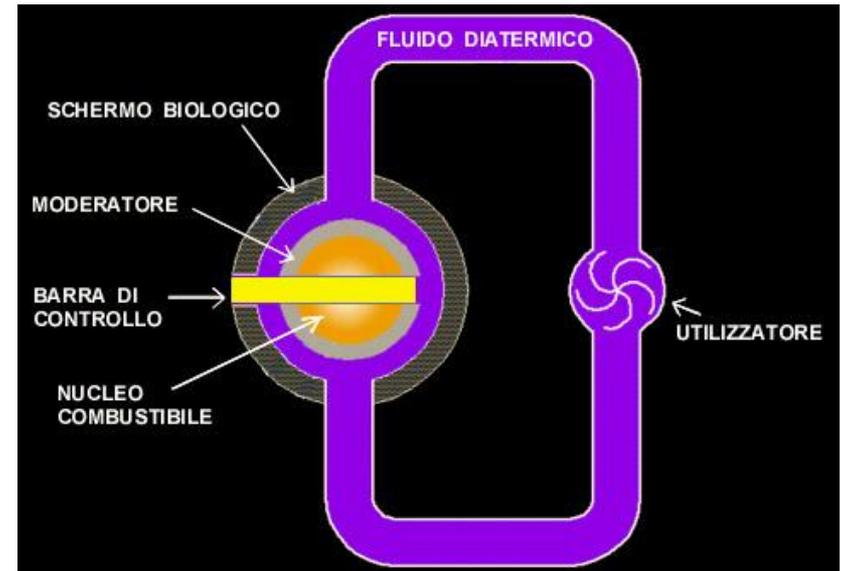
- Se le barre sono completamente inserite il sistema è sottocritico
- Estrahendo le barre si aumenta il numero di neutroni e il sistema raggiunge la criticità

Aggiustando la posizione delle barre si può mantenere costante il numero di reazioni di fissione al secondo e il livello di potenza

Ma le barre si muovono meccanicamente, con tempi di risposta limitati

⇒ Un **reattore** è progettato in modo tale da risultare **sottocritico per i neutroni veloci e critico per neutroni veloci più ritardati**

In questo regime, **le reazioni crescono ancora in modo esponenziale, ma su tempi scala caratteristici dei neutroni ritardati** ⇒ quindi in modo abbastanza lento e controllabile



I neutroni ritardati sono essenziali per il controllo del reattore

Moderatore dei neutroni

I neutroni con energie \sim MeV hanno poche possibilità di indurre altre fissioni perché la sezione d'urto decresce rapidamente al crescere dell'energia del neutrone

E' necessario rallentare i neutroni

Si circonda il materiale fissionabile con un moderatore e i neutroni perdono energia nelle collisioni con i nuclei (D_2O)

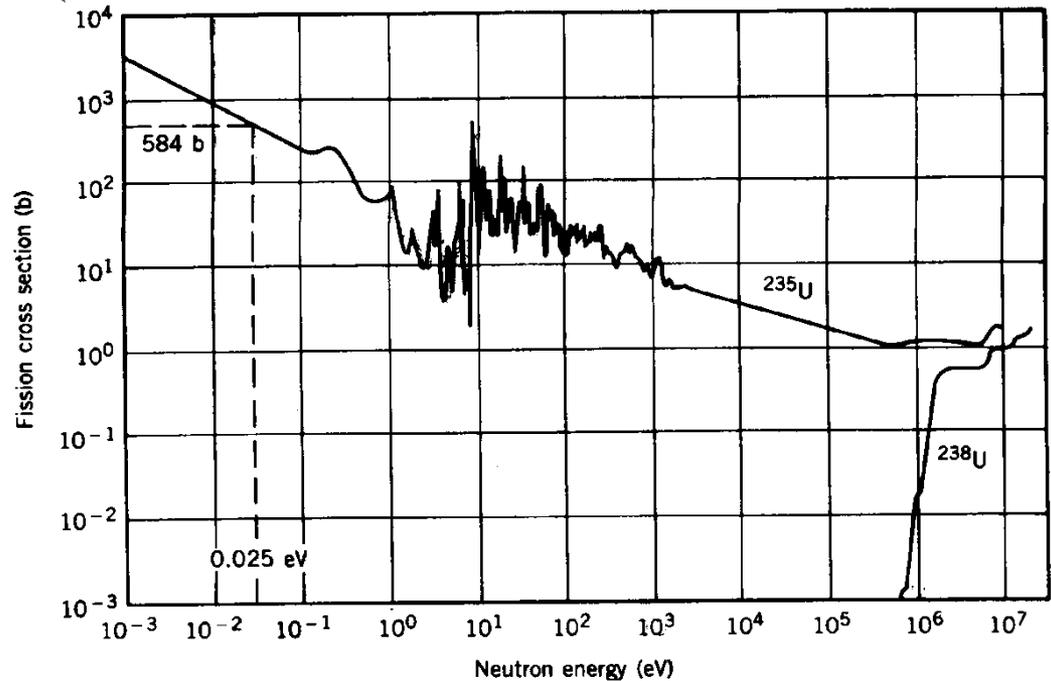
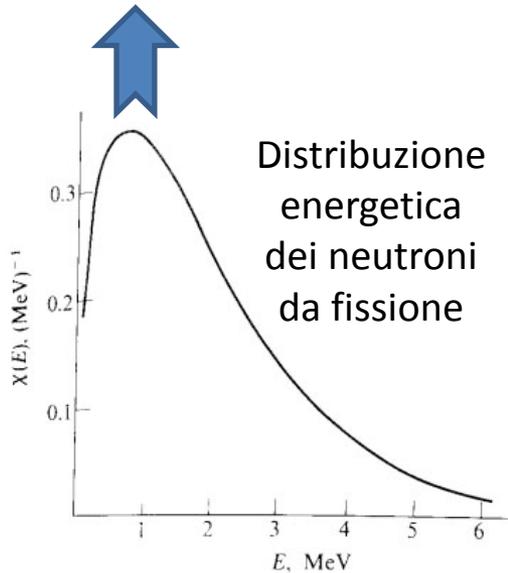
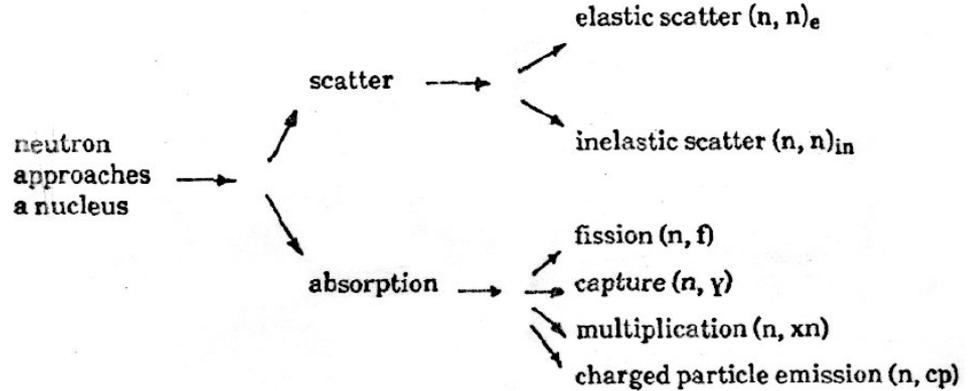


Figure 13.9 Cross sections for neutron-induced fission of ^{235}U and ^{238}U .

Reattore a fissione: schema di principio

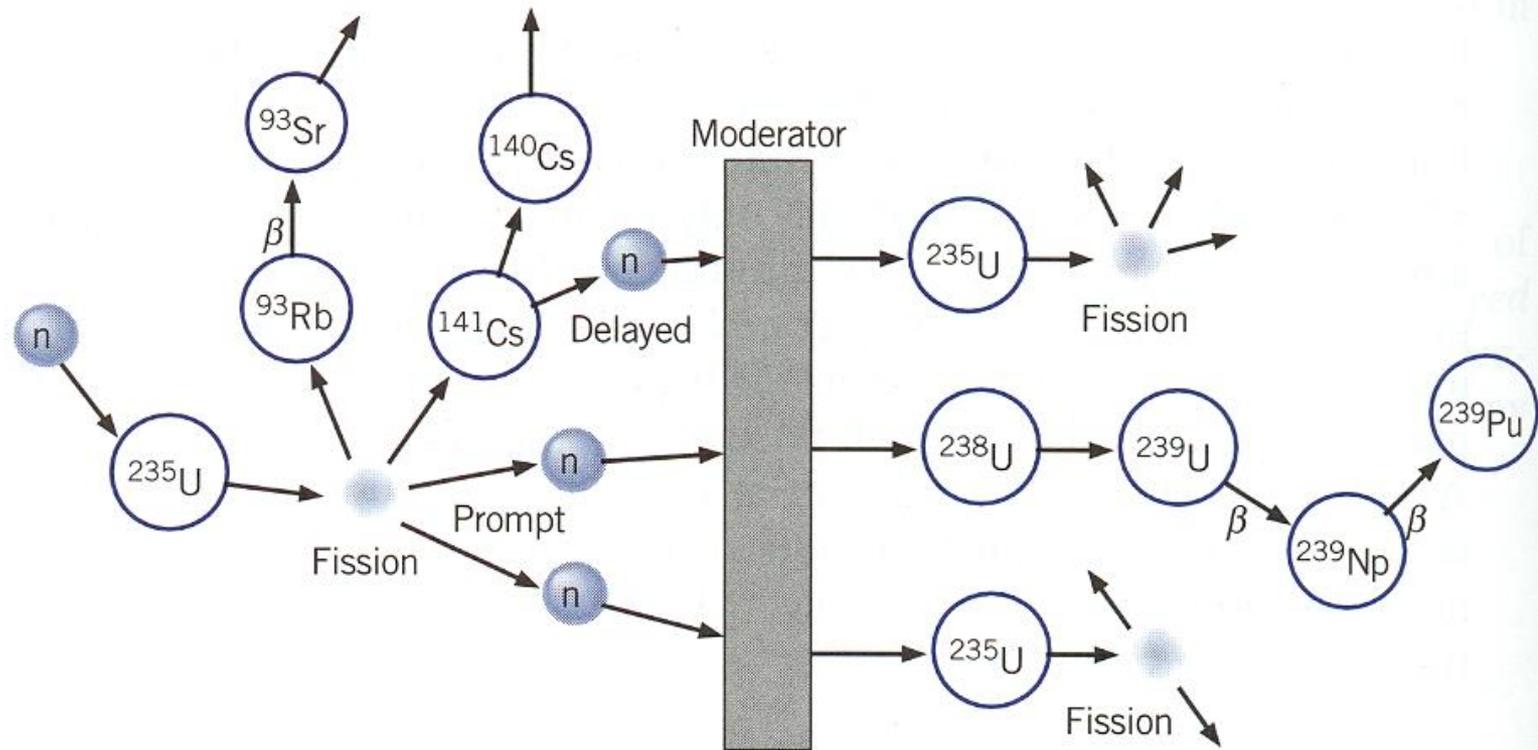
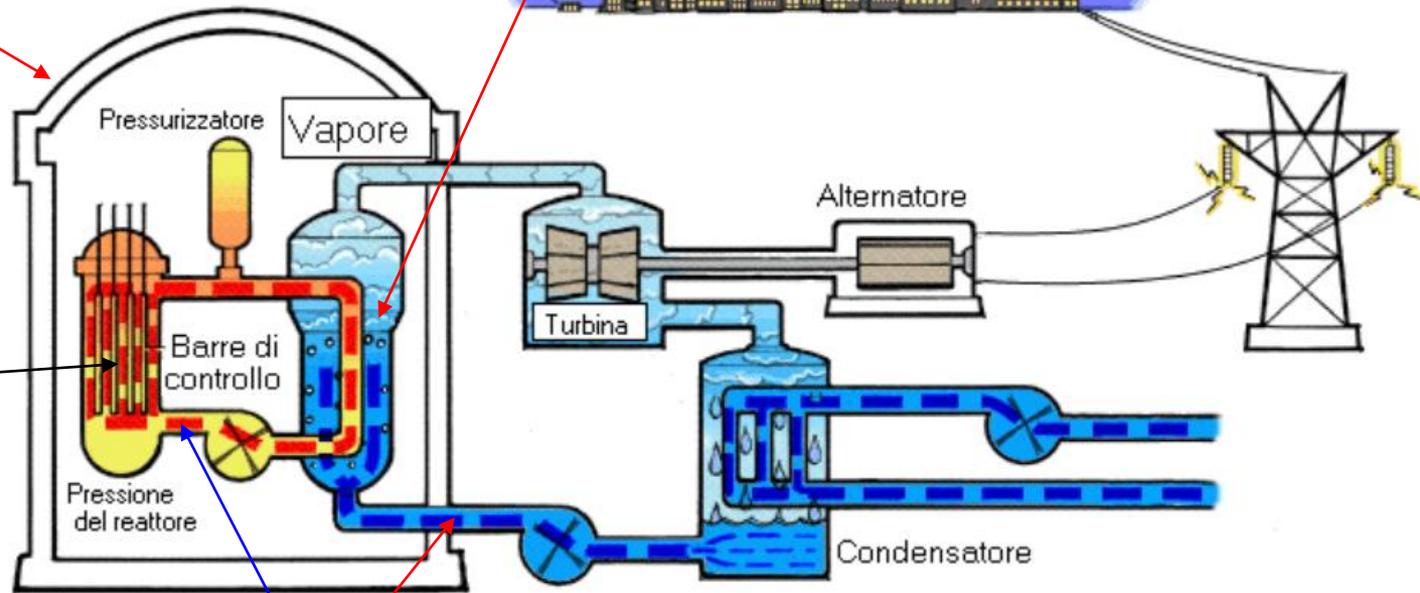


FIGURE 13.10 A typical sequence of processes in fission. A ^{235}U nucleus absorbs a neutron and fissions; two prompt neutrons and one delayed neutron are emitted. Following moderation, two neutrons cause new fissions and the third is captured by ^{238}U resulting finally in ^{239}Pu .

Principali componenti di un reattore nucleare

Massiccio edificio in calcestruzzo armato (oltre 1 m di spessore e rivestimento interno in acciaio) progettato per resistere a ogni tipo di incidente anche ad un eventuale impatto aereo

Combustibile: materiale fissile, tipicamente una miscela di ^{235}U e ^{238}U arricchita al 3-6% in ^{235}U (20-25% in reattori veloci e 90% nelle bombe)



Scambiatore di calore

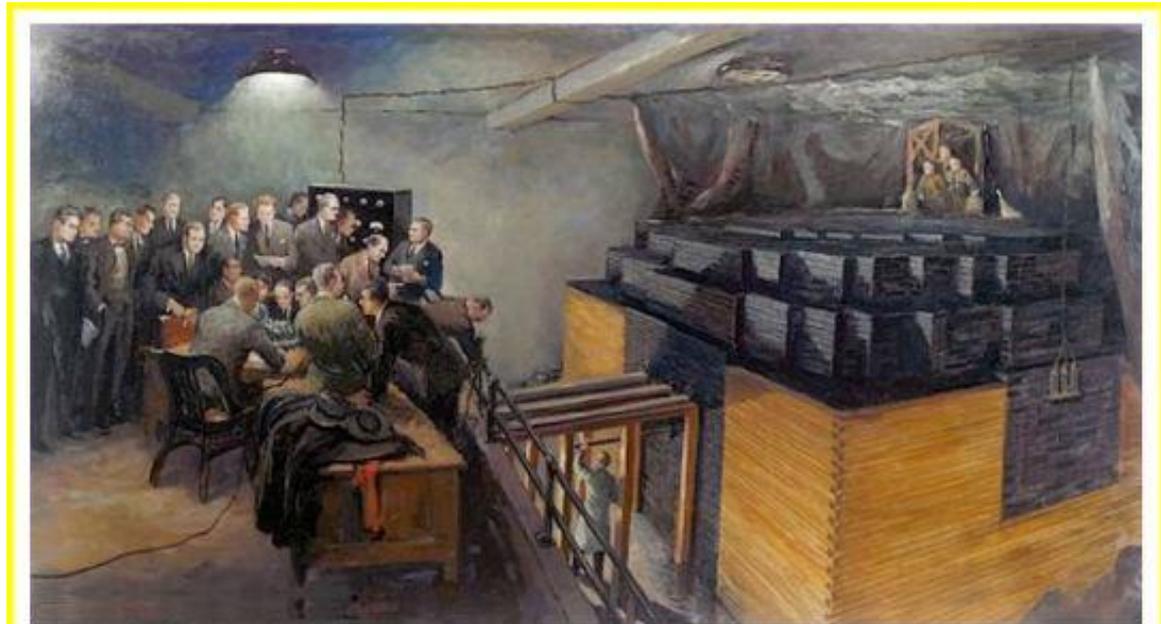
Circuiti di raffreddamento
primario e secondario

Moderatore: spesso il fluido refrigerante svolge anche il ruolo di moderatore (acqua o acqua pesante). Un altro materiale molto utilizzato è la grafite

Il primo reattore artificiale a fissione nucleare al mondo Chicago Pile 1 (CP1)

Assemblato sotto la supervisione di [Enrico Fermi](#), in collaborazione con [Leó Szilárd](#), scopritore della reazione a catena

- Forma sferoidale (riduce fuga neutroni) con un diametro di circa 7 metri
- Si utilizzò uranio naturale raggiungendo la condizione di criticità grazie all'uso del moderatore (grafite)
- I blocchi di uranio e grafite vennero impilati a strati: da qui il nome di pila
- Le barre di controllo erano in legno rivestito di cadmio



La prima reazione a catena controllata di fissione nucleare, ottenuta da Enrico Fermi il 2 dicembre 1942 in un laboratorio ricavato nella palestra dell'Università di Chicago.

La Pila di Fermi funzionò con un $K = 1.0006$ per 28 minuti e dimostrò che l'energia nucleare poteva essere controllata

Scorie nucleari

Il consumo progressivo del combustibile nucleare nel nocciolo comporta la formazione di materiale di scarto detto anche residuo o prodotto di fissione non più utile alla fissione stessa, ma radioattivo e che quindi deve essere periodicamente rimosso e smaltito

Quantità dosimetriche

Attività (A), disintegrazioni per unità di tempo

1 Bq (becquerel) = 1 dis./s (SI)

1 Ci (curie) = 3.7×10^{10} Bq (attività di 1 g di ^{226}Ra)

Dose assorbita (D), energia depositata per unità di massa

1 Gy (gray) = 1 J/kg (SI)

1 rad = 0.01 Gy

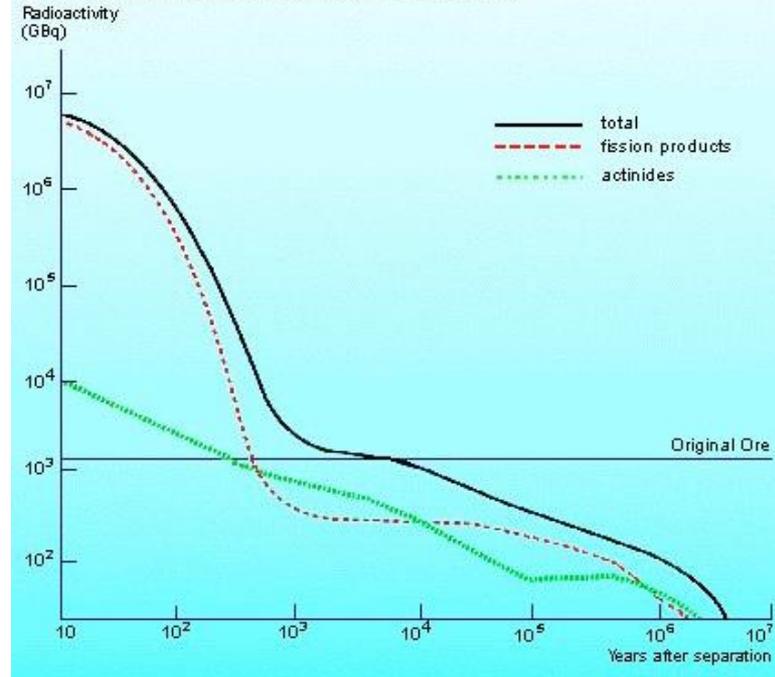
Dose equivalente (H=Q·D), correlata alla dose assorbita D, tiene conto degli effetti biologici; il fattore di qualità Q dipende dal tipo di radiazione e dalla sua energia

1 Sv (sievert) = 1 J/kg (SI)

1 rem = 0.01 Sv

Dose Efficace media della popolazione dovuta a fondo naturale: 2,4 mSv/anno

Decay in radioactivity of high-level waste from reprocessing one tonne of spent PWR fuel



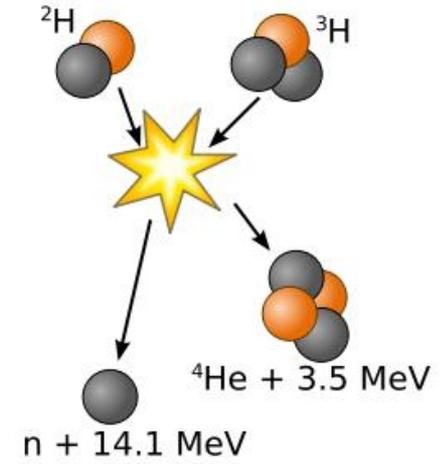
Type and energy of radiation R	Q
Photons, all energies	1
Electrons and muons, all energies	1
Neutrons:	
<10 keV	5
10 to 100 keV	10
> 0.1 to 2 MeV	20
> 2 to 20 MeV	10
> 20 MeV	5
Protons, other than recoil protons, E > 2 MeV (protons and charged pions)	5 (2)
Alpha particles, fission fragments, heavy nuclei	20

Fusione nucleare

Si può liberare energia nucleare mediante la fusione di due nuclei leggeri, ad esempio:



(1 grammo di d+t produce $3.4 \times 10^{11} \text{ J}$)



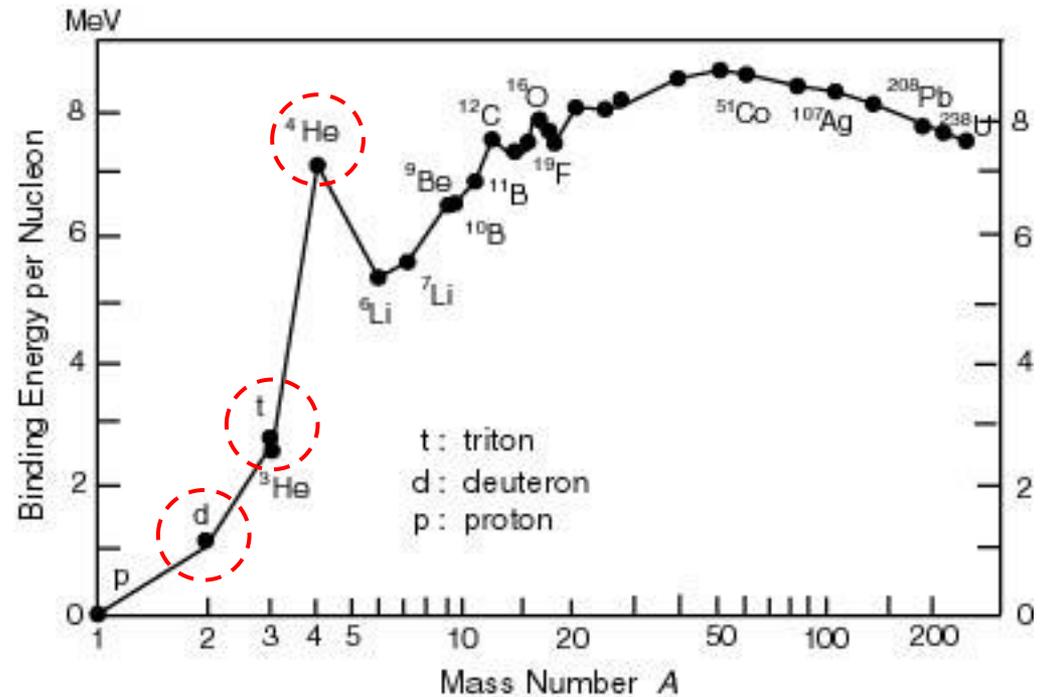
$$E = B({}^4\text{He}) - B({}^3\text{H}) - B({}^2\text{H})$$

$$B({}^4\text{He}) = 4 \times 7.1 = 28.3 \text{ MeV}$$

$$- B({}^3\text{H}) = 3 \times 2.8 = 8.5 \text{ MeV}$$

$$- B({}^2\text{H}) = 2 \times 1.1 = 2.2 \text{ MeV}$$

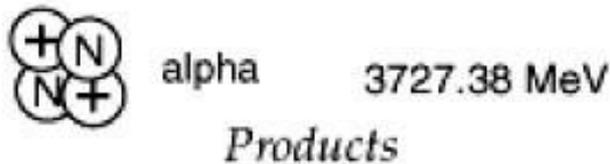
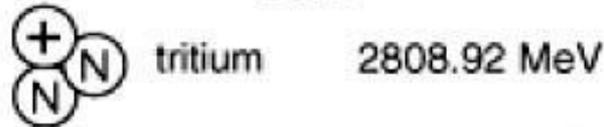
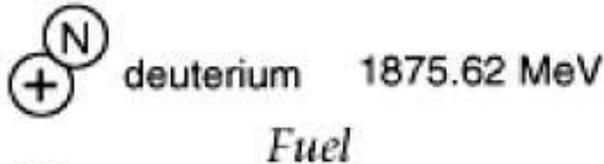
$$\rightarrow 17.6 \text{ MeV}$$



Il processo di fusione è il meccanismo che alimenta il Sole e le altre stelle

Fusione vs Fissione

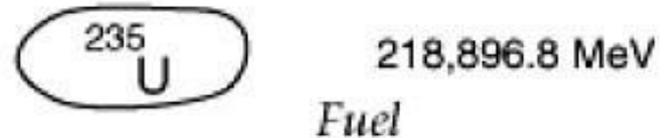
FUSIONE



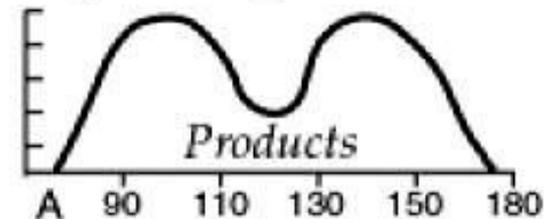
D-T fusion yield: 17.6 MeV

Fractional yield: $\frac{17.6 \text{ MeV}}{4684.54 \text{ MeV}} = .00375$

FISSIONE



Average fission yield 215 MeV



$\frac{215 \text{ MeV}}{219,836.37 \text{ MeV}} = .00098$

$$\frac{\text{Fusione}}{\text{Fissione}} = \frac{0.00375}{0.00098} = 3.8$$

Fusione Nucleare: Barriera Coulombiana

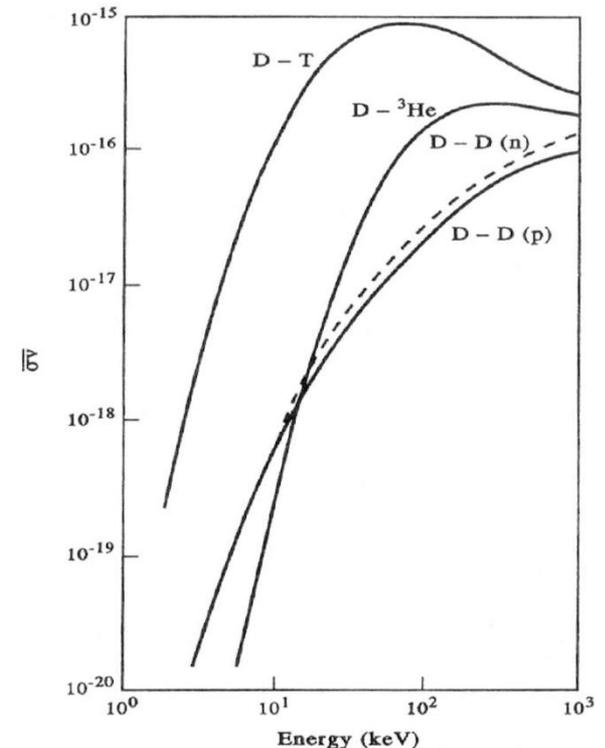
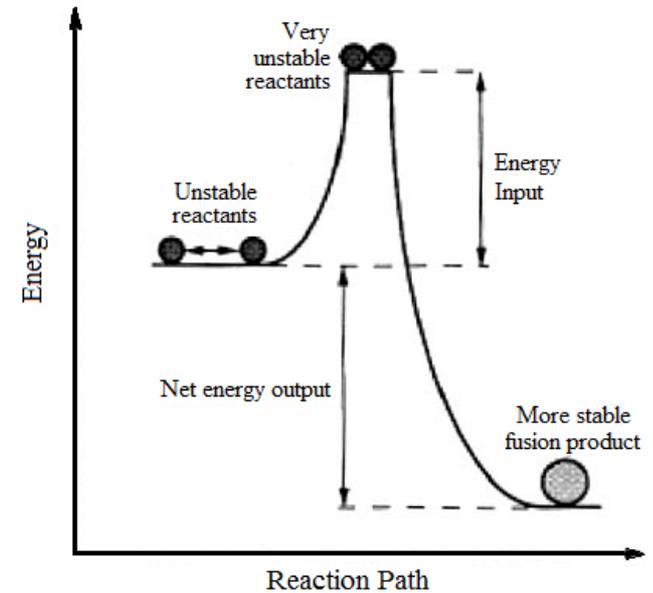
Per ottenere la fusione dei nuclei di deuterio ^2H e tritio ^3H occorre superare la **repulsione coulombiana** tra le due cariche positive

$$E_B = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 d} = \frac{Z_d Z_t e^2}{4\pi\epsilon_0 d} \cong \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_0 \left(A_d^{\frac{1}{3}} + A_t^{\frac{1}{3}} \right)}$$

$$E_B \cong 400 \text{ keV}$$

I due nuclei si devono urtare con una energia cinetica molto elevata

Questo comporta portare il sistema ad una temperatura molto elevata: **milioni di gradi**
($1\text{eV} = 1,16 \times 10^4 \text{ K}$)



Fusione nucleare

In una bomba termonucleare (a fusione) la temperatura molto elevata viene realizzata mediante l'esplosione di una bomba nucleare a fissione

Nel centro del **Sole**, composto prevalentemente da idrogeno, vengono raggiunte temperature altissime (~16 milioni di gradi) grazie alla compressione gravitazionale prodotta dalla sua massa: $M_S \sim 2 \times 10^{30} \text{ kg}$

Oggi si può realizzare la fusione controllata in laboratorio con varie tecniche quali il confinamento inerziale o quello elettromagnetico

La reazione più studiata è la reazione d-t, che è quella a energia di attivazione più bassa: ciò permette di utilizzare dei reagenti a temperature nettamente più basse che nelle altre reazioni

Tuttavia non si è ancora realizzato un reattore a fusione, cioè una macchina che produca più energia di quanta ne consumi

Caratteristiche di una reazione utilizzabile in un reattore:

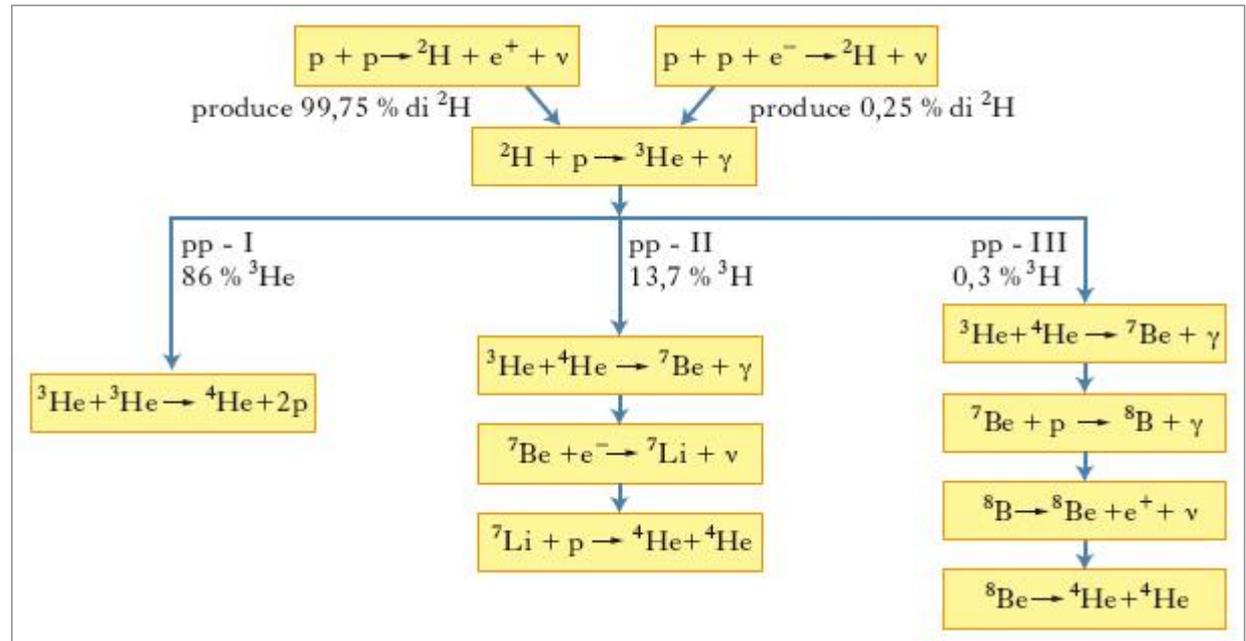
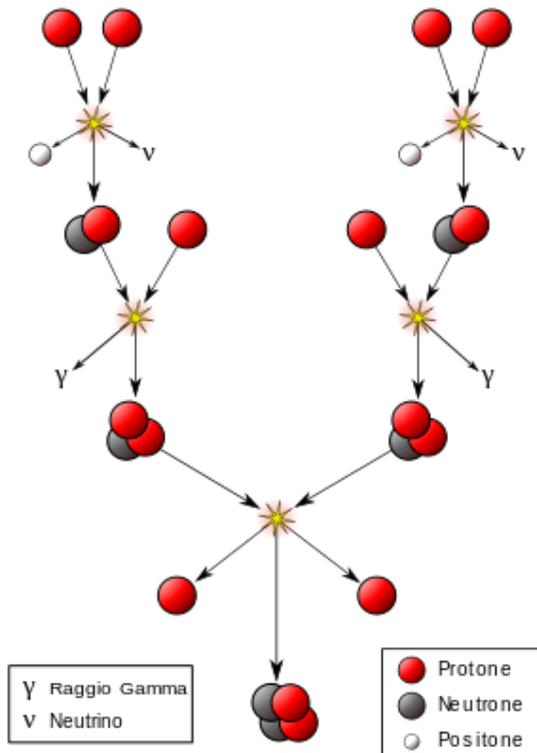
1. Temperatura di fusione bassa;
2. Elevata resa energetica;
3. Elevata sezione d'urto;
4. Disponibilità di combustibile;
5. Produzione di particelle cariche (al fine di dissipare l'energia nel plasma stesso);
6. Assenza di produzione di neutroni per evitare processi di attivazione)

Energia solare

L'energia solare è prodotta dalla fusione nucleare dell'idrogeno in elio, attraverso il ciclo di reazioni detto **ciclo p-p** (*protone-protone*)

Si articola in tre catene di reazioni, dette *pp-I*, *pp-II* e *pp-III*

Per tutte, il risultato finale è la fusione di **4 p** in un nucleo di elio, **^4He** , con la liberazione di un'energia di **26,7 MeV** trasportata dalle particelle (ν_e , e^+) e i γ prodotti nelle reazioni



Circa 3.6×10^{38} p sono convertiti in elio ogni secondo producendo 3.8×10^{26} W equivalenti a 9.1×10^{10} Mt (megatoni) al secondo (bomba Hiroshima: 15 kt; bomba H più potente sperimentata: 50 Mt)