

# Fisica applicata

Laurea in Scienza dei Materiali

Fissione Nucleare

Fusione Nucleare

Nucleosintesi ed evoluzione stellare

<http://www.ge.infn.it/~prati>

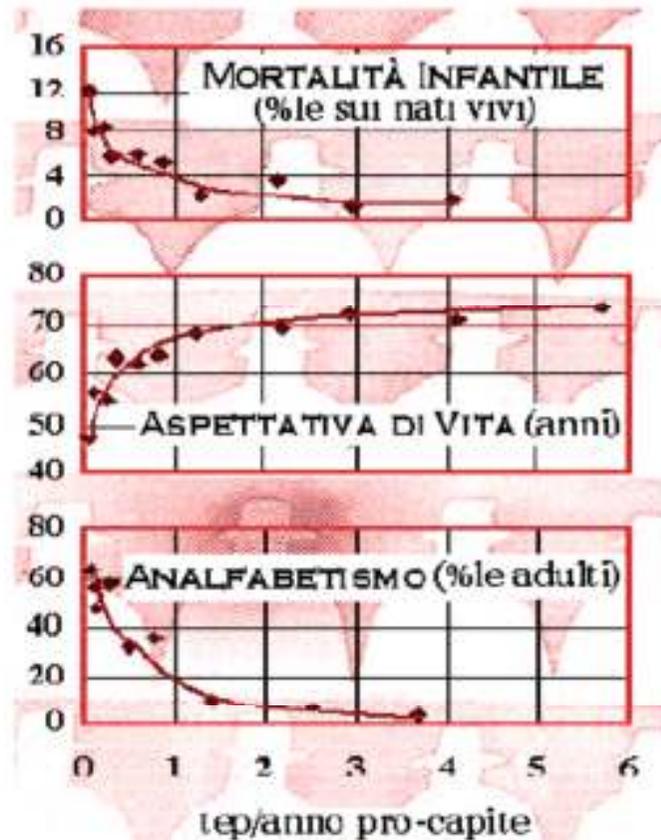
## 23 settembre 2010...una notizia dal UK



Per confronto:  
una centrale a  
combustibile  
fossile o una  
nucleare  
produce (odG)  
1000 -2000  
MW

E' stato inaugurato al largo delle coste britanniche del Kent il più grande parco eolico offshore del mondo. Per il momento a funzionare saranno un totale di 100 turbine alte 115 metri posizionate in un tratto di mare largo circa 35 chilometri quadrati (l'equivalente di 4 mila campi da calcio). L'energia prodotta dal vento (la potenza dell'impianto è di 300 MW), sarà sufficiente a soddisfare i consumi elettrici di oltre 200 mila famiglie. Per realizzare la centrale l'azienda svedese Vattenfall ha impiegato meno di 24 mesi investendo circa 910mln di euro e nei prossimi quattro anni conta di arrivare a un totale di 341 turbine installate.

## Un problema estremamente rilevante



Parametri come  
la **mortalità infantile**,  
l'**aspettativa di vita**,  
l'**analfabetismo**

migliorano significativamente  
se il consumo energetico pro  
capite raggiunge circa  
1 tep/anno.

In Africa è 0.4 tep/anno,  
negli USA 8 tep/anno.

1 tonnellata equivalente di petrolio (tep)  
~ 42 GJ ~ 10 Gcal ~ 12 MWh

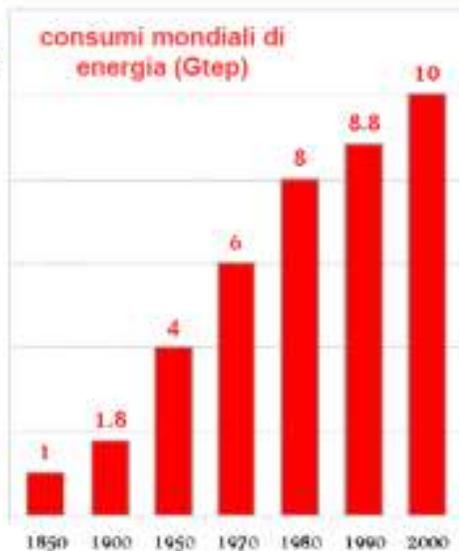
# I numeri (ed i problemi) del fabbisogno energetico

Il presente consumo mondiale di energia è circa

11 10<sup>9</sup> tep/anno,

corrispondente ad una potenza media pro capite di

2 500 W<sub>termici</sub>



Il rapporto del Club di Roma (1972)  
*I limiti dello sviluppo*  
evidenziò per la prima volta che  
il  
**limite delle risorse della terra**

13

## FABBISOGNO ENERGETICO GLOBALE

83% COMBUSTIBILI FOSSILI  
(petrolio, carbone e gas naturale)

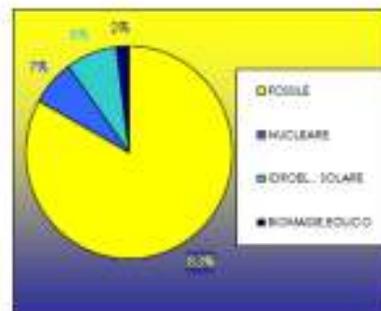
7% ENERGIA NUCLEARE

10% ENERGIA RINNOVABILE,

di cui

8% idroelettrico

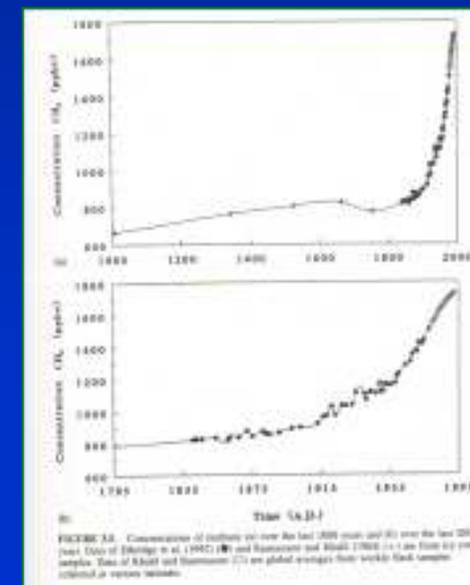
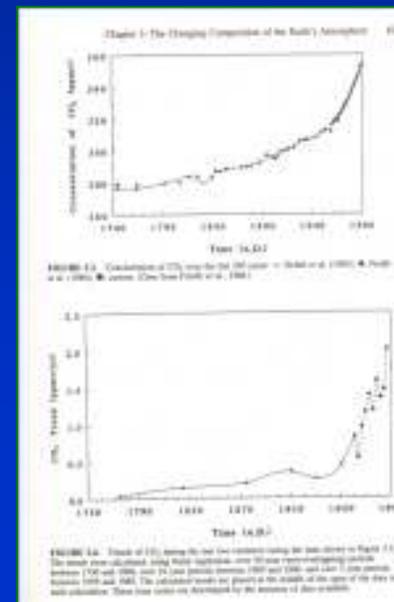
2% biomasse, geotermico,  
eolico e solare



**90% del fabbisogno energetico globale è coperto da**

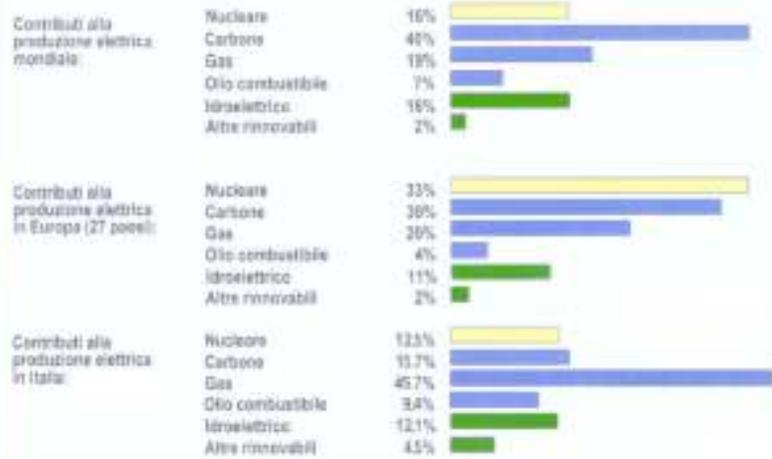
**fonti primarie esauribili**

8



# La situazione italiana

## LA DISTRIBUZIONE DELLE FONTI DI ENERGIA IN ITALIA E NEL MONDO



Il consumo energetico in Italia è di circa 200 milioni di TEP/anno.  
**3.6 Tep/anno pro-capite = 4800 W<sub>termici</sub> pro-capite**

	Quantità di energia lorda utilizzata, per unità di tempo, da ognuno di noi
	W <sub>termici</sub>
Riscaldamento e condizionamento	2 000
Trasporti	1 000
Potenza termica per produrre l'energia elettrica domestica	300
Prodotti	1 000
<b>Totale</b>	<b>4 300</b>

Nell'ipotesi di risparmio energetico (tasso di crescita nei consumi costante e pari all'1%): i consumi arriverebbero nel 2020 a 413 TWh (+15%) e la potenza a 108000 MW. In questa ipotesi la Commissione Energia della SIF ha proposto (2008) il seguente piano per la copertura:

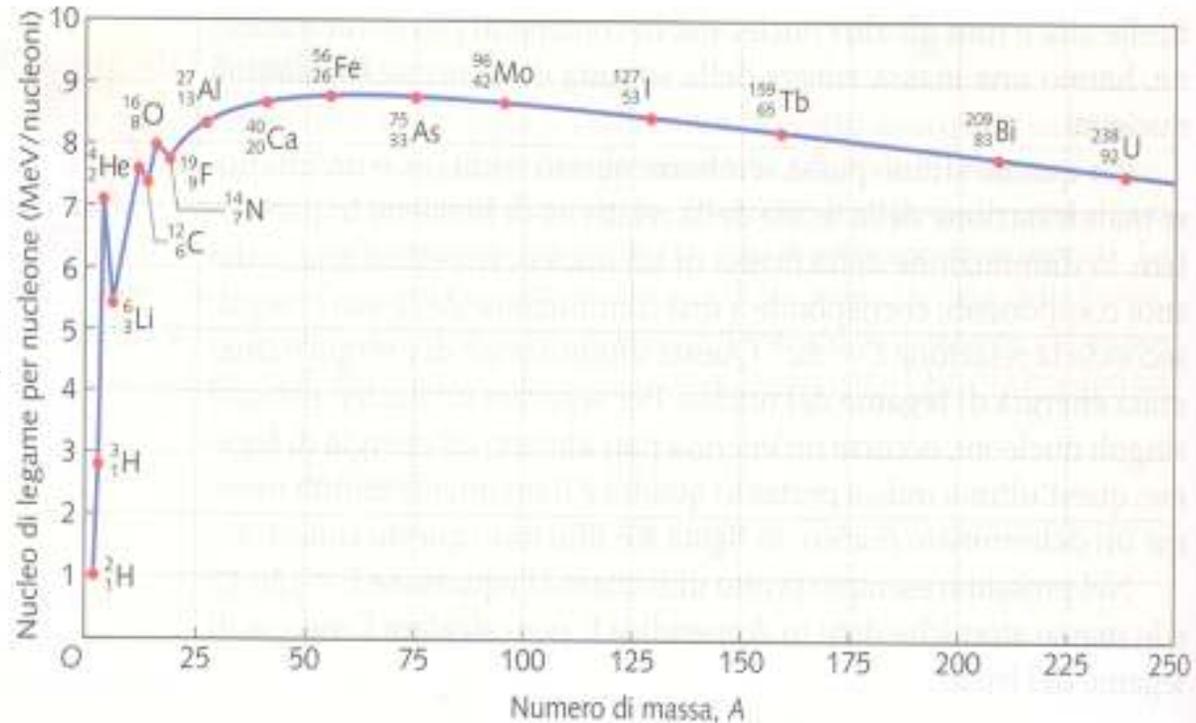
	2006		2020	
	TWh	%	TWh	%
<i>Idroelettrico da apporti naturali</i>	37,0	10,3%	43	10,4%
<i>Geotermico</i>	5,5	1,5%	7	1,7%
<i>Eolico</i>	3,0	0,8%	20	4,8%
<i>Solare</i>		0,0%	10	2,4%
<i>Biomasse e rifiuti</i>	6,7	1,9%	16	3,9%
<b>Produzione rinnovabile</b>	<b>52,2</b>	<b>14,5%</b>	<b>96</b>	<b>23,2 %</b>
<b>Idroelettrico da pompaggi</b>	<b>6,4</b>	<b>1,8%</b>	<b>7</b>	<b>1,7%</b>
<b>Nucleare di importazione</b>	<b>45,0</b>	<b>12,5%</b>	<b>60</b>	<b>14,5%</b>
<i>Combustibili Solidi (carbone)</i>	44,2	12,3%	72	17,4%
<i>Gas naturale</i>	158,1	44,0%	157	38,0%
<i>Gas derivati</i>	6,2	1,7%	6	1,5%
<i>Prodotti petroliferi</i>	33,8	9,4%		0,0%
<i>Altri combustibili</i>	12,1	3,4%	13	3,1%
<i>Altre fonti</i>	1,0	0,3%	2	0,5%
<b>Produzione termica</b>	<b>255,4</b>	<b>71,1%</b>	<b>250</b>	<b>60,5%</b>
<b>TOTALE PRODUZIONE LORDA</b>	<b>352,0</b>		<b>413</b>	



Nota: è un'ipotesi di un gruppo di fisici..del tutto opinabile da molti punti di vista ma fissa gli OdG

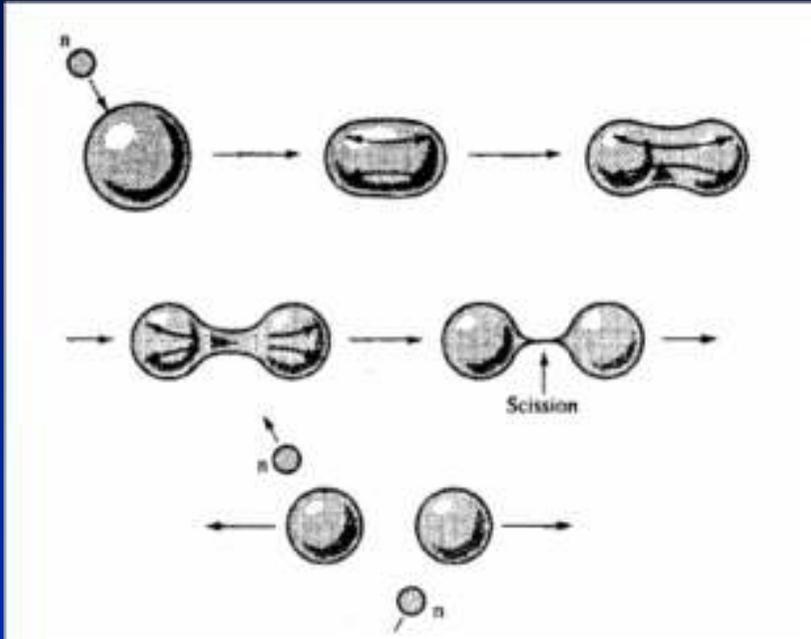
# La possibilità di estrarre energia dai nuclei atomici

L'energia di legame aumenta rapidamente dai nuclei più leggeri fino ad un max. di  $\sim 8$  MeV/nucleone intorno al Fe e poi diminuisce lentamente fino all'U



Reazioni nucleari che comportino una riaggregazione dei nucleoni coinvolti in configurazioni maggiormente legate, sono in linea di principio in grado di liberare energia verso l'esterno. La cosa sembra possibile muovendosi da sinistra verso destra per  $A < 56$  e da destra verso sinistra per  $A > 56$ . Il punto è se l'eventuale energia spesa per indurre la reazione è sufficientemente più bassa di quella liberata.

# La fissione nucleare



$$E_c \propto Z^2$$
$$E_{ts} \propto R^2 = A^{2/3} \sim Z^{2/3}$$

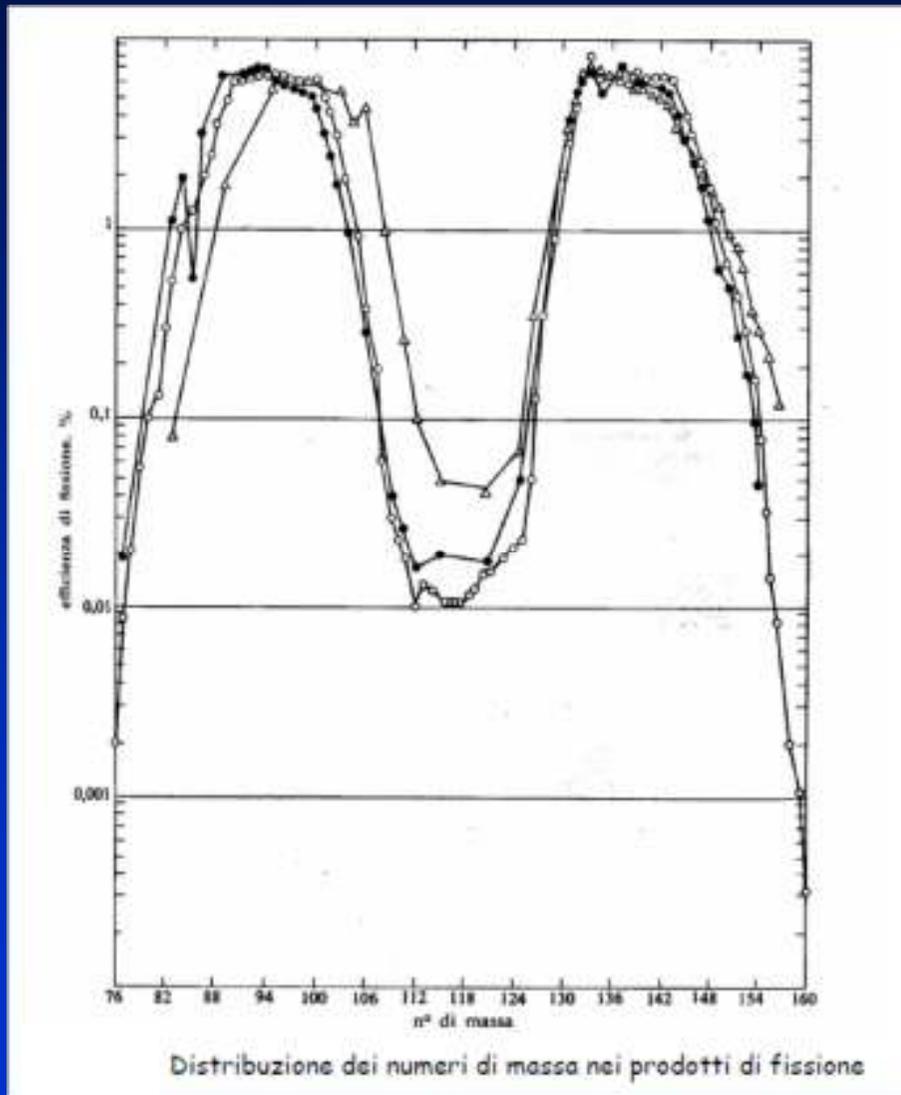
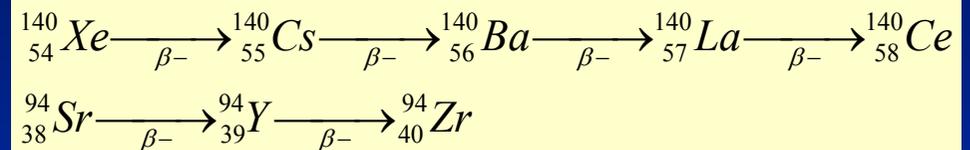
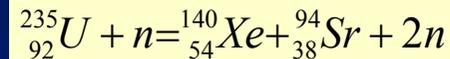
$$E_c/E_{ts} \sim Z^{1/3}$$

**1932:** dopo la scoperta del neutrone **Fermi** e i suoi collaboratori iniziarono uno studio sistematico delle reazioni indotte dal bombardamento di nuclei pesanti con neutroni. Il nucleo, catturando un neutrone diventa instabile e si porta successivamente verso una conformazione più stabile trasformando il neutrone in eccesso in protone ed emettendo una particella  $\beta^-$ . Si ottiene così un elemento con  $Z=Z+1$ . L'Uranio ( $Z=92$ ), era l'ultimo elemento del sistema periodico conosciuto. Con la cattura neutronica e successivo decadimento beta ci si aspettava di ottenere un elemento di numero atomico  $Z=93$ . Fermi ed i suoi collaboratori ottennero elementi finali radioattivi con tempi di decadimento non noti tra gli elementi pesanti e pensarono di aver creato elementi transuranici.

**1938:** **Curie** e **Sovitch** prima e **Hahn** e **Strassmann** poi, ipotizzano che non venisse creato un elemento transuranico, bensì avvenisse un processo di "fissione", cioè una scissione del nucleo bersaglio in due frammenti. La spiegazione della fissione fu dapprima suggerita da **Meitner** e **Frisch** e sviluppata da **Bohr** e **Wheeler** sull'analogia del processo di suddivisione di una goccia di liquido in due gocce più piccole. Come il modello a goccia riproduce l'andamento dell'energia di legame dei nuclei ma deve essere corretto per tener conto della carica dei protoni e della simmetria tra protoni e neutroni manifestata dalle forze nucleari; per studiare la fissione, oltre a rifarsi all'analogia con una goccia, occorre tener conto della carica elettrica dei protoni (e la loro repulsione) e del fatto che stabilità maggiore si ha per simmetria tra protoni e neutroni (in assenza di repulsione coulombiana).

# Frammenti di fissione

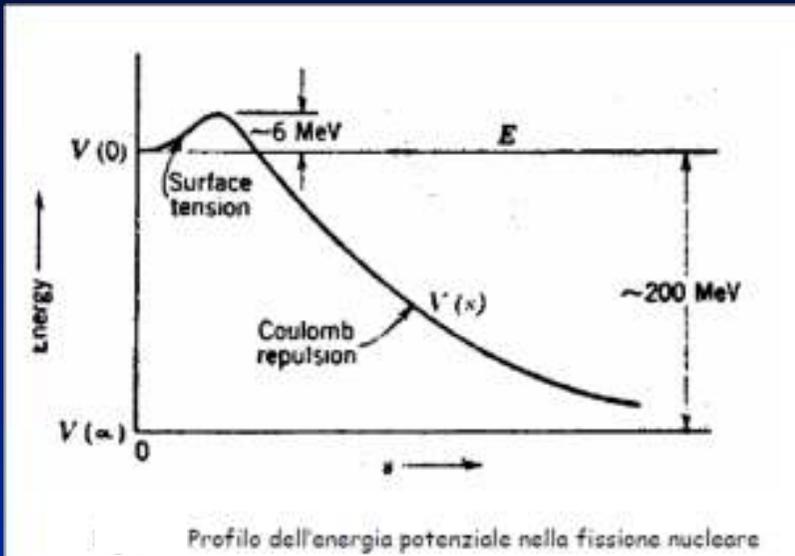
Questa è la reazione studiata da Fermi: i frammenti tendono ad avere un eccesso di  $n$  e quindi sono radioattivi  $\beta^-$ .



La probabilità che nella fissione si formino due nuclei di numero di massa  
 $A_1 = A_2 = A/2$   
 ha un minimo, come risulta dalla figura. La fissione è asimmetrica, e presenta due massimi in corrispondenza di numeri di massa

$$90 < A_1 < 100 \text{ e } 130 < A_2 < 140$$

# Analogia meccanica e resa energetica

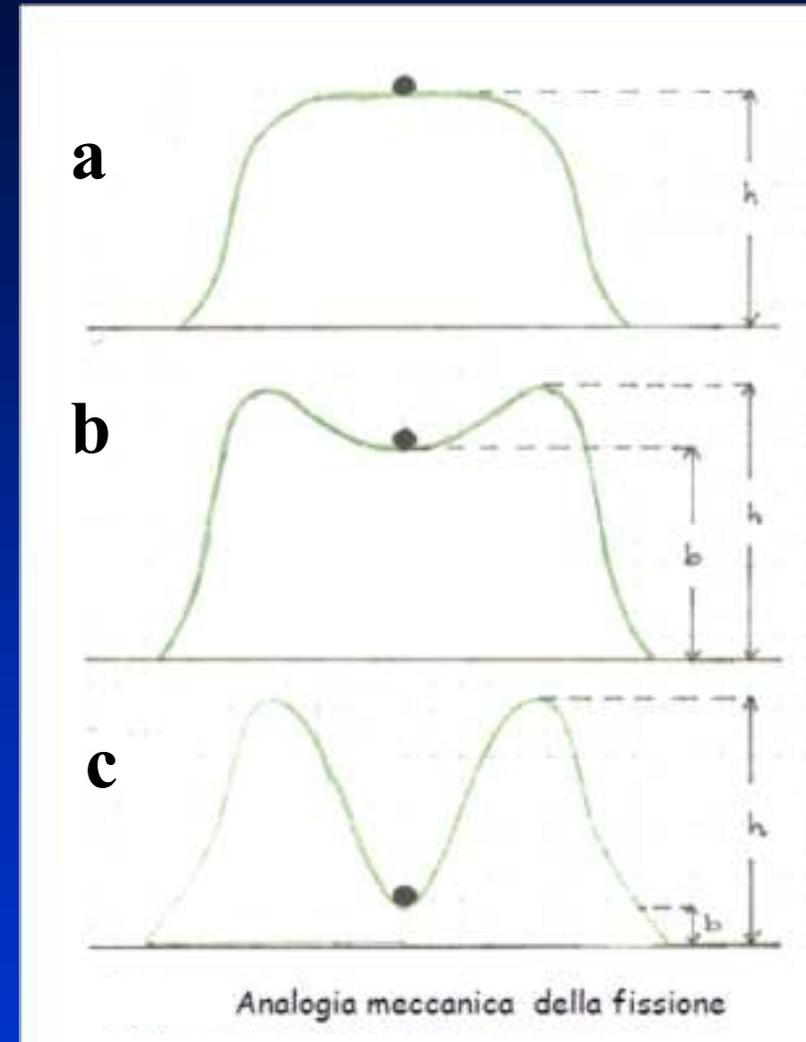


In funzione della distanza tra due frammenti che stanno fissionando

Energia fornita dal neutrone in eccesso  $\sim 7 \text{ MeV}$   
Se il neutrone possiede Energia cinetica ci può essere un ulteriore contributo

## Analogia meccanica:

- Fissione spontanea
- Fissione da neutroni "termici"  $\rightarrow E_n = kT = 0.025 \text{ eV} \rightarrow$  resa elevata
- Fissione da neutroni "veloci"  $\rightarrow E_n \sim \text{MeV} \rightarrow$  resa modesta



# Energia liberata - Potere Calorico

Supponiamo che  $(A,Z) \rightarrow 2(A/2,Z/2)$ , allora:

$$\Delta M = \Delta E = 2\Delta E(A/2,Z/2) - \Delta E(A,Z) = \beta(1-2^{1/3})A^{2/3} + \gamma(1-2^{-2/3})Z^2A^{-1/3}$$

(verificare, trascurando il termine di parità). Sostituendo i valori numerici di  $\alpha$  e  $\beta$  (crf. Slide 17- Blocco 1) e considerando  $^{235}\text{U}$  si ottiene  $\Delta E \sim 180 \text{ MeV}$

( $180/235 = 0.8 \text{ MeV/nucleone} \rightarrow \Delta E/A \sim 7 \text{ MeV per } A = 240 \text{ e } \sim 8 \text{ MeV per } A = 120$ )

**POTERE CALORICO** (di un combustibile) = calore sviluppato da 1 kg di combustibile

$$1 \text{ kg } ^{235}\text{U} \rightarrow N_{\text{at}} = N_0 M/A = 6.022 \cdot 10^{23} \cdot 10^3/235 = 2.5 \cdot 10^{24} \text{ atomi}$$

$$\text{PC}(^{235}\text{U}) = 180 \cdot 2.5 \cdot 10^{24} = 4.5 \cdot 10^{26} \text{ MeV/kg} = 1.7 \cdot 10^{13} \text{ cal/kg}$$

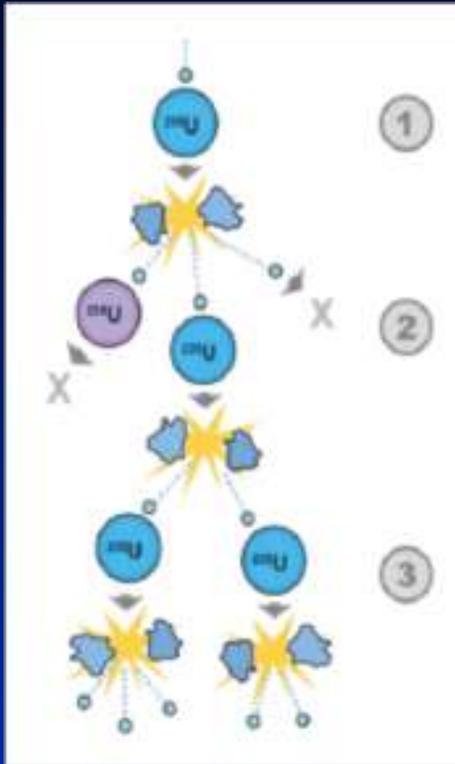
$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

$$10^{13} \text{ cal/s} = 2.4 \cdot 10^6 \text{ MW}$$

$$\text{PC(carbone)} = 7.5 \cdot 10^6 \text{ cal/kg} \quad - \quad \text{PC(tritolo)} = 7.3 \cdot 10^6 \text{ cal/kg}$$

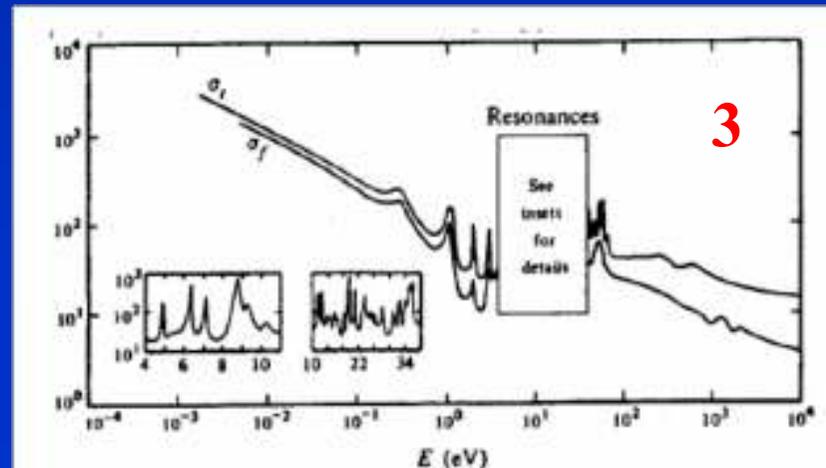
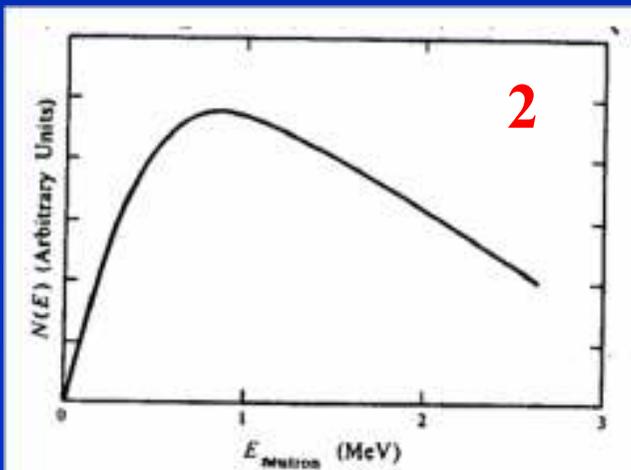
Esercizio: calcolare il valore di  $k$  e l'energia liberata dalla reazione  $n + ^{235}\text{U} \rightarrow ^{138}\text{Xe} + ^{92}\text{Sr} + kn$

# La reazione a catena



L'emissione di neutroni a seguito della fissione di un nucleo, in particolari condizioni, un fenomeno di enorme interesse pratico: la reazione a catena. Se ognuno dei neutroni risultanti da una fissione produce altre fissioni, il numero di queste cresce rapidamente, e al limite basterà un solo neutrone iniziale per provocare la fissione di un enorme numero di nuclei nel bersaglio. Tre parametri sono particolarmente importanti per realizzare e controllare la reazione a catena:

- 1) il numero  $\nu$  di neutroni emessi per ogni fissione;
- 2) la distribuzione energetica dei neutroni emessi;
- 3) la probabilità  $P$  di indurre una fissione (legata alla sezione d'urto  $\sigma_{\text{fiss}}$  del processo)  
 $\rightarrow P = P(E_n, \text{geometria, composizione})$



# Condizioni di criticità - Formula a 4 fattori di Fermi

La probabilità del processo si descrive con il fattore di criticità,  $k$ :

$$k = \frac{n^\circ \text{ neutroni generazione } i}{n^\circ \text{ neutroni generazione } (i-1)}$$

$K > 1$ , reaz. sovracritica

$K = 1$ , reaz. critica

$K < 1$ , reaz. sottocritica

Se si considera un volume infinito, contenente il combustibile ma eventualmente altro materiale in grado di assorbire e/o rallentare (moderare) i neutroni si può scrivere:

$$k_\infty = \eta \epsilon p f$$

con  $\eta = \frac{\nu \sigma_{fis}}{\sigma_{abs}}$  nel combustibile ( $U_{nat} = 99.3\% \text{ } ^{238}U + 0.7\% \text{ } ^{235}U$ )

$$\epsilon = \frac{n^\circ \text{ totale di fissioni}}{n^\circ \text{ di fissioni termiche}}$$

$p$  = Probabilità di evitare la cattura durante la moderazione

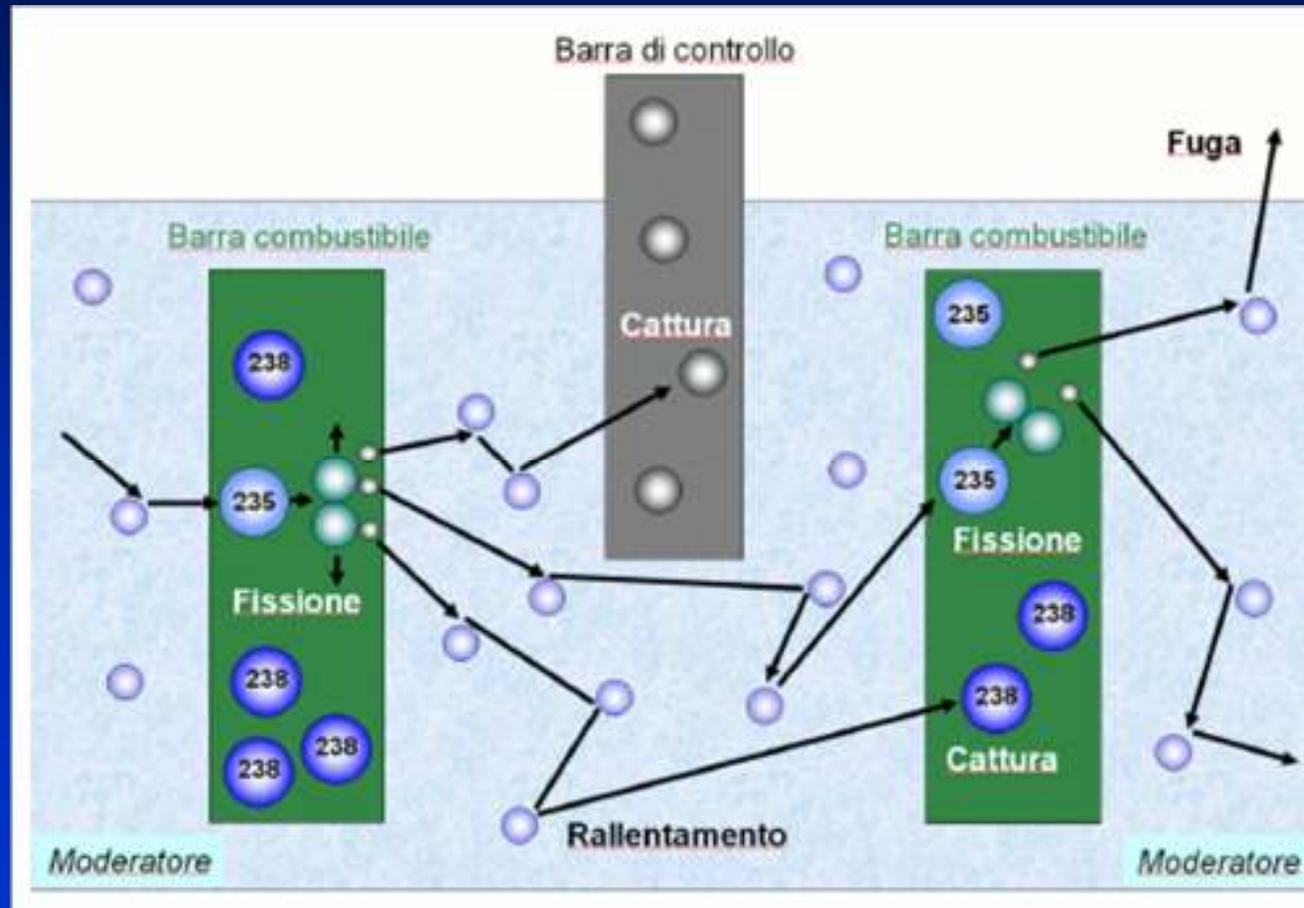
$$f = \frac{\sum_{aF}}{\sum_{aT}} = \text{fattore di utilizzo del combustibile}$$

In un reattore finito bisogna tenere conto della Probabilità di non perdere neutroni per fuga,  $K$

$$k = k_\infty K$$

# Il reattore nucleare

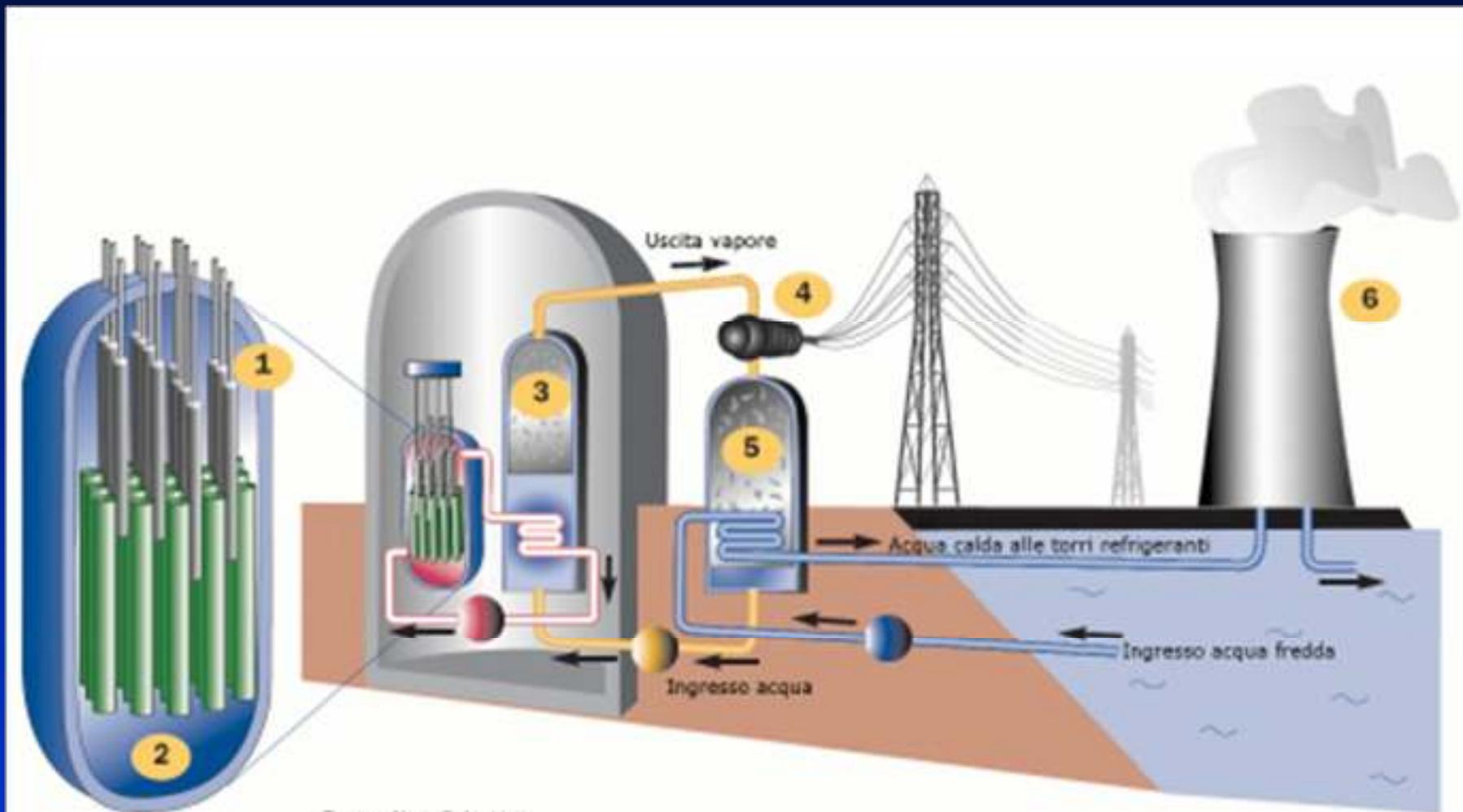
La geometria sferica è quella che massimizza  $K$  ma nei reattori sono più frequenti geometrie cilindriche poco allungate. Fissata la geometria la quantità di combustibile che rende  $k=1$  è detta **MASSA CRITICA**.



Reattori **TERMICI**

Combustibile  $^{238}\text{U}$ ,  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$  Moderatore  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{D}_2\text{O}$ ,  $\text{C}$ ,  $\text{Be}$  Refrigerante  $\text{H}_2\text{O}$  Assorbitore **B**

# Struttura di una centrale nucleare di potenza



Fonte: New Scientist

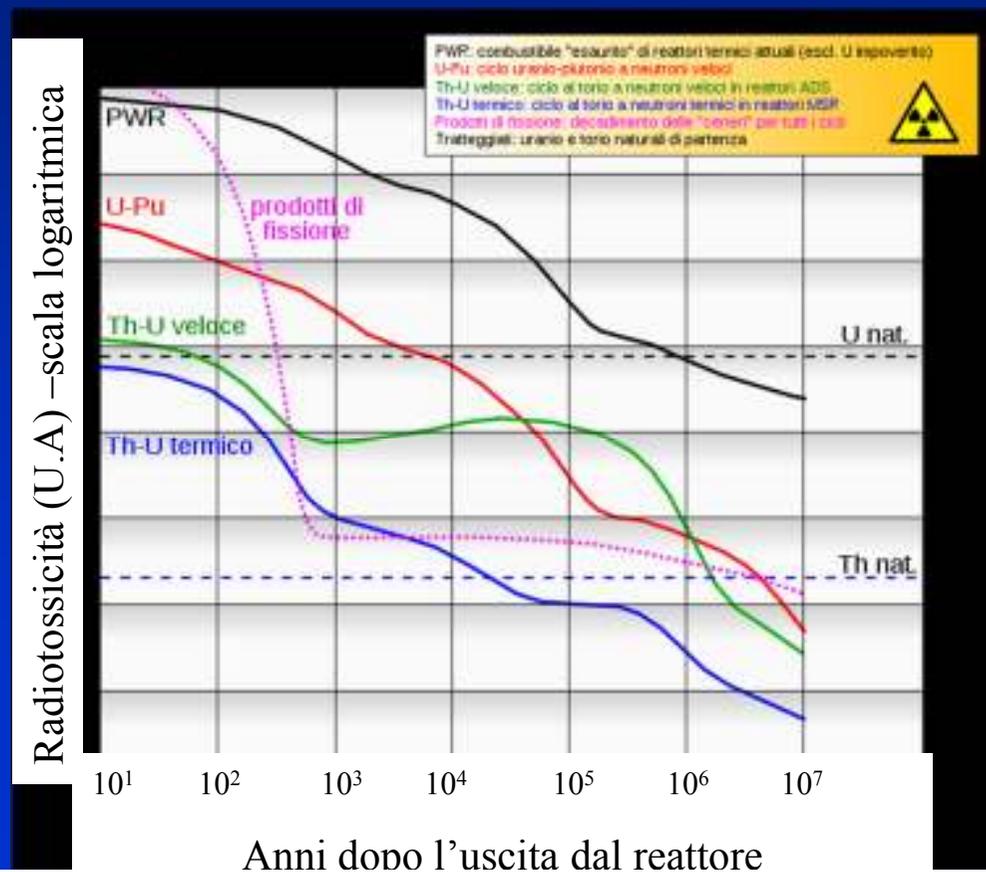
1\_COMBUSTIBILE E BARRE DI CONTROLLO ; 2\_MODERATORE; 3\_SCAMBIAITORE DI CALORE; 4\_TURBINE  
5 CONDENSATORE; 6\_TORRI REFRIGERANTI

$$\text{OdG } W_{\text{elet}} \sim \frac{1}{4} W_{\text{fiss}}$$

# I problemi della fissione nucleare

Problema complesso suddivisibile in tre parti:

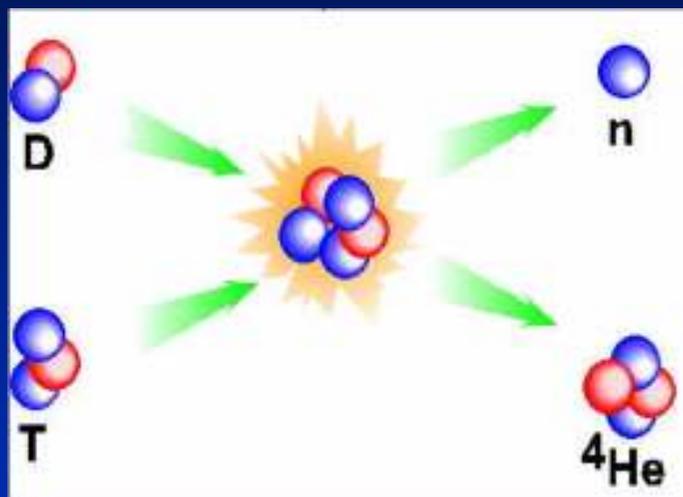
- 1) Impatto ambientale e sicurezza degli impianti
- 2) Durata delle scorte di combustibile ( $^{235}\text{U}$ ,  $^{238}\text{U}$ ,  $^{234}\text{Th}$ )
- 3) **Trattamento/conservazione delle scorie radioattive**



I reattori (veloci) di IV generazione, attualmente in fase di sviluppo, dovrebbero portare significativi miglioramenti "bruciando" parte delle scorie e quindi sfruttando meglio il combustibile a disposizione

# Fusione Nucleare

Si può guadagnare energia anche con il processo inverso ma, come indica l'andamento della curva  $\Delta E/A$  vs  $A$ , utilizzando nuclei leggeri:



$$M(D) = 1875.613 \text{ MeV}$$

$$M(T) = 2808.921 \text{ MeV}$$

$$M(^4\text{He}) = 3727.379 \text{ MeV}$$

$$M(n) = 939.565 \text{ MeV}$$

$$\Delta M = 17.59 \text{ MeV}$$

Con 1 kg di "miscela" D,T  $\rightarrow PC = \Delta M \cdot 6.02 \cdot 10^{23} \cdot 4 \cdot 10^2 / 2 = 2.1 \cdot 10^{27} \text{ MeV/kg} \sim 8 \cdot 10^{13} \text{ cal/kg}$

Altre reazioni possibili:



C'è pochissima radioattività indotta !

Le scorte di combustibile sono praticamente inesauribili !

MA...

# Repulsione coulombiana e tasso di reazione

Tra i due nuclei interagenti esiste un potenziale repulsivo dovuta alla forza di Coulomb: l'altezza della barriera coulombiana esistente tra due nuclei di carica rispettivamente  $Z_1$  e  $Z_2$  è :

$$V(R) = Z_1 Z_2 e^2 / R \approx \text{MeV}$$

$$(e^2 = 1.44 \text{ MeV}\cdot\text{fm}, R = R_1 + R_2)$$

Classicamente, occorre che  $E_{c1} \sim E_{c2} \sim \text{MeV}$  e, supponendo che i nuclei interagenti si trovino sotto forma di gas (*plasma*),  $E_c = kT \sim \text{MeV} \rightarrow T = \text{MeV}/k$

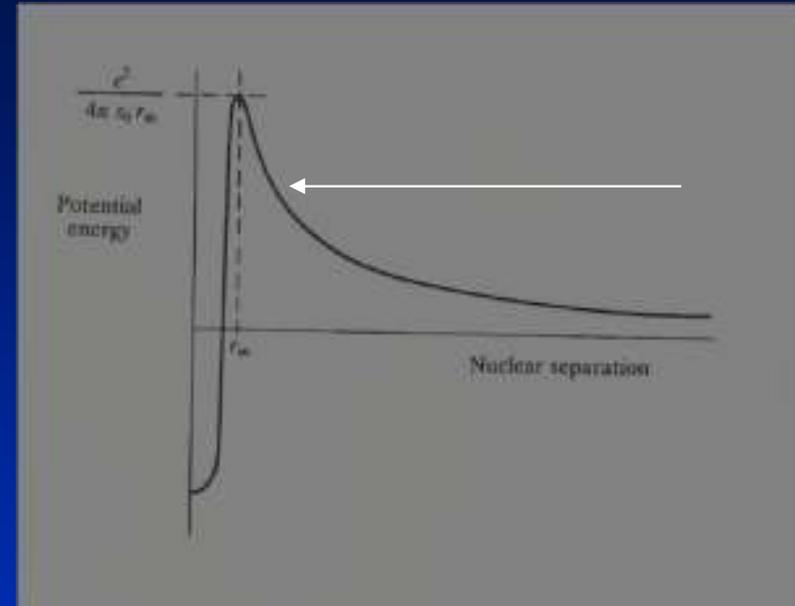
$$k = 1.38 \cdot 10^{-23} \text{ J/K} \quad e \quad 1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$$T \sim 10^9 \text{ K}$$

Fortunatamente c'è una probabilità non trascurabile che la reazione avvenga per **Effetto Tunnel**.

$$\text{Cons. la } D+T \rightarrow R = N_D N_T \langle \sigma v \rangle \text{ s}^{-1} \text{cm}^{-3}$$

Con:  $N_D$  e  $N_T = n$ . nuclei/volume,  $v = v$ . relativa.



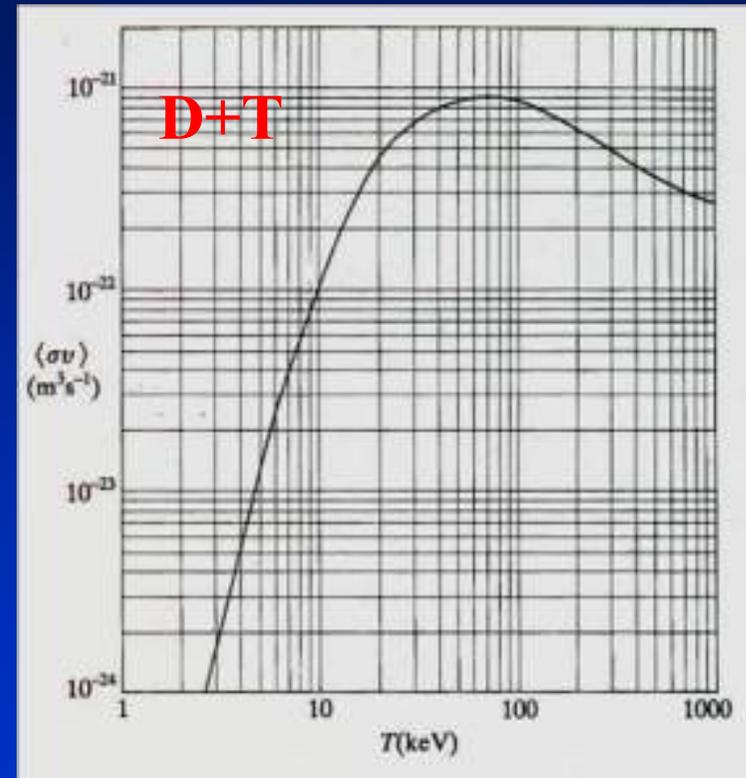
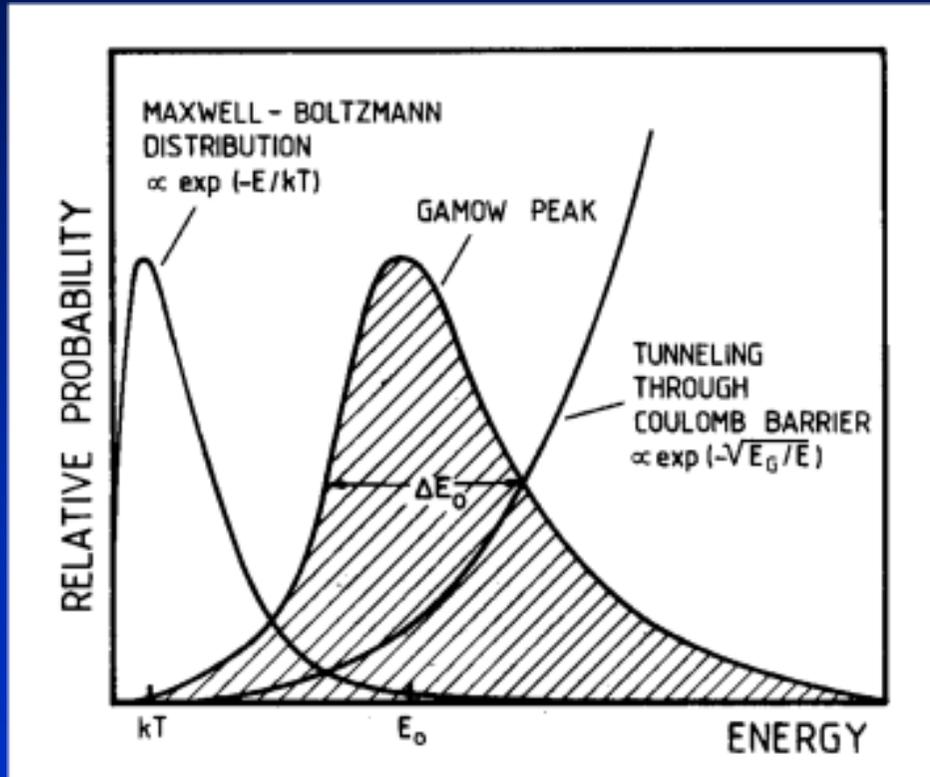
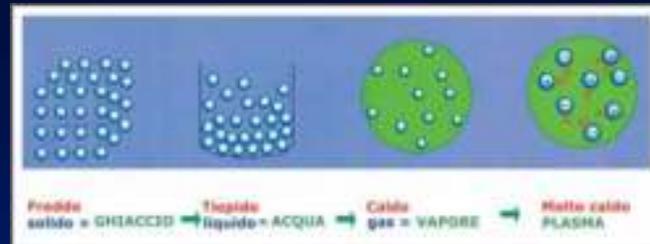
$$\int_0^{\infty} \phi(v) dv = 1$$

$$\langle \sigma v \rangle = \int_0^{\infty} \phi(v) v \sigma(v) dv$$

$$\phi(v) = 4\pi v^2 \left( \frac{m}{2\pi kT} \right)^{3/2} \exp\left( -\frac{mv^2}{2kT} \right)$$

$$\langle \sigma v \rangle = \left( \frac{8}{\pi \mu} \right)^{1/2} (kT)^{-3/2} \int_0^{\infty} \sigma(E) E \exp\left( -\frac{E}{kT} \right) dE$$

# Tasso di reazione e Temperatura



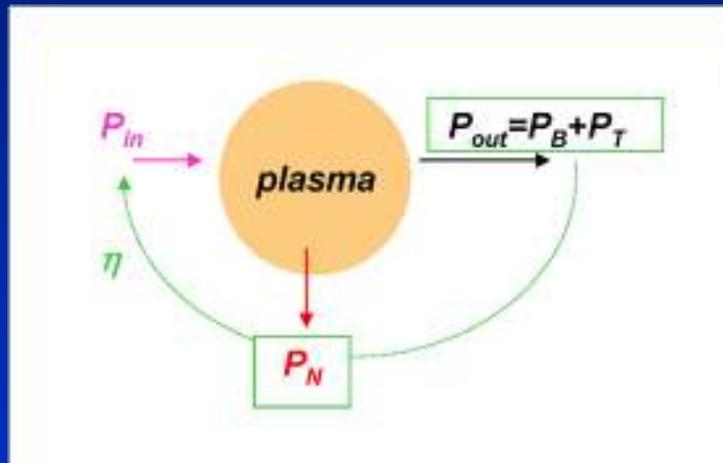
$$10 \text{ keV} < E_{\text{cm}} < 100 \text{ keV} \quad \rightarrow \quad 10^7 \text{ K} < T < 10^8 \text{ K}$$

Numeri analoghi per le altre reazioni di fusione di interesse pratico

## Possibilità di produrre energia

A differenza di quanto avviene per la fissione in questo caso non è possibile mantenere una reazione a catena: bisogna quindi riuscire a mantenere il combustibile (cioè il plasma delle due specie nucleari) in condizioni di densità e temperatura tali che l'energia prodotta dalle reazioni di fusione sia superiore a quella spesa per indurre le reazioni stesse. Nelle condizioni di fattibilità entra anche il "tempo di confinamento",  $\tau_c$  = tempo in cui si riescono a mantenere le condizioni di  $T$  e  $\rho$  necessarie.

Si può anche in questo caso definire una condizione di criticità in cui la Potenza spesa ( $P_{in}$ ) eguaglia quella (termica) prodotta ( $P_{out}$ )



$$P_{in} = P_{out} \text{ e } P_{in} = \eta(P_{out} + P_N)$$

$$P_N = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle \Delta E_F = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle \Delta E_F \quad (n_1 = n_2 = \frac{n}{2})$$

$$P_T = \frac{3nkT}{\tau_E} \quad \left( \frac{dE}{dT} = \frac{E}{\tau_E} \right); \quad \tau_E = \text{tempo di confinamento}$$

$$P_B = C_B n^2 \sqrt{kT}$$

Il CRITERIO DI LAWSON fissa una condizione quantitativa per la criticità (reazione che si auto-sostiene re-immettendo nel reattore una parte della potenza prodotta)

$$n\tau = \frac{3kT}{\frac{\eta}{(\eta-1)} \frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle \Delta E_F - C_B \sqrt{kT}} \Rightarrow n\tau = F(T)$$

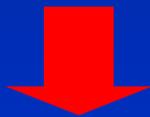
## Più realisticamente...

Il criterio di Lawson si esprime anche con il Prodotto Triplo: prendendo a riferimento il minimo della curva  $n\tau_E$  si ha:

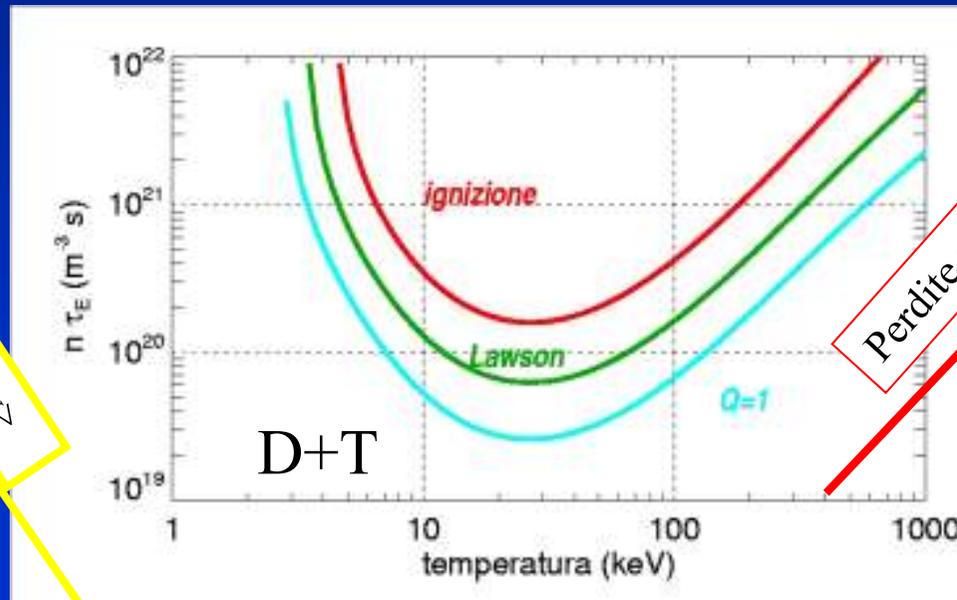
$$n\tau_E T \geq 1.2 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s} \quad (\text{LAWSON})$$

Il criterio diventa più stringente tenendo conto che, nella  $D+T \rightarrow \alpha+n$ , solo l'energia cinetica della particella  $\alpha$  (provare a calcolarla) resta confinata nel plasma e contribuisce al suo riscaldamento (il  $n$  fugge) e quindi, con lo stesso ragionamento di Lawson, si ottiene il **CRITERIO DI IGNIZIONE**:

$$n\tau = \frac{3kT}{\frac{1}{4} \langle \sigma v \rangle E_\alpha - C_B \sqrt{kT}}$$



$$n\tau_E T \geq 3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s} \quad (\text{IGNIZIONE})$$

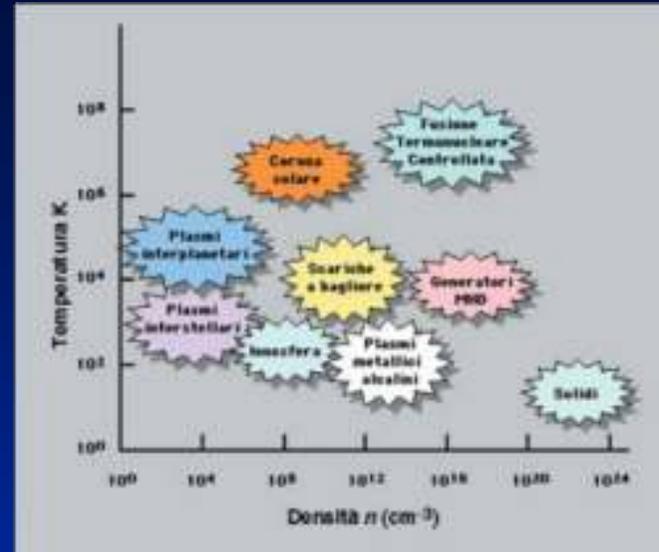


# Problemi tecnologici e reattori a fusione

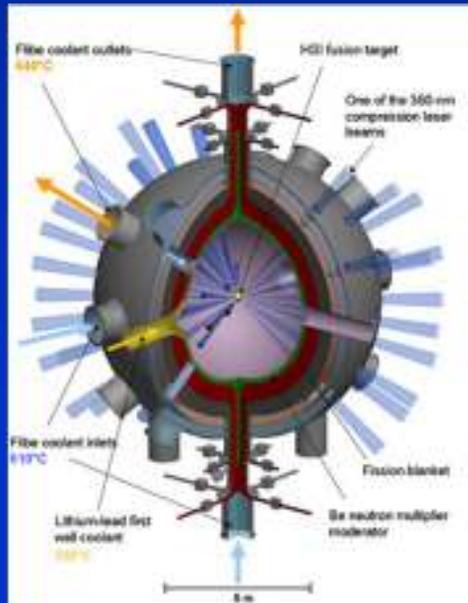
La fusione nucleare controllata:

- è un processo fisico relativamente semplice
- Il combustibile (D,T) è sufficiente per  $\sim 10^9$  anni
- Produce poche scorie radioattive e a vita media non troppo lunga
- È intrinsecamente sicura

Ma pone formidabili problemi tecnologici



Come si può mantenere ("confinare") il plasma garantendo T e n necessarie?



## Confinamento Inerziale



NIF: National Ignition Facility – Livermore USA

# Reattori a confinamento magnetico

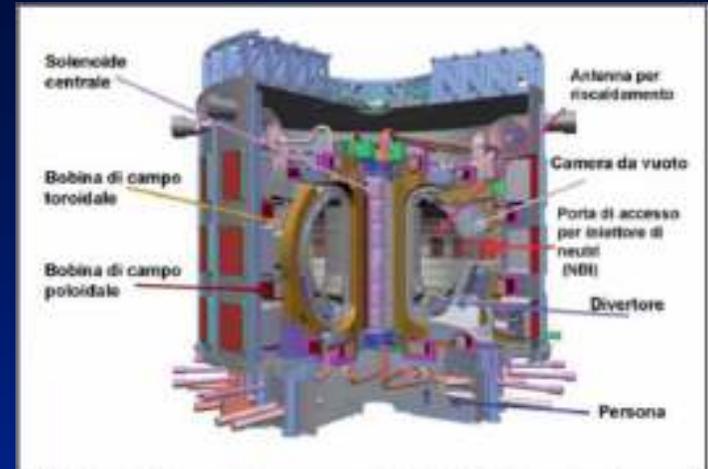
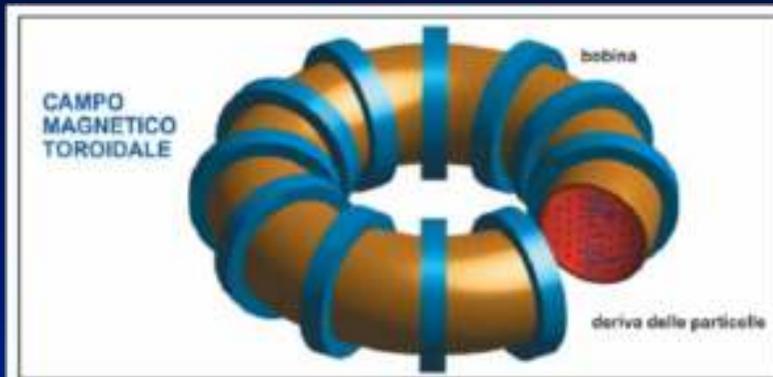


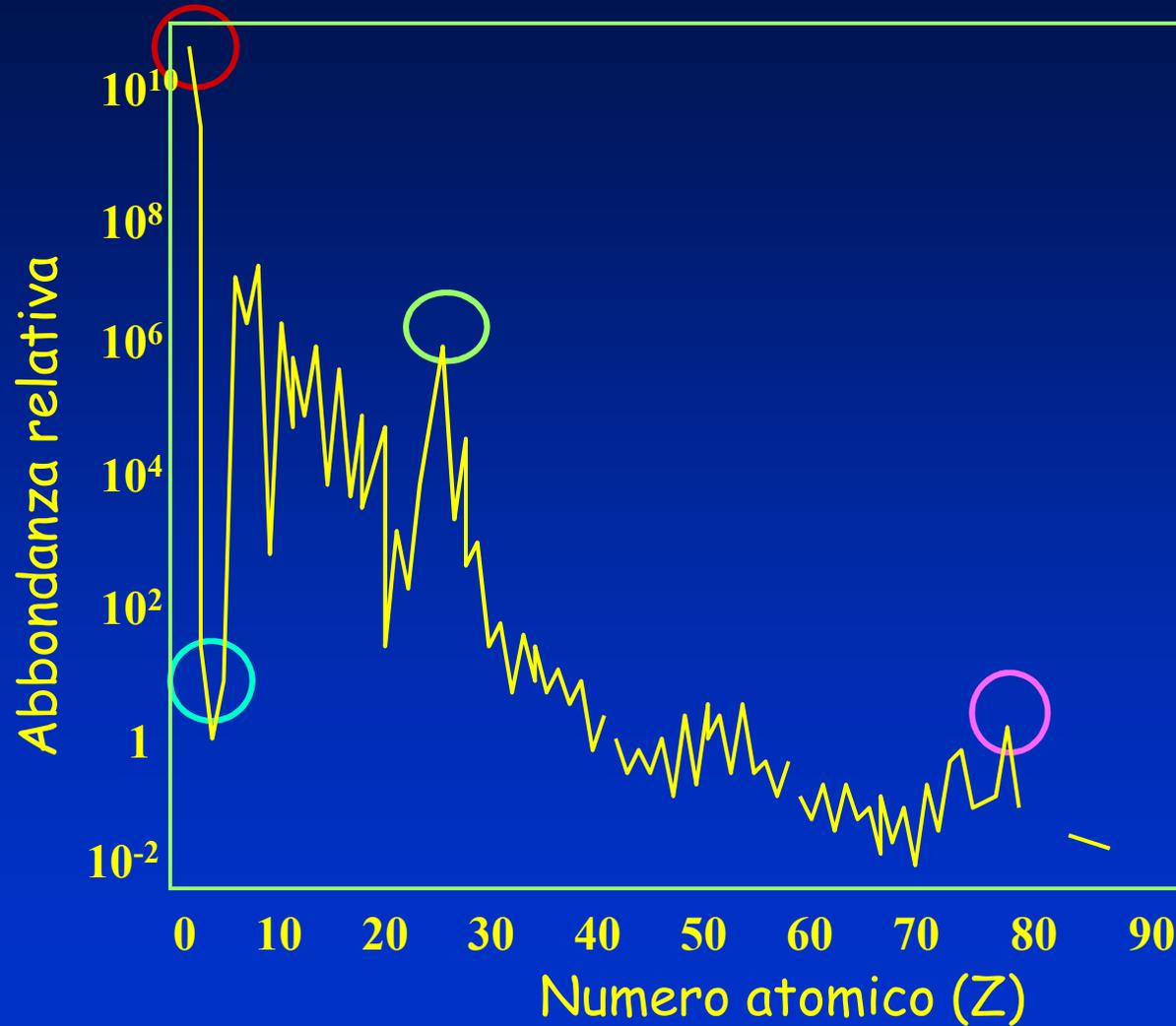
Fig. 17.1. Schema schematico di un reattore a fusione magnetica toroidale - TQ poloidale - PD (cassero di vuoto) (componenti principali del reattore: camera da vuoto, divertore, portali per i sistemi di riscaldamento a neutri, iniezione e estrazione di neutri).

**ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor) dovrebbe per la prima volta nella storia raggiungere le condizioni fissate dal criterio di Lawson (1955!) e quindi dimostrare la fattibilità tecnica della fusione controllata. Primo plasma previsto per il 2018



# Nucleosintesi

Abbondanza degli elementi nell'Universo (conosciuto...)



H, He

Li, Be, B

Fe

Pb

Dove e quando sono prodotti i diversi elementi?

## L'Universo

- consiste di  $\approx 10^{10} \div 10^{11}$   $\S$
- ogni  $\S$  contiene  $\approx 10^{10} \div 10^{11}$   $\star$
- si contano quindi  $\approx 10^{21}$   $\star$

• molto differenti in massa,  
raggio, luminosità, densità

$$\left\{ \begin{array}{l} 10^{-4} < L/L_{\odot} < 10^4 \\ 10^{-1} < M/M_{\odot} < 10^2 \\ 10^{-2} < r/r_{\odot} < 10^3 \\ 10^{-6} < \rho/\rho_{\odot} < 10^4 \end{array} \right.$$

$$M_{\odot} = 2 \cdot 10^{33} \text{ g}$$

$$R_{\odot} = 1.39 \cdot 10^{11} \text{ cm}$$

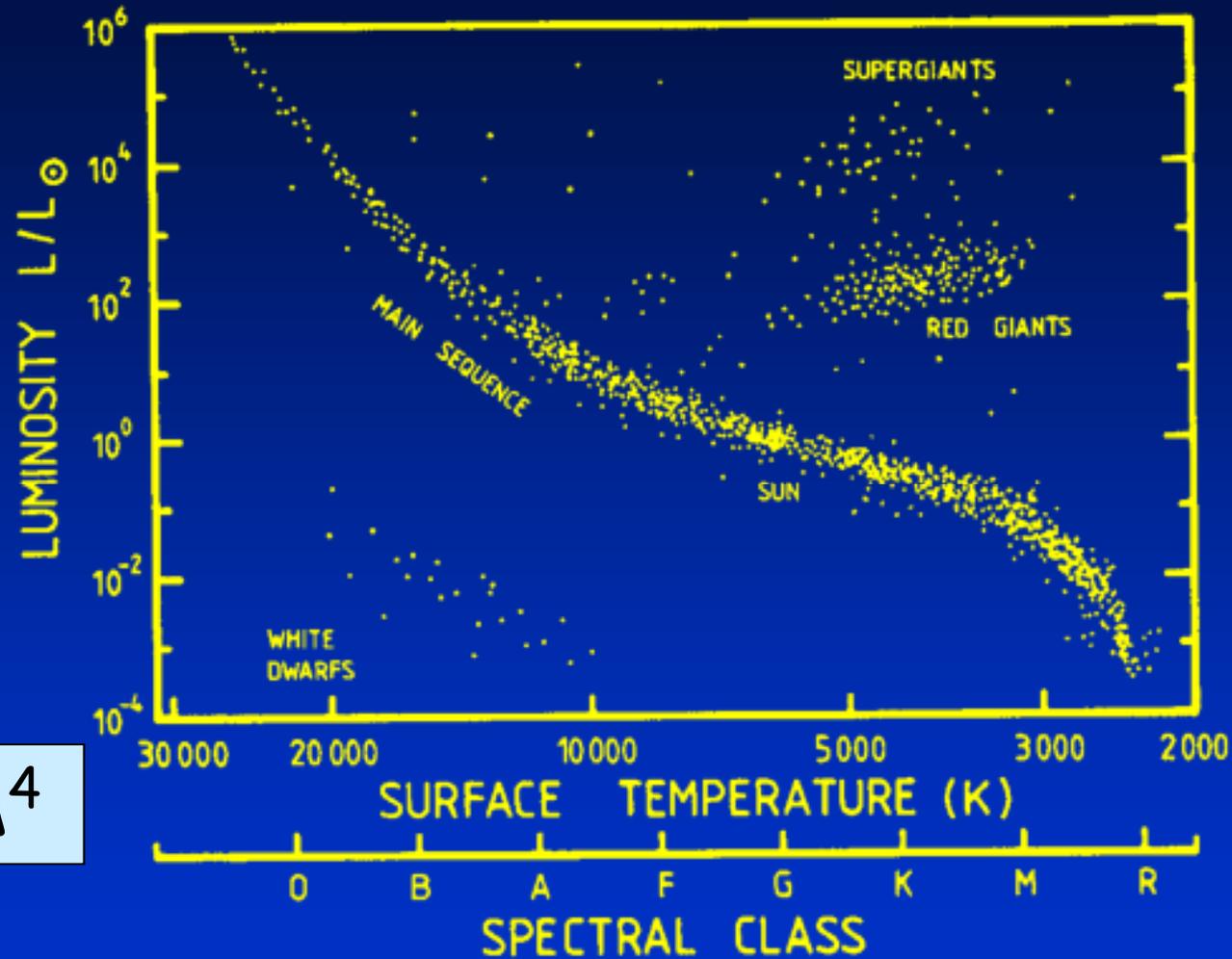
$$\rho_{\odot} = 1.4 \text{ g/cm}^3$$

$$T_{\odot} = 5.800 \text{ K}$$

$$L_{\odot} = 3.83 \cdot 10^{33} \text{ erg/s}$$

E' possibile individuare regolarità o somiglianze?

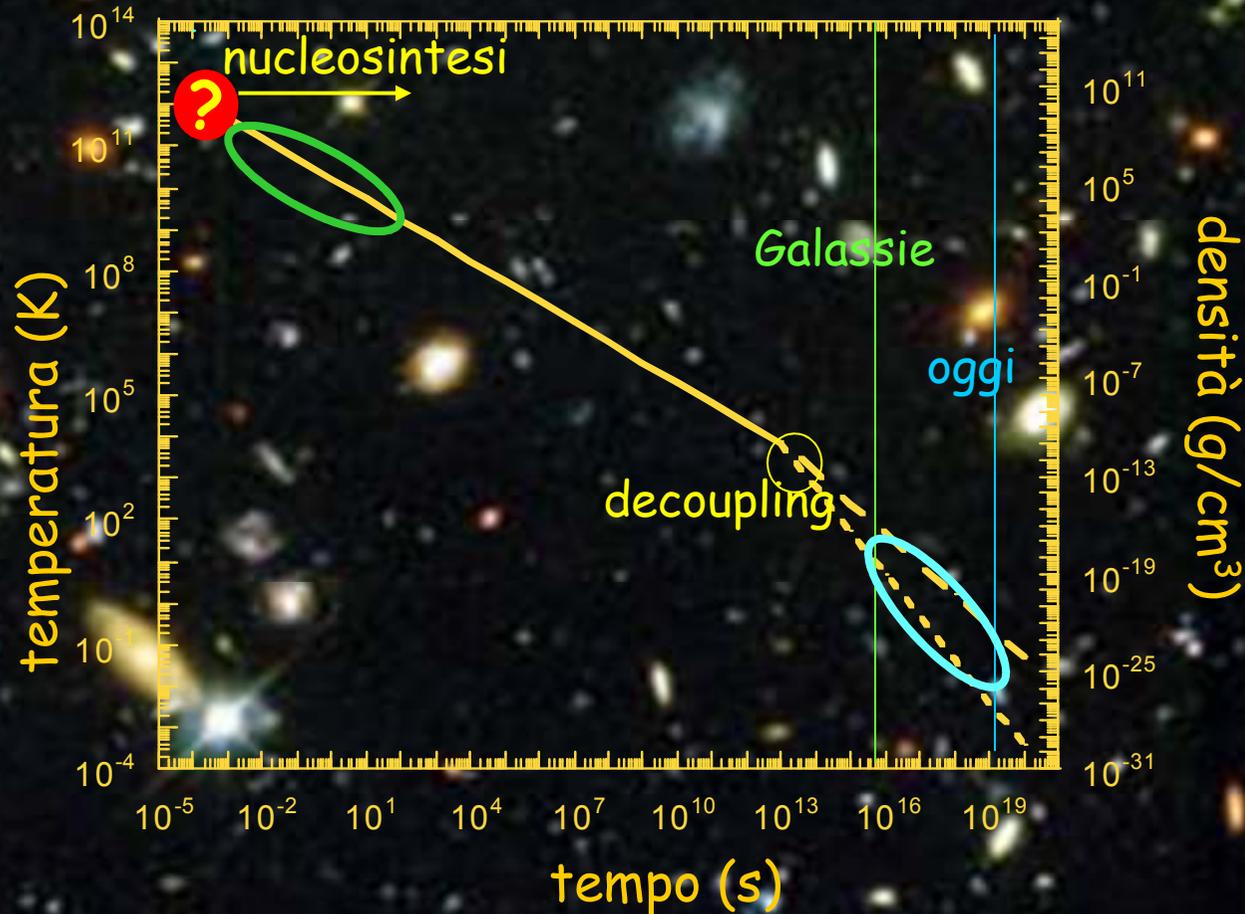
## Il Diagramma HR (Hertzprung-Russel)



$L \propto M^4$

In un piano Luminosità (Massa) - Temperatura superficiale (Colore) le stelle si raggruppano in zone ben delimitate

# L' origine dell' Universo



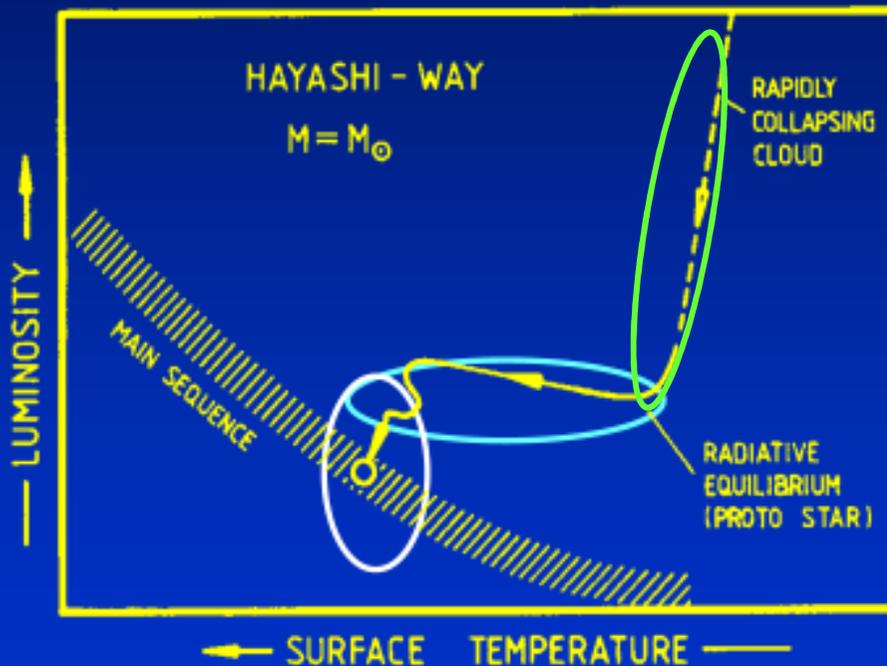
La fisica nucleare gioca e ha giocato un ruolo fondamentale:

nei "primi tre minuti"  
sintesi di: p, n, d, He

negli "ultimi" 10 miliardi di anni:  
nascita, vita e morte delle stelle

# Nascita di una stella

- gas interstellare collassa in caduta libera
- $[\rho \uparrow] \Rightarrow [\text{opacita}' \uparrow] \Rightarrow [E_{\text{rad}} \downarrow] \Rightarrow [T \uparrow]$   
questa fase dura circa 30÷100 anni



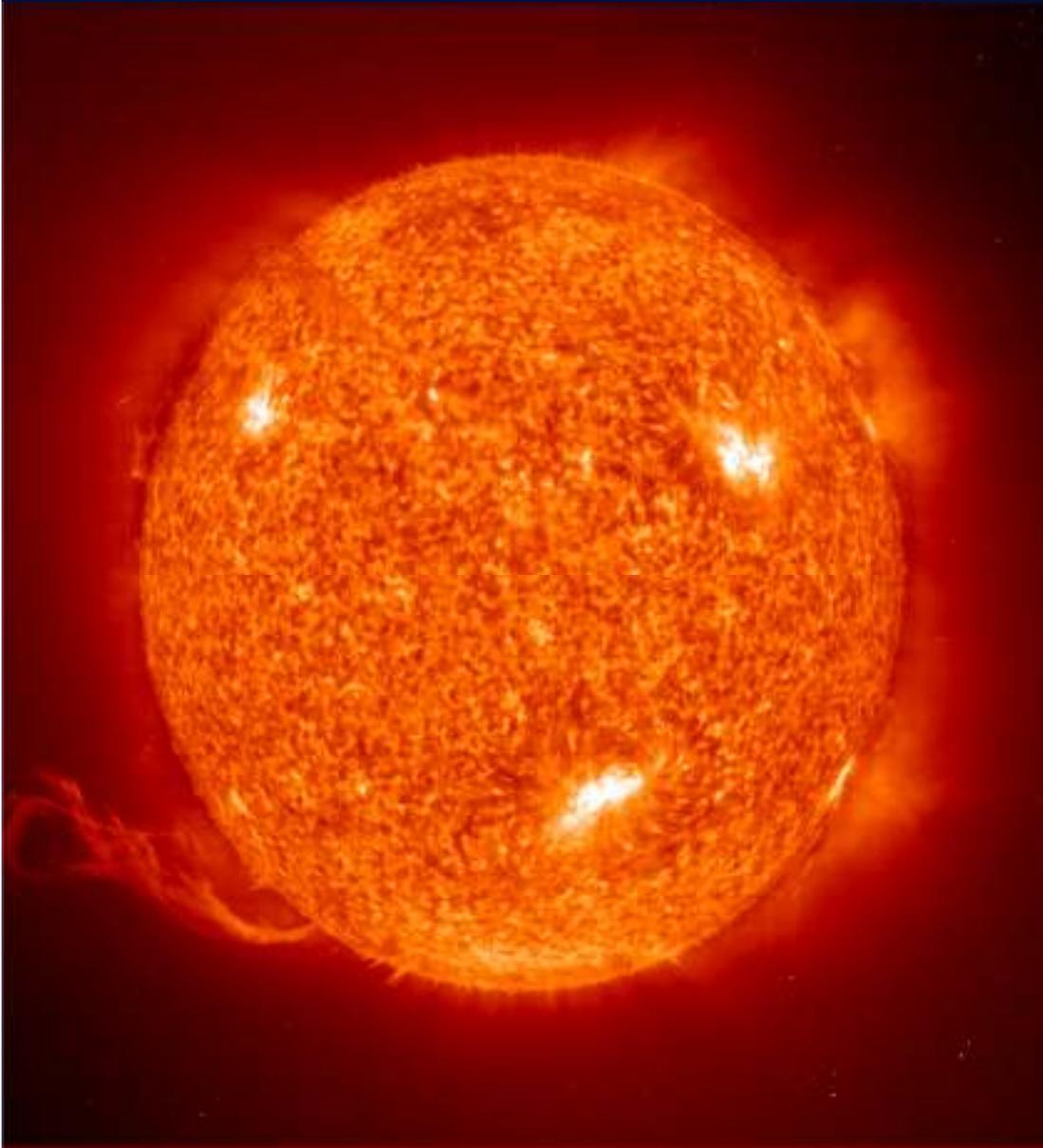
- fase di equilibrio radiativo:  
si forma una protostella (luminosa)  
 $2E_{\text{cin}} = 2E_{\text{T}} = -E_{\text{G}}$  (teorema viriale)  
per  $10^6 \div 10^8$  anni:  $L \approx \text{cost} \rightarrow \text{MS}$

Si innescano le reazioni nucleari, la stella entra nella MS del diagramma H-R e il punto di ingresso dipende dalla massa  $M$



Ma perché proprio le  
reazioni nucleari ?

# Il sole



dista da noi 150 milioni di km e  
la sua luce impiega 8 minuti a  
raggiungere la terra

La potenza irradiata nello spazio  
e'  $P = 4 \cdot 10^{23}$  kW pari a quella  
prodotta da 400 miliardi di  
centrali da 1000 Megawatt  
ciascuna !!

Con quale meccanismo il Sole produce questa enorme quantità di energia?

Se il sole funzionasse "chimicamente" si sarebbe spento nel giro di 10.000 anni ...

Conosciamo il potere calorico  $Q$  delle reazioni chimiche ,  $Q \sim 10^6$  J/kg

Conosciamo la massa di combustibile:  $M_{\text{v}} = 3 \cdot 10^{30}$  kg

Conosciamo la potenza sviluppata:  $P = 4 \cdot 10^{23}$  kW

Potrebbe restare acceso per un tempo pari a:

$$t = M_{\text{v}} \cdot Q / P = 10^7 \text{h} = 10.000 \text{ anni}$$

Il Sole dovrebbe avere meno di 10.000 anni



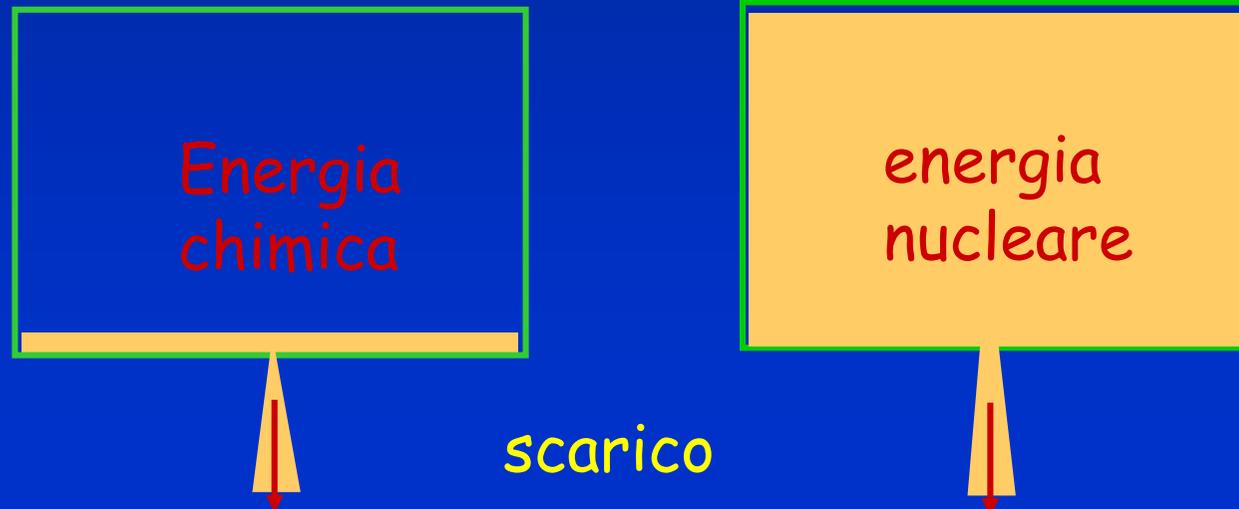
## Ma la terra ha 5 miliardi di anni...

L'età della terra si ricava dalle sue rocce, utilizzando come orologio il decadimento radioattivo (e.g.  $\tau_{40K} \sim 10^9$  y)

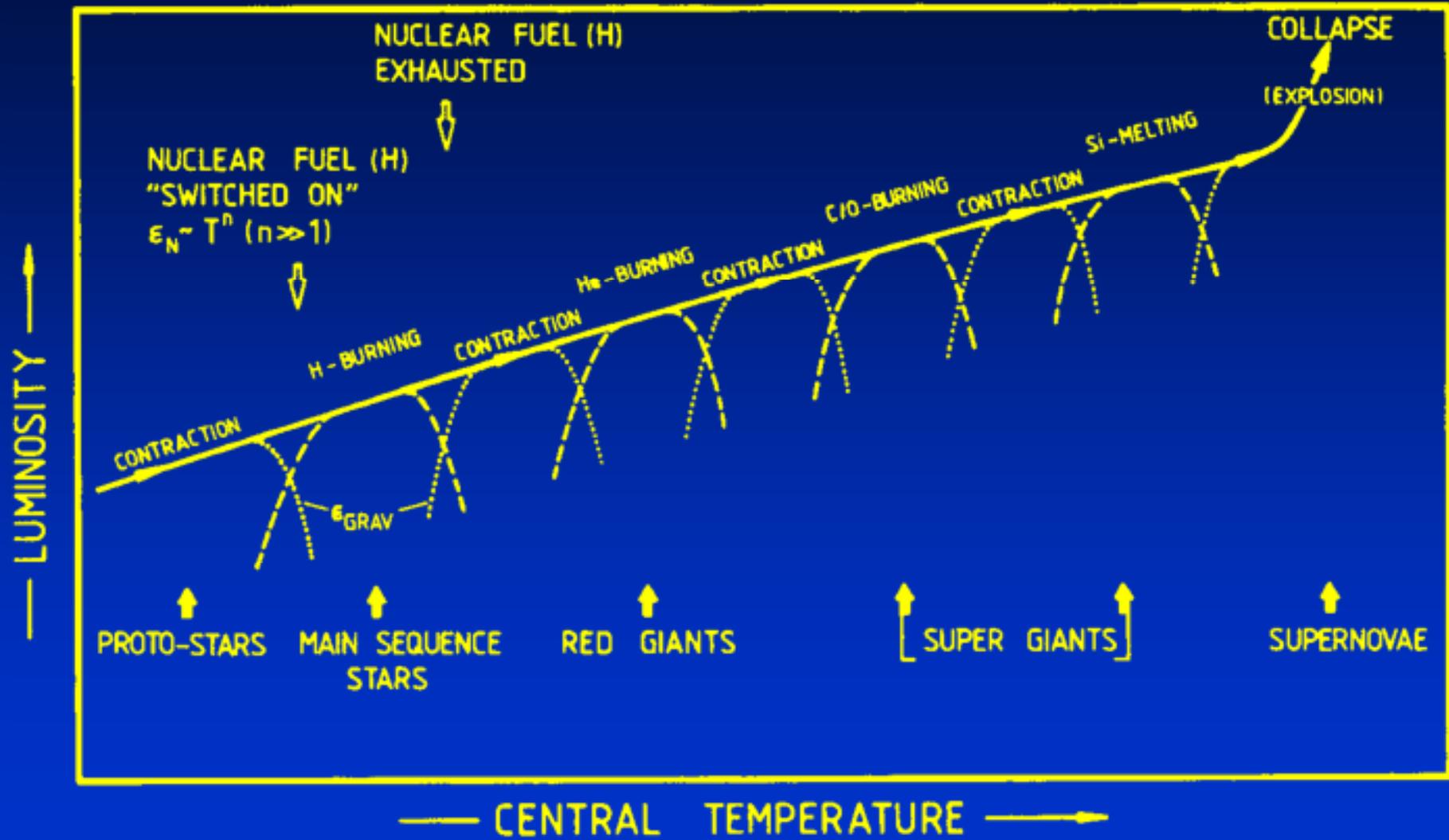
e il sole deve essere più vecchio → da 1 a 10 miliardi di anni

Il processo che fornisce energia al Sole deve essere  $\sim 10^5$ - $10^6$  volte più efficiente nel "bruciare" la massa di quanto non siano le reazioni chimiche

Energia prodotta per fusione termonucleare



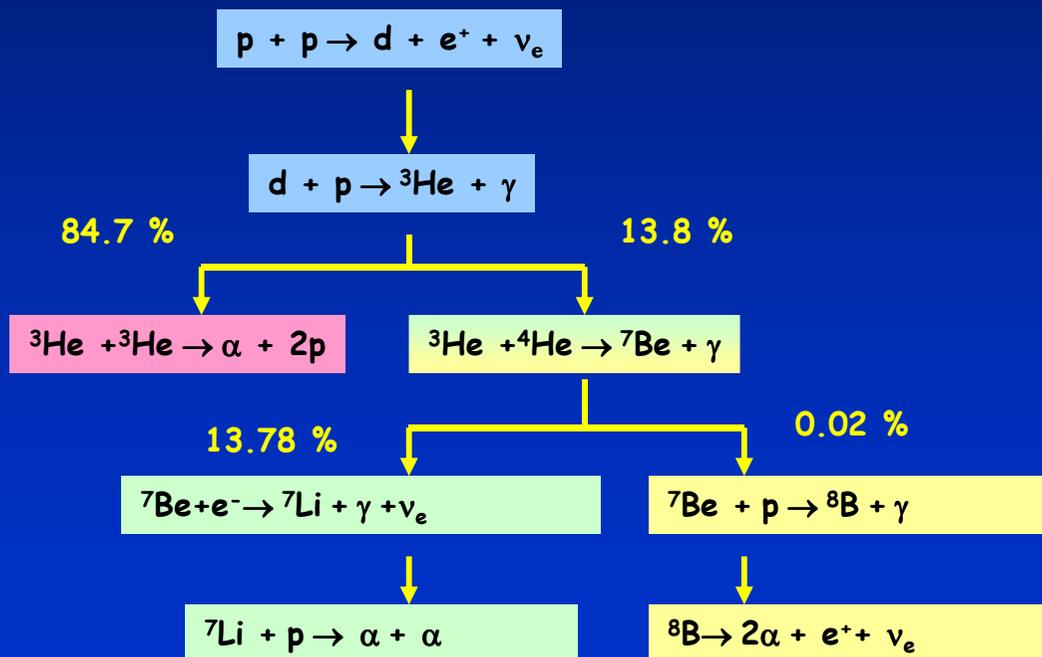
# La "vita" delle stelle



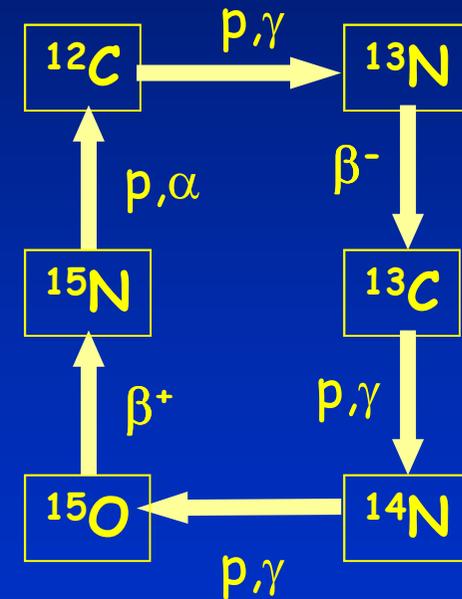
**H burning:** è il meccanismo che produce energia per la maggior parte della vita della stella:



### *pp chain*



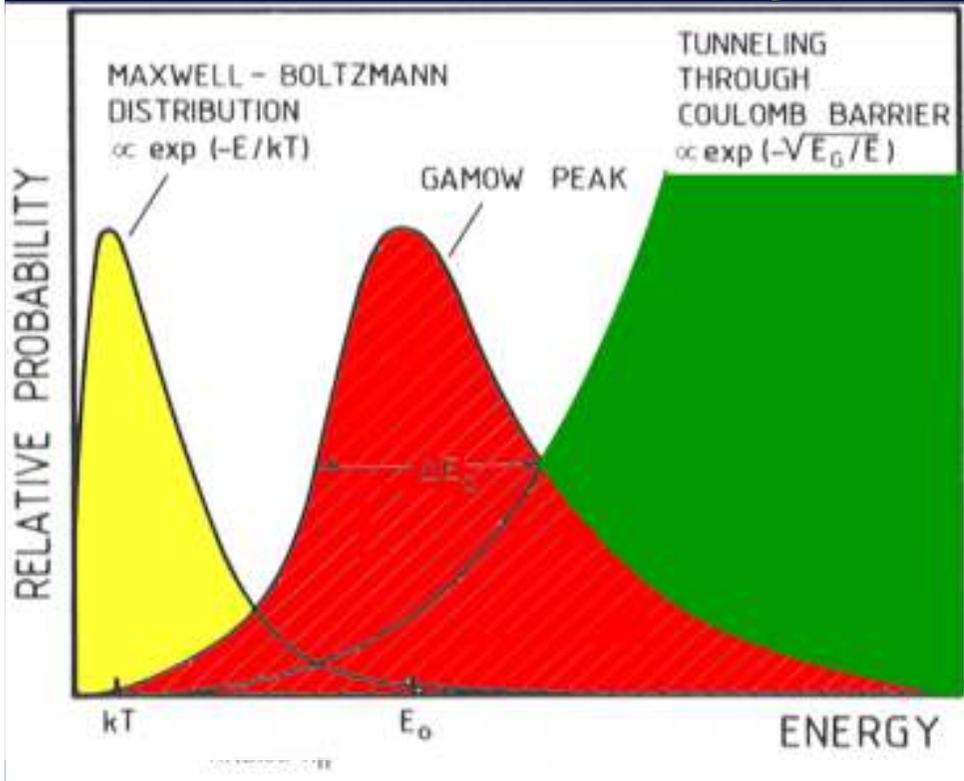
### *CNO cycle*



$$T_{\text{sun}} \approx 16 \cdot 10^6 \text{ K}$$

$$\Rightarrow E_{\text{MB}} \approx 1.3 \text{ keV}$$

Caduta esponenziale della sezione d'urto  
 Nell'intervallo energetico corrispondente alla  
 temperatura del sole



La reazione nucleare è classicamente impossibile, quantisticamente può avvenire per effetto tunnel

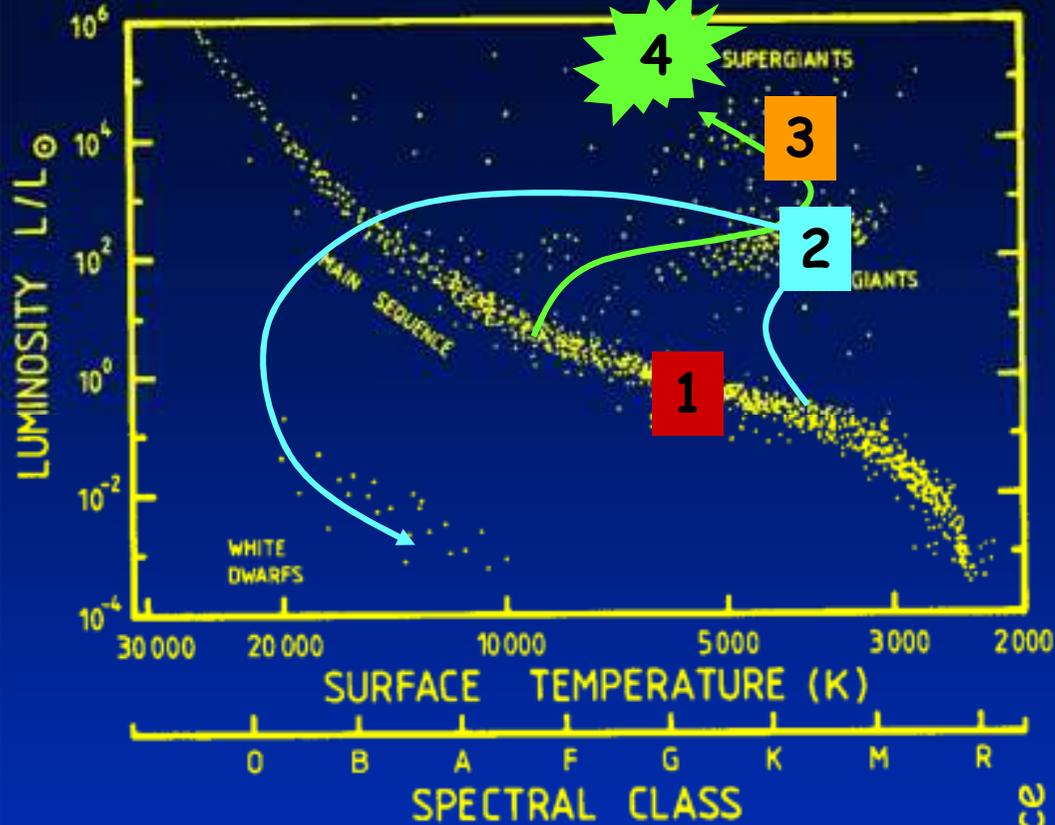
### Il picco di Gamow:

Intervallo energetico in cui reazioni non risonanti hanno luogo nelle stelle.

Esempi:

	$E_c/\text{keV}$	$E_0/\text{keV}$	$\sigma(E_0)/\text{barn}$	$E_{\text{min}}/\text{keV}$
${}^3\text{He}({}^3\text{He}, 2p) {}^4\text{He}$	1540	21	$7 \cdot 10^{-13}$	16.5
${}^3\text{He}(\alpha, \gamma) {}^7\text{Be}$	1540	22	$9 \cdot 10^{-18}$	107
${}^{14}\text{N}(p, \gamma) {}^{15}\text{O}$	2270	26	$4 \cdot 10^{-21}$	200

A<60



$M < 1.4 M_{\odot}$   
 La stella abbandona  
 la sequenza principale  
 (nana bianca/bruna)

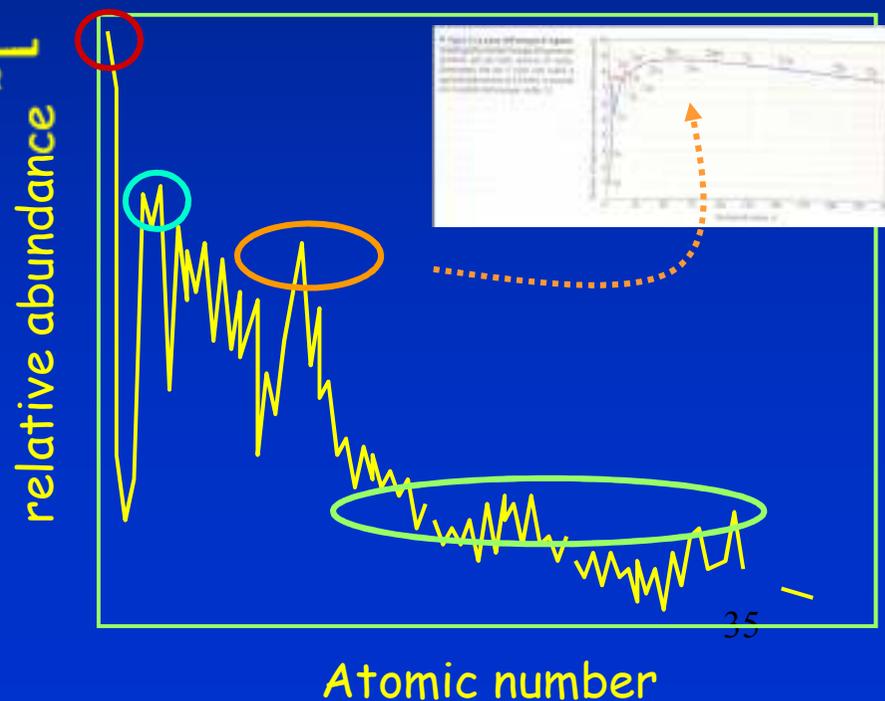
$M > 1.4 M_{\odot}$   
 La stella esplode  
 (supernova)

H burning  $\rightarrow$  He

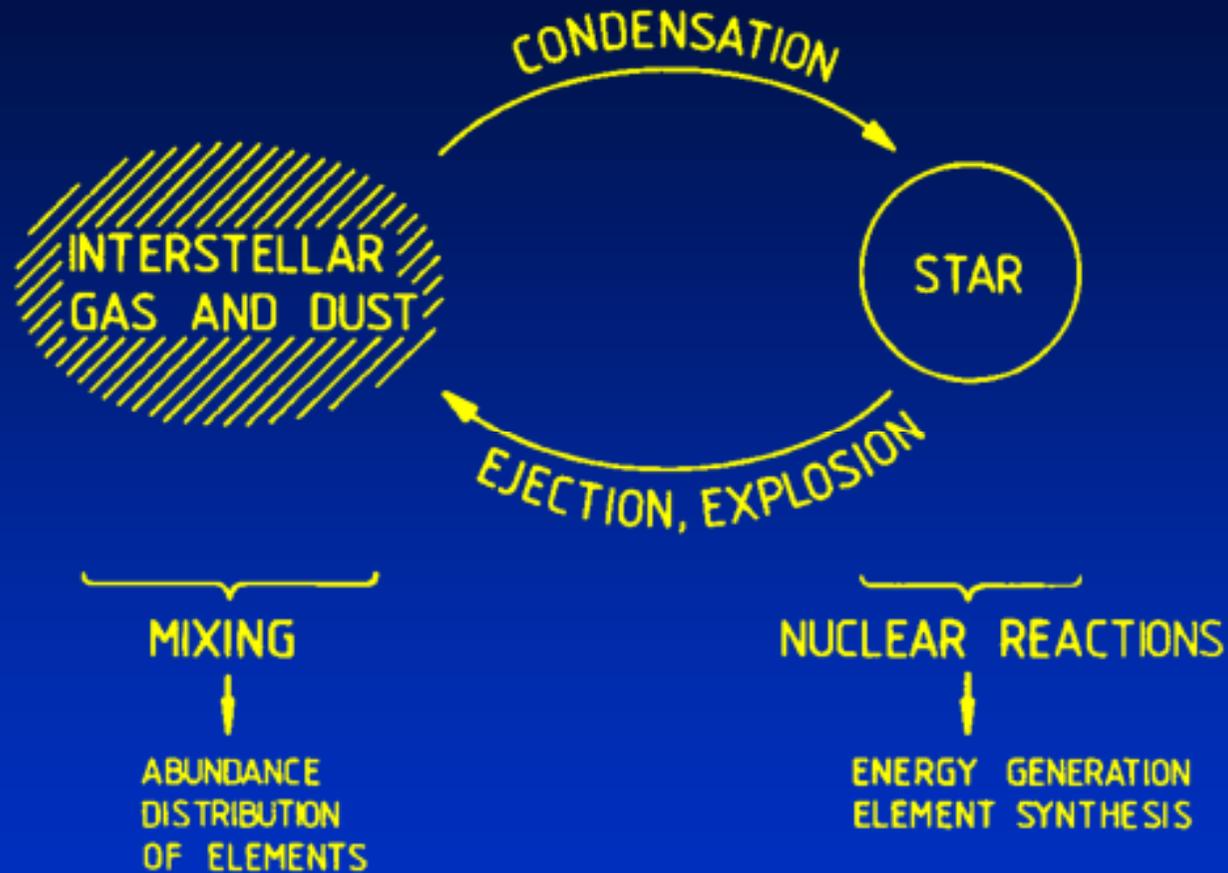
He burning  $\rightarrow$  C, O, Ne

C/O ... Si burning  $\rightarrow$  Fe

explosive burning



# Polvere di stelle



Le stelle sono ... "Cauldrons in the cosmos"

... e noi siamo cenere di supernovae !