



**FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI**

# Cenni di fisica nucleare

*Federico Porcù ([federico.porcu@unibo.it](mailto:federico.porcu@unibo.it))  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Università di Bologna*



## unità di misura: energia

$$1 \text{ Joule} = 1 \text{ N} \times 1 \text{ m}$$

$$1 \text{ kWh} = 3.6 \cdot 10^6 \text{ J} \quad 1 \text{ W} = 1 \text{ J/1 s}$$

$$1 \text{ eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ u.m.a.} = 1.49 \cdot 10^{-10} \text{ J}$$

$$1 \text{ tep} = 41.87 \text{ GJ}$$

$$1 \text{ cal} = 4.1868 \text{ J}$$

$$1 \text{ Btu} = 1055.055 \text{ J}$$

## prefissi SI

$$\text{Kilo} = 10^3$$

$$\text{femto} = 10^{-15}$$

$$\text{Mega} = 10^6$$

$$\text{pico} = 10^{-12}$$

$$\text{Giga} = 10^9$$

$$\text{nano} = 10^{-9}$$

$$\text{Tera} = 10^{12}$$

$$\text{micro} = 10^{-6}$$

$$1 \text{ Fermi (fm)} = 10^{-15} \text{ m}$$



**modello atomico e nucleare;**

**le forze e l'energia;**

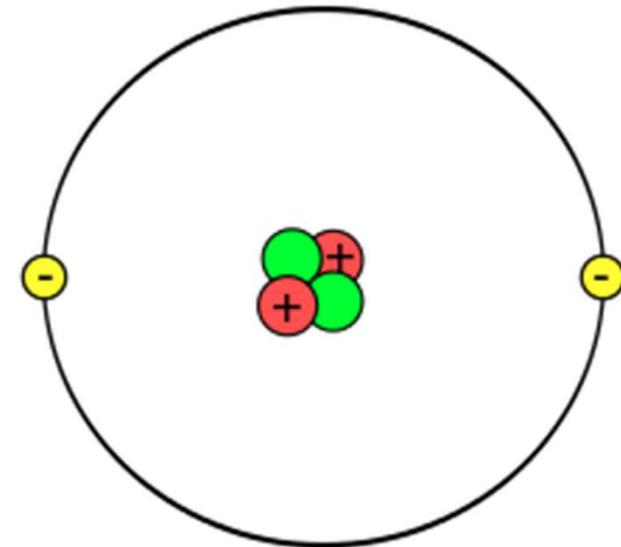
**le reazioni nucleari.**

# modello atomico e nucleare



La fisica atomica è nata con la scoperta dell'**elettrone** (J.J.Thomson 1897). A distanza di poco più di 30 anni, con la scoperta del **neutrone** (Chadwick, 1932) nasce la fisica nucleare.

L'atomo, secondo il **modello** che useremo, ha un raggio  $R_a \approx 10^{-10}$  m, ed è composto da un **nucleo centrale**, formato da Z particelle (protoni) con carica positiva  $e = 1.6 \cdot 10^{-19}$  C, di raggio  $R_N \approx 10^{-15}$  m attorno al quale si muovono Z elettroni, aventi carica negativa -e.



**Z** è il numero atomico e rappresenta il numero totale di protoni, aventi carica positiva  $e \approx 1.6 \times 10^{-19}$  Coulomb, presenti nel nucleo.

Nel nucleo ci sono anche  $N=A-Z$  particelle neutre chiamate neutroni, dove **A** è il numero di massa di un atomo.

$R_N \approx R_0 A^{1/3}$  dove  $R_0$  è una costante di valore  $1.2 \times 10^{-15}$  m (=1.2 fm)

# modello atomico e nucleare



Nel **nucleo** è concentrata quasi tutta la **massa** dell'atomo. Infatti, neutroni e protoni hanno masse molto più grandi (circa 1800 volte) di quella degli elettroni. La massa del protone è quasi uguale a quella del neutrone.

Se si trascura la piccolissima differenza esistente tra le masse del protone e del neutrone, si può concludere che la massa di un nucleo è circa **Z + N volte la massa del protone**.

Come riferimento per le masse atomiche (e nucleari) si è scelto un particolare isotopo del carbonio molto abbondante in natura: il **carbonio-12**. Nel suo nucleo sono presenti 6 protoni e 6 neutroni; il suo numero di massa **A** è dunque 12.

Come unità di misura della massa atomica (**u.m.a.**) si è scelta la dodicesima parte della massa del carbonio-12.

$$1 \text{ u.m.a. (anche indicata con } u) = 1.661 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$$

# modello atomico e nucleare



<p>Electron ○</p>	$m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ u}$ $e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$
<p>Proton ○</p>	$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1836.15 m_e = 1.00728 \text{ u}$ $e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$ $m_p c^2 = 938.272 \text{ MeV}$
<p>Neutron ○</p>	$m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1838.68 m_e = 1.00867 \text{ u}$ charge = 0 $m_n c^2 = 939.566 \text{ MeV}$

**L'unità di massa atomica è definita come 1/12 della massa atomica del carbonio**

dalla relazione di Einstein  $E=mc^2$  si ottiene anche  $1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$   
ove  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ )



Tutti gli atomi che hanno **uguale Z**, anche se differiscono per il numero di neutroni, danno origine allo **stesso elemento chimico** (hanno le medesime proprietà e occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi).

Atomi con lo stesso Z sono detti **isotopi**, l'elemento chimico idrogeno H ha tre isotopi:

H-1,  ${}^1\text{H}$  nucleo con un protone ( $A=1$ )

H-2,  ${}^2\text{H}$  nucleo con un protone e un neutrone: Deuterio D ( $A=2$ )

H-3,  ${}^3\text{H}$  nucleo con un protone e due neutroni: Tritio T ( $A=3$ )

${}^1\text{H}$  e  ${}^2\text{H}$  sono isotopi naturali e sono stabili,  ${}^3\text{H}$  è artificiale (reazioni nucleari) ed è instabile o radioattivo. Nuclei con lo stesso A e diverso Z sono chiamati **isobari**.

Con il termine **nuclide** si indica una singola specie nucleare caratterizzata da Z ed A: ciò li distingue dagli isotopi, che hanno invece fisso il numero di protoni ed il numero di neutroni variabile.



L'esistenza stessa di un nucleo atomico stabile ci pone un problema inesplicabile sulla base delle conoscenze della Fisica Classica dei primi del novecento: come è possibile la **stabilità dei nuclei** (più particelle positive che si trovano a distanze molto piccole, dell'ordine di  $10^{-15}$  m ) ?

Sappiamo infatti che tra due cariche elettriche puntiformi  $q_1$  e  $q_2$ , che si trovano ad una distanza  $d$  nel vuoto si esercita una forza (di **Coulomb**) che vale, in modulo:

$$F = k \frac{|q_1| |q_2|}{d^2}$$

ove  $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$  è la costante di Coulomb in SI.

Per distanze piccole la forza repulsiva è molto elevata, e diverge per  $d \rightarrow 0$ .



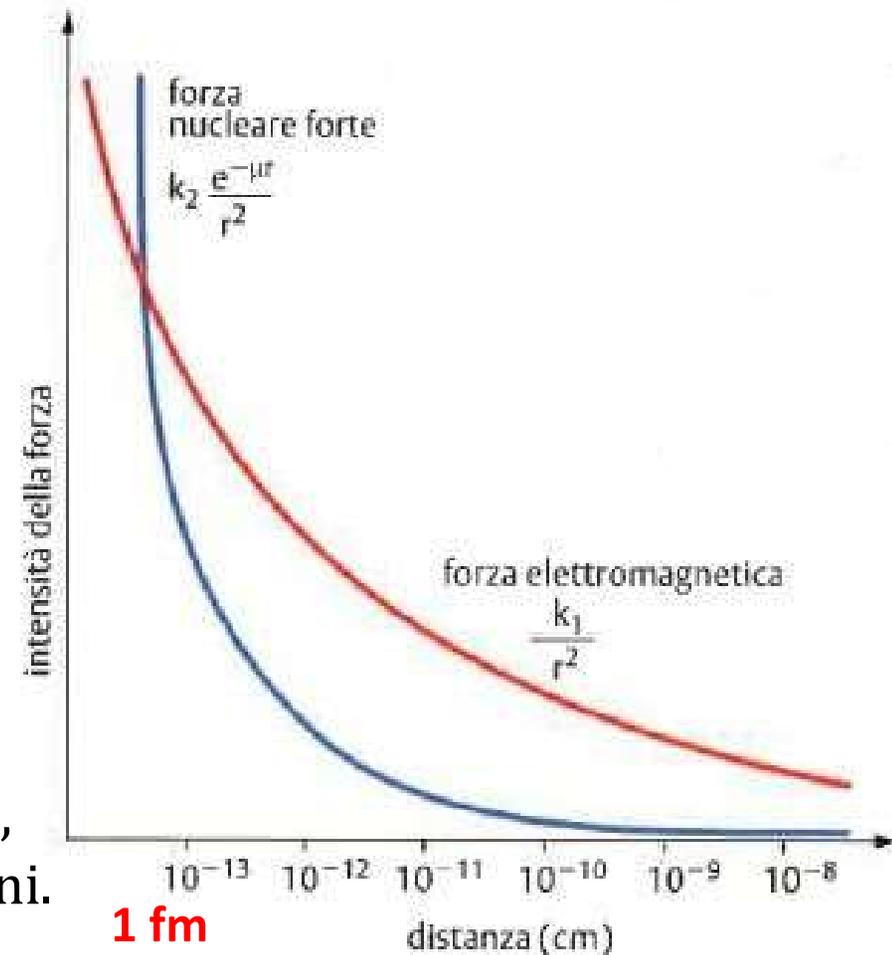
La Fisica Nucleare (Ettore Majorana) indica la via di una soluzione per spiegare la stabilità dei nuclei atomici: l'esistenza di altre forze attrattive tra nucleoni (anche con carica dello stesso segno) chiamate **forze nucleari** o **interazione nucleare forte**.

Esse devono essere:

- **molto intense**, per poter tenere insieme, a distanza piccolissima, molti protoni con la stessa carica,
- **inefficaci** al di fuori del nucleo atomico stesso.

Sono attive a distanze  $d < 10^{-15}$  m, ma inefficaci a distanze maggiori.

Sono **indipendenti** dal segno della carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra protoni e protoni.



# forze ed energia



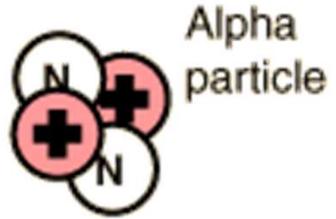
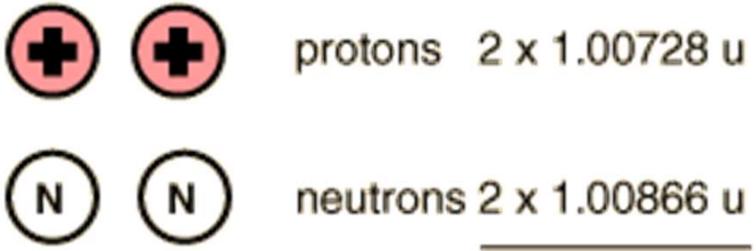
Si **osserva** che, per qualunque nucleo con più nucleoni si ha un difetto di massa  $\Delta\mathcal{M} = \Sigma m - M > 0$ , cioè:

la massa **M** del nucleo è **minore** della somma  $\Sigma m$  delle masse di tutti i nucleoni in esso contenuti.

Data l'equivalenza tra massa ed energia, secondo la relazione di **Einstein**, al difetto di massa  $\Delta\mathcal{M}$  corrisponde quindi una energia che è chiamata energia di **legame** (Binding Energy BE):

$$\Delta E = BE = \Sigma(mc^2) - Mc^2 = \Delta\mathcal{M}c^2$$

Esempio: nucleo di He  
(2 protoni+2 neutroni)



$$\Delta\mathcal{M} = 0.03035 \text{ u}$$

$$\Delta E = 4.5358 \text{ pJ}$$

$$= 28.3134 \text{ MeV}$$

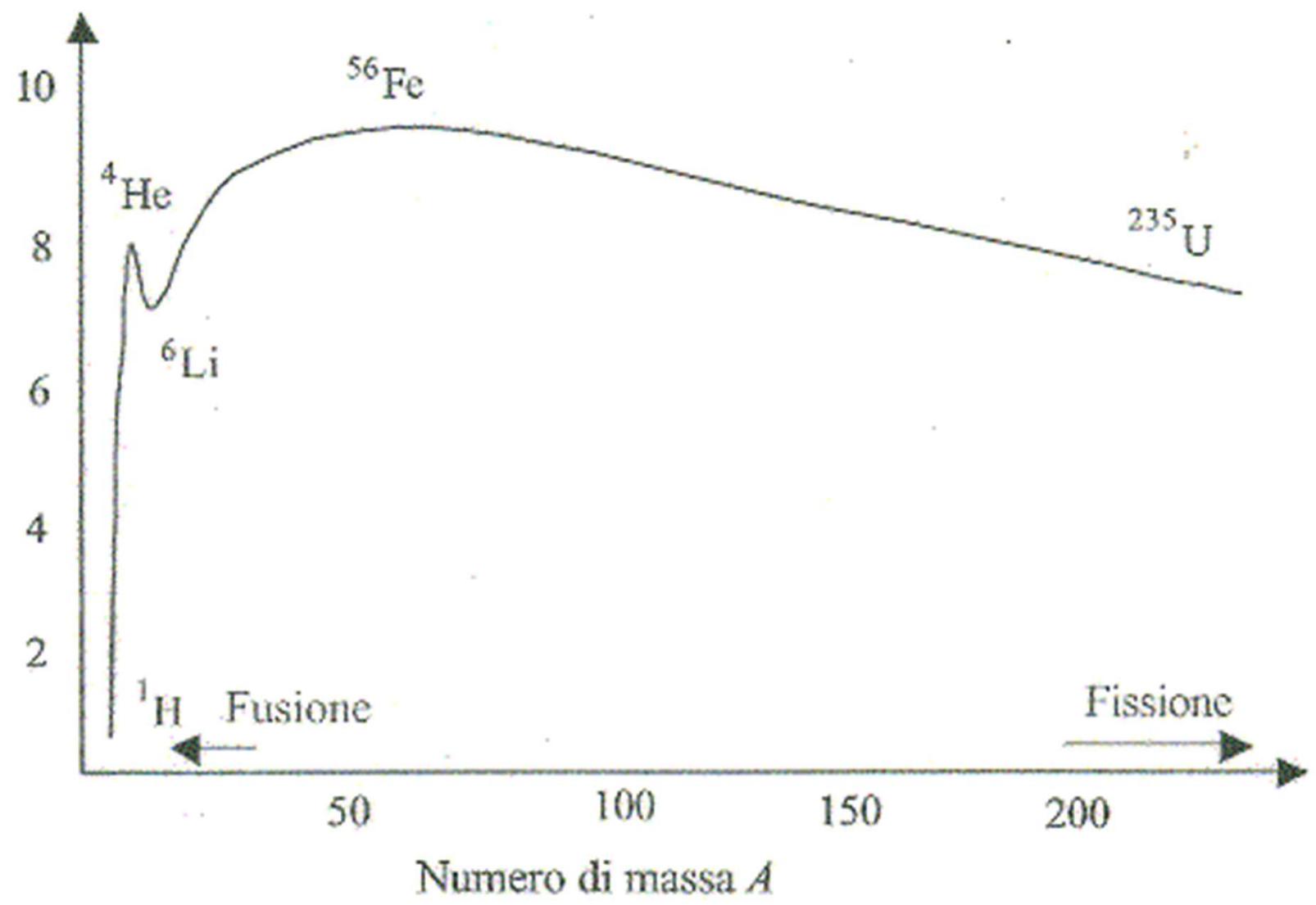
Mass of parts                      4.03188 u      Mass of alpha      4.00153 u

$$1 \text{ u} = 1.66054 \times 10^{-27} \text{ kg} = 931.494 \text{ MeV}/c^2$$

# forze ed energia



Energia di legame per nucleone (MeV)



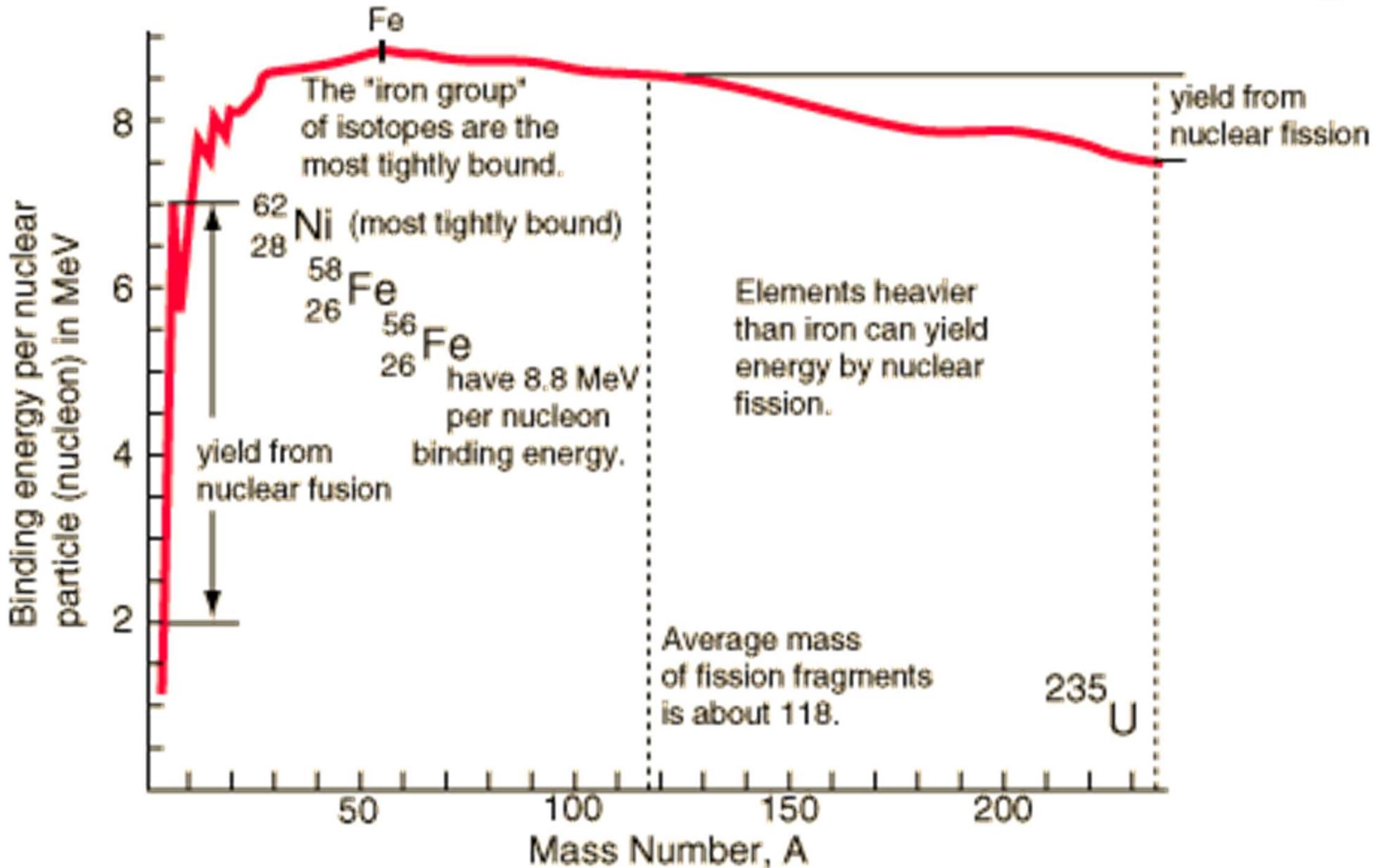
Mediamente (esclusi i nuclei più leggeri) si ha che l'energia di legame vale circa 8-9 MeV per nucleone: energia che occorre fornire per estrarre un nucleone dal nucleo.

# forze ed energia



- il Fe ( $A=56=30n+26p$ ) è il nucleo più stabile (richiede l'energia massima per estrarre un nucleone),
- gli elementi più leggeri, all'aumentare di  $A$ , aumentano l'energia di legame per nucleone, mentre gli elementi più pesanti l'energia diminuisce all'aumentare di  $A$ ,
- l'energia di legame per nucleone è l'energia che devo spendere per estrarre un nucleone dal nucleo,
- per ottenere energia (reazioni esoterme) dovremmo produrre reazioni che portano da uno stato ad energia di legame inferiore ad uno con energia di legame superiore (quindi più stabili):
  - **fusione** per elementi più leggeri del Fe
  - **fissione** per elementi più pesanti del Fe

# forze ed energia



# reazioni nucleari



Col termine **reazione nucleare** si intende un evento nel quale il numero di nucleoni all'interno di un **nucleo viene variato**, tramite aggiunta, estrazione o scambio tra nuclei, come gli elettroni che venivano scambiati tra atomi in una reazione chimica.

Anche la **radioattività** è una forma di reazione nucleare: decadimento alfa (nuclei di He), beta (elettroni) o gamma (fotoni). L'emissione spontanea di particelle e/o radiazioni dal nucleo di un atomo è un fenomeno **naturale**, scoperto nel 1896 da Henri Becquerel che notò che una lastra fotografica s'anneriva se posta nelle vicinanze di un minerale contenente composti dell'uranio.

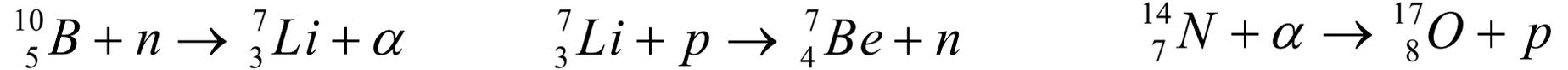
Le reazioni nucleari possono essere:

- esotermiche (la massa diminuisce e l'energia cinetica aumenta),
- endotermiche (la massa aumenta e l'energia cinetica diminuisce).

# reazioni nucleari



alcune reazioni nucleari



Due reazioni nucleari rivestono una **particolare importanza** per la produzione di energia:

Reazione di **Fissione**:  $U^{235} + n \rightarrow Rb^{93} + Cs^{140} + 3n$  (+200 MeV)

Reazione di **Fusione**:  $H^2 + H^3 \rightarrow He^4 + n$  (+17.6 MeV)



Un parametro caratteristico di ogni reazione nucleare è la **sezione d'urto**  $\sigma$ : essa fornisce una indicazione della probabilità che ha tale reazione di avvenire.

La  $\sigma$  rappresenta l'**area** con cui una particella incidente (proiettile) vede il nucleo (bersaglio).

Infatti, per oggetti macroscopici è l'area (sezione dell'oggetto) perpendicolare alla direzione della particella incidente.

Le dimensioni della sezione d'urto sono quindi quelle di un'area: si misura in  $\text{cm}^2$  o barns b, dove  $1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2$ .

La sezione d'urto per una certa reazione nucleare dipende:

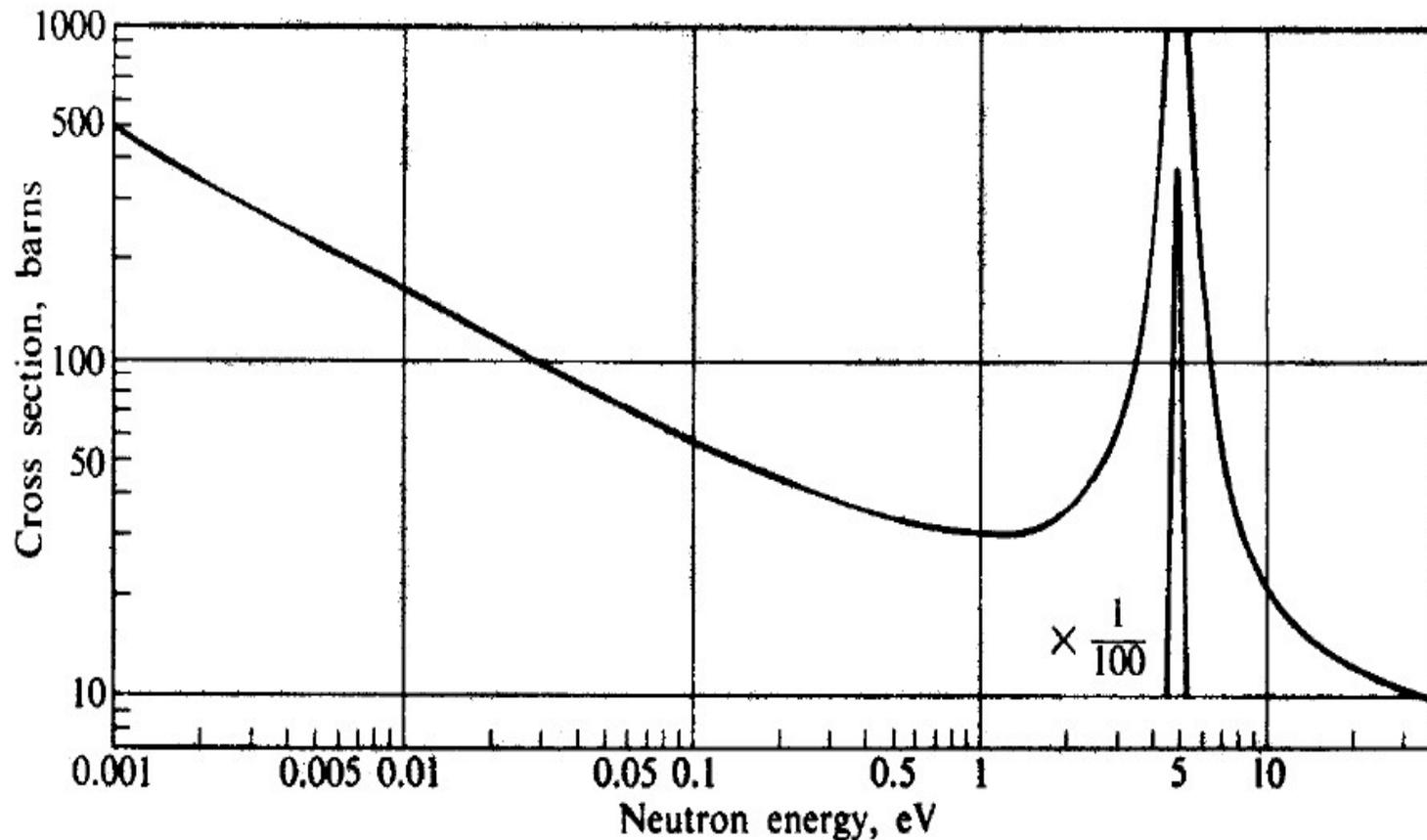
- dal tipo di particella incidente,
- dal nuclide bersaglio,
- dalla energia della particella incidente.

# reazioni nucleari



Consideriamo il caso di un **neutrone** come particella incidente. In generale, la  $\sigma$  decresce con l'aumentare della energia del neutrone. Tuttavia per certi valori di energia la  $\sigma$  può presentare un valore molto elevato. Si dice allora che la sezione d'urto ha una **risonanza** per quel valor di energia.

Esempio:  $\sigma$  di un neutrone da parte di un nucleo di  $^{197}\text{Au}$





1. assumiamo una struttura atomica di tipo planetario (nucleo piccolo, pesante e positivo, ed elettroni leggeri e negativi in orbita),
2. i nucleoni sono legati tra loro dalla forza nucleare forte,
3. la massa dei nucleoni legati differisce dalla massa dei nucleoni isolati,
4. per ogni nucleo si definisce l'energia di legame per nucleone,
5. per ottenere energia da una trasformazione nucleare, occorre:
  - rompere nuclei più pesanti del Ferro
  - oppure
  - fondere nuclei più leggeri del Ferro,
6. una reazione nucleare avviene tramite urti, la cui probabilità dipende dalle caratteristiche del sistema.



**FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI**

# Energia dalle reazioni nucleari

*Federico Porcù ([federico.porcu@unibo.it](mailto:federico.porcu@unibo.it))  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Università di Bologna*



**reazione di fusione;**

**reazione di fissione;**

**reattori nucleari a fissione;**

**il progetto ITER.**

# reazioni nucleari: fusione



Affinché avvenga una reazione di fusione nucleare è necessario che i due nuclei si **avvicinino** a distanze equivalenti alle dimensioni del nucleo.

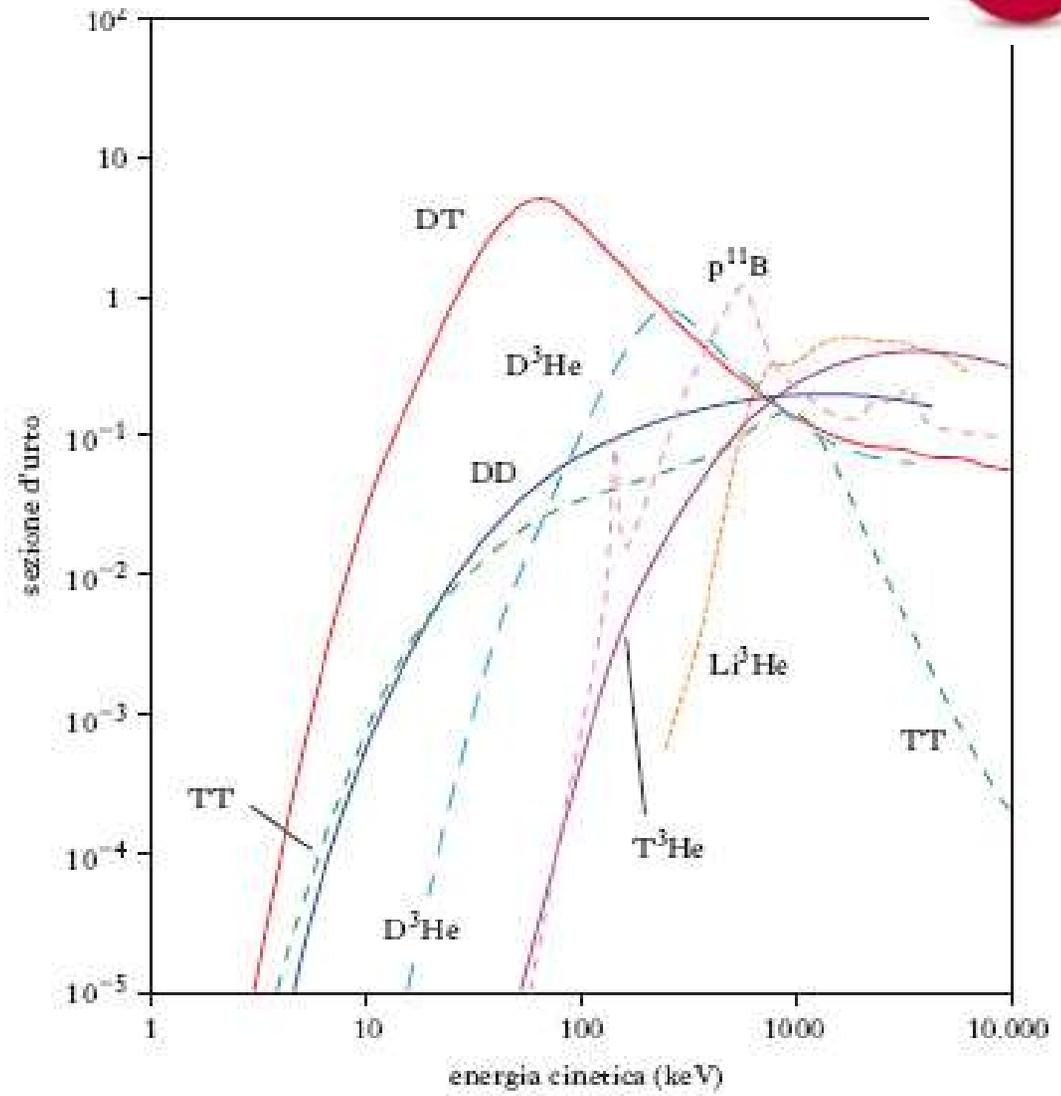
Poiché essi sono entrambi carichi positivamente, tenderanno a respingersi senza interagire. Esiste cioè una **barriera energetica** che impedisce la loro interazione (cioè la fusione).

Occorrerà allora fornire ai due nuclei una **energia sufficiente** per superare tale barriera e farli arrivare ad una distanza così piccola dove predominino le forze nucleari, in grado di superare la repulsione elettrostatica.

La probabilità di superare tale barriera è, anche in questo caso, quantificata dalla **sezione d'urto di fusione** che è funzione dell'energia posseduta dai nuclei interagenti. Più grande è tale grandezza, più elevata è la probabilità di interazione tra i due nuclei leggeri.

Si può rendere elevata tale probabilità facendo sì che la velocità con cui i nuclei leggeri si urtano sia molto alta: cioè la loro energia cinetica (e quindi la **temperatura**) deve essere molto elevata.

# reazioni nucleari: fusione



Appare evidente, osservando gli andamenti delle sezioni efficaci di varie reazioni possibili, che la reazione tra **D** e **T** è quella che presenta valori elevati anche per valori non estremamente elevati di energia: essa è pertanto più facilmente realizzabile.

# reazioni nucleari: fusione



Per ottenere in laboratorio reazioni di fusione è necessario, ad esempio, portare una miscela di deuterio e trizio a **temperature elevatissime** (100 milioni di gradi corrispondenti ad energie di circa 10 keV) per tempi sufficientemente lunghi. In tal modo i nuclei hanno tempo di fare molte **collisioni**, aumentando la probabilità di dar luogo a reazioni di fusione.

A temperatura ordinaria un gas è costituito da particelle (atomi o molecole) neutre; viceversa a temperatura superiore a qualche eV (cioè qualche migliaio di gradi), poiché le singole particelle tendono a dissociarsi negli elementi costitutivi (ioni positivi, cioè nuclei, ed elettroni) il gas si trasforma in una miscela di particelle cariche, cioè un **plasma**.

Due domande:

- quanta energia serve per scaldare il plasma?
- come contengo il plasma?

# reazioni nucleari: fusione



Vista la enorme quantità di energia necessaria a **scaldare** il plasma, dobbiamo valutare se la reazione di fusione produce una quantità di energia superiore a quella **spesa** per innescarla.

Il fattore di **guadagno Q** della fusione è definito come il rapporto fra la potenza nucleare  $P_N$  prodotta in un reattore nucleare a fusione e la potenza di riscaldamento  $P_H$  spesa per mantenere il plasma in equilibrio e per riscaldarlo, cioè per mantenere il reattore in uno stato **stazionario**:

$$Q = P_N / P_H.$$

La condizione  $Q = 1$  (condizione minima per mantenere attiva la reazione di fusione) è detta condizione di **pareggio** o di *breakeven*.

E' necessario quindi ottenere  $Q > 1$ , in cui la potenza immessa viene completamente trasformata in potenza da fusione perché inevitabili processi di **perdita** di potenza nel plasma (conduzione termica, Bremsstrahlung, ecc.) sono **irreversibili** e, se non adeguatamente bilanciati da un eccesso di potenza in ingresso, portano allo **spegnersi** della reazione di fusione.

# reazioni nucleari: fusione



La condizione ideale è quella in cui il plasma si **autosostiene**, senza la necessità di immettere potenza dall'esterno (in modo simile a quanto succede nel sole e nelle altre stelle): questa condizione implica  $P_H = 0$  e corrisponde a  $Q = \infty$ , ed è detta **condizione di ignizione**.

Criterio di ignizione ci dice quali sono le **condizioni** di esercizio dell'ipotetica centrale a fusione per ottenere le condizioni di ignizione.

$$n\tau_E T \geq 3 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$$

$n$	numero di particelle per unità di volume	$\approx 1.5 \cdot 10^{20} \text{ m}^{-3}$
$\tau_E$	tempo di confinamento del plasma	$\approx 1 \text{ s}$
$T$	temperatura del plasma	$\approx 20 \text{ keV} = 232 \cdot 10^6 \text{ K}$

**progetto ITER**

Il plasma va confinato per un tempo sufficientemente lungo, ci sono due tre opzioni: confinamento **magnetico**, confinamento **inerziale** e «**proiettile**».



## Confinamento magnetico

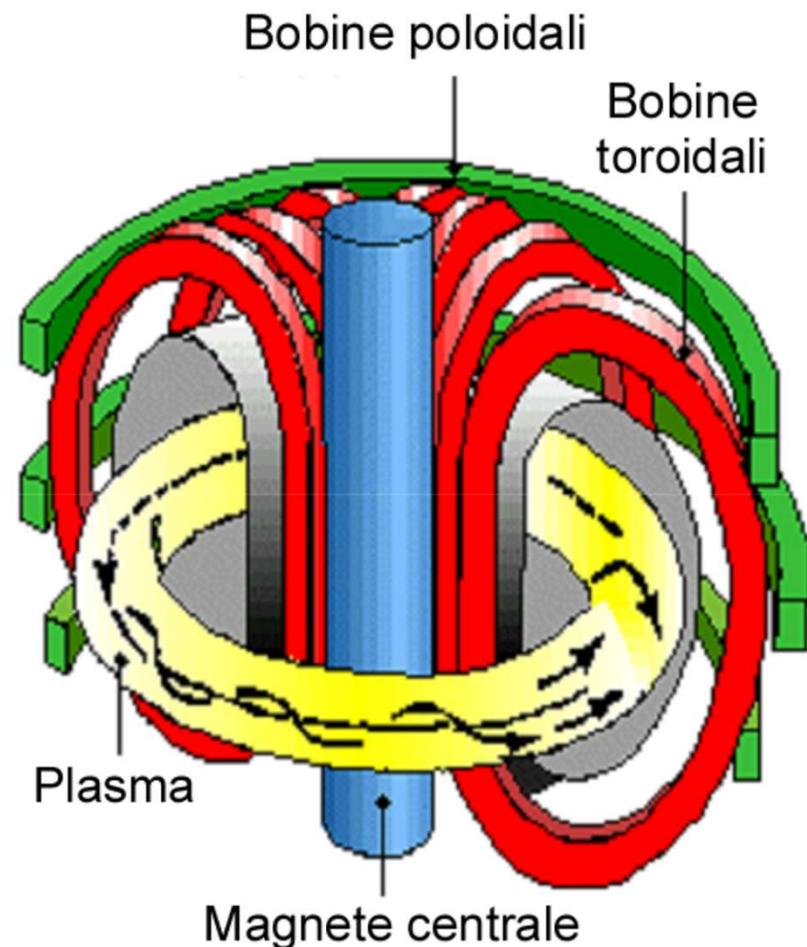
Il plasma è composto da particelle cariche che in presenza di un campo magnetico di intensità  $B$  sono sottoposte alla **forza di Lorenz**:

$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

Creando un campo magnetico di forma opportuna si può fare in modo che le particelle restino confinate in uno spazio ristretto senza interagire con altro materiale.

Si fa in modo che le particelle di plasma si muovano secondo traiettorie **elicoidali**, grazie ad un campo magnetico toroidale ed uno poloidale, generati da potenti **elettromagneti**. Una tale struttura è detta **Tokamak**.

$$B \approx 3.5 - 12 \text{ T}$$
$$i \approx 15 \text{ MA}$$



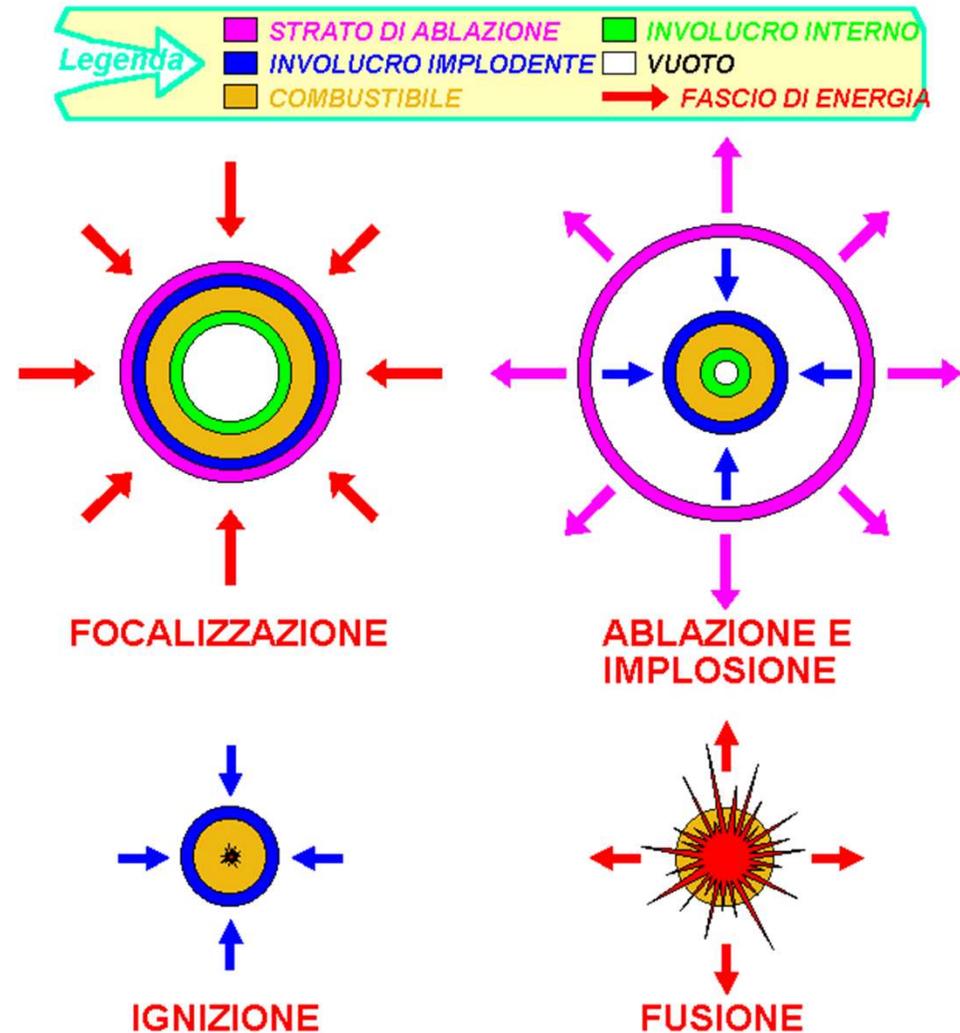
# reazioni nucleari: fusione



## Confinamento inerziale

Una sferetta di combustibile (circa 0.1 mg di D + T, allo stato solido per la temperatura criogenica) di circa 2 mm di diametro che viene fortemente **compressa** (a più di mille volte la densità di un liquido) fino a che nel suo centro non si **innesca** la reazione di fusione (ignizione), che si propaga nel combustibile freddo circostante.

La compressione può avvenire attraverso fasci di luce laser, elettroni o ioni che causa la vaporizzazione istantanea del guscio della sfera. Per la **conservazione della quantità di moto** la parte interna contenente il combustibile viene compressa.



## Confinamento inerziale

L'energia per comprimere e riscaldare il combustibile viene somministrata allo strato esterno del bersaglio usando prevalentemente raggi di luce **laser** ad alta energia ( $10^{18}$ – $10^{19}$  Wm<sup>-2</sup>).

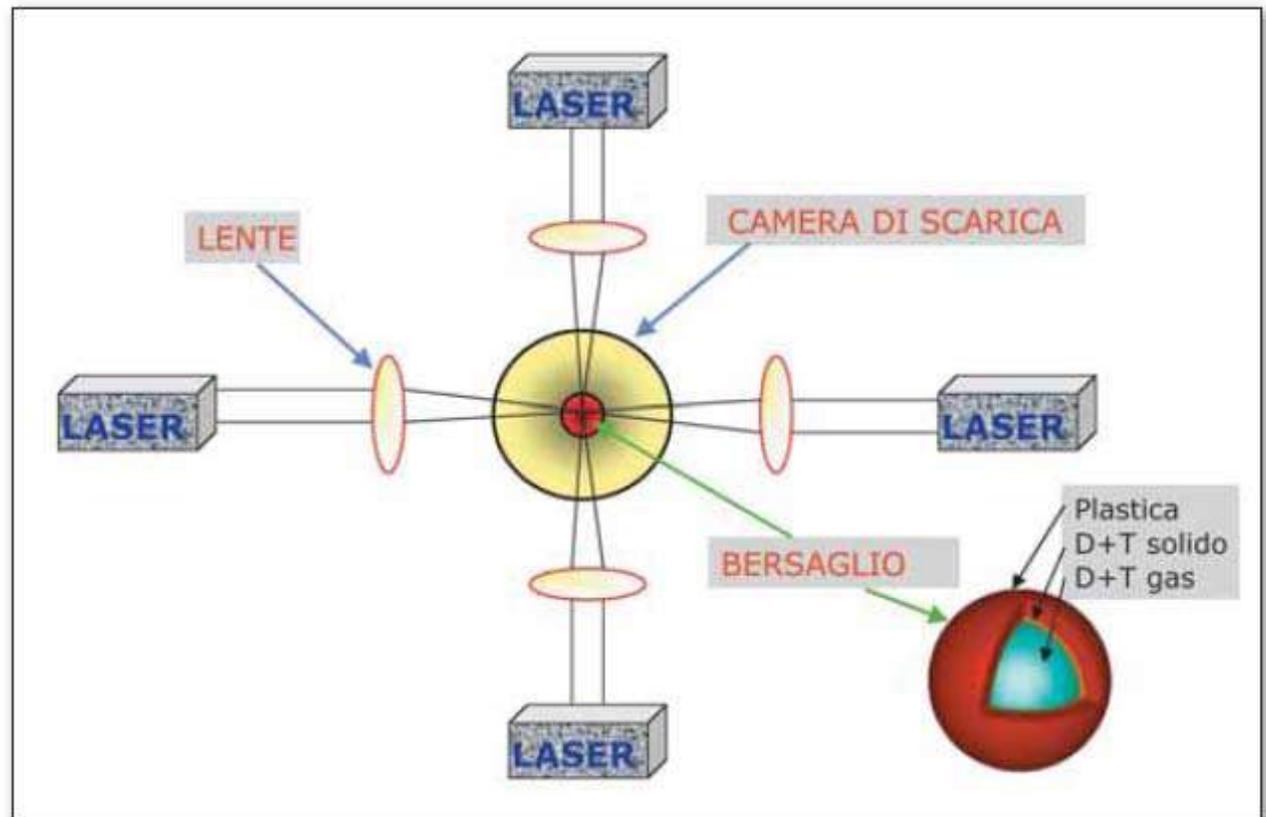
L'ignizione dura fintanto che il combustibile rimane confinato dalla propria inerzia. Il confinamento inerziale è stazionario

$$n \approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$$

$$\tau_E \approx 10^{-11} \text{ s.}$$

Nel 2013, presso il NIF del

Laboratorio di Livermore negli Stati Uniti viene per la prima volta raggiunto il **punto di pareggio** con la tecnica di fusione a confinamento inerziale.



# reazioni nucleari: fusione



Il confinamento magnetico in genere fornisce:

basse densità ( $n \approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$ ) e tempi di confinamento alti ( $\tau_E \approx 1 \text{ s}$ ) per un volume di plasma di circa  $1000 \text{ m}^3$ )

Il confinamento inerziale in genere fornisce:

alte densità ( $n \approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$ ) e tempi di confinamento piccoli ( $\tau_E \approx 10^{-10} \text{ s}$ ) per un volume plasma attorno ai  $10^{-12} \text{ m}^3$ )

In Europa (progetto **ITER**) si preferisce la via del confinamento magnetico, mentre negli Stati Uniti si studia maggiormente i sistemi a confinamento inerziale, nella **National Ignition Facility**.

# reazioni nucleari: fusione



La First Light Fusion, spinoff dell'Università di Oxford, ha collaudato un **nuovo approccio** per ottenere la fusione, più semplice ed economico, definito “**a proiettile**”, certificando la produzione di neutroni coerenti con quelli ottenuti dalla fusione del deuterio adottato negli altri sistemi, anche se in numero limitato (circa 50)

«la fusione a proiettile rappresenta una nuova via più semplice ed efficiente dal punto di vista energetico e presenta un rischio fisico inferiore» e una spesa **di 45 milioni di sterline** mentre il progetto internazionale Iter richiede un investimento **di 20 miliardi di dollari**.

Viene sparato un proiettile contro un bersaglio costituito di pastiglie di deuterio alla velocità di 23.400 km/h. L'impatto genera una serie di onde d'urto ed effetti di cavitazione che insieme intensificano l'effetto della pressione **passando da 100 GPa a 100 TPa**, innescando la reazione di fusione. L'energia termica è assorbita da uno strato di litio metallico di un metro di spessore. Da qui, con uno scambiatore di calore, si azionano le turbine da cui ricavare elettricità.

# reazioni nucleari: fusione



Secondo la First Light Fusion ogni bersaglio può generare energia per alimentare il fabbisogno elettrico di una casa media per due anni. In una centrale commerciale il fenomeno si può produrre ogni **30 secondi** consentendo all'impianto di raggiungere una potenza di 744 MW (per confronto il reattore a fissione AP1000 prodotto da Toshiba-Westinghouse Electric Company genera 1154 MW).

E' in programma la costruzione di un impianto pilota commerciale del costo di 1 miliardo di dollari in grado di produrre 150 MW che dovrebbe essere pronto per il **2030/40**.

«In realtà non sono state fornite ulteriori informazioni dettagliate sulla precisione con cui questi neutroni siano stati misurati, o sulla conformazione **reale** dell'esperimento, e che ci aspettiamo a breve su qualche rivista internazionale con lavori sottoposti a peer-review. L'esperimento fornisce, comunque, risultati **incoraggianti** verso questo tipo di approccio di fusione inerziale, che chiaramente necessita di ulteriori ed importanti conferme»



## Come si scalda il plasma?

- 1) Riscaldamento ohmico: viene ottenuto tramite il **solenoid** che produce il campo toroidale, mediante l'incremento del flusso di corrente nel solenoide stesso. Il plasma si comporta come il secondario di un **trasformatore**. Questo sistema introduce però una limitazione: le fasi di riscaldamento devono essere impulsate.
- 2) Riscaldamento a radio-frequenza: si irradia il plasma con **onde** elettromagnetiche della **frequenza propria** di rotazione degli ioni all'interno del toro. Questo sistema introduce instabilità all'interno del plasma e ha richiesto studi approfonditi per il suo utilizzo in Tokamak sempre più grandi e vicini all'ignizione.
- 3) Iniezione di atomi neutri ad alta energia: **atomi** vengono ionizzati e accelerati da un campo elettrico, se ne si ripristina poi la carica elettrica neutra e li si lascia entrare nel flusso del plasma. Qui vengono nuovamente ionizzati per urto con il plasma ed entrano a far parte del sistema stesso. Il plasma si scalda in seguito agli **urti** con questi ioni, che trasferiscono il loro eccesso di energia.

# reazioni nucleari: fusione nel Sole



All'interno del Sole (nana gialla), composto, in massa, per il 75% da **H** ed il 25% da **He**, più elementi più pesanti in tracce, si trovano le seguenti condizioni:

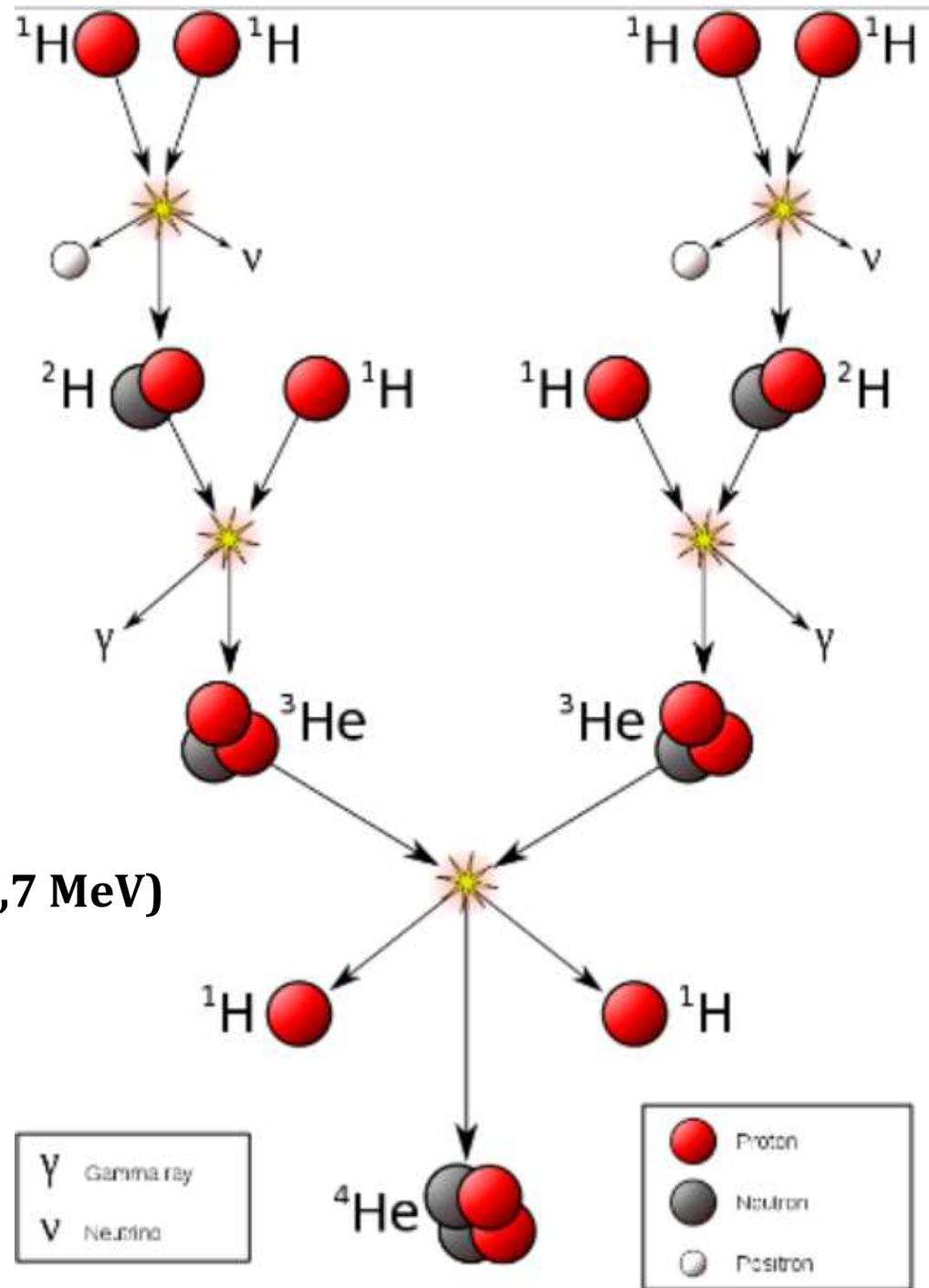
temperatura  $\sim 15.7 \cdot 10^6 \text{ K}$ , densità  $\sim 1.5 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-3}$

dovute alla forza gravitazionale esercitata dalla enorme massa del Sole ( $M_{\text{S}} \sim 2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$ )

Ciò rende possibile la fusione di circa  $3.5 \cdot 10^{38}$  protoni al secondo

In 1 secondo l'energia emessa dal Sole è  $3,83 \times 10^{26} \text{ J} \sim 106.4 \cdot 10^9 \text{ TWh}$  circa uguale a tutta l'energia producibile sulla terra (con tassi attuali) per  $4.5 \cdot 10^6$  anni.

# reazioni nucleari: fusione nel Sole



Una delle reazioni nucleari presenti nel Sole è la catena protone-protone, che avviene attraverso stadi intermedi e si può riassumere come:



Federico Porcù, Dip. di Fisica ed Astronomia,  
Alma Mater Studiorum - Università di Bologna  
federico.porcu@unibo.it



**FONDAZIONE  
GIUSEPPE OCCHIALINI**

## 06.05 Energia I

problema energetico, struttura atomica,  
fissione nucleare

## 06.06 Energia II

fusione nucleare, centrali nucleari, energie  
rinnovabili

## 07.06 Clima

sistema climatico, osservazione, modellazione  
e tendenze

# riassunto della lezione del 06.05



La fornitura di **energia** in modo **equo**, **sicuro** e **sostenibile** a chiunque serva è un problema fondamentale per l'umanità, che richiede la sinergia tra diverse ambiti di ricerca.

**Classificazione** delle fonti energetiche e **LCSA** sono necessarie per le scelte.

E' possibile ottenere più energia per unità di massa di combustibile utilizzando **reazione nucleari** invece che reazioni chimiche.

Modificando il nucleo dell'atomo, dove agiscono **forze** molto intense, si può liberare una grande quantità di energia grazie alla perdita di una piccola quantità di massa legando diversamente i **nucleoni** tra di loro.

**Fusione** di nuclei leggeri e **fissione** di nuclei pesanti.

La **fusione**, che avviene naturalmente nelle **stelle**, richiede che il combustibile venga **riscaldato** ( $10^8$  K) e **confinato** per tempi tali da innescare la reazione, comportando un elevato **investimento** di energia.

I prodotti della **fusione** (nuclei di He) hanno **impatto trascurabile** sull'ambiente.

La costruzione di una **centrale a fusione** non è prevista a breve tempo, viste le difficoltà di tipo tecnologico per soddisfare il **criterio di ignizione**.



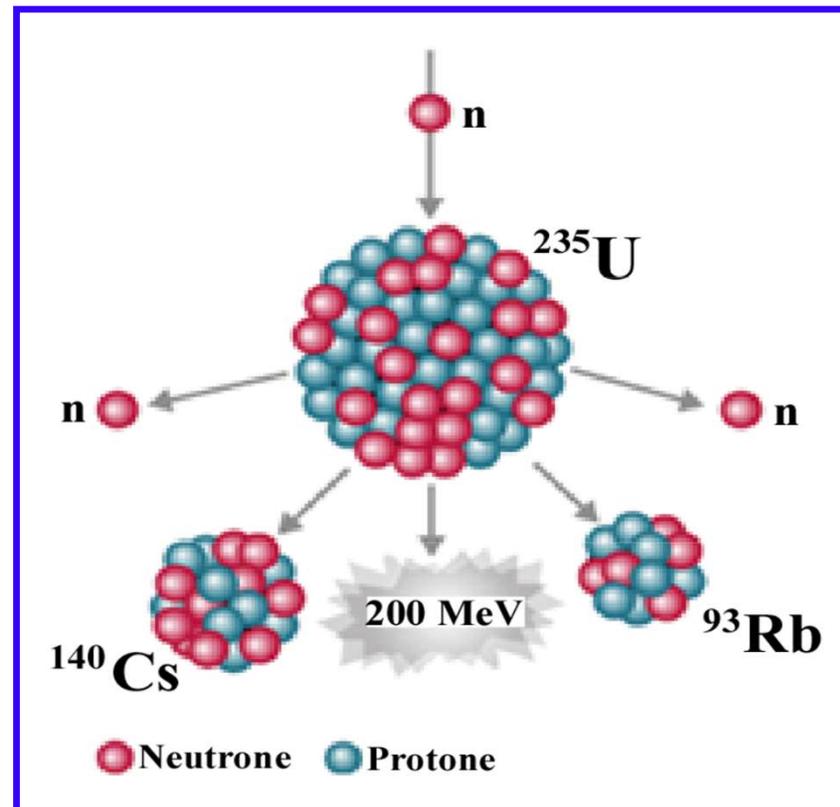
**fissione nucleare,  
centrali nucleari a fissione,  
un reattore sperimentale a fusione,  
centrali a combustibili fossili,  
energie rinnovabili.**

# reazioni nucleari: fissione



Affinché avvenga una reazione di fissione nucleare è necessario che un **nucleo pesante** (più del Fe) si scinda in due nuclei più **leggeri**: questo avviene se il nucleo viene **colpito** da una particella di opportuna energia.

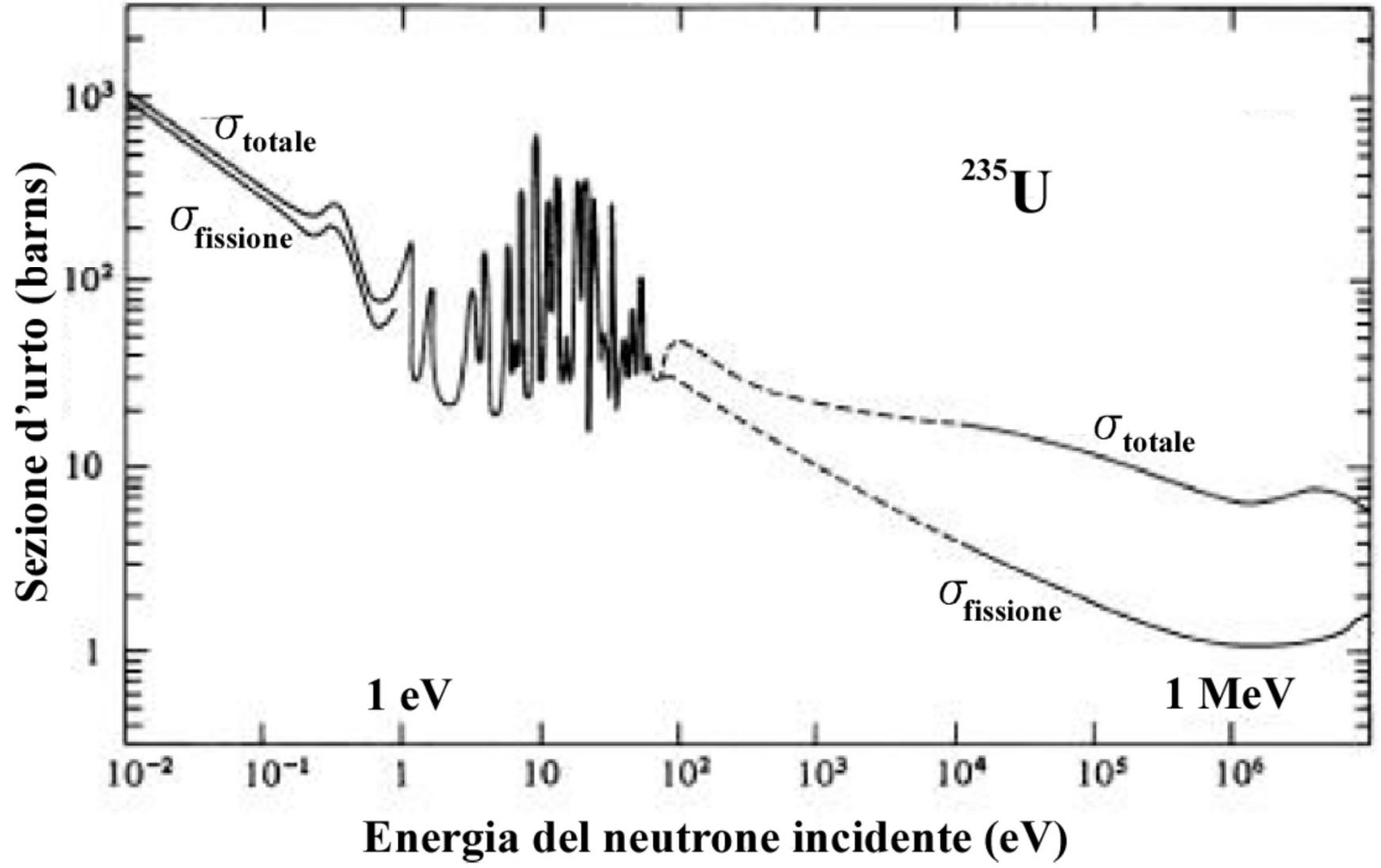
Il **difetto di massa** porta alla liberazione di energia. Ad esempio, nella fissione dell'isotopo 235 dell'uranio ( $U^{235}$ ) mediante un neutrone lento (o termico) si libera una energia di circa 200 MeV (cioè  $3.2 \times 10^{-11}$  J).



# reazioni nucleari: fissione



Sezione d'urto per un neutrone dell' $U^{235}$   $E_n = \frac{1}{2} m_n v_n^2$



# reazioni nucleari: fissione

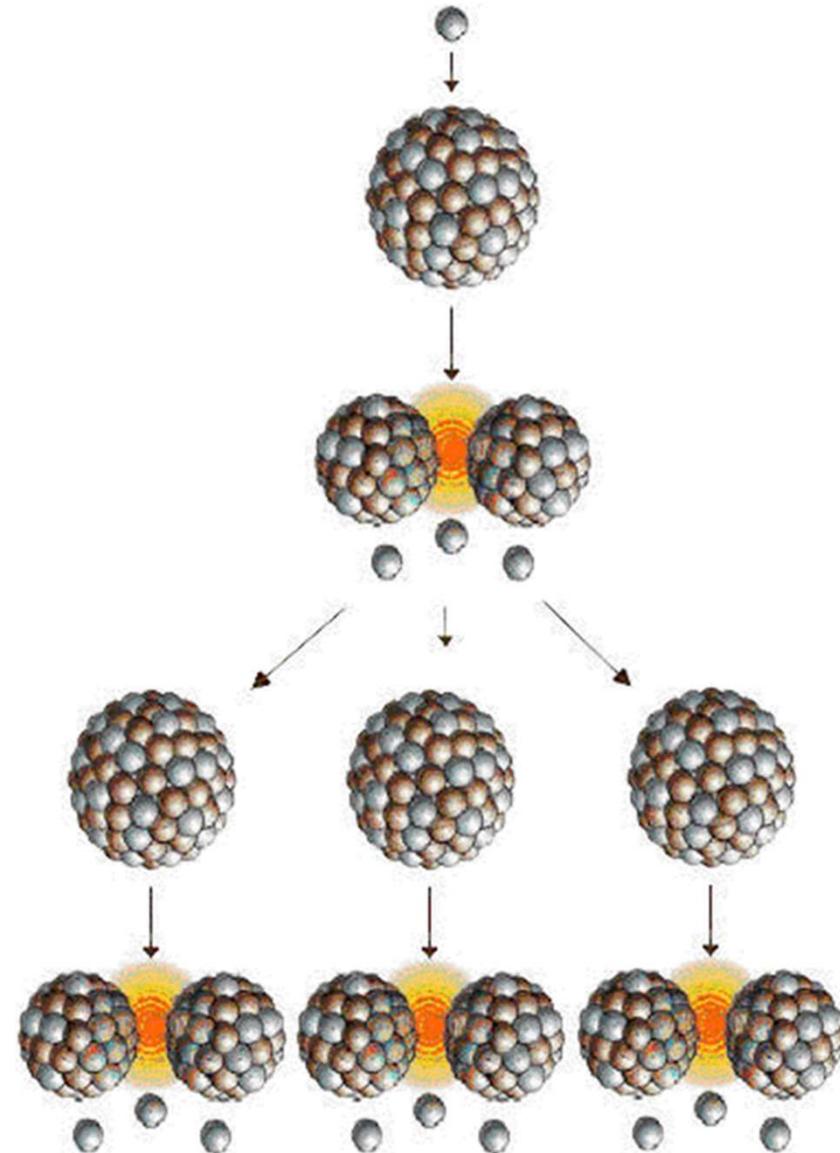


I neutroni prodotti in una reazione di fissione possono poi, a loro volta, colpire altri nuclei fissili dando quindi luogo ad una **reazione a catena**, in grado di proseguire fino a quando sia disponibili materiale fissile.

I **neutroni** non avendo carica elettrica sono particolarmente idonei per la fissione perché non vengono respinti dalle cariche positive del nucleo.

I neutroni usciti dalla fissione sono però molto energetici (200 MeV) e vanno **rallentati** perché possano produrre altre reazioni.

L'energia tolta ai neutroni viene utilizzata dai reattori per **scaldare** acqua.



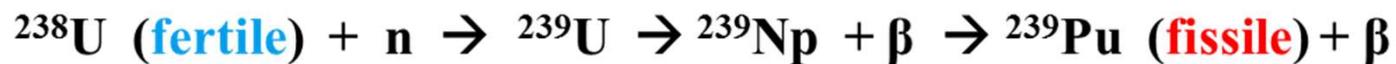
# reazioni nucleari: fissione



La produzione di energia da reazioni nucleari di fissione può essere realizzata utilizzando come “combustibile” vari elementi chimici quali, ad esempio, **Uranio** U e **Torio** Th (che esistono in natura) e **Plutonio** Pu (prodotto artificialmente da reazioni nucleari). Di ognuno di tali elementi esistono diversi isotopi.

Alcuni isotopi sono **fissili**: se i loro nuclei sono colpiti da neutroni di energia opportuna possono subire la reazione di fissione del nucleo. In questo caso, si producono due nuclei più leggeri del nucleo bersaglio e alcuni (solitamente 2 o 3) neutroni (veloci). La massa totale dei “prodotti” risulta leggermente inferiore alla massa dei “reagenti” (nucleo bersaglio più neutrone incidente). La differenza di massa si trasforma in energia (convertita quasi completamente in calore).

Altri isotopi, detti **fertili**, possono (mediante reazioni nucleari) produrre nuclidi fissili. Ad esempio:



# reazioni nucleari: fissione



Tra gli elementi utilizzati come combustibile nei reattori nucleari quello largamente più usato è l'**Uranio**. Esso esiste in natura fondamentalmente sotto forma di due diversi isotopi: uno **fissile** mediante neutroni termici ( $U^{235}$ ) ed uno non-fissile con neutroni termici ( $U^{238}$ ) ma solo con neutroni veloci. Quest'ultimo isotopo (**fertile**) mediante una reazione nucleare può trasformarsi nell'isotopo 239 del Plutonio ( $Pu^{239}$ ), anch'esso fissionabile, anche mediante neutroni termici.

Il processo di produzione di  $Pu^{239}$  è particolarmente rilevante nei reattori nucleari **veloci** nei quali non è richiesta la moderazione dei neutroni prodotti nella fissione. Inoltre, il numero di neutroni prodotti nella fissione del  $Pu^{239}$  è sensibilmente più elevato con neutroni veloci.

Dei due isotopi naturali dell'Uranio, quello fissile è presente in piccola percentuale, pari a **0.7%** circa. In molti tipi di impianti nucleari ad uranio è necessario, per poter mantenere la reazione a catena, **aumentare** la percentuale di  $^{235}U$  presente nel combustibile nucleare: ciò è ottenuto mediante un processo di **arricchimento** isotopico.

# reattori nucleari a fissione



Poiché l'energia dei neutroni prodotti dalla fissione di un nucleo fissile è troppo elevata per poter dare luogo con probabilità non trascurabile a nuove fissioni e quindi a consentire la **reazione a catena**, si rende necessario diminuire l'energia cinetica dei neutroni (cioè rallentarli, o moderarli) fino a che essa non raggiunga un valore per la quale la **sezione d'urto** di fissione dei nuclei fissili è sufficientemente elevata.

Attualmente gli impianti nucleari nei quali si sfrutta questo fenomeno per la produzione di energia (termica, come energia primaria, ed elettrica, come energia secondaria) sono i **reattori nucleari termici**.

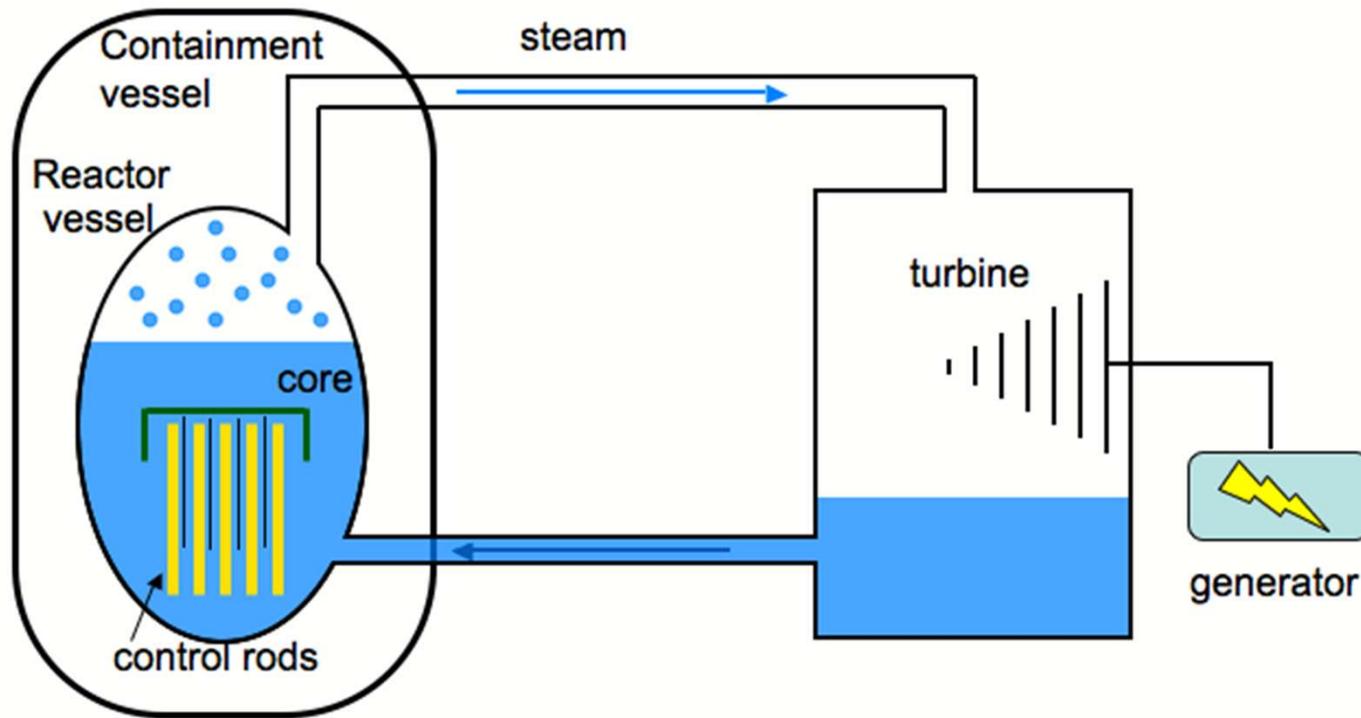
Indipendentemente dal tipo di reattore nucleare utilizzato per la produzione di energia elettrica, il calore prodotto dalle reazioni di fissione riscalda un fluido refrigerante che viene poi utilizzato per produrre vapore che entra in una turbina collegata ad un generatore di corrente elettrica.

energia chimica → termica → cinetica → meccanica → elettrica  
energia nucleare → termica → cinetica → meccanica → elettrica

# reattori nucleari a fissione



Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione Boiling Water Reactor (BWR) simile agli impianti coinvolti nell'incidente di Fukushima. Il calore sviluppato dalla reazione di fissione nel reattore viene trasferito all'acqua che si trasforma in vapore all'interno del contenitore (vessel) del reattore. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente.

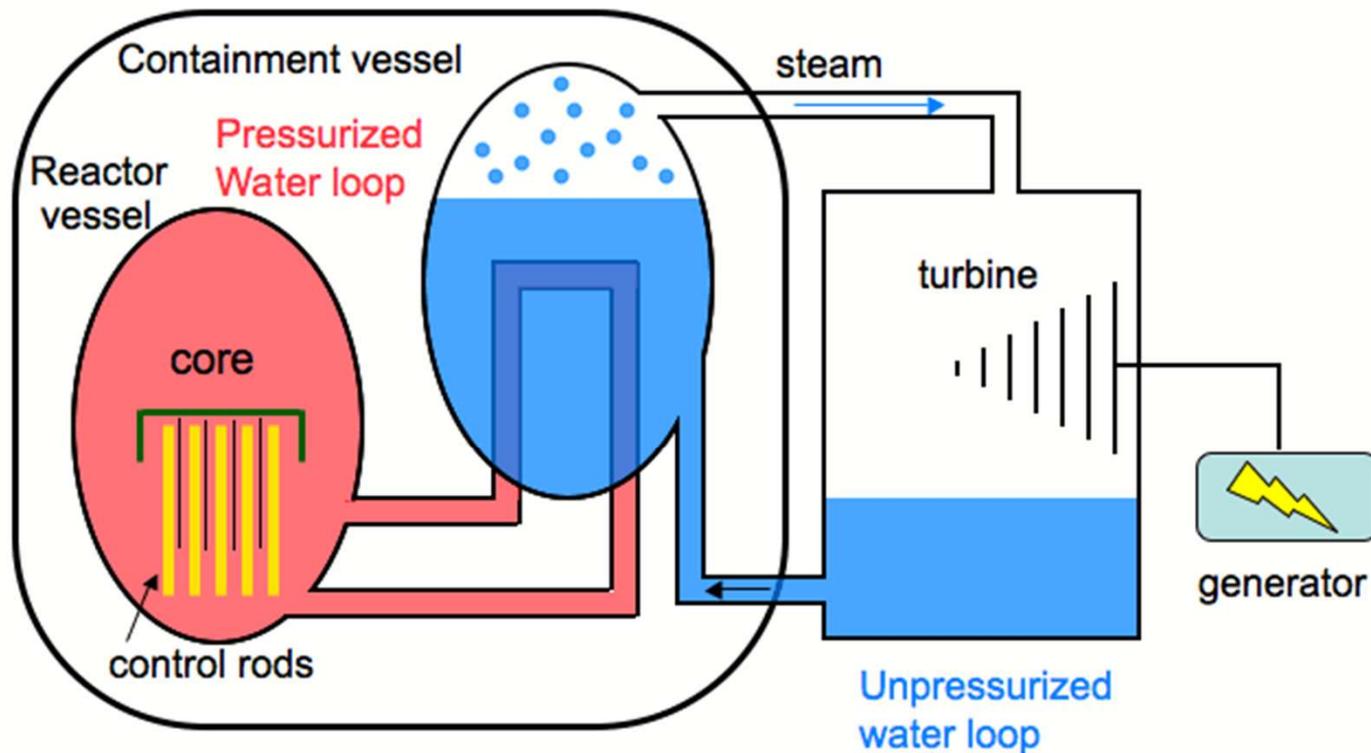


Boiling Water Reactor

# reattori nucleari a fissione



Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione Pressurized Water Reactor (PWR). Il calore sviluppato dalla reazione di fissione all'interno del reattore viene trasferito tramite un fluido refrigerante a un flusso di acqua che genera vapore. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente che alimenterà la rete elettrica.



Pressurized Water Reactor

# reattori nucleari a fissione

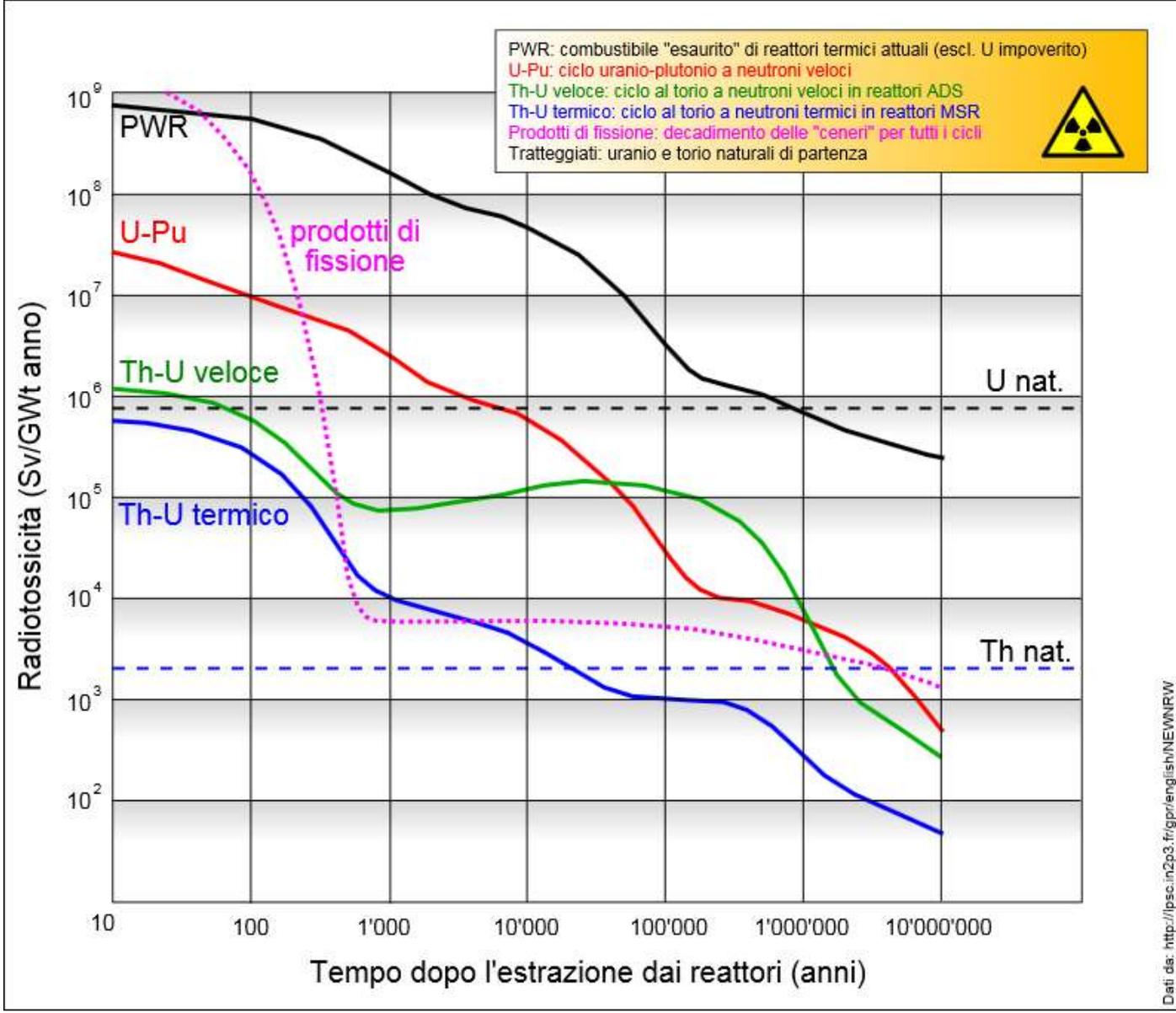


La dose di energia assorbita si misura in Sievert (Sv)

$$1 \text{ Sv} = 1 \text{ J} / 1 \text{ Kg}$$

Radiotossicità (in Sv per GWt all'anno) del combustibile esausto scaricato dai reattori nucleari per diversi cicli del combustibile, in funzione del tempo.

- Prodotti della fissione**
- Materiale contaminato**
- Incidenti**



# reattori nucleari a fissione



Ia generazione (1950-1960): costruzione e sperimentazione di molti **prototipi** delle più varie concezioni.

Ila generazione (1970-1980): costruzione di un **gran numero** di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima parte ad uranio ed acqua naturale. È dai reattori di questa generazione che proviene la maggior parte di energia elettronucleare prodotta **attualmente** nel mondo. Circa **440 reattori** nucleari (PWR, o BWR) sono operativi in più di 30 paesi. La potenza elettrica di ciascuno di tali impianti è di circa 600-900 MWe.

Illa generazione (>2000): reattori già certificati e **disponibili** sul mercato. Comprende innanzi tutto i reattori avanzati ad acqua naturale, alcuni già in funzione in Advanced Boiling Water Reactor (ABWR da 1400 MWe) altri, come lo European Pressurized Water Reactor (EPR da 1.600 MWe), in fase di costruzione: il primo esemplare di EPR (Olkiluoto 3, III+, originalmente previsto per il **2009**) entrerà in funzione in Finlandia nel febbraio **2022**, altri sono in fase di approntamento o di trattativa commerciale in Europa, Asia e Medio Oriente.

# reattori nucleari a fissione



IV generazione (2030-2040?): allo stato concettuale. una iniziativa avviata nel gennaio 2000, allorquando dieci Paesi si sono uniti per sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, operativi **fra 20 o 30 anni**.

Requisiti: a) **sostenibilità** (massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi); b) **economicità** (rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici); c) **sicurezza** e affidabilità (bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore, tolleranza a gravi errori umani) non dovranno richiedere piani di emergenza per la difesa della salute pubblica, non essendoci uno scenario credibile per il rilascio di radioattività fuori dal sito; d) resistenza alla proliferazione e **protezione fisica** contro attacchi terroristici.

# reattori nucleari a fissione



## Incidente di Chernobyl (1986)

Due ipotesi: 1) errore umano nella gestione di un test (disattivazione di sistemi di sicurezza); 2) errore di progettazione dell'impianto.

Un incontrollato aumento della potenza del reattore portò ad una scissione dell'acqua di raffreddamento in O ed H, aumentando grandemente la pressione all'interno del reattore, che giunse a far saltare il coperchio del reattore con conseguenti fuoriuscite di materiale radioattivo.

## Incidente di Fukushima (2011)

La causa principale fu un terremoto con conseguente tsunami che allagò la centrale, non sufficientemente protetta dal mare.

In caso di terremoto, la centrale sospende automaticamente le reazioni inserendo barre di controllo, attivate da generatori dedicati. L'onda di tsunami, alta 13 metri, ha superato la diga di protezione (alta 10 metri) allagando i motori ed interrompendone il funzionamento, ed il pompaggio di liquido di raffreddamento delle barre. Ciò ha generato numerosi incendi ed esplosioni.

# reattori nucleari a fusione



Sia nel caso di impianti a confinamento magnetico che a confinamento inerziale basati sulla reazione deuterio-trizio viene utilizzato come combustibile una miscela di deuterio (esistente in natura, ed estraibile dall'acqua del mare) e di trizio (isotopo radioattivo, non esistente in natura ma prodotto artificialmente mediante reazioni nucleari).

Il trizio T può essere anche prodotto nella stessa macchina a fusione, sfruttando reazioni nucleari prodotte dai neutroni originati dalla fusione stessa.

Ad esempio  $\text{Li}^6 + \text{n} = \text{He}^4 + \text{T} + 4.86 \text{ MeV}$

Il  $\text{Li}^6$  è presente (7.5%) nel litio naturale che abbonda nelle rocce della crosta terrestre (30 parti su un milione per unità di peso) ed è presente, in concentrazione minore, anche negli oceani.

Il combustibile per la fusione nucleare è pertanto costituito da Deuterio e Litio entrambi presenti in natura in quantità significative.



# reattori nucleari a fusione



Per dimostrare la **fattibilità tecnologica** di un impianto nucleare a fusione e prima di dare il via alla costruzione di impianti prototipi **pre-commerciali**, si è costituita una impresa raggruppante sette grandi partners mondiali (Comunità Europea, USA, Russia, Giappone, Cina, India, Corea del Sud) al fine di costruire un impianto **sperimentale** a fusione di tipo **tokamak**, di taglia paragonabile a quella di un futuro impianto commerciale. Tale impianto, denominato **ITER** (International Thermonuclear Experimental Reactor), è in costruzione congiuntamente dai sette partners presso il centro nucleare francese di Cadarache (in Provenza, Francia).

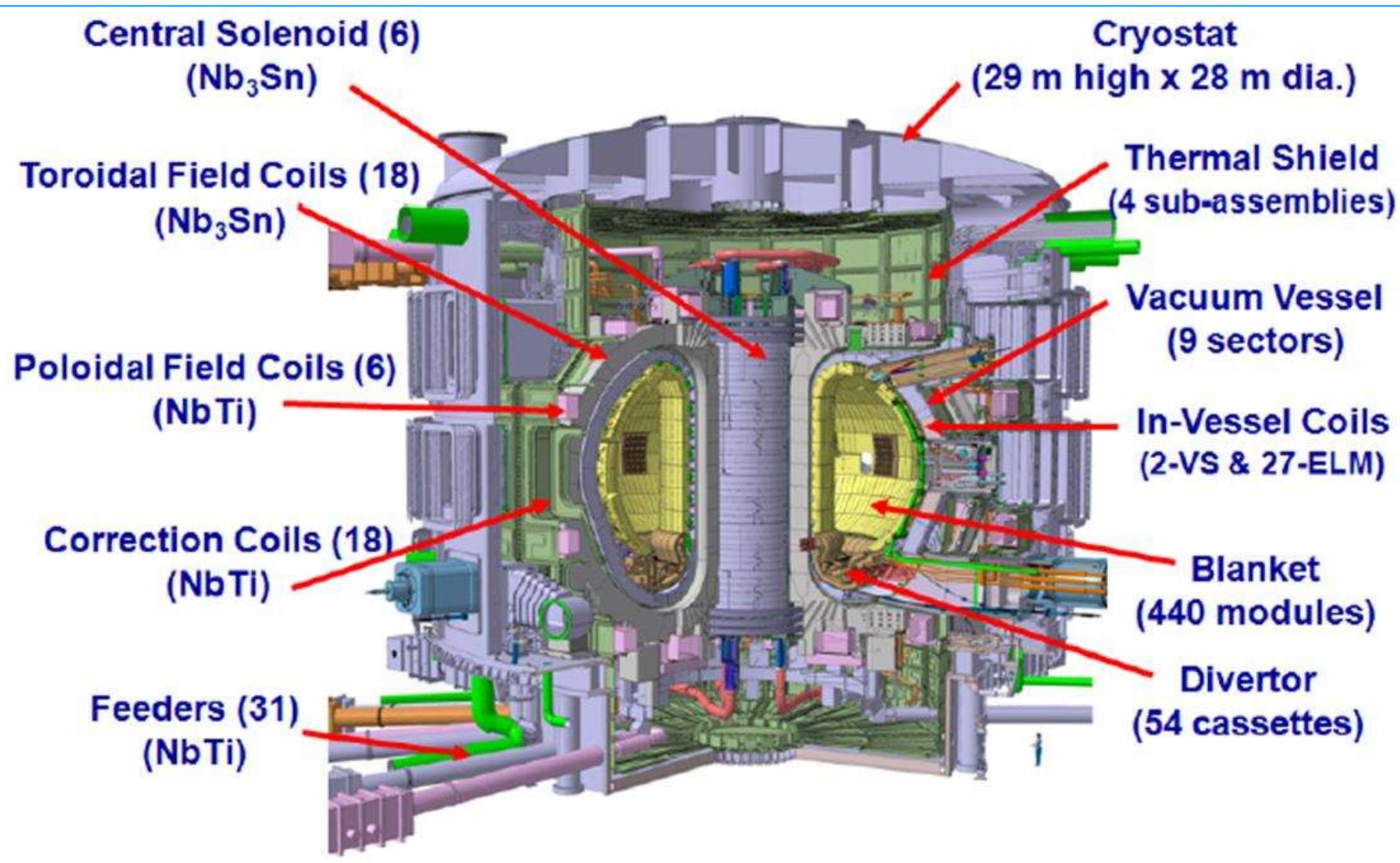
La costruzione e la messa in esercizio dell'impianto richiederanno circa **N** anni. La vita utile di ITER è prevista in circa 30 anni. Il costo stimato per ITER (progettazione, costruzione ed esercizio per 20-30 anni) è di circa **10 miliardi di euro** (costi 2008) rivisti a 15, con un costo di gestione di **290 milioni all'anno**.

Il primo plasma è atteso per il 2025 mentre l'inizio dell'operatività sarà nel **2035**.

# reattori nucleari a fusione



Il tokamak di ITER: 29 m di altezza, 28 m diametro e circa 23000 t di massa



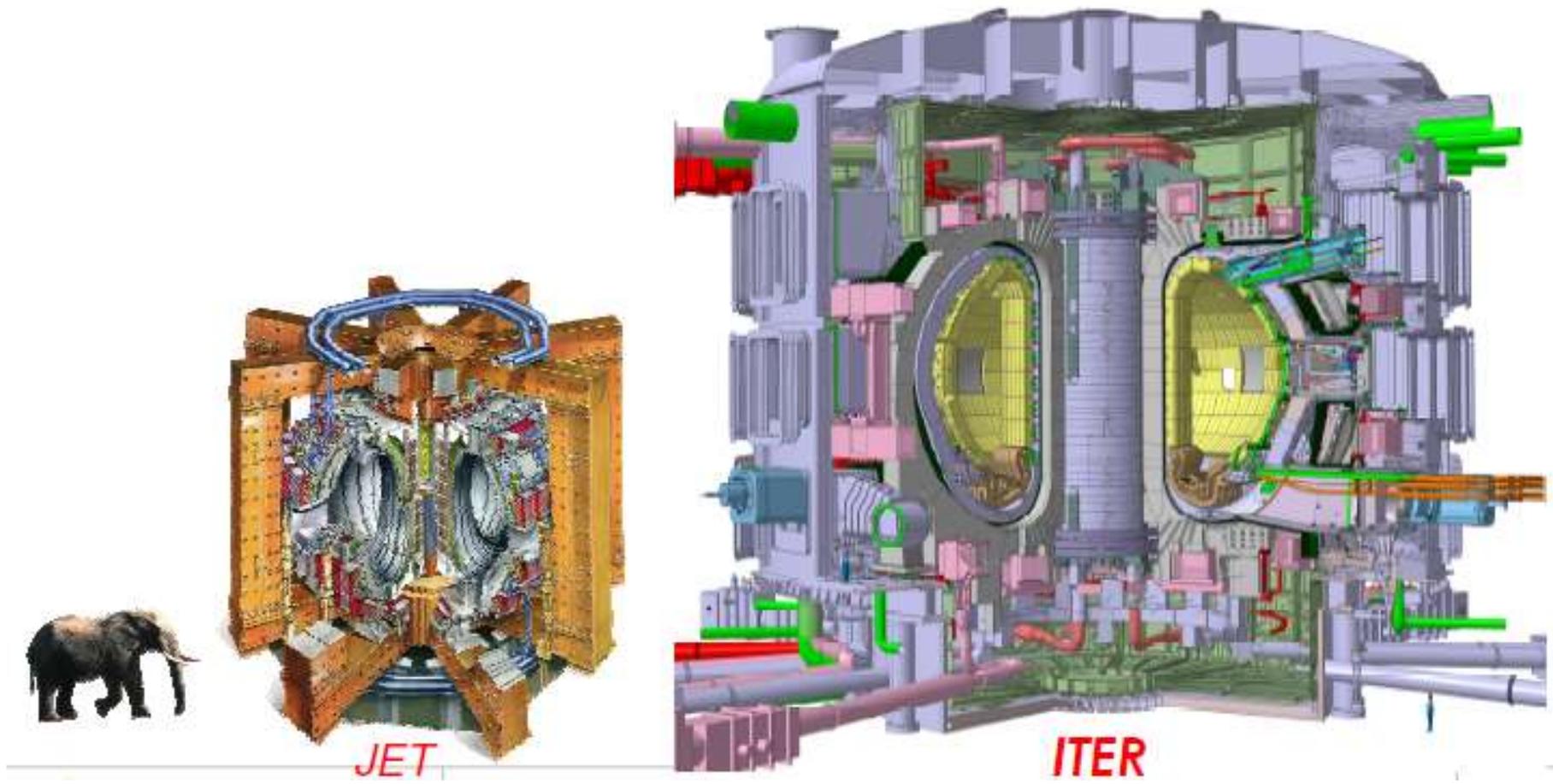
# reattori nucleari a fusione



Confronto tra ITER e il Joint European Torus (JET, 1973)

$Q(\text{JET-1991}) = 0.15$

$Q(\text{JET-1997}) = 0.65$

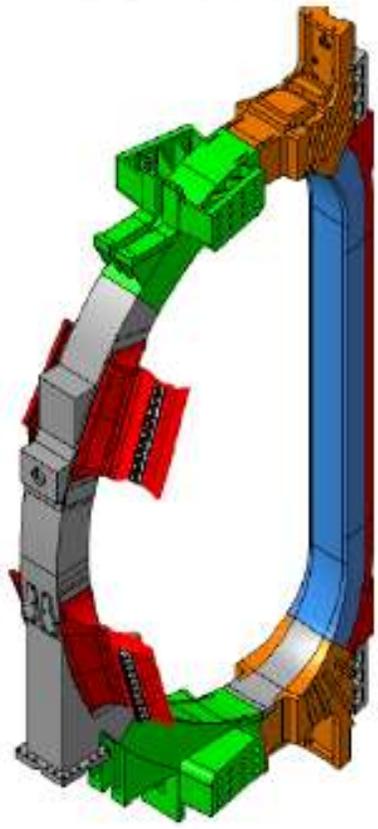


# reattori nucleari a fusione



Massa di un elemento superconduttore per produrre il campo toroidale

## TF Coil – Mass Comparison



**Mass of (1) TF Coil:**  
~360 t  
16 m Tall x 9 m Wide



**Boeing 747-300**  
**(Maximum Takeoff Weight)**  
~377 t

# reattori nucleari a fusione



# reattori nucleari a fusione



04.2021





## Caratteristiche di ITER:

<b>Volume del plasma</b>	<b>840 m<sup>3</sup></b>
<b>B</b>	<b>5.3 T</b>
<b>i</b>	<b>15 MA</b>
<b>T</b>	<b>8.7 keV = 100 10<sup>6</sup> K</b>
<b>N</b>	<b>1.3 10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup></b>
<b>P<sub>in</sub></b>	<b>50 MW</b>
<b>τ<sub>E</sub></b>	<b>3.4 s</b>
<b>P<sub>out</sub></b>	<b>500 MW</b>
<b>Q</b>	<b>10</b>



1. reazione di fusione  $D + T \rightarrow {}^4\text{He} + n (+17.6 \text{ MeV})$ :
  - richiede molta energia per l'innesco,
  - richiede soluzioni tecnologiche superiori (confinamento),
  - combustibile disponibile,
  - assenza di rifiuti/emissioni,
  - ancora non disponibile (40/50 anni?);
  
2. reazioni di fissione  ${}^{235}\text{U} + n \rightarrow {}^{93}\text{Rb} + {}^{140}\text{Cs} + 3n (+200 \text{ MeV})$ :
  - tecnologia acquisita,
  - combustibile disponibile,
  - assenza di emissioni,
  - combustibile e scorie radioattivi,
  - incidenti potenzialmente catastrofici.