



# 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

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

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

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

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

$$1 \text{ tep} = 42 \text{ GJ}$$

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

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

## prefissi SI

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

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

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

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

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

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

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

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

# sommario



**modello atomico e nucleare;**

**le forze e l'energia;**

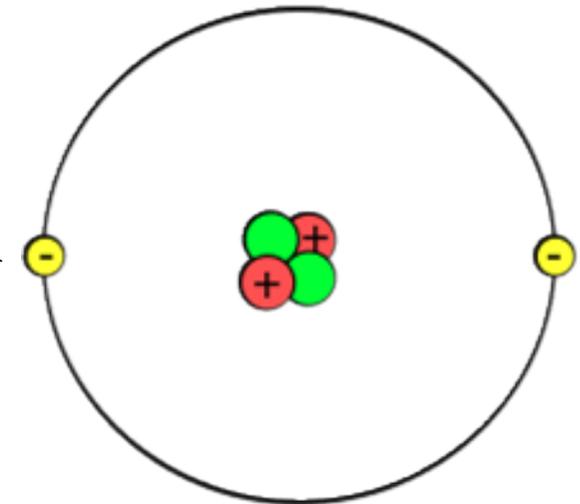
**le reazioni nucleari.**

# modello atomico e nucleare



La fisica atomica è nata con la scoperta dell'**elettone** (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  $e = 1.6 \times 10^{-19}$  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

# 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



Electron ○	$m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ u}$ $e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$
Proton ○	$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1836.15 m_e = 1.00728 \text{ u}$ $e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C}$	$m_p c^2 = 938.272 \text{ MeV}$
Neutron ○	$m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1838.68 m_e = 1.00867 \text{ u}$ 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  $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$ . ( $1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$ )

# modello atomico e nucleare



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.

## forze ed energia



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.

## forze ed energia

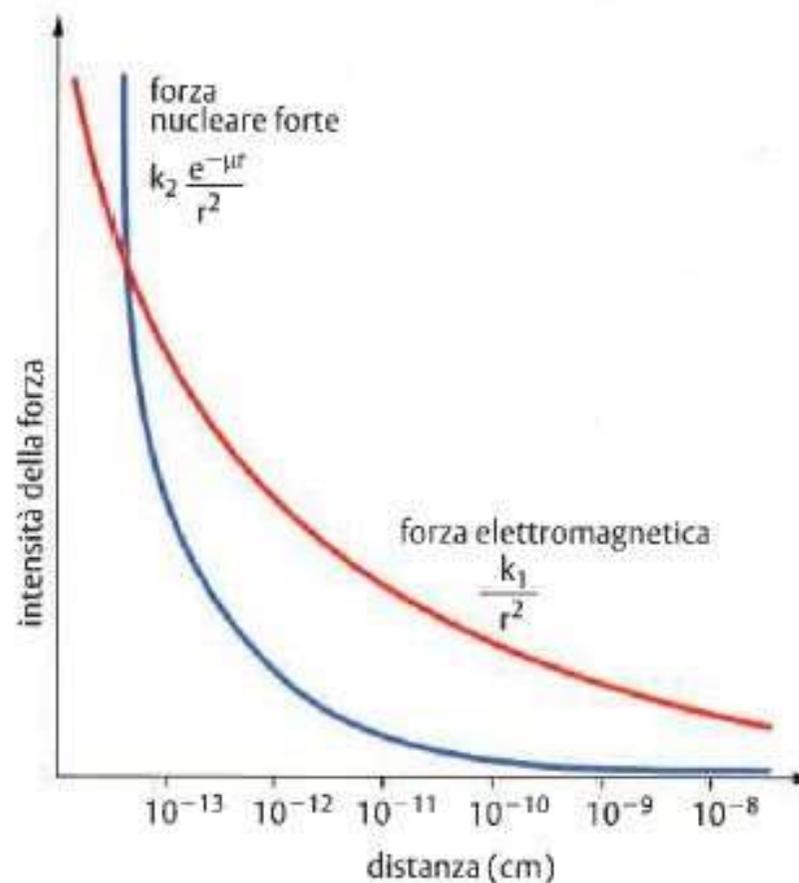


La Fisica Nucleare (Ettore Majorana) indica la via di una soluzione per spiegare la stabilità dei nuclei atomici: l'esistenza di altre forze attrattive tra nucleoni (anche con carica dello stesso segno) chiamate **forze nucleari** o **interazione nucleare forte**.

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.

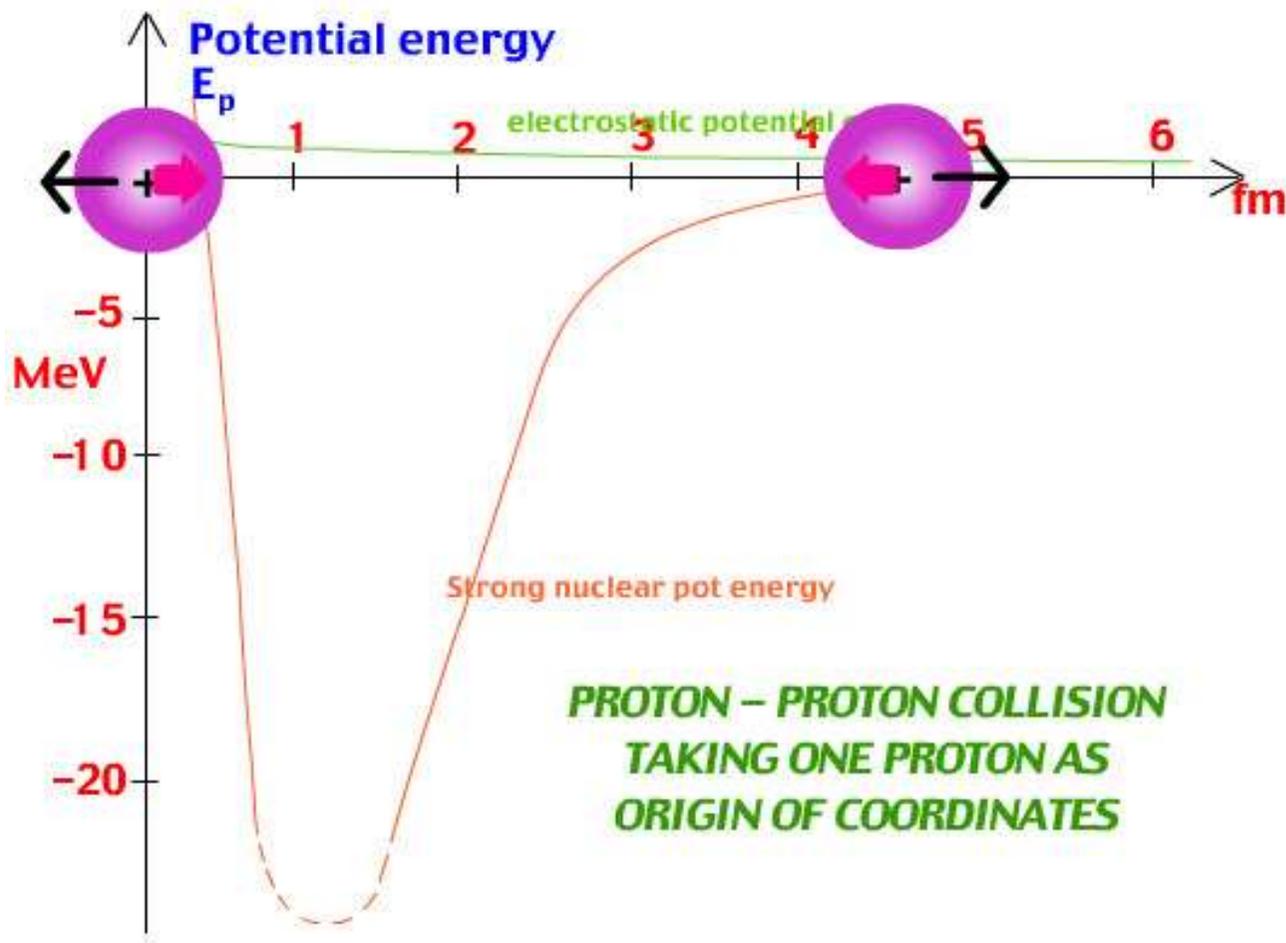
Sono attive a distanze  $d < 10^{-15}$  m, ma inefficaci a distanze maggiori.



# forze ed energia



Le forze nucleari sono **indipendenti** dalla carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra protoni e protoni. Vediamolo dal punto di vista dell'energia potenziale.



# forze ed energia



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



protons 2 x 1.00728 u



neutrons 2 x 1.00866 u



Alpha particle

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

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

$$= 28.3134 \text{ MeV}$$

Mass of parts

4.03188 u

Mass of alpha

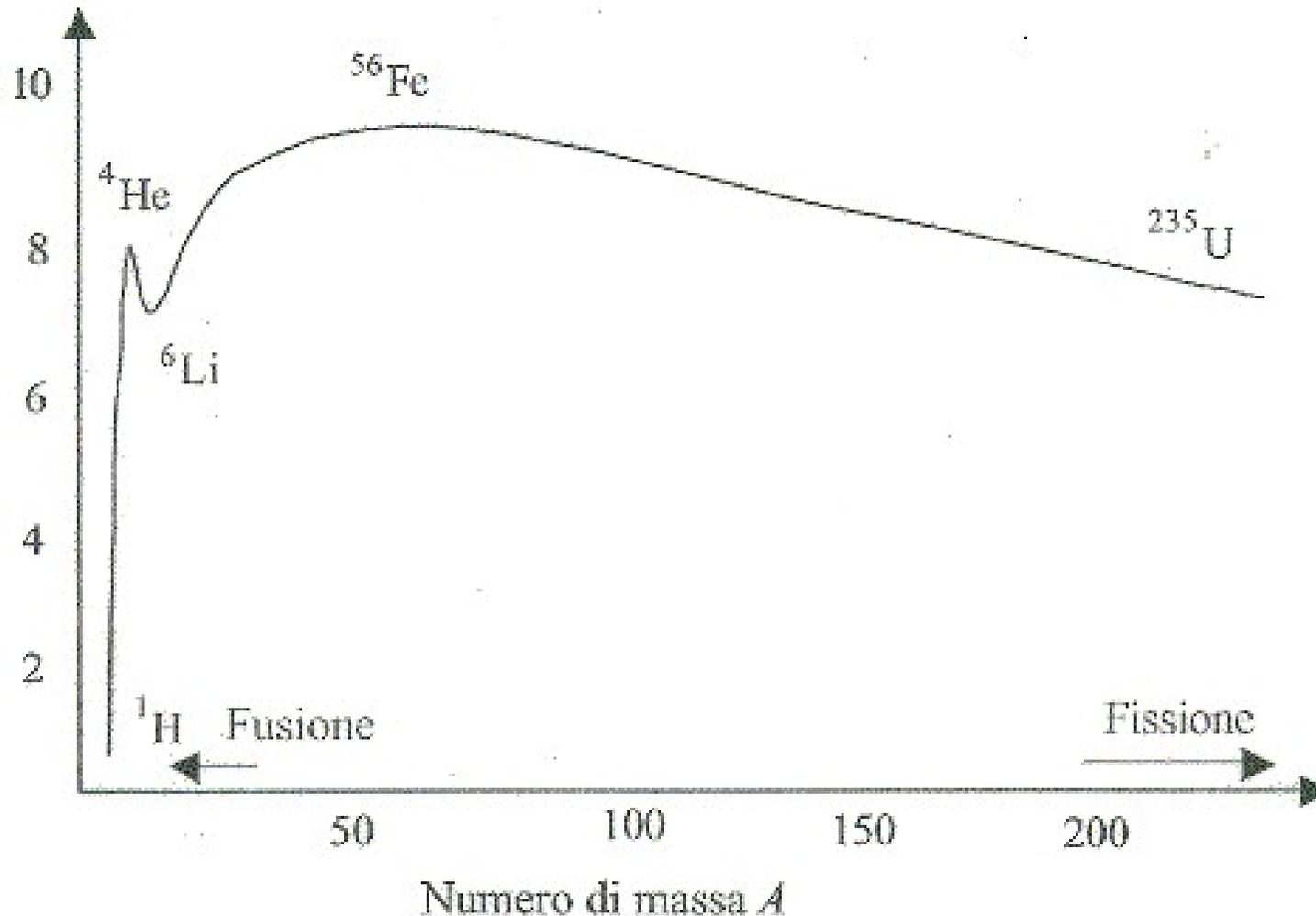
4.00153 u

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

## forze ed energia



Energia di legame per nucleone (MeV)



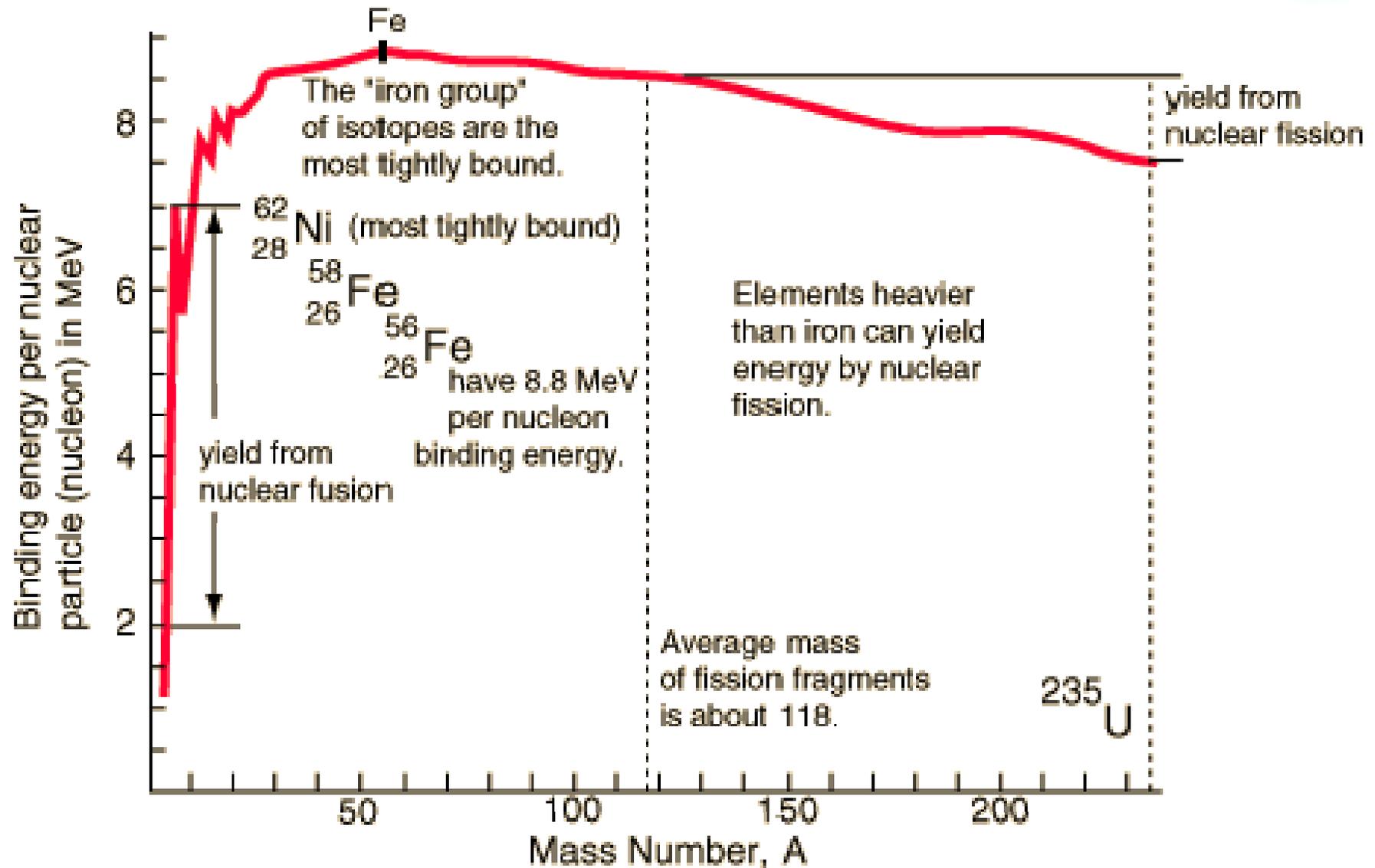
Mediamente (esclusi i nuclei più leggeri) si ha che l'energia di legame vale circa 8-9 MeV per nucleone: energia che occorre fornire per estrarre un nucleone dal nucleo.

# 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  $A$ ,
- 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.

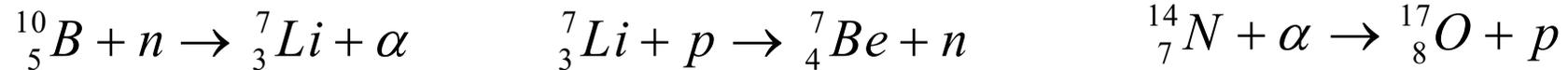
Le reazioni nucleari possono essere:

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

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

# reazioni nucleari



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:

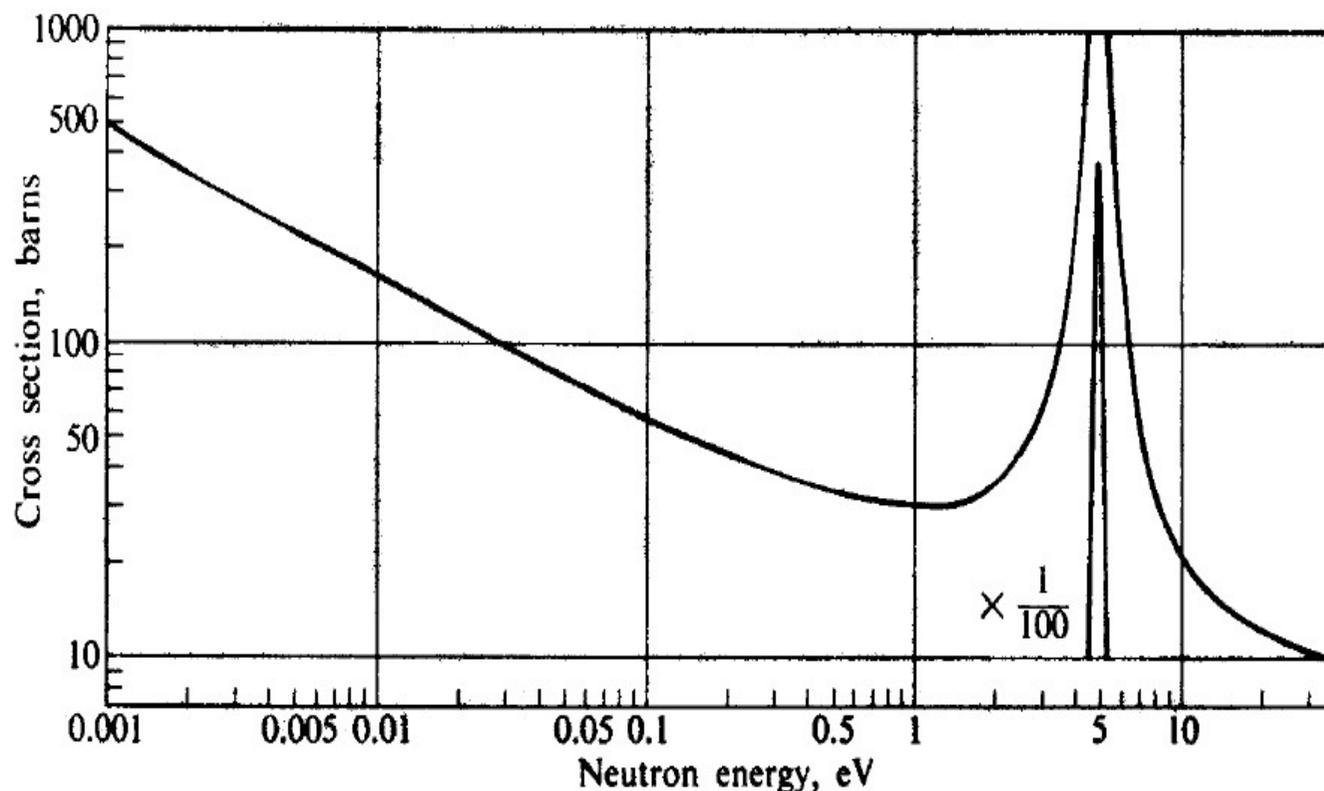
- dal tipo di particella incidente,
- dal nuclide bersaglio,
- dalla energia della particella incidente.

# 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  $^{197}\text{Au}$



# riassunto



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*

# sommario



**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.

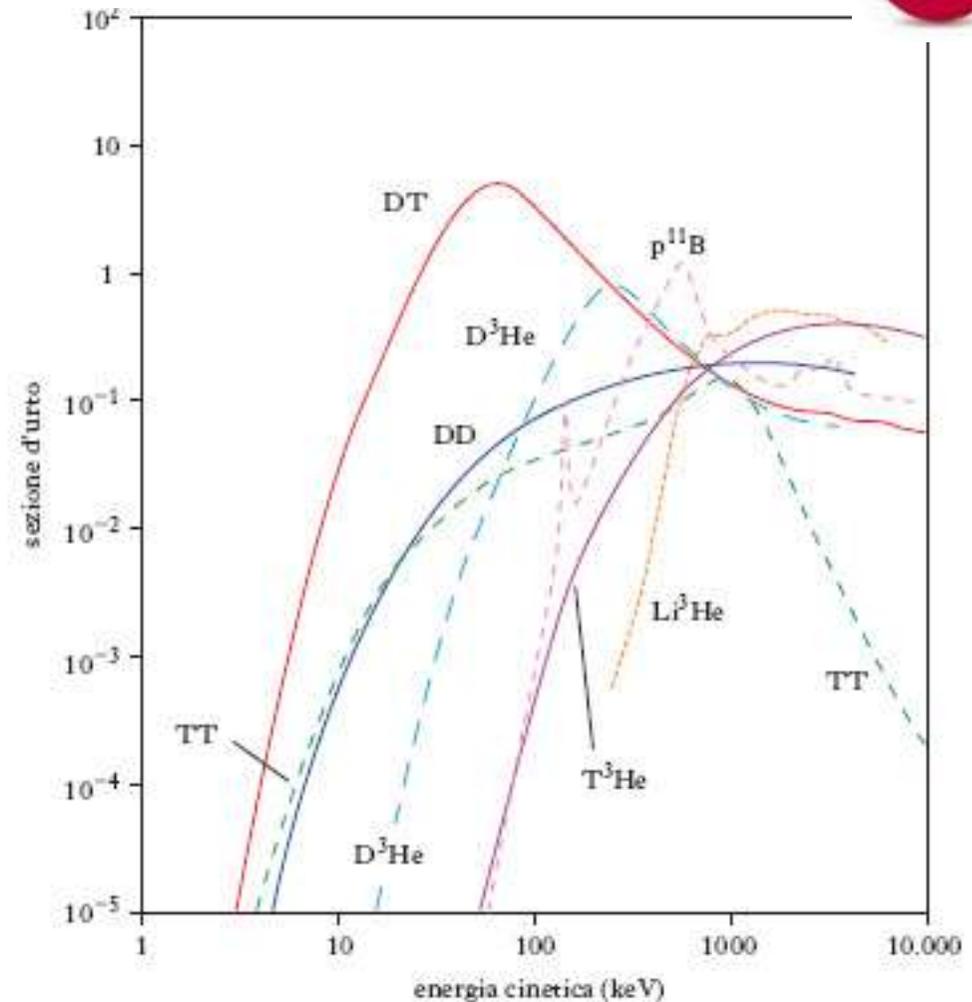
Poiché essi sono entrambi carichi positivamente, tenderanno a respingersi senza interagire. Esiste cioè una **barriera energetica** che impedisce la loro interazione (cioè la fusione).

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 opzioni: confinamento **magnetico**, confinamento **inerziale**.

# reazioni nucleari: fusione



## Confinamento magnetico

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

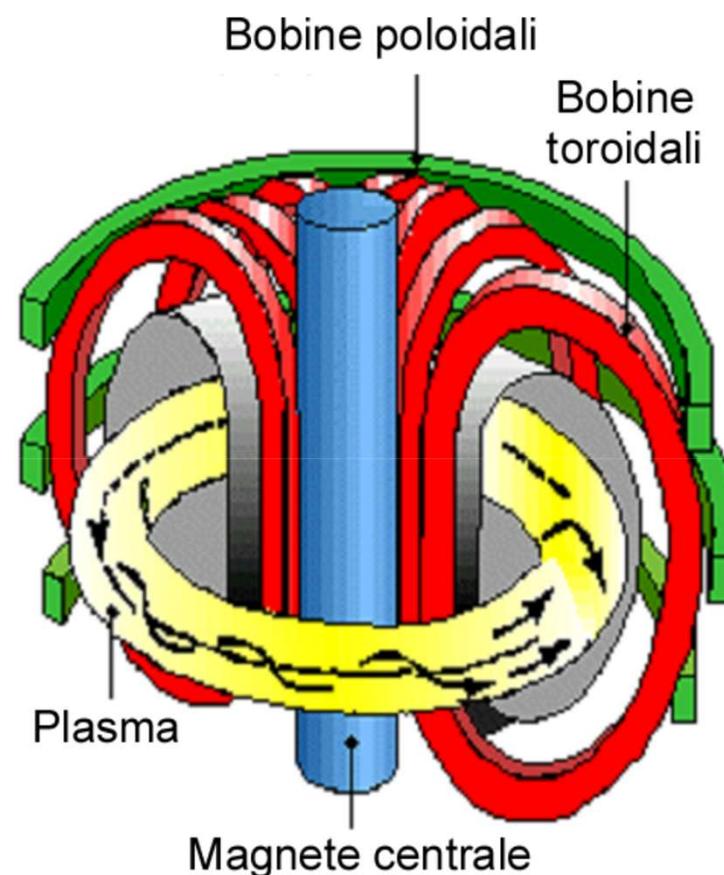
$$\mathbf{F} = q \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

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**.

$$B \approx 3.5 - 12 \text{ T}$$

$$i \approx 15 \text{ MA}$$



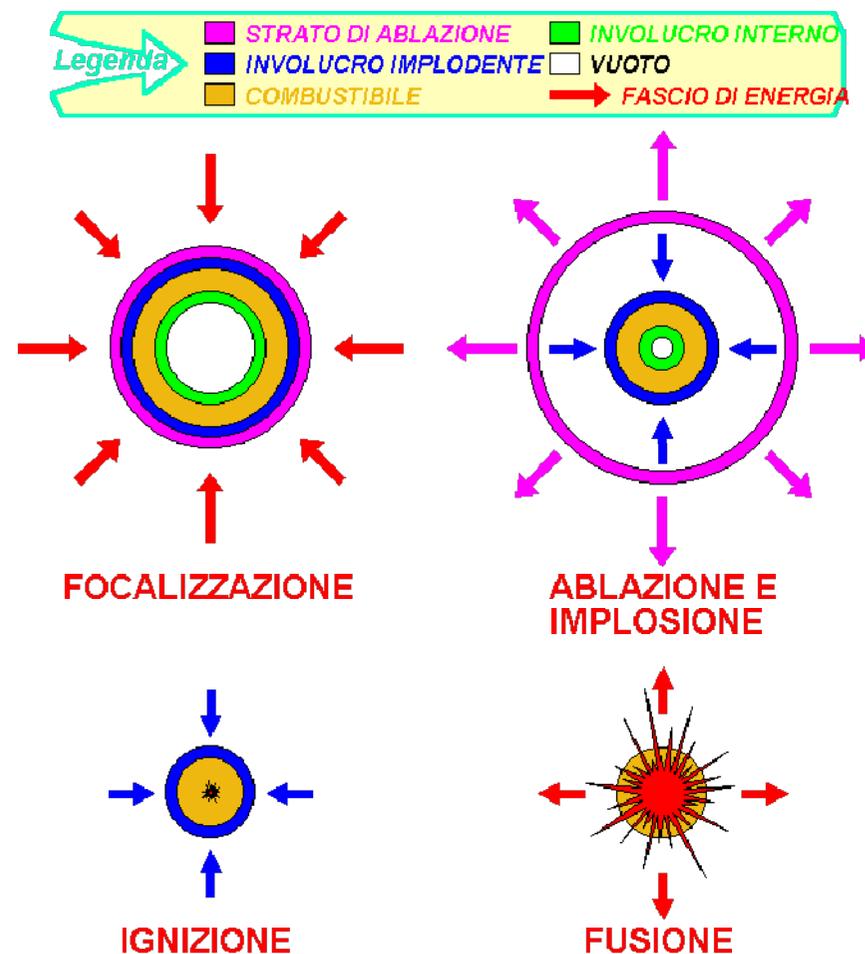
# reazioni nucleari: fusione



## 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.



# reazioni nucleari: fusione



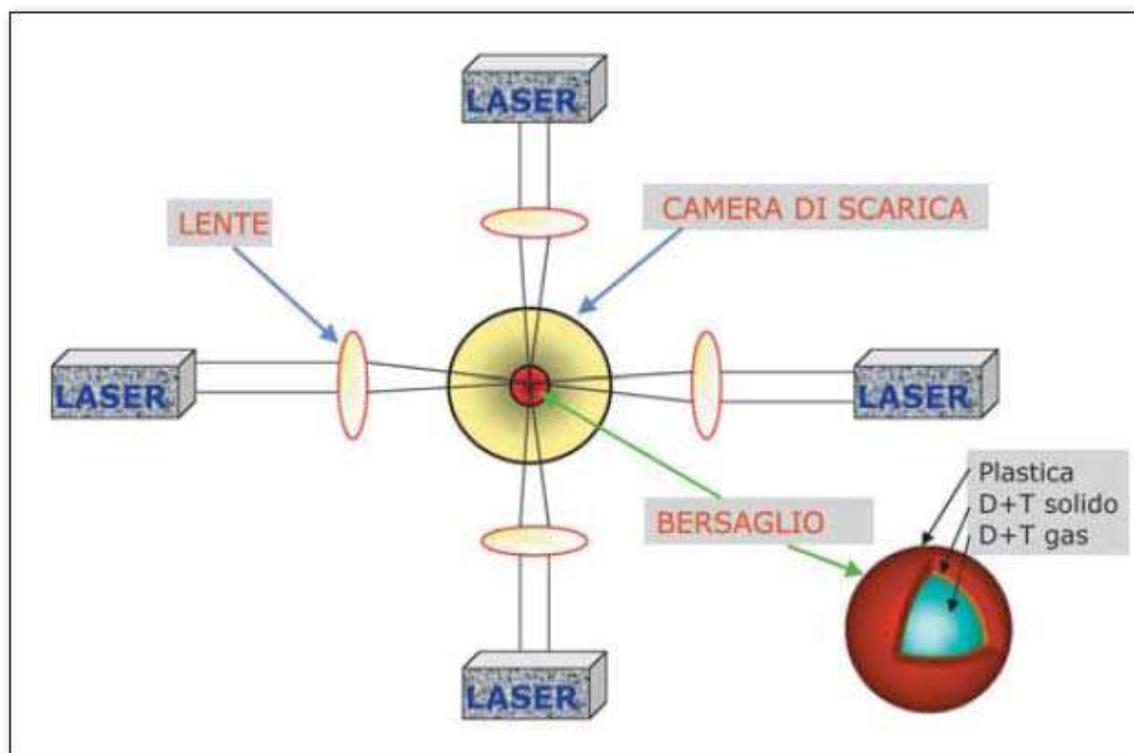
## Confinamento inerziale

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



## Come si scalda il plasma?

- 1) Riscaldamento ohmico: viene ottenuto tramite il **solenoid**e 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 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 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 ~  **$15.7 \cdot 10^6 \text{ K}$** , densità ~  **$1.5 \cdot 10^5 \text{ kg m}^{-3}$**

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

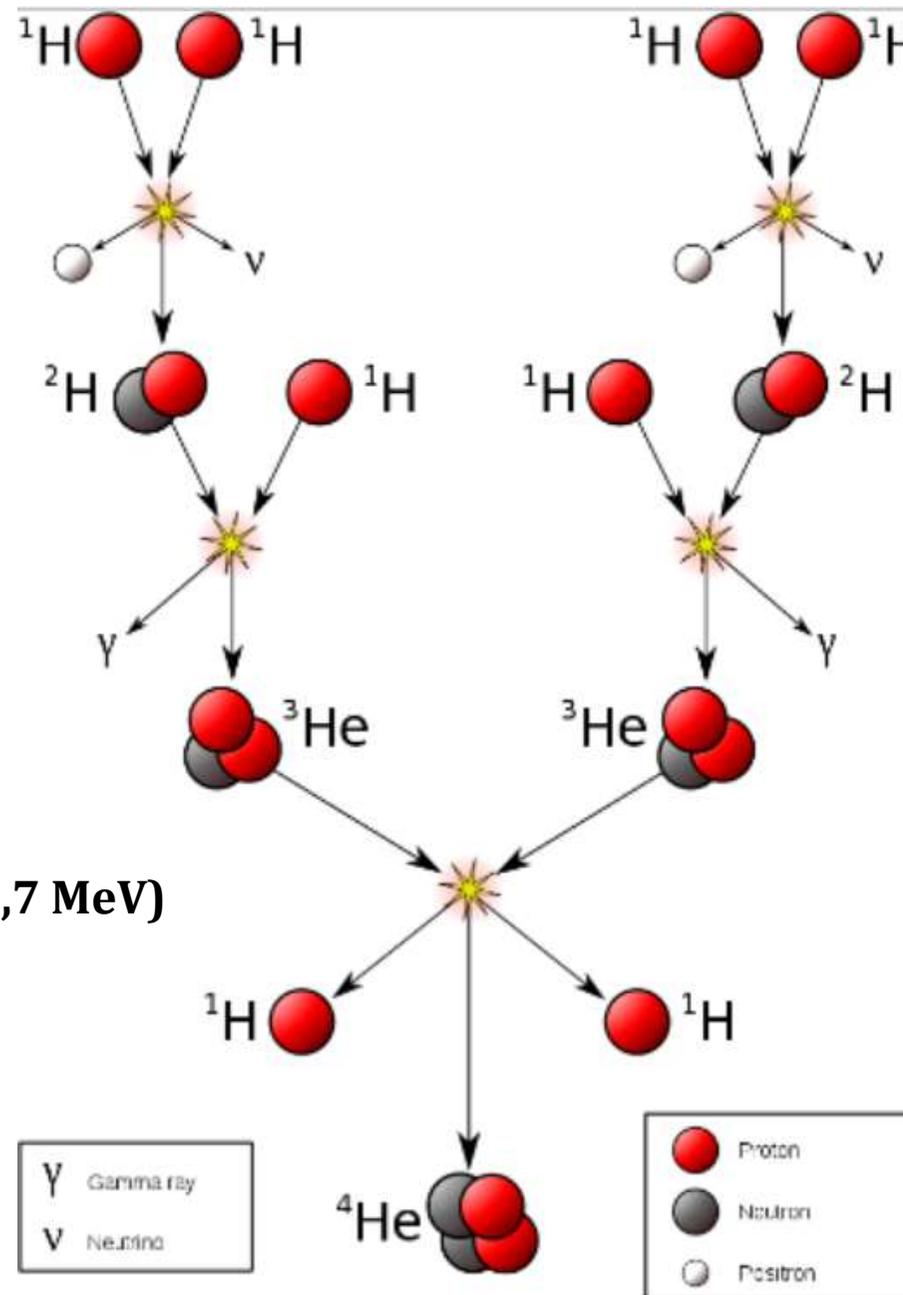
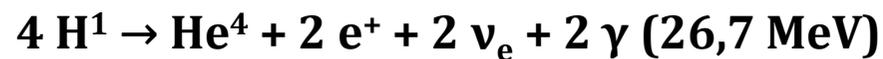
Esse rendono possibile la fusione di circa  **$3.5 \cdot 10^{38}$**  protoni al secondo

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:



## riassunto della lezione del 25.05



La **questione energetica** è un problema che investe vari campi (PESTEL), e si risolve producendo energia in modo **equo, sicuro e sostenibile**.

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 che si verifica legando diversamente i **nucleoni** tra di loro.

Esistono due tipi di reazioni nucleari esoenergetiche: **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** spazialmente per tempi tali da innescare la reazione. Entrambe queste condizioni richiedono un elevato **investimento** di energia.

I **prodotti** della reazione di fusione non hanno impatto sull'ambiente.

La costruzione di una **centrale a fusione** non è prevista a breve tempo.