



La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La crescita della domanda di elettricità sarà, *verosimilmente*, ancora superiore, percentualmente, alla crescita del consumo globale di energia.

L'esaurimento dei combustibili fossili (carbone, petrolio, gas naturale) ed il difficile utilizzo delle fonti di energie rinnovabili (solare, eolica, ecc.) nella produzione di energia centralizzata in grado di sopperire ai bisogni dei paesi a forte densità di popolazione (o a paesi con forti concentrazioni locali della popolazione) rende indispensabile (??) lo sviluppo e l'utilizzo di altre fonti di energia, ad alta densità di energia quale l'energia nucleare (sia da **fissione** che da **fusione**).

Su queste fonti di energia primaria (**fissione e fusione nucleare**) si concentreranno ora i nostri sforzi, con particolare riferimento al loro utilizzo per la *produzione di energia elettrica*



La produzione di energia da reazioni nucleari

Gli albori della fisica atomica 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**.

- “Grossolanamente” l'atomo (raggio atomico $R_a \approx 10^{-10}$ m) è composto da **un nucleo centrale** con carica positiva $+Ze$ delle dimensioni di $R_N \approx 10^{-15}$ m “attorno” al quale si muovono Z **elettroni e** (aventi carica negativa $\approx 1.6 \times 10^{-19}$ Coulomb).
- $R_N \approx R_0 A^{1/3}$ dove R_0 è una costante di valore 1.2×10^{-15} m

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

Nel nucleo ci sono anche **N=A-Z** particelle neutre chiamate **neutroni n**.

A è il **numero di massa** di un atomo.



La produzione di energia da reazioni nucleari

Basi fisiche - introduzione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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 vale $Z + N$ volte la massa del protone. La quantità $Z + N$ s'indica con **A** e si chiama numero di massa.

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 vale dunque 12.

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

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

Dalla relazione di Einstein $E=mc^2$ si ottiene anche **1 u = 931.5 MeV**

Si ricorda che 1 eV = 1.6 x 10⁻¹⁹ J. (1 MeV = 10⁶ eV)

Essa è l'energia acquistata da un elettrone **e** sottoposto ad una differenza di potenziale di 1 Volt.



La produzione di energia da reazioni nucleari

(massa e carica di e, p, n)



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Electron
○

$$m_e = 9.1094 \times 10^{-31} \text{ kg} = 0.000549 \text{ u}$$

$$e = -1.6022 \times 10^{-19} \text{ C} \quad m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$$

Proton

$$m_p = 1.6726 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1836.15 m_e = 1.00728 \text{ u}$$

$$e = 1.6022 \times 10^{-19} \text{ C} \quad m_p c^2 = 938.272 \text{ MeV}$$

Neutron

$$m_n = 1.6749 \times 10^{-27} \text{ kg} = 1838.68 m_e = 1.00867 \text{ u}$$

$$\text{charge} = 0 \quad m_n c^2 = 939.566 \text{ MeV}$$

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



La produzione di energia da reazioni nucleari

Un po' di terminologia atomica/nucleare

Tutti gli atomi che hanno **uguale Z**, anche se differiscono per il numero di neutroni, danno origine allo **stesso elemento chimico**, hanno in pratica le medesime proprietà e occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi. Per questo motivo atomi con lo stesso numero atomico **Z** sono detti **isotopi** (*appunto perché occupano lo stesso posto nella tavola periodica degli elementi*).

Ad esempio: l'elemento chimico idrogeno H ha tre isotopi:

H-1, indicato anche ^1H (nucleo con un p) (Numero di massa $A=1$)

*H-2, indicato anche ^2H (nucleo con un p e un n) (chiamato **Deuterio D**) (Numero di massa $A=2$)*

*H-3, indicato anche ^3H (nucleo con un p e due n) (chiamato **Tritio T**) (Numero di massa $A=3$)*

I primi due sono isotopi **naturali** (cioè esistono in natura) e sono **stabili**.

Il terzo è **artificiale** (prodotto mediante reazioni nucleari) ed è **instabile** o **radioattivo**.

Nuclei con lo stesso valore di A e *diverso valore di Z* sono chiamati **isobari**.

Con il termine **nuclide** si indica una singola specie nucleare caratterizzata da un numero atomico Z e da un numero di massa A .

I **nuclidi** possono essere definiti come nuclei aventi lo stesso numero di neutroni e lo stesso numero di protoni; ciò li distingue dagli **isotopi**, che hanno invece fissato il solo numero di protoni, e quindi hanno un numero di neutroni variabile.



La produzione di energia da reazioni nucleari

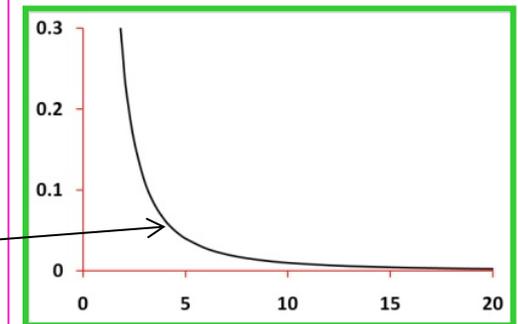
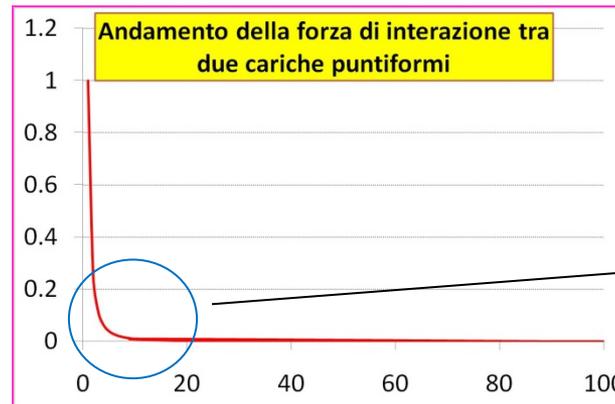
Forza di interazione coulombiana tra nucleoni

L'esistenza stessa del nucleo atomico 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 Q_1 e Q_2 , supposte puntiformi, che si trovano ad una distanza d si esercita una forza (di Coulomb) che vale, in modulo:

$$F = K \frac{|Q_1| |Q_2|}{d^2} \quad (\text{dove } K \approx 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2} \text{ è la costante di Coulomb}).$$

Per distanze molto piccole, quale quella tra due nucleoni del nucleo di un atomo, tale forza diviene molto elevata !
Inoltre, per cariche dello stesso segno essa è repulsiva, cioè le cariche interagenti tendono ad allontanarsi !



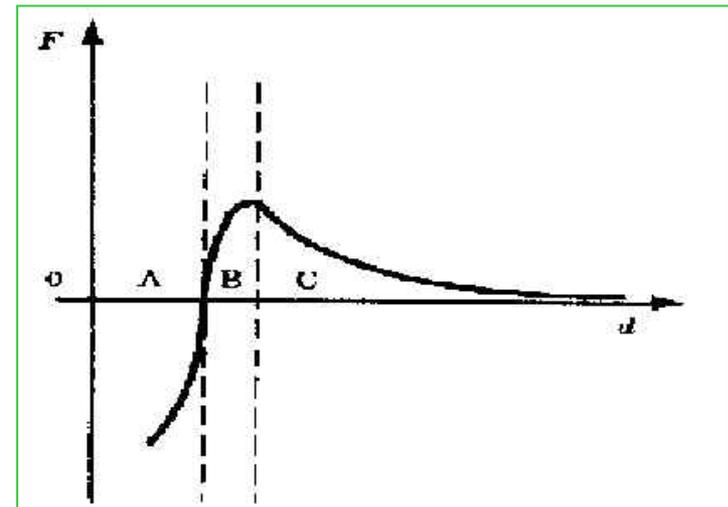


La produzione di energia da reazioni nucleari

Forze nucleari (a breve raggio d'azione)

La Fisica Nucleare 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**

Esse debbono essere intensissime, per poter tenere insieme, a distanza molto piccola, molti protoni con la stessa carica; inoltre debbono essere praticamente inefficienti al di fuori del nucleo atomico stesso, altrimenti della loro esistenza ci saremmo accorti ben prima, così come accadde con le forze gravitazionali ed elettromagnetiche. Saranno attive a distanze $d < 10^{-15}$ m, ma inefficaci a distanze maggiori.



- Nel tratto C ($d > 10^{-14}$ m) agiscono solo le forze (repulsive) coulombiane.
- Nel tratto B (10^{-15} m $< d < 10^{-14}$ m) si manifestano le forze nucleari che si oppongono a quelle elettriche.
- Nel tratto A ($d < 10^{-15}$ m) prevalgono le forze nucleari (attrattive).



La produzione di energia da reazioni nucleari

Forze nucleari (a breve raggio d'azione)



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

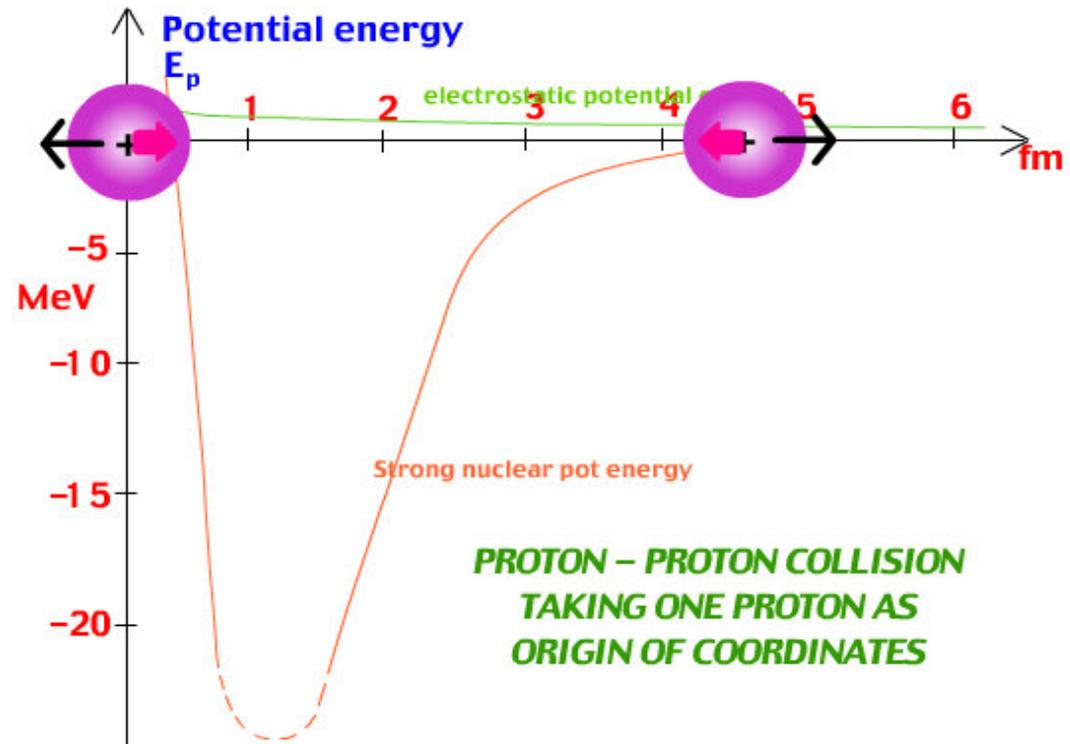
Le forze nucleari sono indipendenti dalla carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra protoni e protoni.

Il raggio d'azione delle forze nucleari è valutato dell'ordine del fermi (pari a 10^{-15} m)

Ad una distanza pari a circa 4 fermi le forze nucleari eguagliano le forze elettrostatiche.

A distanze superiori del fermi, le forze nucleari sono attrattive, a valori inferiori sono fortemente repulsive.

Esempio di interazioni tra due protoni di un nucleo





La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia di legame

Si osserva che, per qualunque nucleo con più nucleoni (cioè tutti, tranne l'isotopo più leggero dell'idrogeno ^1H) si ha un *difetto di massa* $\Delta m = \Sigma m - M$, cioè:

la massa M del nucleo è minore della somma Σm delle masse di tutti i nucleoni in esso contenuti.

Poiché massa \leftrightarrow energia secondo la relazione di Einstein, al difetto di massa Δm corrisponde una energia che è chiamata energia di legame (Binding Energy BE):

$$\Delta E = BE = \Sigma(mc^2) - Mc^2$$

Esempio per una particella α
(nucleo di He : 2 p + 2 n)

		protons	2 x 1.00728 u		Alpha particle
		neutrons	2 x 1.00866 u		
Mass of parts			4.03188 u	Mass of alpha	4.00153 u

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

Essa rappresenta l'energia che dovremmo spendere per dividere il nucleo in tutti i suoi nucleoni: dipende dal numero di massa A .

Altra grandezza molto importante è l'energia di legame per nucleone (energia media per separare un nucleone dal nucleo) $\Delta E_n = BE_n = \Delta E/A$

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.

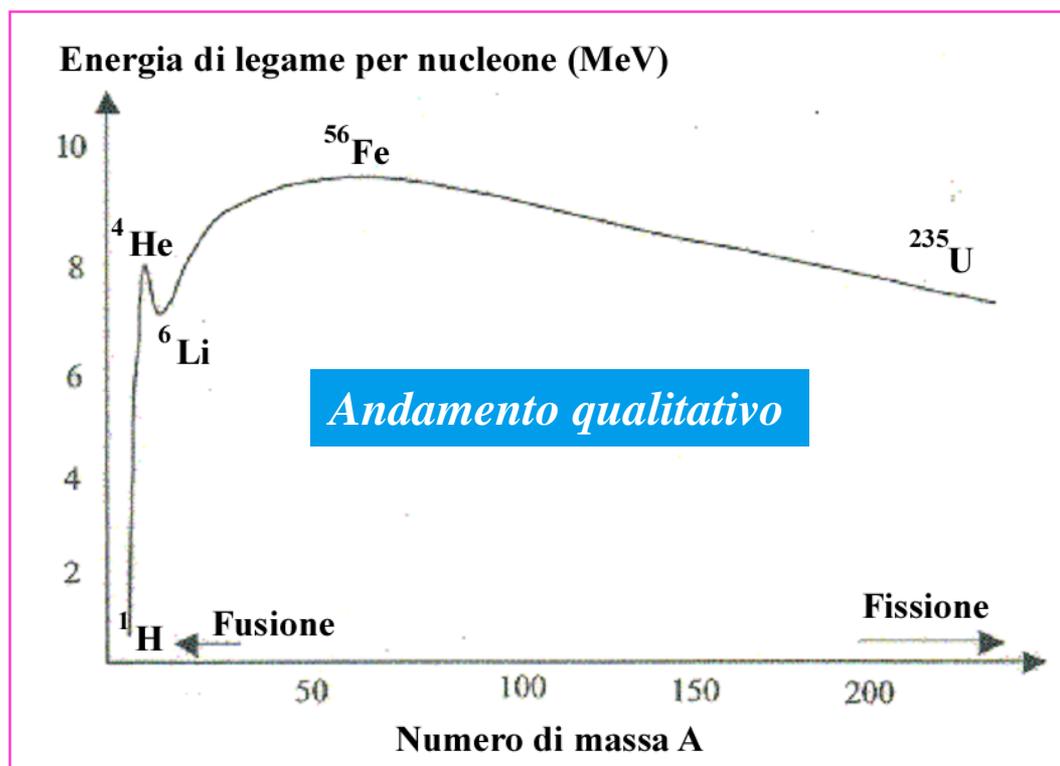


La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia di legame per nucleone



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



I nuclei più leggeri e quelli più pesanti hanno valori di ΔE_n più bassi e richiedono una minore quantità di energia per poterli separare

I nuclei di massa intermedia hanno i valori di ΔE_n più elevati e richiedono una elevata quantità di energia per poterli separare

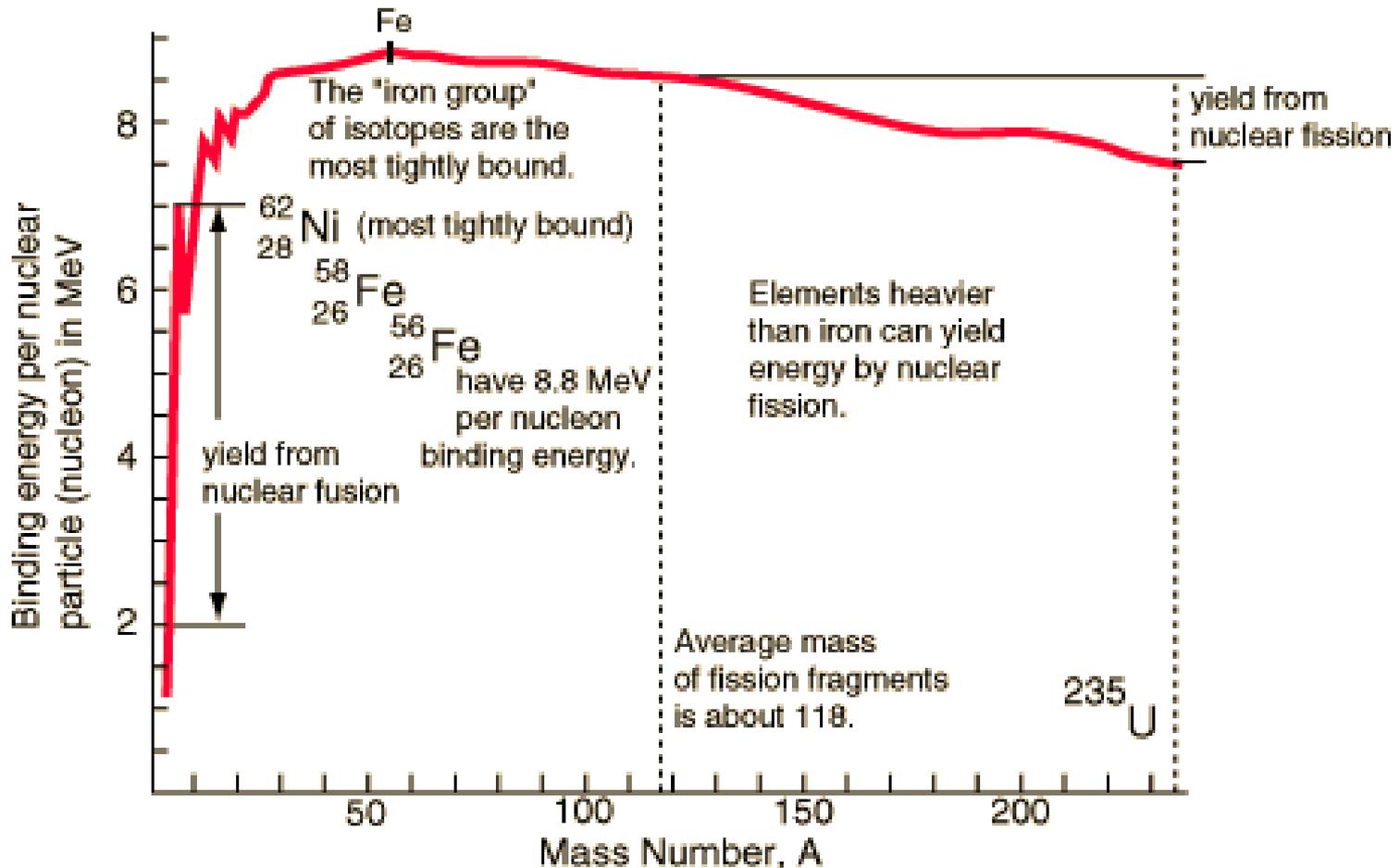


I nucleoni tendono a privilegiare situazioni in cui si trovano ad avere elevati ΔE_n



La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia di legame per nucleone





La produzione di energia da reazioni nucleari

Le reazioni nucleari



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

- Col termine **reazione nucleare** si intende un evento nel quale nucleoni vengono cambiati all'interno di un nucleo o scambiati 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, beta o gamma**.*
- La **radioattività** (*emissione spontanea di particelle e/o radiazioni dal nucleo di un atomo*) è un fenomeno **naturale**. Fu scoperta nel 1896 da **Henri Becquerel** che notò che una lastra fotografica s'anneriva se posta nelle vicinanze di un minerale contenente composti dell'uranio. (*Esiste anche una radioattività indotta o artificiale*)
- **Solitamente** però si considerano reazioni nucleari quelle indotte colpendo un nucleo con un'altra particella.

Le reazioni nucleari possono essere:

1. **esotermiche** (la massa diminuisce e l'energia cinetica aumenta), **DI PARTICOLARE INTERESSE**
2. **endotermiche** (la massa aumenta e l'energia cinetica diminuisce)



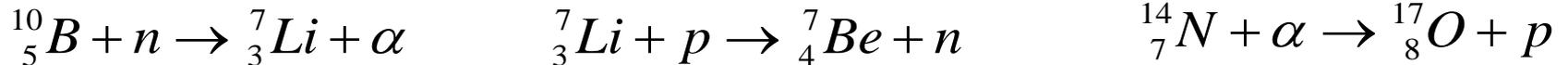
La produzione di energia da reazioni nucleari

Le reazioni nucleari



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Alcuni esempi di reazioni nucleari



Si ricorda che $\alpha = {}^4_2\text{He}$ e che $p = {}^1_1\text{H}$

Due reazioni nucleari rivestono una particolare importanza :

- La reazione di **Fissione** (ad esempio: $\text{U}^{235} + n \rightarrow \text{Rb}^{93} + \text{Cs}^{140} + 2n$)
- La reazione di **Fusione** (ad esempio: $\text{H}^2 + \text{H}^3 \rightarrow \text{He}^4 + n$)

Entrambe sono accompagnate da elevata produzione di energia termica (utilizzabile per la produzione di energia elettrica che esula dalla disponibilità di combustibili fossili).



La produzione di energia da reazioni nucleari

Sezione d'urto nucleare



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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

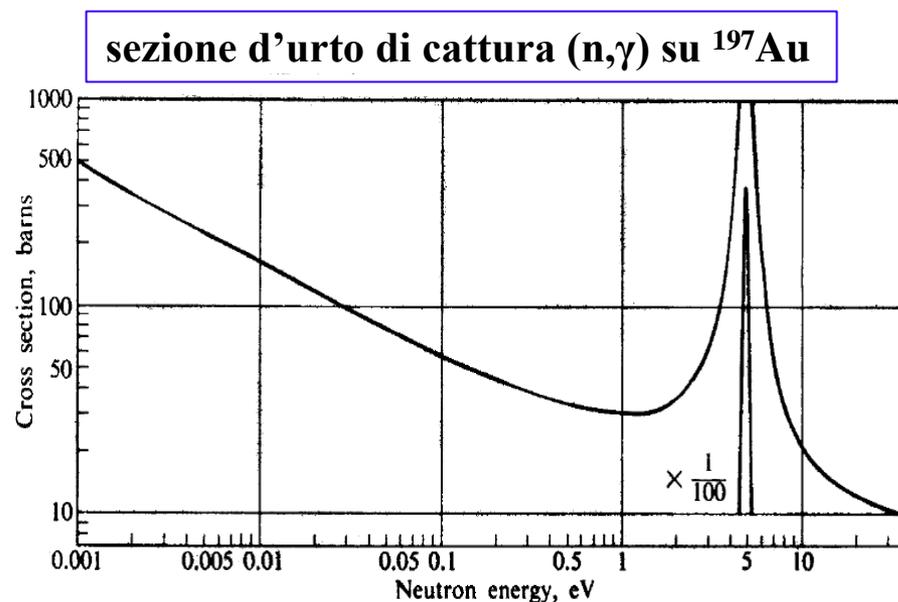
La σ rappresenta l'area con cui una particella incidente (“proiettile”) vede il nucleo bersaglio. Le dimensioni della sezione d'urto sono quindi quelle di un'area.

La σ si misura in 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.

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





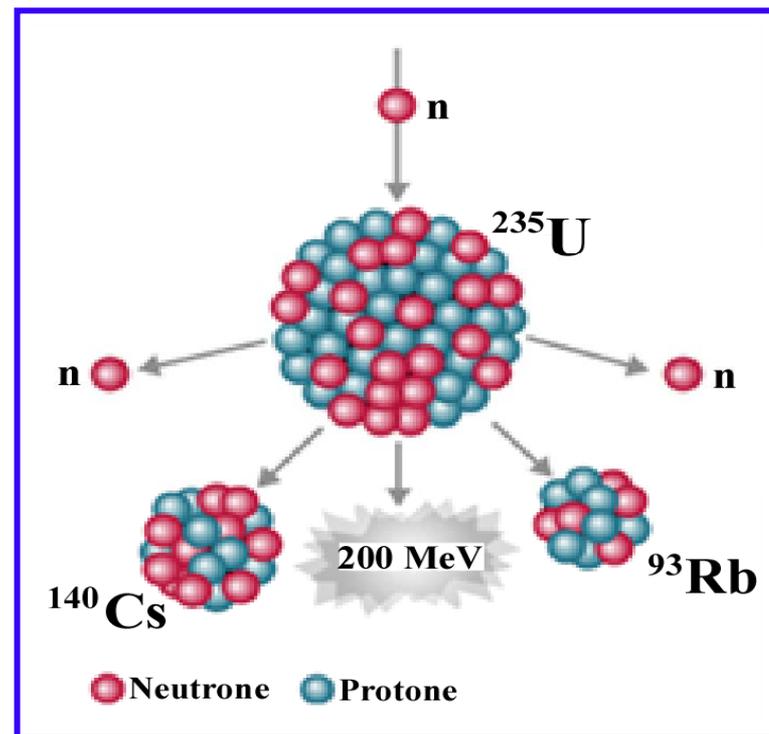
La produzione di energia da reazioni nucleari

La fissione nucleare



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

In una reazione di **fissione nucleare** partendo dal nucleo di un atomo pesante si "costruiscono" nuclei di atomi più leggeri ed il difetto di massa porta alla liberazione di energia. Ad esempio, nella fissione dell'isotopo 235 dell'uranio (^{235}U) mediante un neutrone "lento" (o *termico*) si libera una energia di circa 200 MeV (cioè 3.2×10^{-11} Joule).





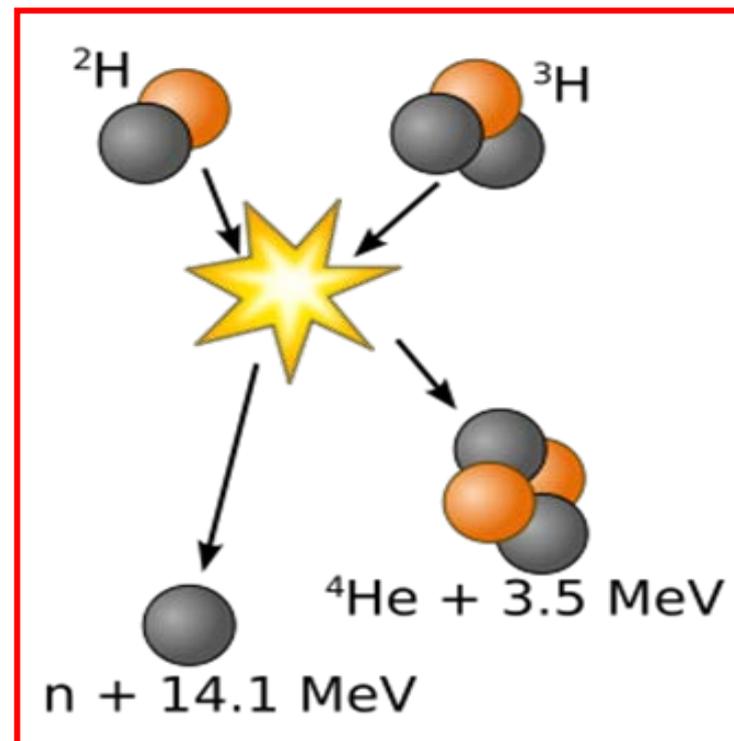
La produzione di energia da reazioni nucleari

La fusione nucleare



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

In una reazione di **fusione nucleare** partendo da nuclei di atomi molto leggeri si "costruiscono" nuclei di atomi più pesanti ed il difetto di massa porta alla liberazione della corrispondente energia. Ad esempio la fusione dei due isotopi deuterio ^2H e trizio ^3H dell'idrogeno, porta a liberare una energia di circa 17.6 MeV (cioè 2.8×10^{-12} Joule).





La produzione di energia da reazioni nucleari

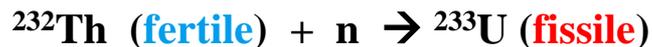
Energia da fissione nucleare: il combustibile

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.*

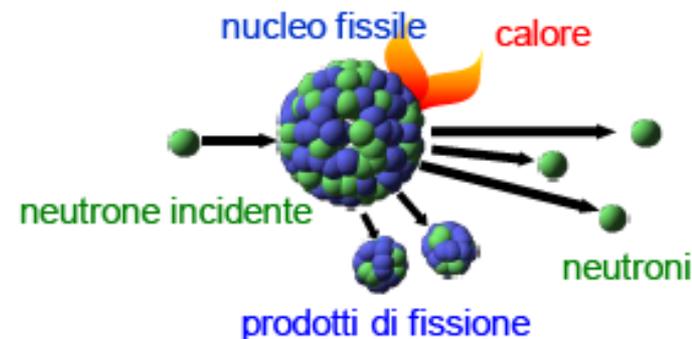
Alcuni isotopi sono **fissili**: se i loro nuclei sono colpiti da **neutroni di energia opportuna** possono subire la reazione di fissione del nucleo. In questo caso, si producono due nuclei più leggeri del nucleo bersaglio e alcuni (solitamente 2 o 3) neutroni (**veloci**). La massa totale dei “prodotti”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

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

Ad esempio:



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI





La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia da fissione nucleare: il combustibile



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Tra gli elementi utilizzati come combustibile negli impianti (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 (^{235}U) ed uno non-fissile con neutroni termici (^{238}U) ma solo con neutroni veloci. Quest'ultimo isotopo (chiamato **fertile**) mediante una reazione nucleare può trasformarsi nell'isotopo 239 del plutonio (^{239}Pu), anch'esso fissionabile, anche mediante neutroni termici. Il processo di produzione di ^{239}Pu 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 ^{239}Pu 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.



La produzione di energia da reazioni nucleari

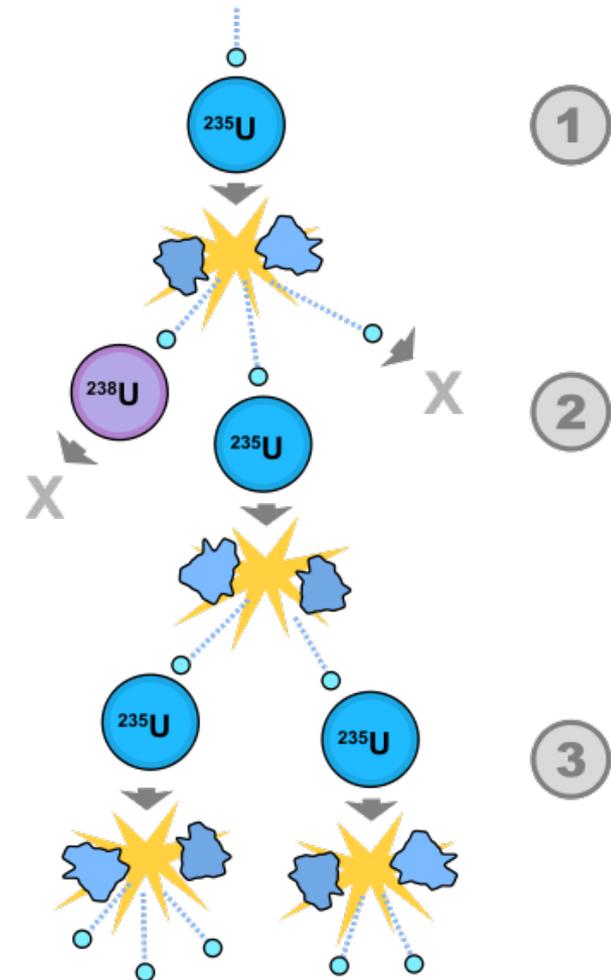
La fissione nucleare: la reazione a catena



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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.



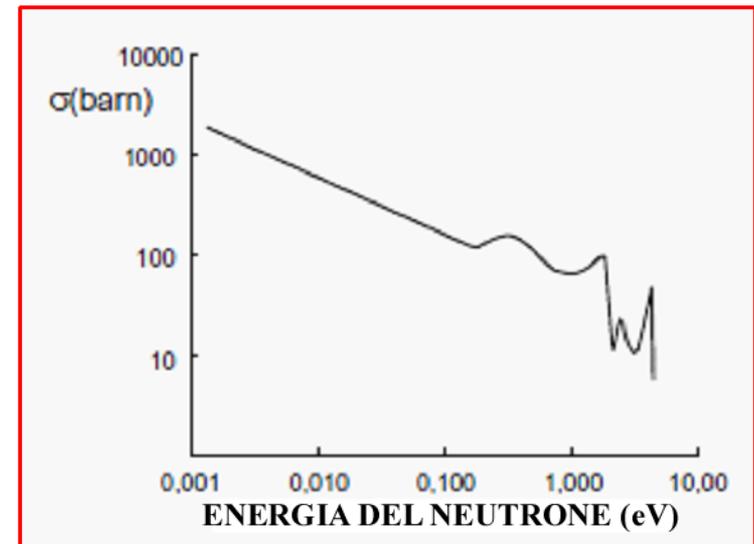


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La produzione di energia da reazioni nucleari

La fissione nucleare: la sezione d'urto di fissione

La possibilità (o probabilità) per un neutrone di dare luogo ad una reazione di fissione di un nucleo fissile dipende dalla energia cinetica del neutrone stesso e dal tipo di nucleo fissile. Tale probabilità è rappresentata dalla **sezione d'urto di fissione**, che è funzione dell'energia del neutrone incidente.



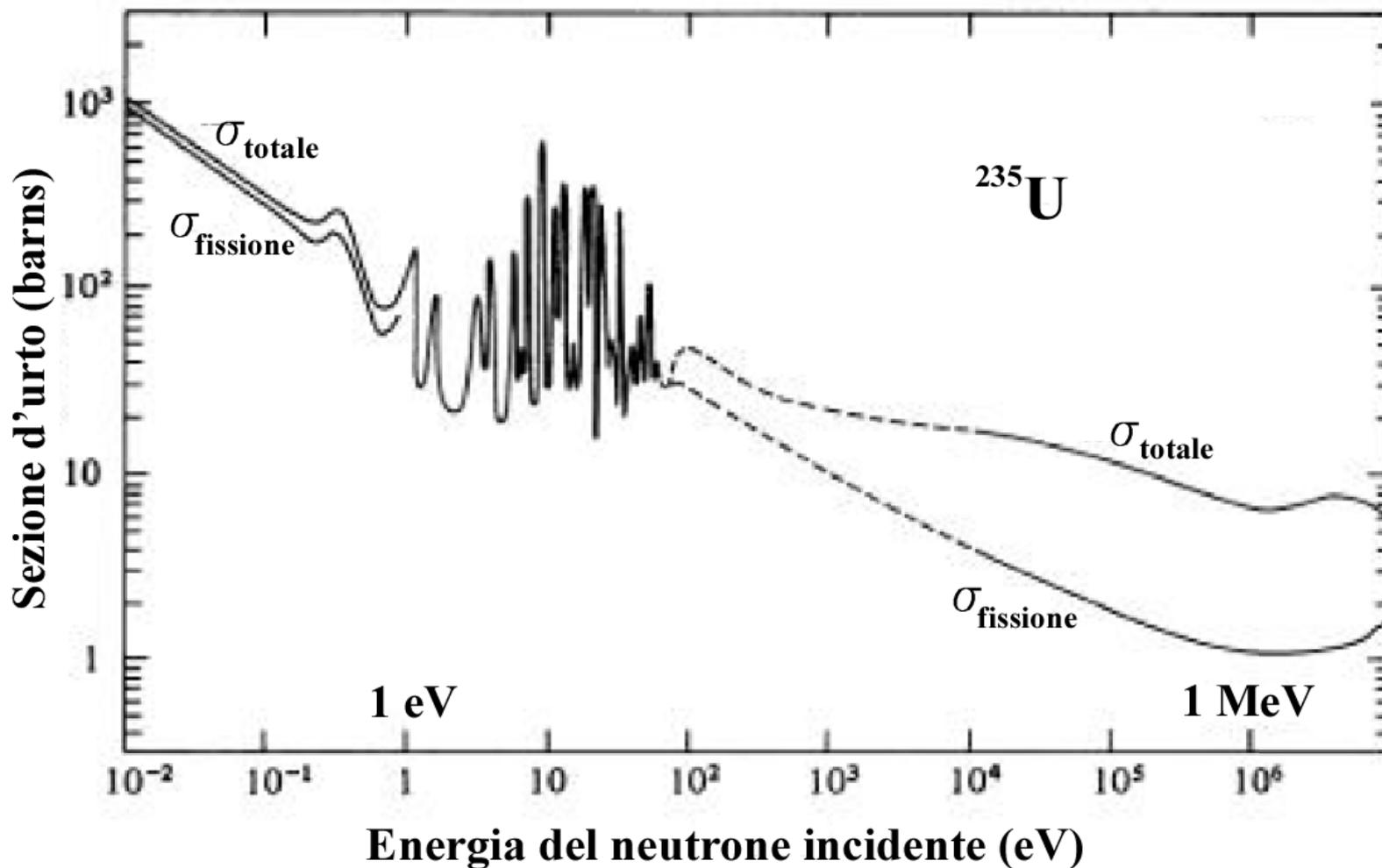
Anche se i nuclei di tutti gli elementi con elevata massa atomica possono essere scissi se colpiti da un neutrone, è l'isotopo ^{235}U dell'uranio a possedere un'elevata probabilità per la fissione anche se colpito da un neutrone lento (un neutrone lento rimane più a lungo nelle vicinanze del nucleo e quindi viene catturato più facilmente). Ciò vale anche per ^{233}U e ^{239}Pu (*isotopi artificiali*). La probabilità di fissione (cioè la sezione d'urto di fissione) dell'isotopo ^{238}U dell'uranio mediante neutroni termici è invece estremamente bassa.



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La produzione di energia da reazioni nucleari

La fissione nucleare: la sezione d'urto di fissione





La produzione di energia da reazioni nucleari

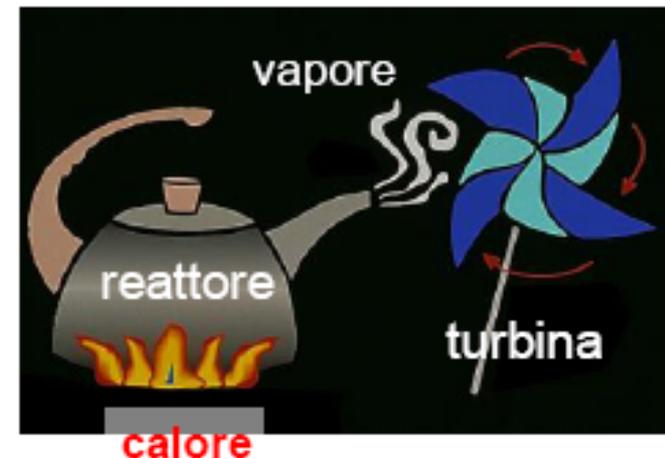
I reattori nucleari (termici)



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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 (dell'isotopo ^{235}U) 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** (quelli nei quali la reazione di fissione avviene con neutroni termici).

Comunque, indipendentemente dal tipo di reattore nucleare utilizzato per la produzione di energia elettrica, lo schema di base è rappresentabile come nella figura a lato. Il calore prodotto dalle reazioni di fissione che avvengono nel reattore nucleare riscalda un fluido refrigerante che viene poi utilizzato (normalmente) per produrre vapore che entra in una turbina collegata ad un generatore di corrente elettrica.





La produzione di energia da reazioni nucleari

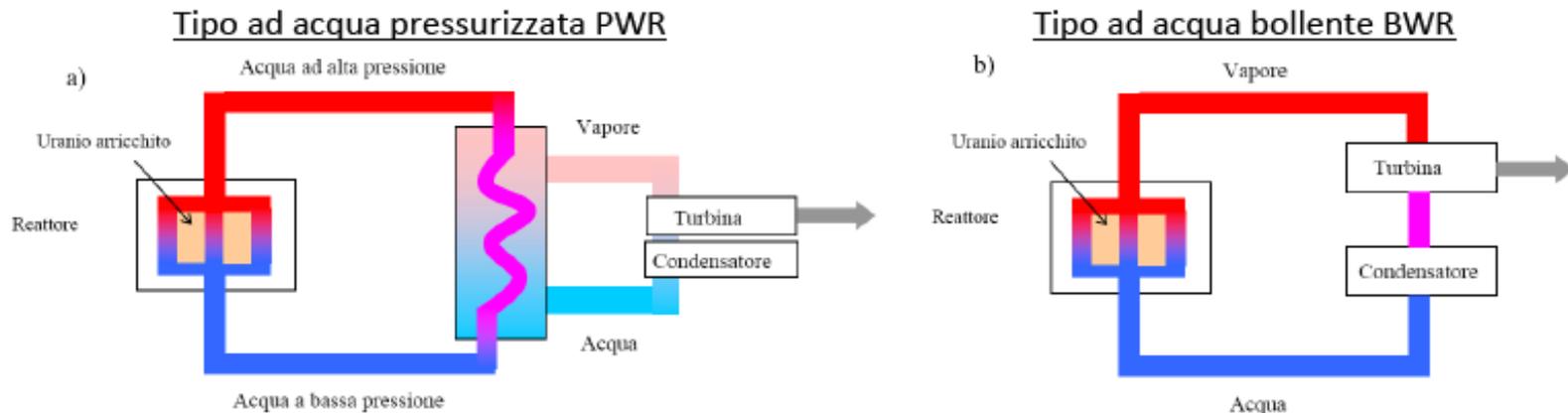
Classificazione delle centrali elettro-nucleari

In base alla tecnologia utilizzata, le centrali elettriche utilizzando reattori nucleari a fissione sono classificate come segue:

I^a generazione: è quella degli anni Cinquanta e Sessanta dello scorso secolo, che vide la costruzione e la sperimentazione di molti prototipi delle più varie concezioni.

II^a generazione: nei successivi anni Settanta e Ottanta si vide la costruzione di un gran numero di centrali commerciali per la produzione di energia elettrica, in massima parte ad uranio arricchito 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 (ad acqua pressurizzata PWR, o ad acqua bollente BWR) sono operativi in più di 30 paesi. La potenza elettrica di ciascuno di tali impianti è di circa 600-900 MW elettrici (MWe).

Schema di impianto nucleare di II^a generazione





La produzione di energia da reazioni nucleari

Classificazione delle centrali elettro-nucleari



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

III^a generazione: è costituita da 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 progettato da General Electric e Toshiba) altri, come lo European Pressurized Water Reactor (EPR da 1.600 MWe fornito dalla franco-tedesca AREVA), in fase di ordinazione (il primo esemplare di EPR (*Olkiluoto 3*) entrerà in funzione in Finlandia nel 2013/2014 (anziché, come precedentemente annunciato, nel 2011), altri sono in fase di approntamento o di trattativa commerciale in Europa, in Asia e nel Medio Oriente). L'americana Westinghouse Electric Company (acquisita dalla giapponese Toshiba a inizio 2006) con il concorso di Ansaldo Nucleare, ha applicato la tecnologia passiva all' Advanced Passive-600 (AP600) e, successivamente all' AP1000, che risultano essere gli unici impianti a sicurezza passiva approvati dalla Nuclear Regulatory Commission americana. A fine 2006 la Cina ha acquistato da Westinghouse le prime 4 unità di AP1000. Alla progettazione della prima unità partecipa anche Ansaldo Nucleare.



La produzione di energia da reazioni nucleari

Classificazione delle centrali elettro-nucleari



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

III^a+ generazione o International Near Term Deployment (INTD) Reactors:

E' una classe di reattori evolutivi rispetto ai precedenti che si prevede siano disponibili fra il 2010 e il 2015. Tra essi si citano l'Advanced CANDU Reactor (ACR), in corso di certificazione in Canada, Cina, Stati Uniti e Regno Unito; i reattori refrigerati a gas ad alta temperatura come il Pebble Bed Modular Reactor (PBMR), sviluppato in Sud Africa col supporto di esperti tedeschi e con la collaborazione di BNFL ed il GT-MHR, reattore modulare refrigerato a gas da 100 MWe progettato da General Atomics (Stati Uniti). Una menzione particolare fra i reattori di questa generazione merita l'International Reactor Innovative & Secure (IRIS), sviluppato da un ampio consorzio internazionale guidato da Westinghouse e di cui fanno parte anche ENEA, università (CIRTEN) ed imprese italiane (Ansaldo Nucleare, Camozzi, SIET). IRIS è un reattore modulare ad acqua pressurizzata da 335 MWe, con circuito contenitore a pressione. Tale peculiarità consente notevoli riduzioni delle dimensioni del sistema di contenimento e, di conseguenza, la possibilità di collocare tali reattori in caverna o nel sottosuolo.



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La produzione di energia da reazioni nucleari

Classificazione delle centrali elettro-nucleari

Le centrali di **nucleari di generazione III^a e III^a +** presentano (rispetto alla II^a generazione) miglioramenti "evolutivi" nel progetto, ma senza innovazioni sostanziali sui principi di funzionamento. Tali miglioramenti derivano da sperimentazioni effettuate durante la vita utile delle centrali di II^a generazione, senza l'introduzione di modifiche radicali quali potrebbero essere la sostituzione del refrigerante-moderatore acqua con altri refrigeranti (ad es. elio, sodio, piombo fuso o Sali minerali fusi).

Caratteristiche tipiche per i reattori di generazione III e III+ sono:

- **un progetto standardizzato che abbrevi le procedure di approvazione e riduca i tempi ed i costi di costruzione;**
- **alta disponibilità e lunga vita utile (tipicamente, 60 anni);**
- **presenza di dispositivi di sicurezza di tipo "intrinseco" o "passivo";**
- **flessibilità nella composizione del combustibile (uranio naturale ed a vari arricchimenti, miscele uranio-plutonio, quest'ultimo anche proveniente dallo smantellamento di armi nucleari, miscele uranio-torio) e sua alta utilizzabilità (burn-up), al fine di distanziare nel tempo le ricariche.**



La produzione di energia da reazioni nucleari

Classificazione delle centrali elettro-nucleari



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

IV^a generazione:

Sono reattori ancora allo stadio concettuale. Essi sono oggetto di una iniziativa avviata nel gennaio 2000, allorquando dieci Paesi si sono uniti per formare il Generation IV International Forum (GIF) allo scopo di sviluppare i sistemi nucleari di futura generazione, cioè i sistemi che potranno divenire operativi fra 20 o 30 anni. Essi dovranno rispettare i seguenti requisiti: a) sostenibilità, ovvero massimo utilizzo del combustibile e minimizzazione dei rifiuti radioattivi; b) economicità (livello di rischio finanziario equivalente a quello di altri impianti energetici); c) sicurezza e affidabilità (in particolare dovranno avere una bassa probabilità di danni gravi al nocciolo del reattore e tollerare anche gravi errori umani; non dovranno, inoltre, 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.

Tra i tipi di impianti individuati per la IV^a generazione, tre sono nominalmente reattori termici ed altri tre sono reattori autofertilizzanti a neutroni veloci.



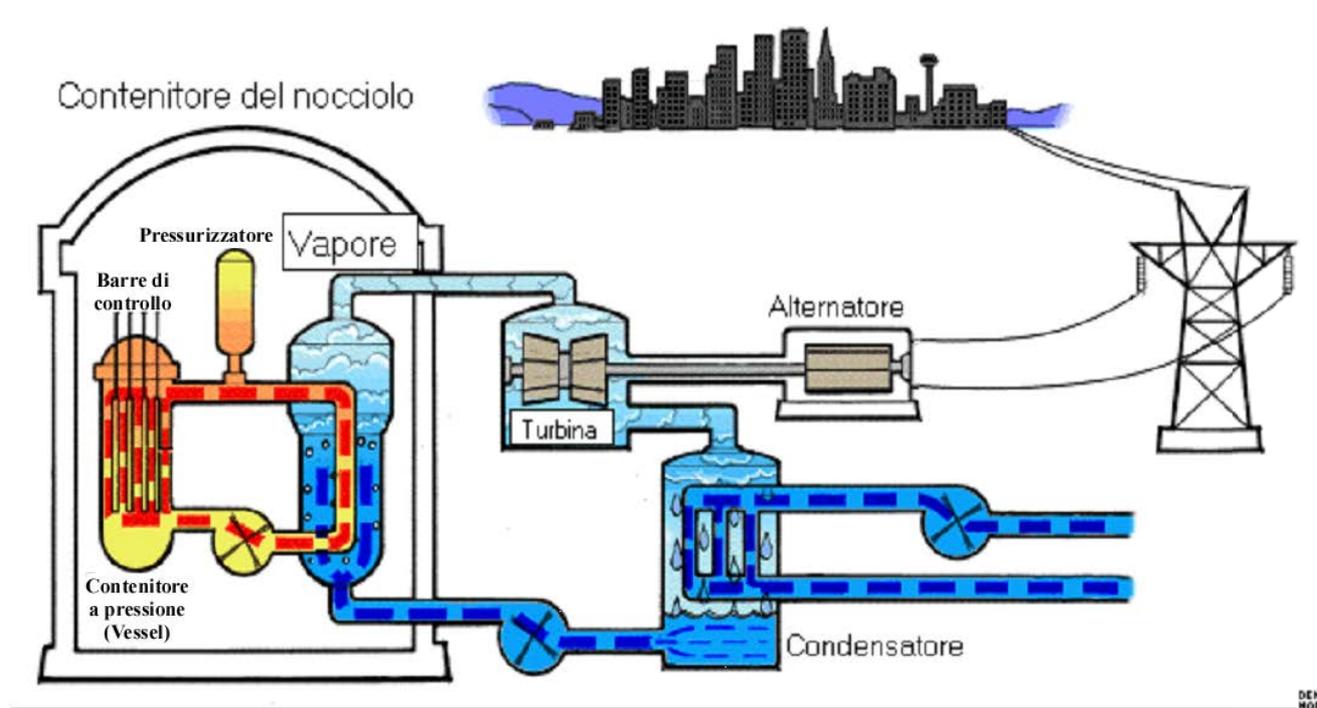
La produzione di energia da reazioni nucleari

Schema di centrale a fissione tipo PWR



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione (tipo 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

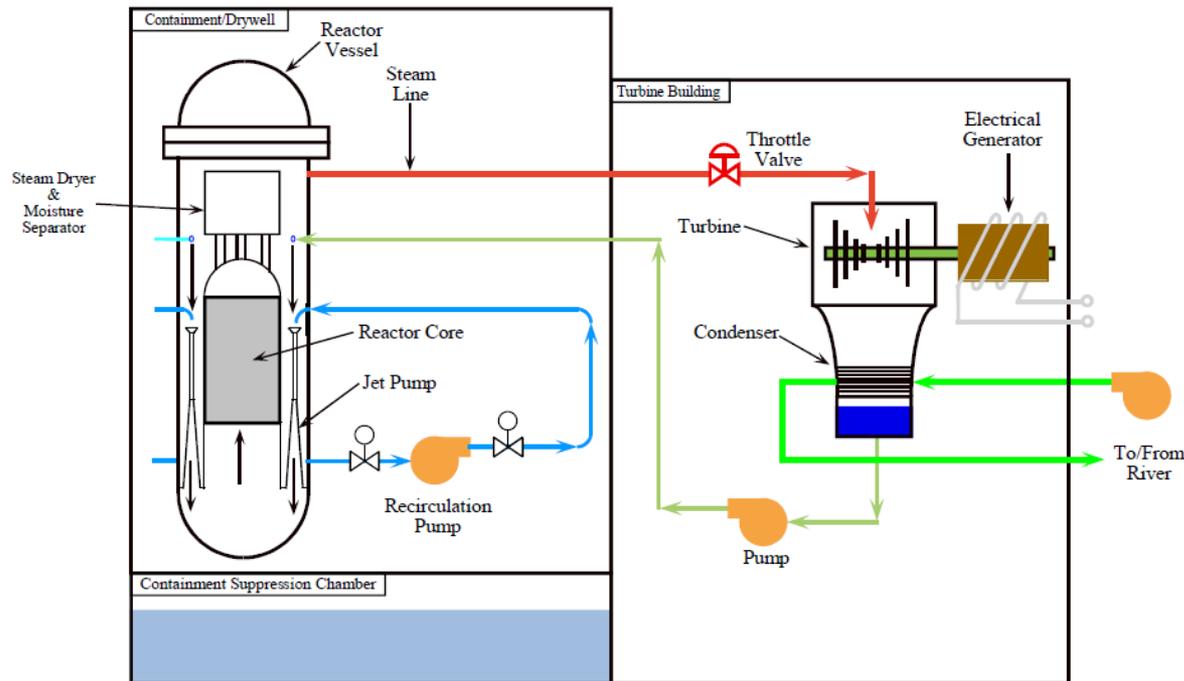




La produzione di energia da reazioni nucleari

Schema di centrale a fissione tipo BWR

Schema di funzionamento di una centrale nucleare a fissione (tipo BWR) simile agli impianti coinvolti nell'incidente di Fukushima (marzo 2011). Il calore sviluppato dalla reazione di fissione all'interno del reattore viene trasferito all'acqua (liquida) che si trasforma in vapore all'interno del contenitore (vessel) del reattore. Il vapore alimenta una turbina che tramite un generatore produce la corrente che alimenterà la rete elettrica





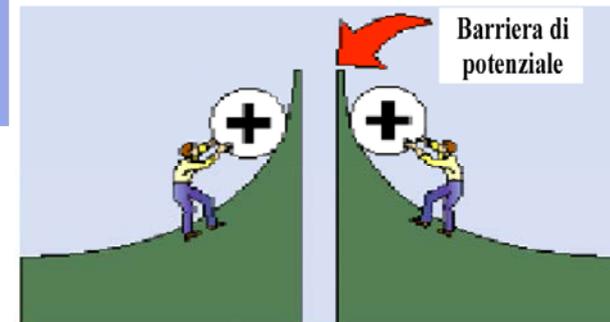
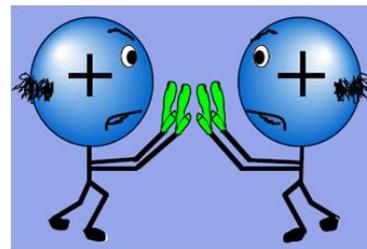
La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia da fusione nucleare



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Affinché avvenga una reazione di fusione nucleare è necessario che i due nuclei leggeri arrivino praticamente a contatto tra loro (a distanze equivalenti alle dimensioni del nucleo). Poiché essi sono entrambi carichi positivamente, tenderanno a respingersi senza interagire. Esiste cioè una sorta di barriera che impedisce la loro interazione (cioè la fusione).



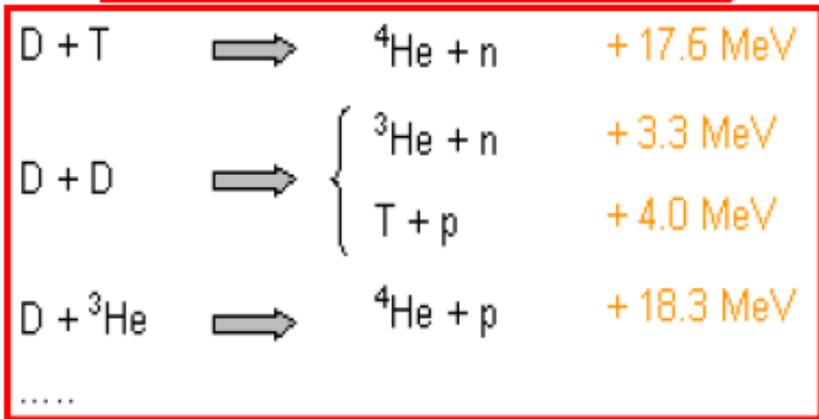
Occorrerà allora fornire ai due nuclei una energia sufficiente per superare tale barriera e farli arrivare ad una distanza così piccola dove agiscono delle forze attrattive molto intense (le forze nucleari) in grado di superare la repulsione elettrostatica. La probabilità di superare tale barriera è, 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 (cioè di fusione nucleare). Si può rendere elevata tale probabilità facendo sì che la velocità con cui i nuclei reagenti si urtano sia molto alta: cioè la loro energia cinetica (e quindi la temperatura) deve essere molto elevata.



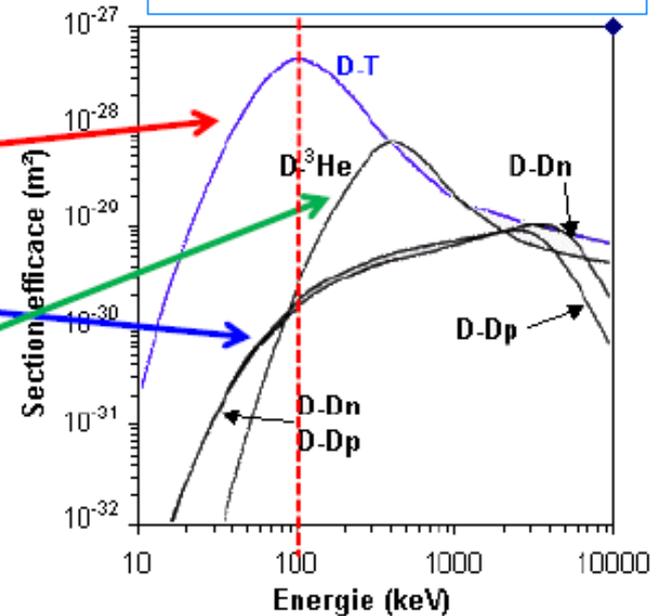
La produzione di energia da reazioni nucleari

Sezione d'urto di fusione nucleare

Alcune reazioni di fusione



Sezione d'urto di fusione per alcune reazioni



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



La produzione di energia da reazioni nucleari

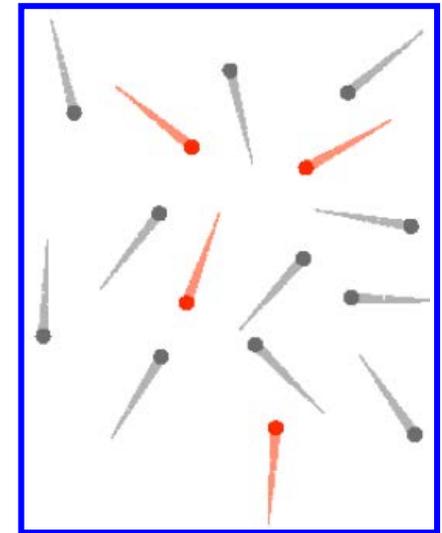
Fusione nucleare: il plasma



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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 (di confinamento) 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**





La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: condizione di breakeven

Una domanda fondamentale per il progetto di un **impianto** per la produzione di energia è: *il mio sistema produce più energia di quella che devo immettere per mantenere attiva la reazione ?*

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**.

Poiché lo scopo del futuro reattore a fusione è quello di produrre energia elettrica in modo continuo **si deve andare a $Q > 1$** , 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.



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il criterio di Lawson



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Condizioni ingegneristiche (*teoriche*) per la fusione termonucleare controllata

Il **criterio di Lawson**, formulato dall'**ingegnere** e fisico inglese John D. Lawson (*documento scritto da Lawson sotto segreto militare nel dicembre 1955*), caratterizza l'insieme di parametri che permette ad un reattore a fusione di produrre più energia di quanta ne assorbe (**cioè di avere $Q > 1$**).



Per ottenere in laboratorio la **fusione termonucleare controllata con un bilancio energetico positivo** (*l'energia liberata dalle reazioni di fusione deve compensare sia le perdite sia l'energia immessa nel sistema per mantenere attiva la reazione*) è **necessario soddisfare le condizioni espresse dal Criterio di Lawson** :

$$n\tau_E T \geq 1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$$

In tali condizioni si ha $Q \cong 3$

per un plasma **D - T**



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il criterio di ignizione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Attualmente il criterio di Lawson ha solo interessi storici, in quanto per la proiezione dei parametri di un futuro reattore si usa il più moderno criterio di ignizione

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

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

per un plasma **D - T**



La produzione di energia da reazioni nucleari

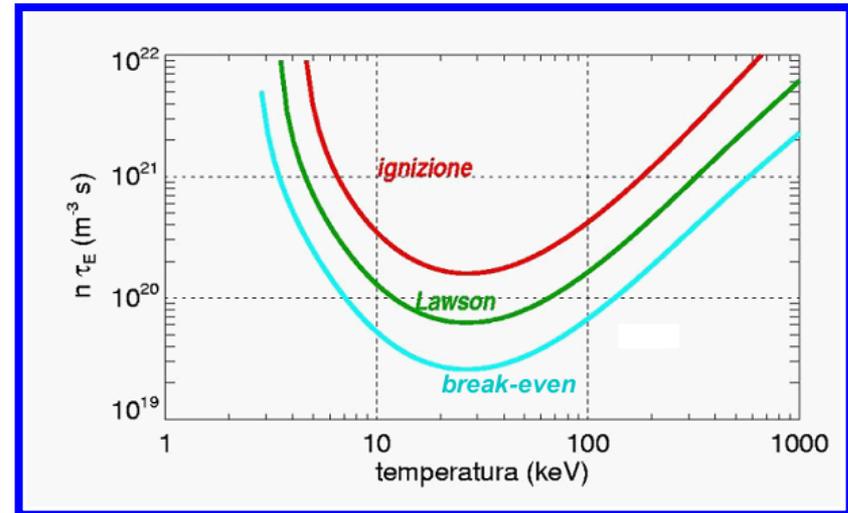
Fusione nucleare: condizioni reali (??) per la fusione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Studi più approfonditi hanno però mostrato che la funzione $nt_E=f(T)$ presenta un minimo per cui si ottiene il grafico riportato a lato che mostra le regioni, nel piano (nt_E, T) , corrispondenti alle condizioni di:

breakeven, **Lawson**, **ignizione**



Per raggiungere i criteri necessari a un reattore, si può operare in due modi differenti, rimanendo a temperature T “relativamente basse”:

basse densità n ($\approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$) e tempi di confinamento τ_E alti (≈ 1 secondo)
(macchine a **confinamento magnetico**) (volume plasma $\approx 1000 \text{ m}^3$)

alte densità n ($\approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$) e tempi di confinamento τ_E piccoli ($\approx 10^{-10}$ secondi)
(macchine a **confinamento inerziale**) (volume plasma $\approx 10^{-12} \text{ m}^3$)



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: la strada attuale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

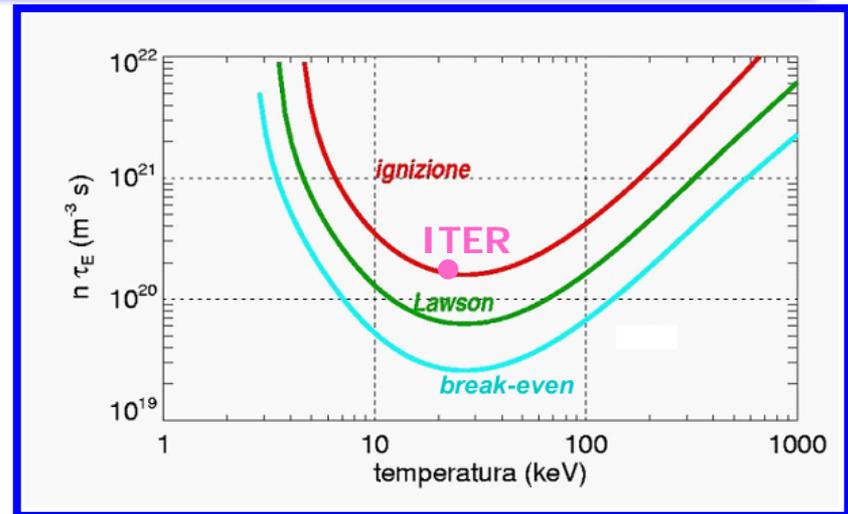
Attualmente gli studi e le applicazioni, a livello internazionale, sulla fusione nucleare si concentrano principalmente sul confinamento magnetico di plasmi Deuterio – Tritio.

Per il progetto dell'impianto **ITER** (confinamento magnetico e plasma D-T) si ha:

$$n = 1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$\tau_E = 1 \text{ secondo}$$

$$T = 20 \text{ keV} \quad (= 155 \text{ milioni di gradi})$$



A temperature così elevate il problema diventa:
come confinare il plasma in un recipiente ?



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il confinamento magnetico



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

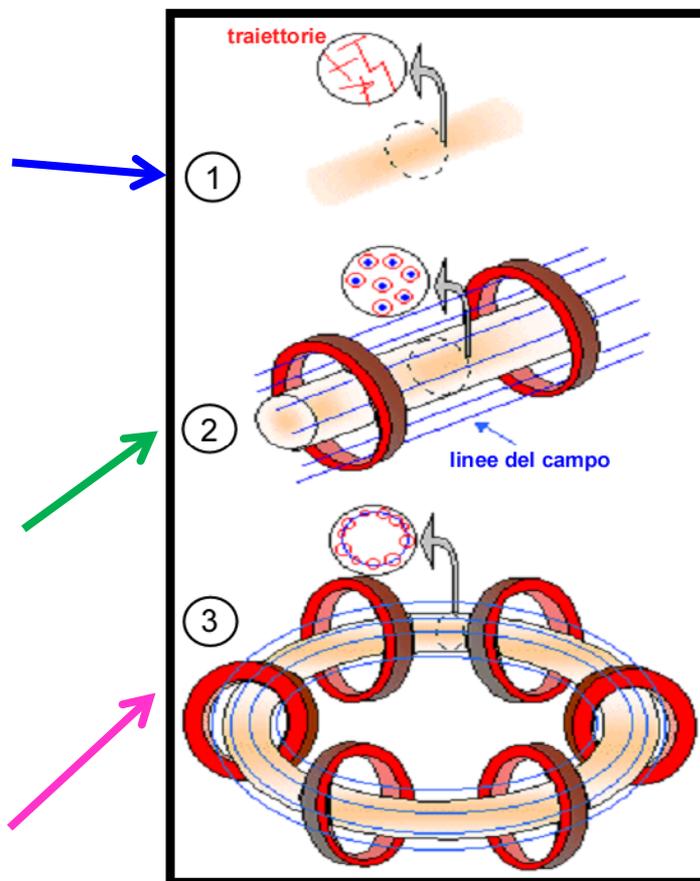


In linea di principio il plasma costituito da particelle cariche (ioni di deuterio e trizio) può essere **confinato mediante un campo magnetico**: in assenza di questo campo le particelle si muoverebbero a caso in tutte le direzioni, urterebbero le pareti del recipiente e il plasma si raffredderebbe inibendo la reazione di fusione.

In un campo magnetico invece le particelle sono costrette a seguire traiettorie a spirale intorno alle linee di forza del campo mantenendosi lontano dalle pareti del recipiente.

Se si utilizzasse la configurazione 2 si avrebbe però la perdita di particelle alle estremità.

Per evitare tale perdita conviene che si utilizzi una configurazione tipo la 3





La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il tokamak



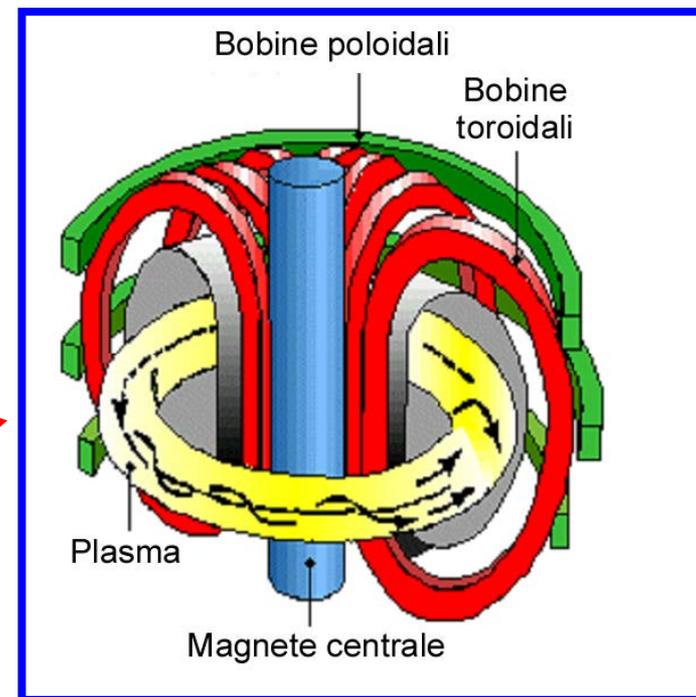
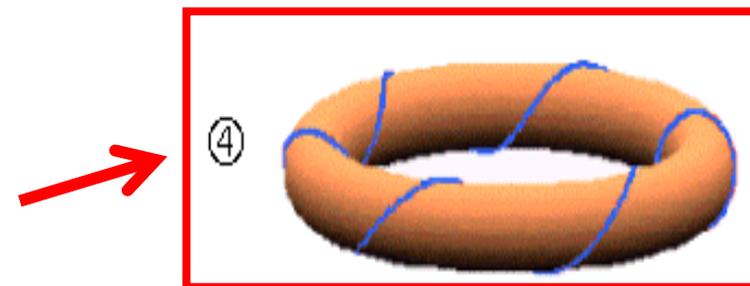
FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

In realtà si è visto che per minimizzare la perdita di particelle di plasma (nuclei di deuterio e trizio) le linee del campo debbono essere elicoidali, come nella configurazione 4. Questo si ottiene aggiungendo al campo toroidale un altro campo ad esso perpendicolare (campo poloidale).

Il metodo sperimentale utilizzato per produrre le linee di campo elicoidali ha dato origine a due tipi di macchine:

Tokamak e **Stellarator**

La macchina tipo Tokamak è quella più studiata (e sviluppata sperimentalmente) a livello mondiale





La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il tokamak



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La piattaforma per
l'impianto ITER a metà 2011



La piattaforma per
l'impianto ITER nel 2018

Gli impianti tipo tokamak sono quelli attualmente più diffusi.

Circa 30 tokamaks sono funzionanti, ad inizio 2008, in vari paesi del mondo.

Oltre un centinaio hanno operato in anni precedenti e sono ora smantellati o in fase di smantellamento .

5 sono attualmente in costruzione.

1 (**ITER**) è in fase finale di progettazione ed è partita la preparazione alla costruzione a **Cadarache, Francia**



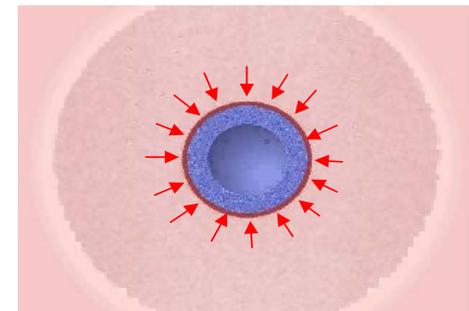
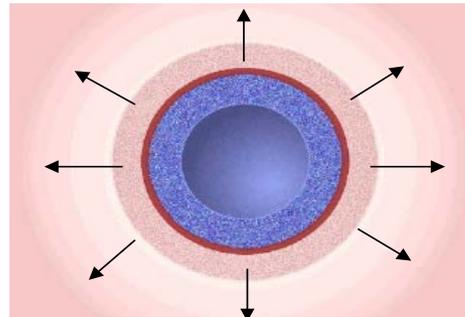
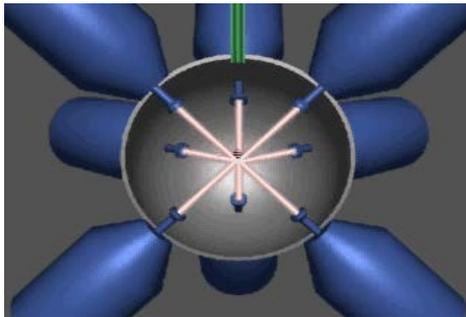
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il confinamento inerziale (cenni)



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Nella fusione a confinamento inerziale una sferetta di combustibile (deuterio + trizio, allo stato solido per la temperatura criogenica a cui sono state prodotte le sferette) 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 un fascio laser ad alta energia (10^{18} – 10^{19} W/m²) che causa la vaporizzazione istantanea del guscio della sfera. Per la conservazione della quantità di moto la parte interna contenente il combustibile viene fortemente compressa. L'ignizione dura fintanto che il combustibile rimane confinato dalla propria inerzia. Il confinamento inerziale è stazionario ($n_0 \approx 10^{31}$ m⁻³ e $t_E \approx 10^{-11}$ s).





La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il combustibile



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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

Il 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.



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il reattore nucleare a fusione

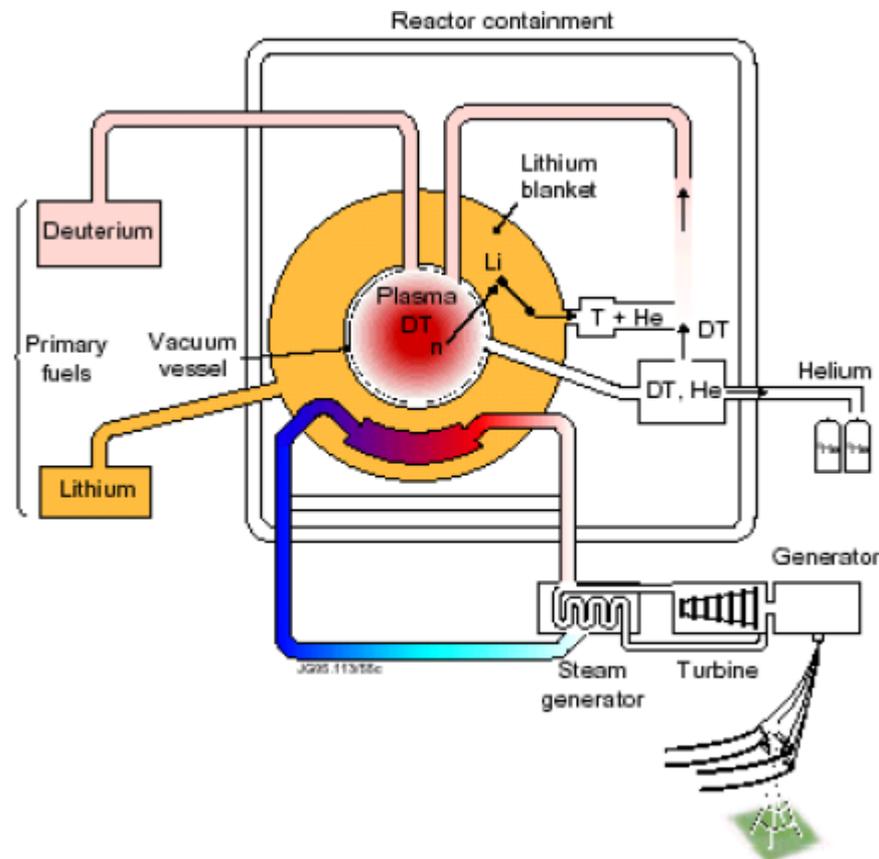


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Lo schema tipico di un impianto nucleare a fusione per la produzione di energia (termica e successivamente elettrica) è rappresentato a lato. Il plasma confinato a 100-200 milioni di gradi deve essere rifornito di combustibile (deuterio e trizio). I neutroni, non confinati, reagiscono con il mantello di litio che circonda la camera toroidale, dando origine a trizio che viene quindi estratto e riciclato per fornire plasma.

L'elio trasferisce la sua energia al plasma e sostiene i nuovi processi prima di essere pompato fuori dal toro insieme a parte del plasma per recuperare le particelle di D e T che non hanno reagito.

L'energia liberata dalle reazioni, in particolare quella trasportata dai neutroni, viene recuperata sotto forma di calore generato nel mantello e nella prima parete ed utilizzata per produrre vapore come in uno schema convenzionale di centrale elettrica .



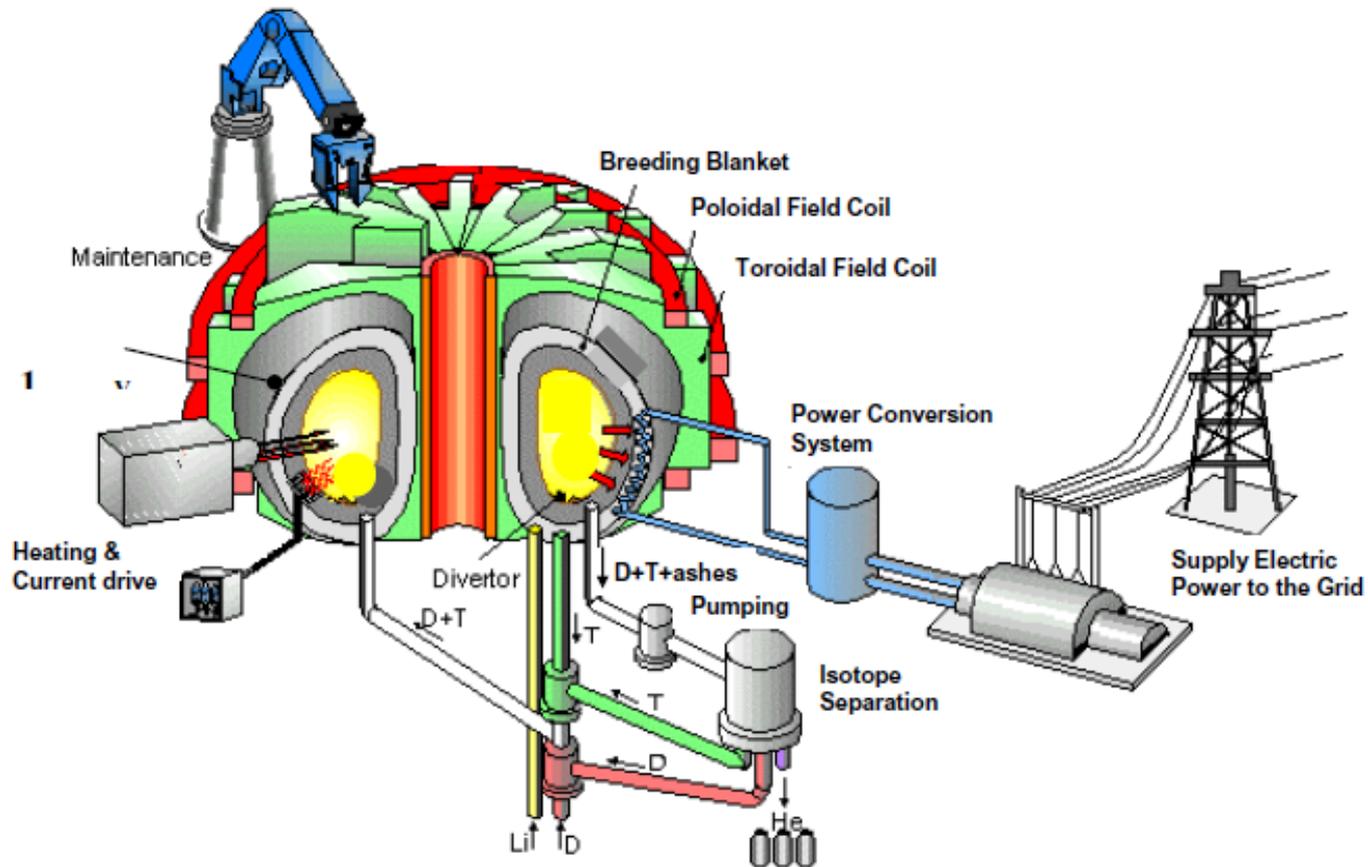


La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: centrale elettro-nucleare a fusione



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



Schema concettuale di centrale nucleare di potenza a fusione (PPCS)



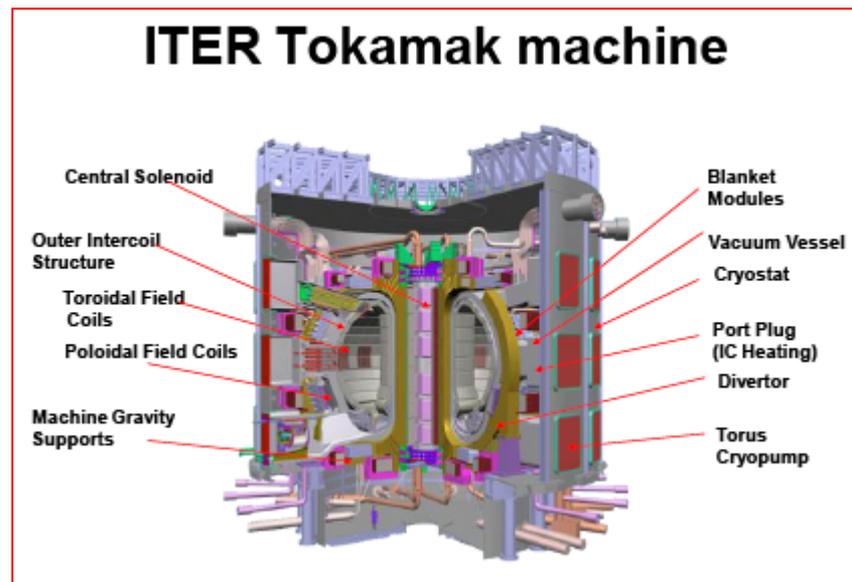
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: l'impianto ITER



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

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).



Tokamak : circa 29 m di altezza, 28 m diametro e circa 23000 t di massa

La costruzione e la messa in esercizio dell'impianto richiederanno circa 10 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).

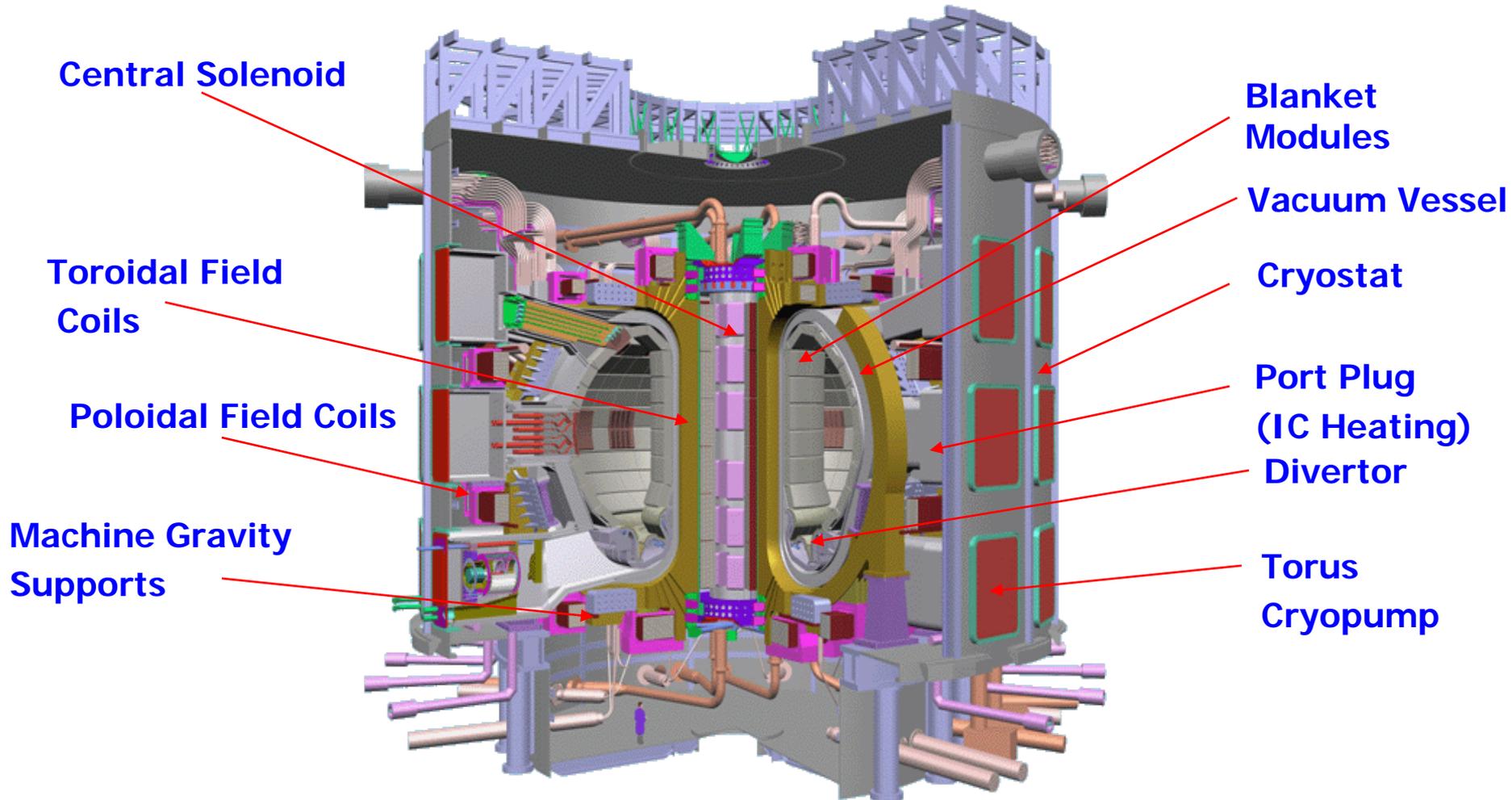


La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il tokamak dell'impianto ITER



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



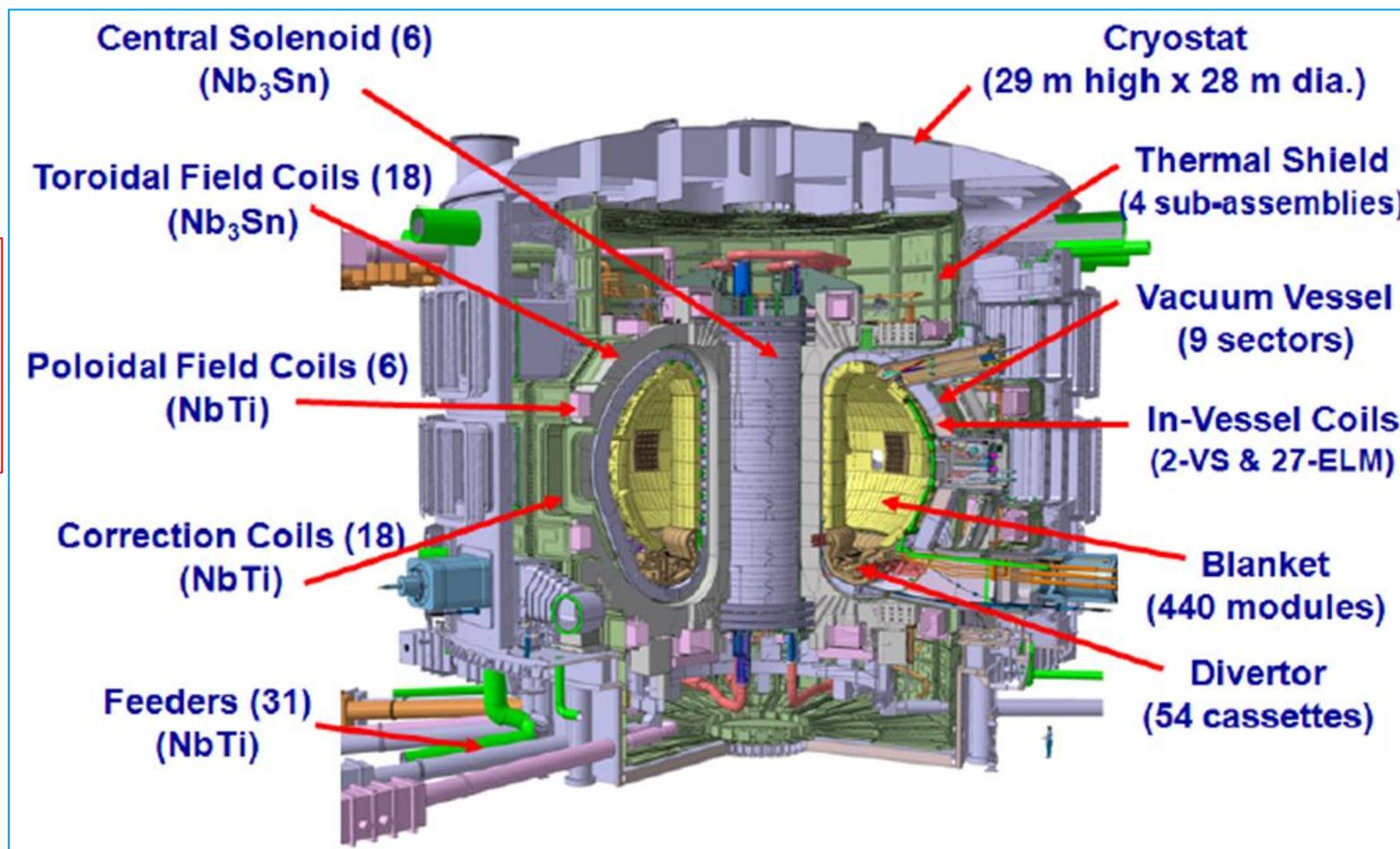


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER

Il tokamak
ITER
Design
attuale



Tokamak : circa 29 m di altezza, 28 m diametro e circa 23000 t di massa

<http://www.fondazioneocchialini.it>

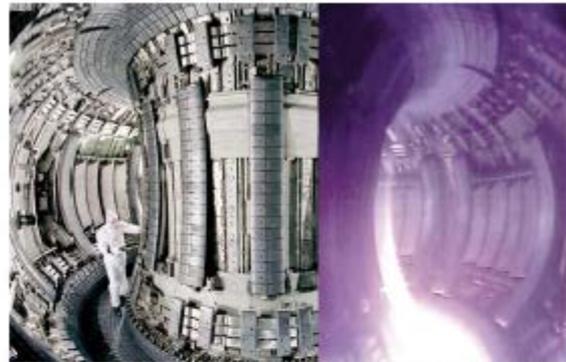


La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER

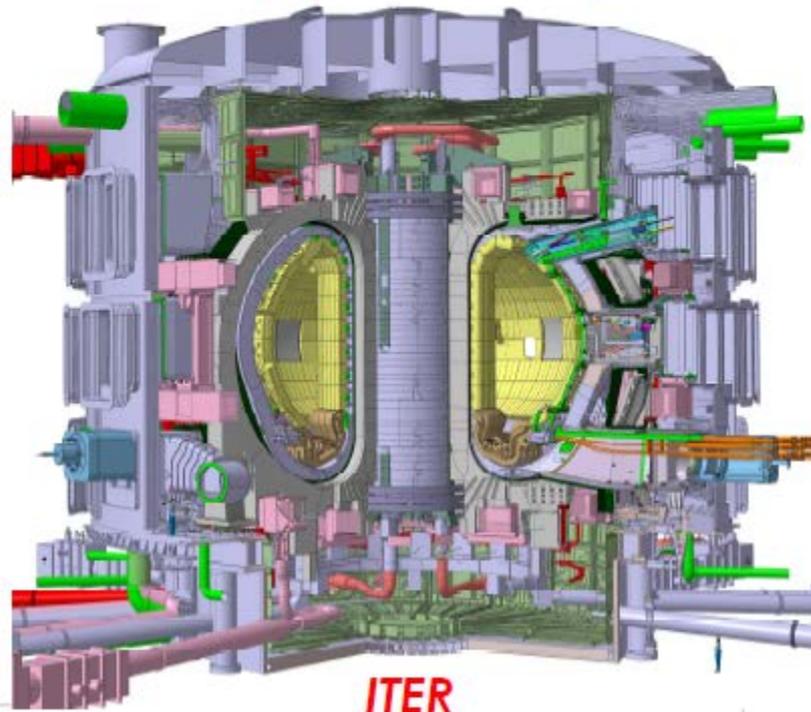


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI



JET – Internals & Plasma

ITER will allow us to produce plasmas with temperatures of 100 - 200 million °C (10 times the temperature of the sun's core) ⇒ 500 Megawatts of fusion power



Un confronto tra JET, ITER ... e un elefante !



JET

ITER



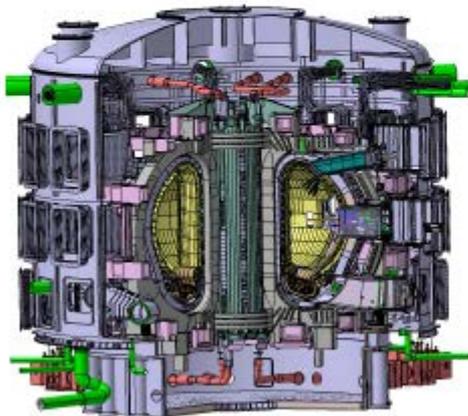
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Cryostat Size Comparison



ITER Tokamak
29 m Tall x 28 m Wide



Arc de Triomphe
49 m Tall x 45 m Wide



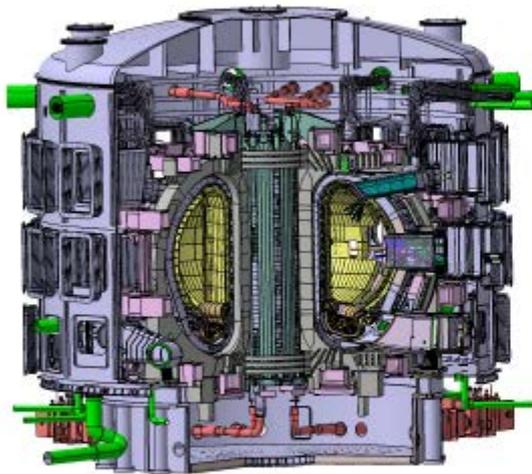
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

ITER Tokamak - Mass Comparison



ITER Machine mass:
~23000 t
28 m diameter x 29 m tall

Charles de Gaulle mass:
~38000 t (empty)
856 ft (261 m) long
(Commissioned 2001)



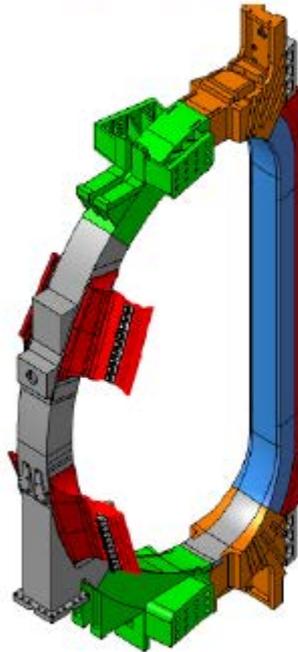
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

TF Coil – Mass Comparison



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



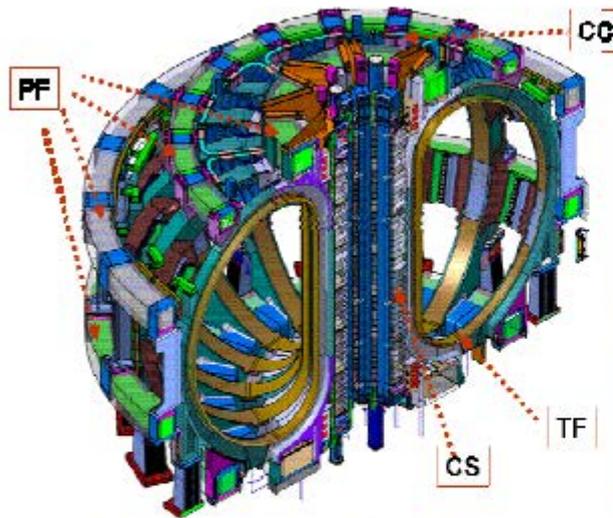
Boeing 747-300
(Maximum Takeoff Weight)
~377 t



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER

Magnet Energy Comparison



Superconducting Magnet Energy:
~51 GJ

Charles de Gaulle Energy:
~38000 t at ~180 km/hr
or
The energy of ~19000 Audi A5's each at ~180 km/hr





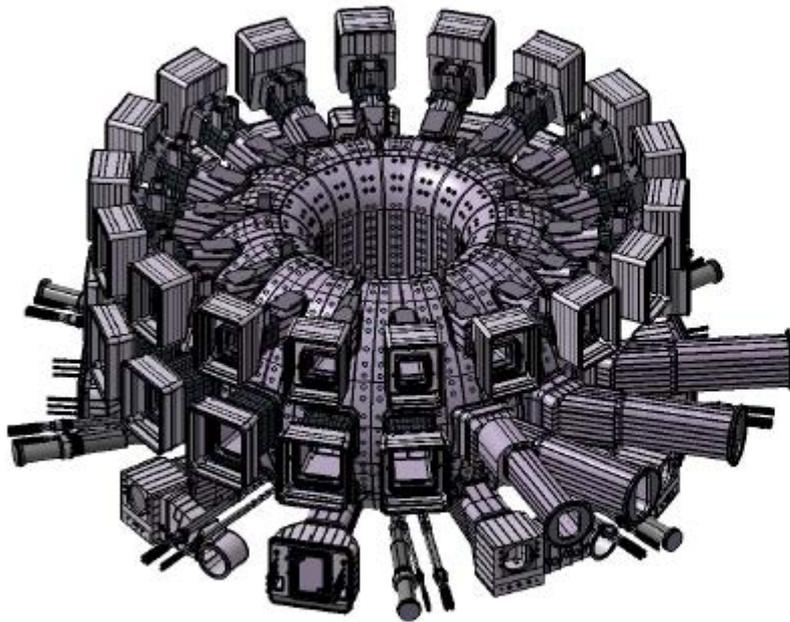
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Vacuum Vessel Mass Comparison



VV & In-vessel components mass: ~8000 t
19.4 m outside diameter x 11.3 m tall



Eiffel Tower mass: ~7300 t
324 m tall



La questione energetica Il supporto della ricerca



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Appare chiaro, anche dalle cose che abbiamo visto in questa nostra chiacchierata sull'energia e dalle esigenze di trovare fonti con elevata densità di energia, che la **RICERCA** giocherà un ruolo fondamentale nella possibilità di dare risposte positive a tali aspettative.

Non vanno certamente dimenticate fonti altrettanto importanti nel panorama della produzione di energia quali le fonti rinnovabili (solare, eolica, geotermica) anche se esse potranno essere impiegate per produrre piccole quantità di energia (per installazione): ma ... tante piccole quantità Anche in questo campo appare fondamentale il ruolo che dovrà giocare la **RICERCA**.

Un altro ruolo importante potrà essere giocato dal risparmio energetico, con particolare rilevanza all'aumento dell'efficienza delle fonti già note: e, di nuovo, molto è affidato alla **RICERCA**.



Per concludere: un augurio per il vostro futuro
soprattutto se nel campo della RICERCA