FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La questione energetica

La fissione e la fusione nucleare come fonti energetiche

Gilio Cambi
Università di Bologna – Dipartimento di Fisica

Fossombrone, 18 e 25 Maggio 2009
Pesaro, 19 e 26 Maggio 2009

FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Sommario

La questione energetica: consumi e prospettive
Energia da reazioni nucleari: fissione e fusione
La fissione nucleare:
- le sue basi fisiche
- la tecnologia (impianti nucleari attuali e futuri)

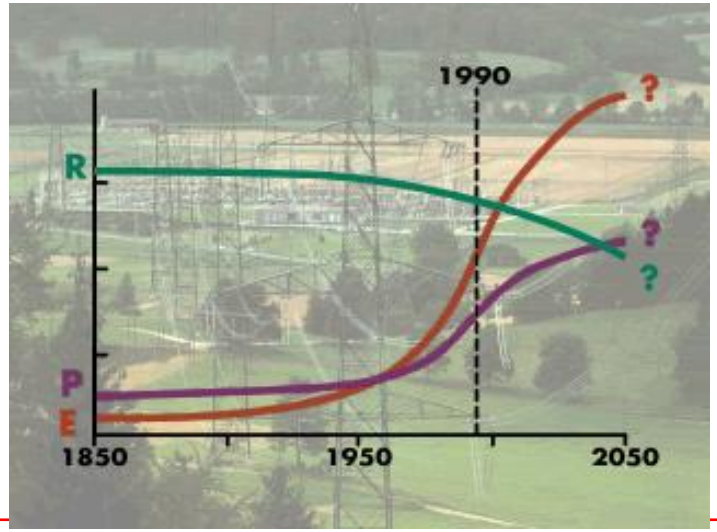
La fusione nucleare:
- le sue basi fisiche
- la tecnologia
- l'impianto ITER

Fossombrone, 18 e 25 Maggio 2009
Pesaro, 19 e 26 Maggio 2009

La Domanda di Energia : Il trend

Lo sviluppo dell'umanità non può farsi senza risorse energetiche, almeno secondo il nostro attuale modello di sviluppo.

La crescita della popolazione mondiale e della domanda di energia porterà, nel prossimo futuro, ad un deficit energetico difficilmente colmabile con le riserve conosciute di combustibili fossili (*riserve non rinnovabili, che tendono a diminuire*).



- R: risorse non rinnovabili
- P: popolazione mondiale
- E: consumo energetico

Domanda:
come affrontare e/o risolvere il problema ?

La questione energetica:
implicazioni, problematiche e prospettive

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

Secondo molte stime *(vedi ad es. [1])* il consumo di energia a livello mondiale potrebbe raddoppiare o triplicare, rispetto al valore attuale, entro il 2050. Tutte le prospettive economiche mostrano che i bisogni energetici aumenteranno continuamente. L'ampiezza di tali aumenti varia a seconda del tipo di scenario considerato (livello di crescita economica, messa in conto o no dei vincoli ambientali, ecc.) ma comunque dipende da due cause principali:

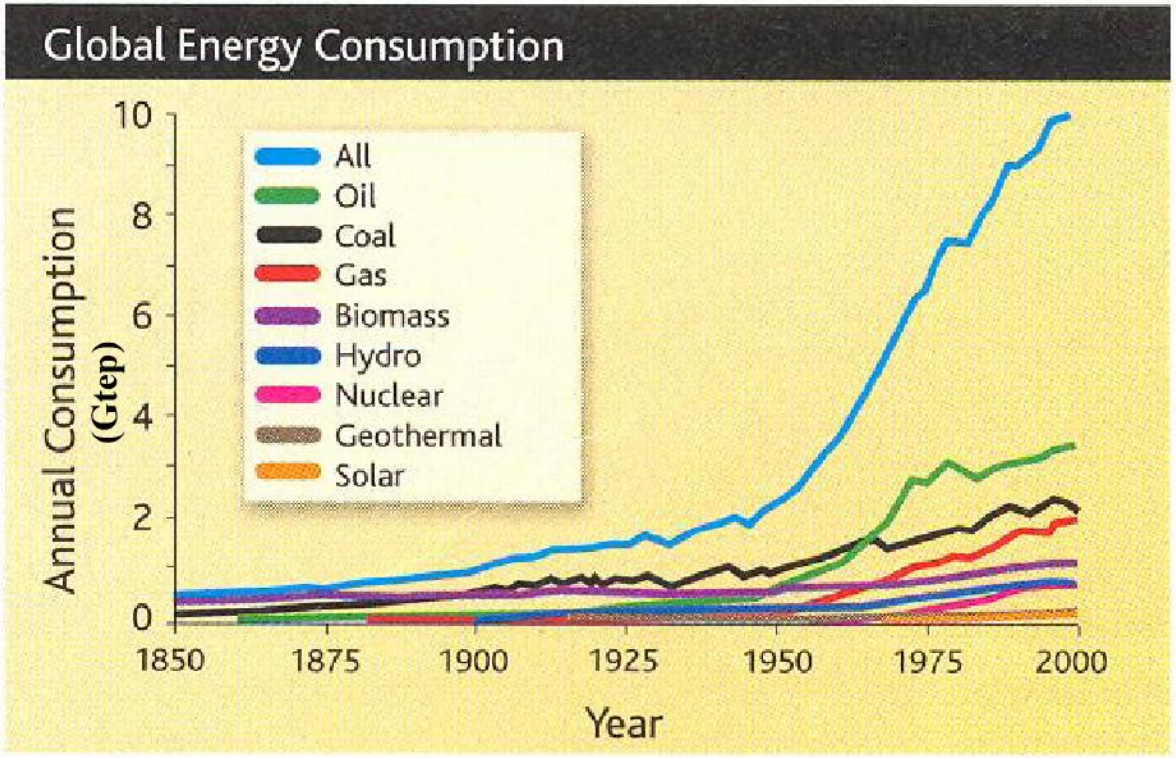
1) **l'aumento della popolazione mondiale, che dovrebbe passare dai 6 miliardi del 2000 a 10 miliardi nel 2050;**
2) **l'aumento dei bisogni energetici dei paesi in via di sviluppo**

[1] Deciding the Future: Energy Policy Scenarios to 2050, World Energy Council 2007

La questione energetica:
implicazioni, problematiche e prospettive

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

Il consumo totale di energia nel mondo è (valutazione anno 2000) di circa 10 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (tep).

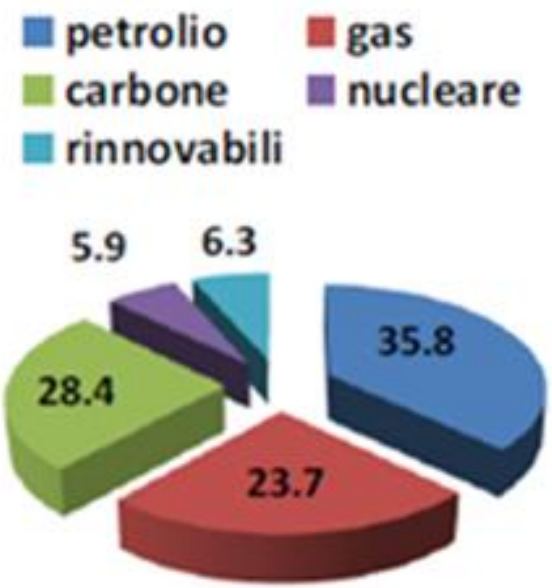


Consumo di energia nel mondo nel 2006

REGIONE	Consumo totale [Mtep]	Consumo per fonti energetiche				
		Petrolio [Mtep]	Gas [Mtep]	Carbone [Mtep]	Nucleare [Mtep]	Rinnovabili [Mtep]
Nord America	2.803	1.124,6	702,5	611,6	212,3	152,0
Centro e Sud America	528,6	236,5	117,5	21,8	4,9	147,9
Europa-Eurasia	3.027,1	970,1	1.031,7	552,9	287,8	184,6
Medio Oriente	554,2	280,1	260,3	8,9		4,9
Asia Pacifico	3.641,6	1.148,0	394,7	1.792,1	128,2	178,6
Africa	324,1	130,5	68,2	102,8	2,4	20,2
TOTALE	**10.878,6**	**3.889,8**	**2.574,9**	**3.090,1**	**635,6**	**688,2**
Contributo percentuale		**35,8%**	**23,7%**	**28,4%**	**5,9%**	**6,3%**

Fonte: BP Statistical Review of World Energy (giugno 2007)

Consumo di energia nel mondo nel 2006
Fonti utilizzate (contributi percentuali)



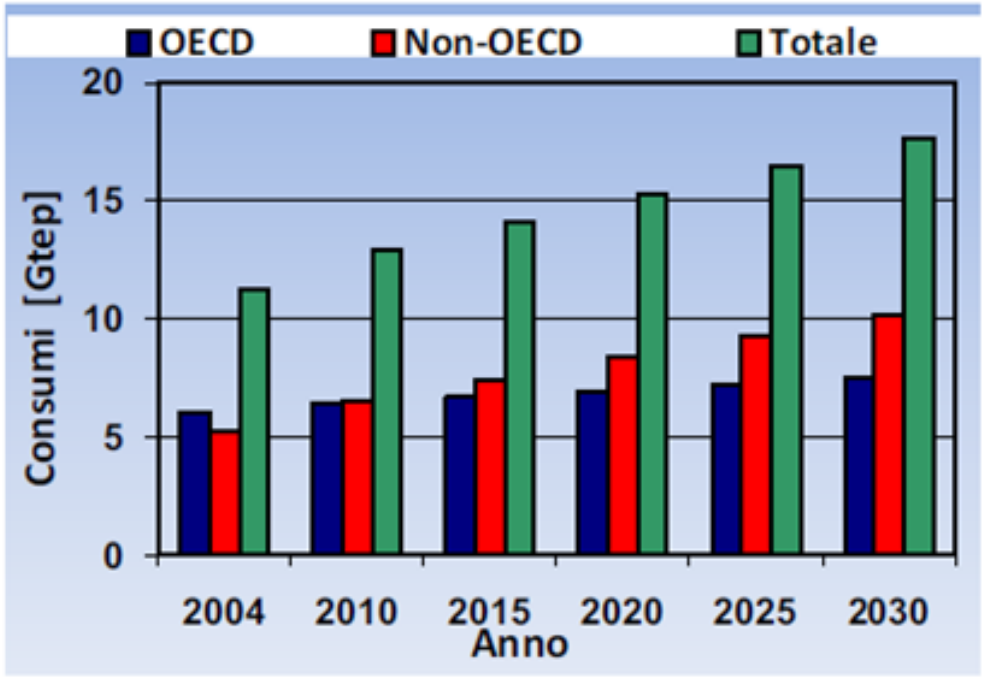
La questione energetica:
implicazioni, problematiche e prospettive

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

Previsioni di crescita dei consumi di energia [in Gtep] nel periodo 2004-2030

(*fonte: EIA-International Energy Outlook 2007).*

(**OECD**: Organization for Economic Cooperation and Development)

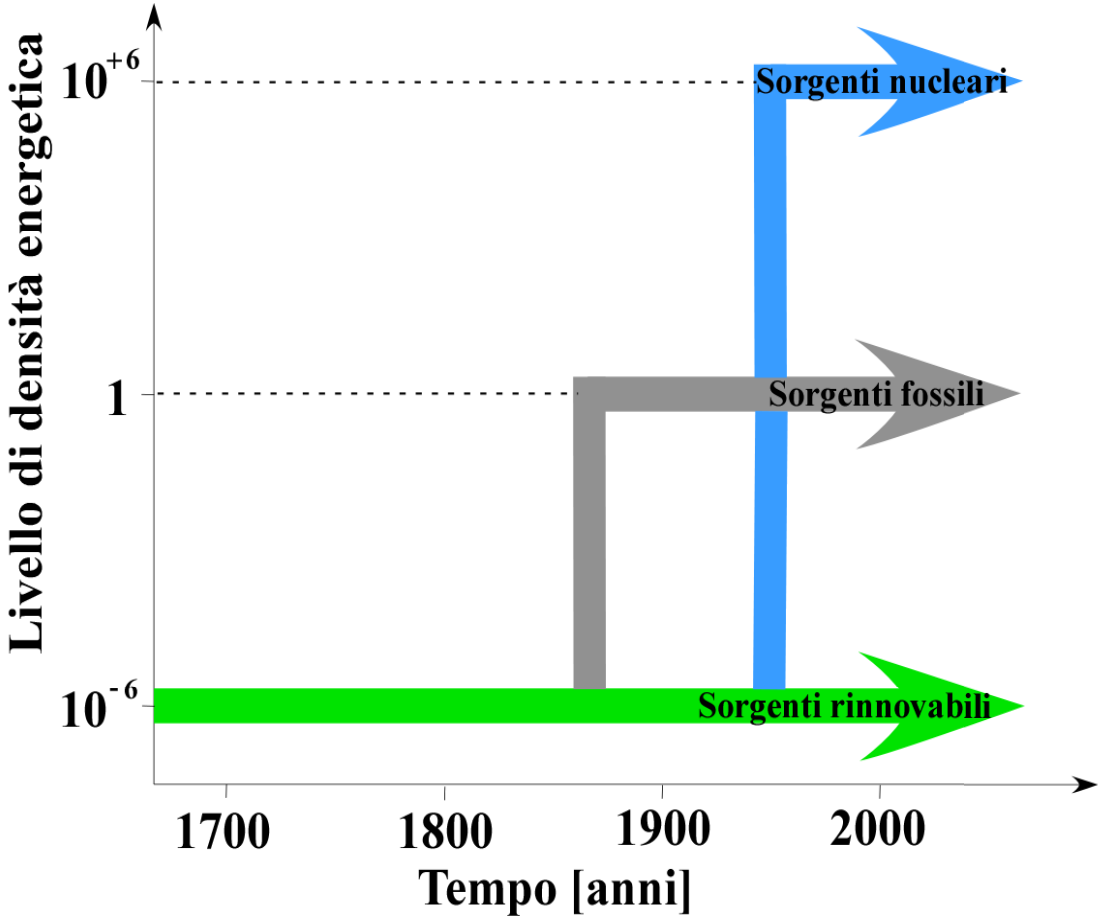


A seconda dello scenario considerato, il consumo mondiale complessivo di energia sarà compreso tra 14 e 27 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (tep) nel 2050 e tra 18 e 45 tep nel 2100.

La questione energetica:
implicazioni, problematiche e prospettive

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

E' quindi evidente che l'aumento dei bisogni energetici porterà all'utilizzo di sorgenti energetiche in grado di fornire una maggiore quantità di energia per unità di massa consumata (cioè a **sorgenti con elevata densità energetica**). Considerando come livello di riferimento (valore = 1) la densità di energia associata alle sorgenti "fossili", la densità di energia associata alle sorgenti "nucleari" ha un valore (relativo) di 1 milione. Per le sorgenti "rinnovabili" tale valore relativo diviene 1 milionesimo.



La questione energetica:
implicazioni, problematiche e prospettive

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

La differenza fondamentale tra sorgenti fossili e nucleari è che le prime si basano su reazioni chimiche che mettono in gioco fenomeni (quale la combustione) che avvengono a livello degli elettroni degli atomi dei combustibili (petrolio, gas, carbone) mentre le seconde si basano su reazioni nucleari che mettono in gioco fenomeni (quali la fissione e la fusione) che avvengono a livello dei nuclei degli atomi dei combustibili (uranio, deuterio, trizio).

Esempio di reazione chimica

combustione del metano

$$CH_4 + 2O_2 \rightarrow CO_2 + 2H_20$$

(48 MJ/kg)

Esempio di reazione nucleare

fissione U^{235}

$$U^{235} + n \rightarrow Rb^{93} + Cs^{140} + 2n$$

(67 TJ/kg)

N.B. : 1 MJ = 10^6 J

1 TJ = 10^{12} J

Fonti energetiche

In merito al loro utilizzo si distinguono fonti di energia primarie e secondarie

A. Primarie : quelle presenti in natura prima di avere subito una qualunque trasformazione. Sono fonti primarie:

- le fonti energetiche esauribili (petrolio grezzo, gas naturale, carbone, materiali fissili)
- le fonti di energia rinnovabili quali energia solare, eolica, idrica, biomasse, geotermica.

B. Secondarie : quelle che derivano, in qualunque modo, da una trasformazione di quelle primarie. Sono fonti secondarie, per esempio

- la benzina (perché deriva dal trattamento del petrolio greggio),
- il gas di città (che deriva dal trattamento di gas naturali),
- l'energia elettrica (trasformazione di energia meccanica o chimica).

La più diffusa forma di energia secondaria è l'energia elettrica:
è trasportabile economicamente, trasformabile e misurabile

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

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

- 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).
- $R_N \approx R_o A^{1/3}$ dove R_o 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 u.m.a. (anche indicata con u) = $1.661 \cdot 10^{-27}$ kg

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

Si ricorda che 1 eV = 1.6×10^{-19} J. (1 MeV = 10^6 eV)
E' 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

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

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

Proton

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

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

Neutron

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

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

The atomic mass unit u is defined as 1/12 of the carbon atomic mass.

La produzione di energia da reazioni nucleari

Un po' di terminologia atomica/nucleare

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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 ^{1}H (nucleo con un p) **(Numero di massa A=1)**

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

*H-3, indicato anche ^{3}H (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

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

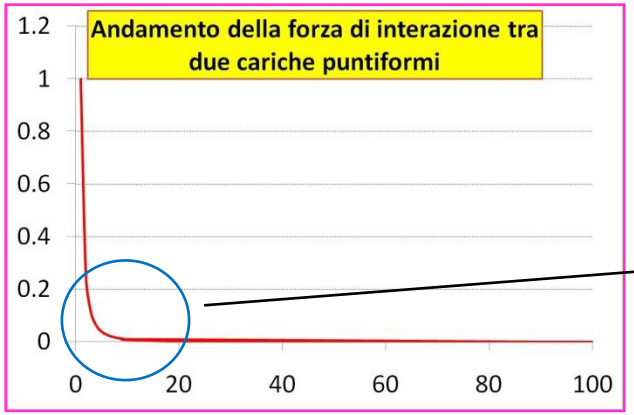
L'esistenza stessa del nucleo atomico ci pone un problema inesplicabile sulla base delle conoscenze della Fisica Classica dei primi del novecento: come è possibile la stabilità dei nuclei (più particelle positive che si trovano a distanze molto piccole, dell'ordine di 10^{-15} m) ?

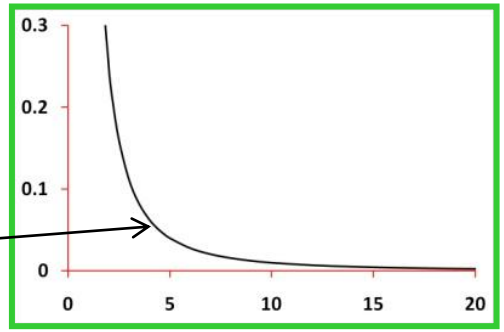
Sappiamo infatti che tra due cariche elettriche Q_1 e Q_2 , supposte puntiformi, che si trovano ad una distanza *d* si esercita una forza (di Coulomb) che vale, in modulo:

$$F = K\frac{|Q_1|\ |Q_2|}{d^2}$$

(dove $K \approx 9 \cdot 10^9$ Nm^2C^{-2} 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 !





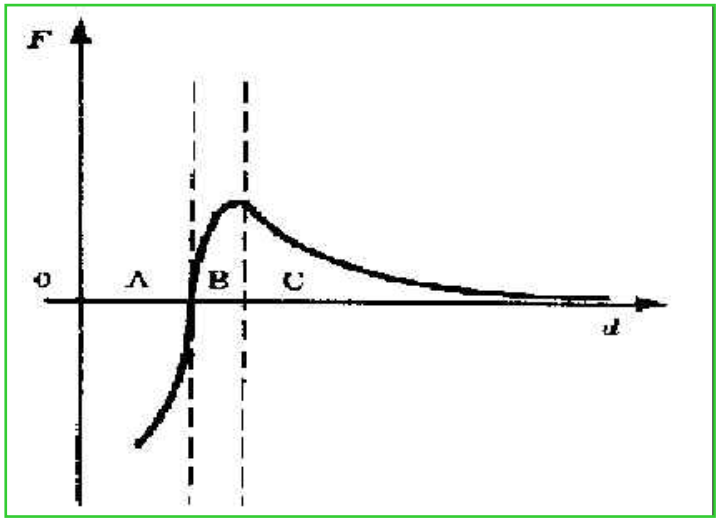
La produzione di energia da reazioni nucleari

Forze nucleari (a breve raggio d'azione)

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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

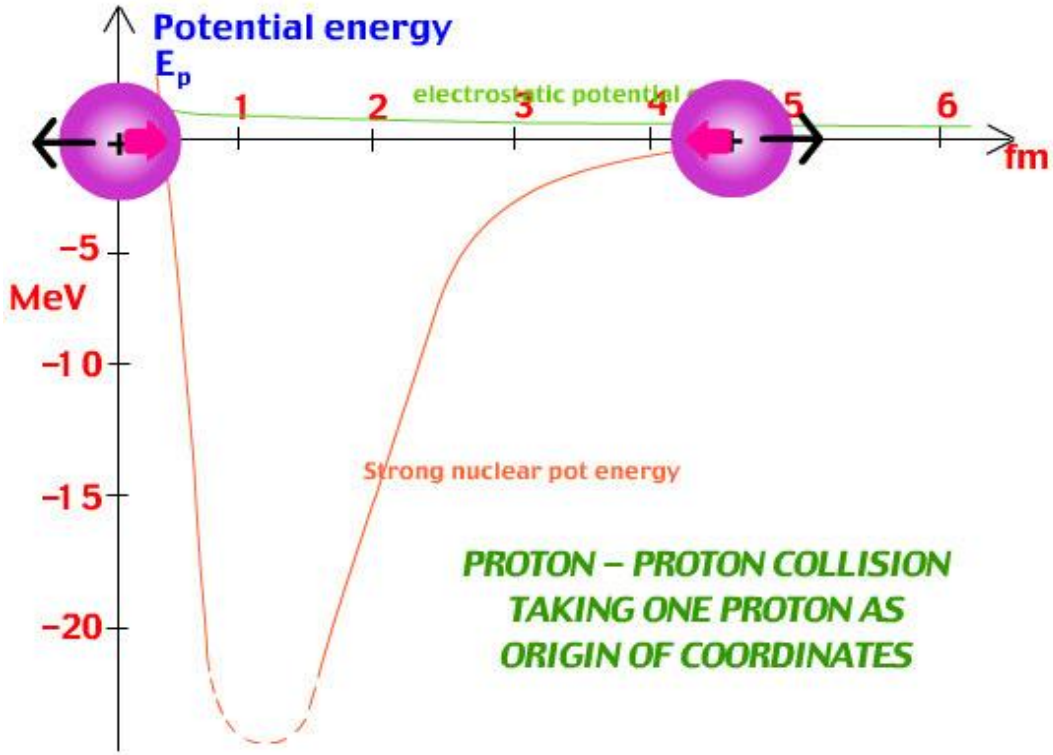
Le forze nucleari sono indipendenti dalla carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra <u>protoni e protoni</u>.

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

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

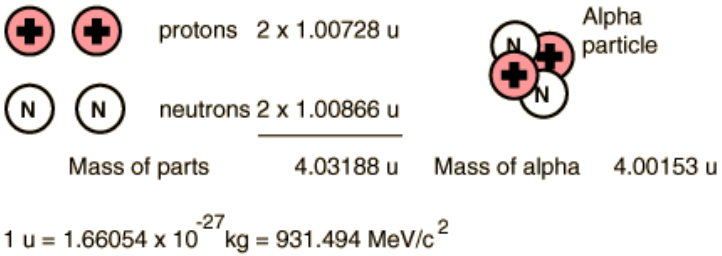
Si osserva che, per qualunque nucleo con più nucleoni (cioè tutti, tranne l'isotopo più leggero dell'idrogeno ^{1}H):

la massa M del nucleo è minore della somma Σm delle masse di tutti i nucleoni in esso contenuti. Si ha allora un difetto di massa Δm = Σm - M.

Poiché massa ⟷ 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)



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

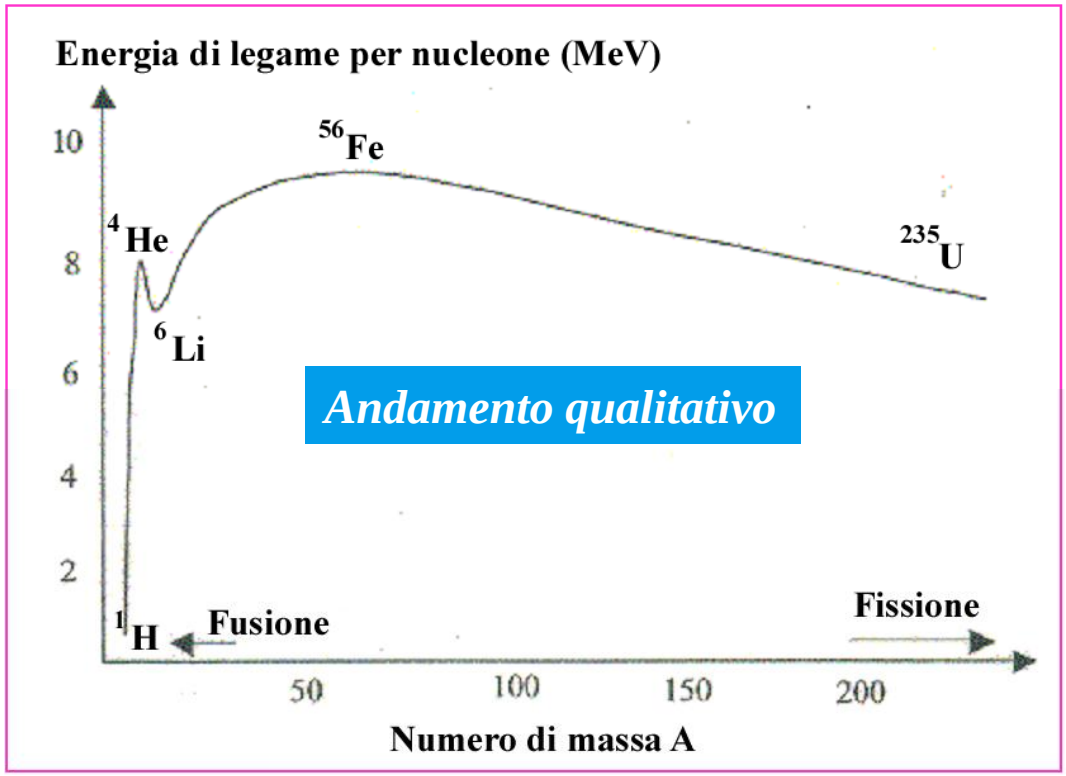
Altra grandezza molto importante è l'energia di legame per nucleone (energia media per separare un nucleone dal nucleo) $\Delta E_n = BE_n = \Delta E/A$

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

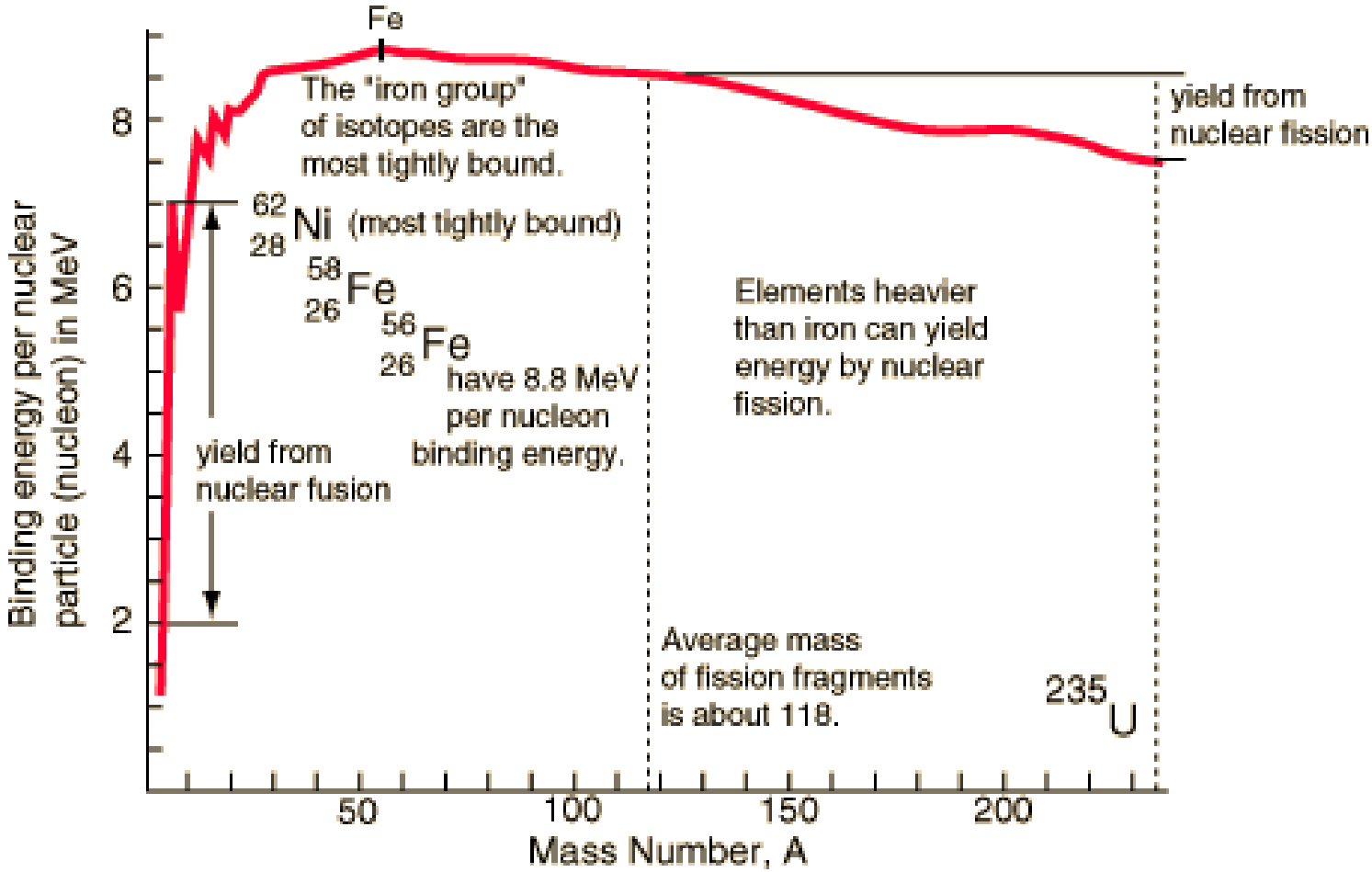
I nuclei di massa intermedia hanno i valori di ΔE_n più elevati e richiedono una elevata quantità di energia per poterli separare

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

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI



http://www.fondazioneocchialini.it

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 Bequerel 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

$${}^{10}_{5}B + n \rightarrow {}^{7}_{3}Li + \alpha \qquad {}^{7}_{3}Li + p \rightarrow {}^{7}_{4}Be + n \qquad {}^{14}_{7}N + \alpha \rightarrow {}^{17}_{8}O + p$$

Si ricorda che $\alpha = {}^{4}_{2}He$ e che $p = {}^{1}_{1}H$

Due reazioni nucleari rivestono una particolare importanza :

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

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.

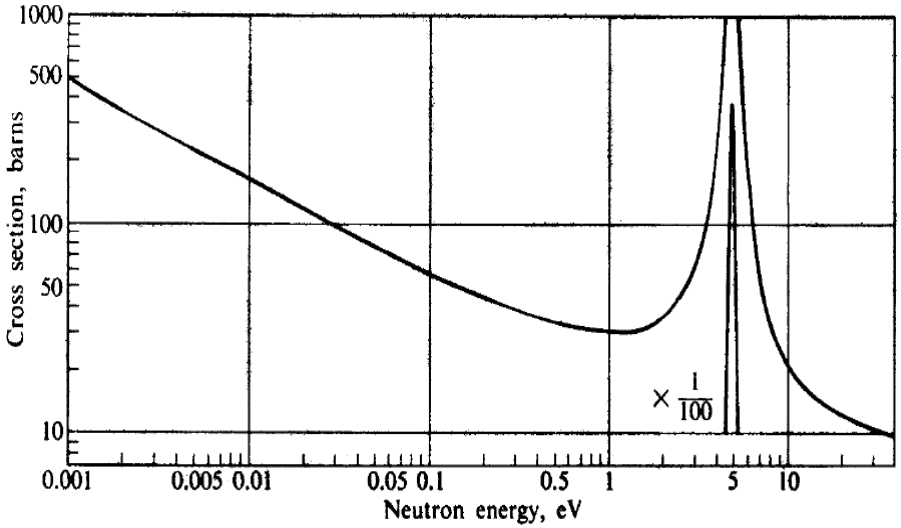
La σ rappresenta l'area con cui una particella incidente ("proiettile") vede il nucleo bersaglio. Le dimensioni della sezione d'urto sono quindi quelle di un'area.
La σ si misura in cm^2 o barns b, dove 1 b = 10^{-24} cm^2.

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.

sezione d'urto di cattura (n,γ) su ^{197}Au

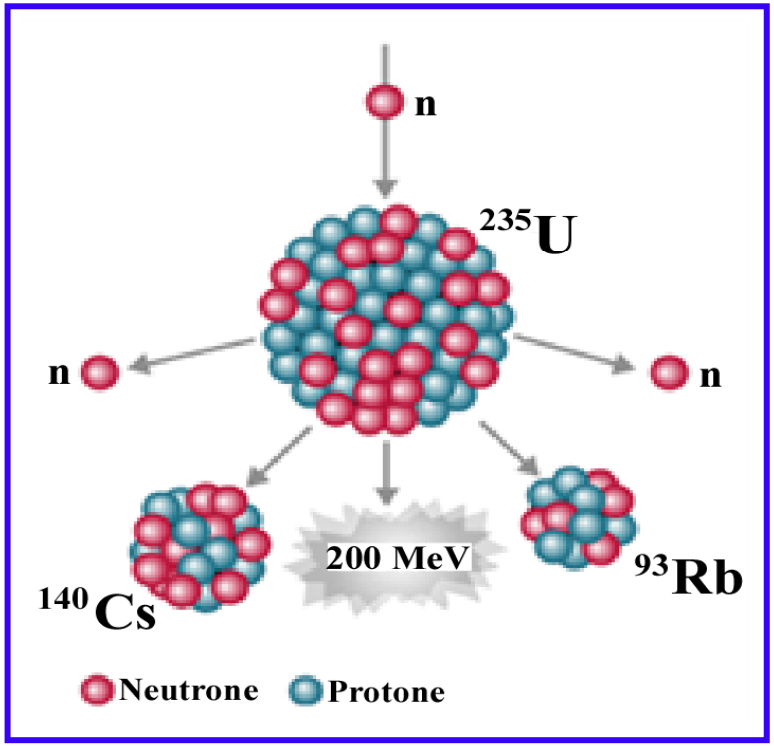


La produzione di energia da reazioni nucleari

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 x 10^{-11} Joule).

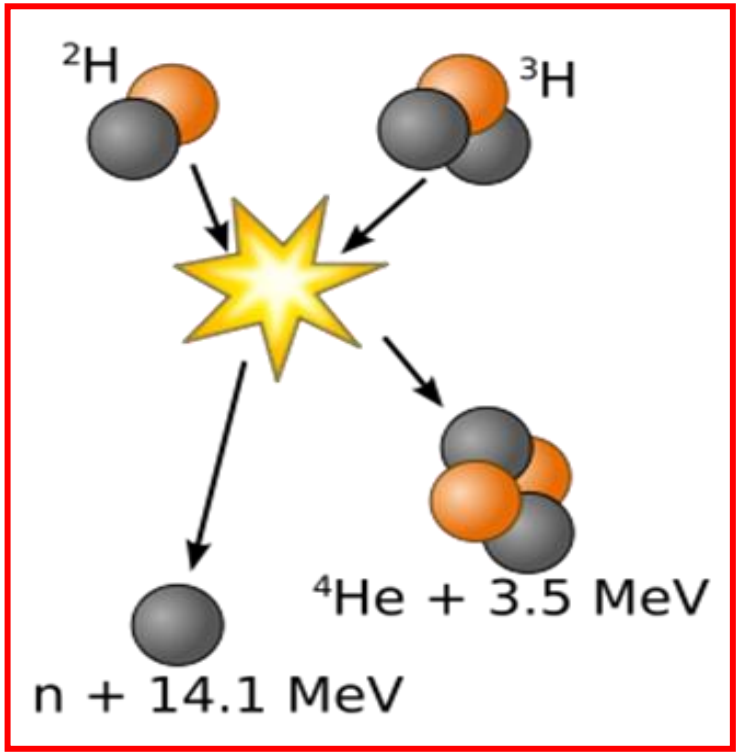


La produzione di energia da reazioni nucleari

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 ^{2}H e trizio ^{3}H dell'idrogeno, porta a liberare una energia di circa 17.6 MeV (cioè 2.8 x 10^{-12} Joule).



La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia da fissione nucleare: il combustibile

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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:

^{232}Th **(fertile) + n →** ^{233}U **(fissile)**

^{238}U **(fertile) + n →** ^{239}U **→** $^{239}Np + \beta$ **→** ^{239}Pu **(fissile) +** β

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.

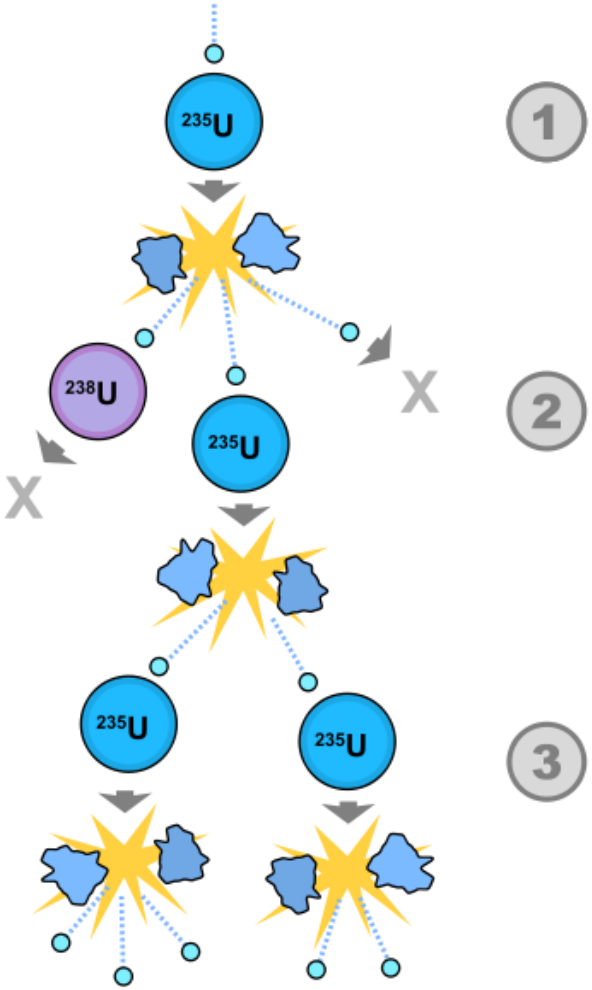
La produzione di energia da reazioni nucleari

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.

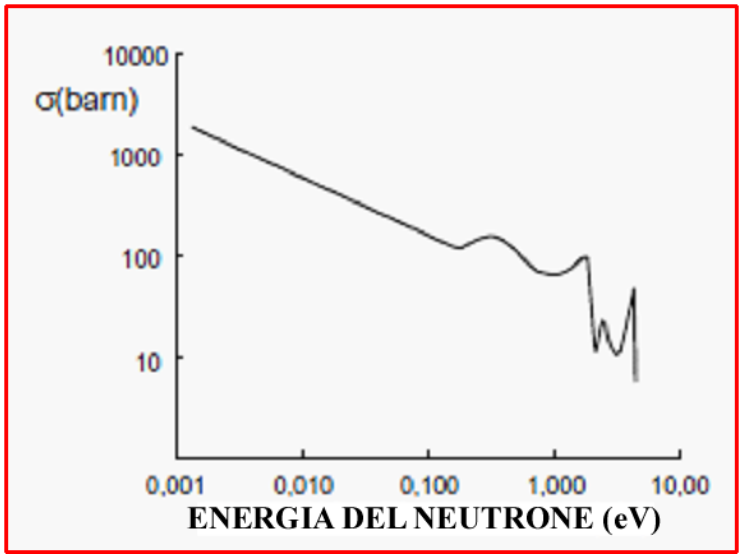


La produzione di energia da reazioni nucleari

La fissione nucleare: la sezione d'urto di fissione

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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.



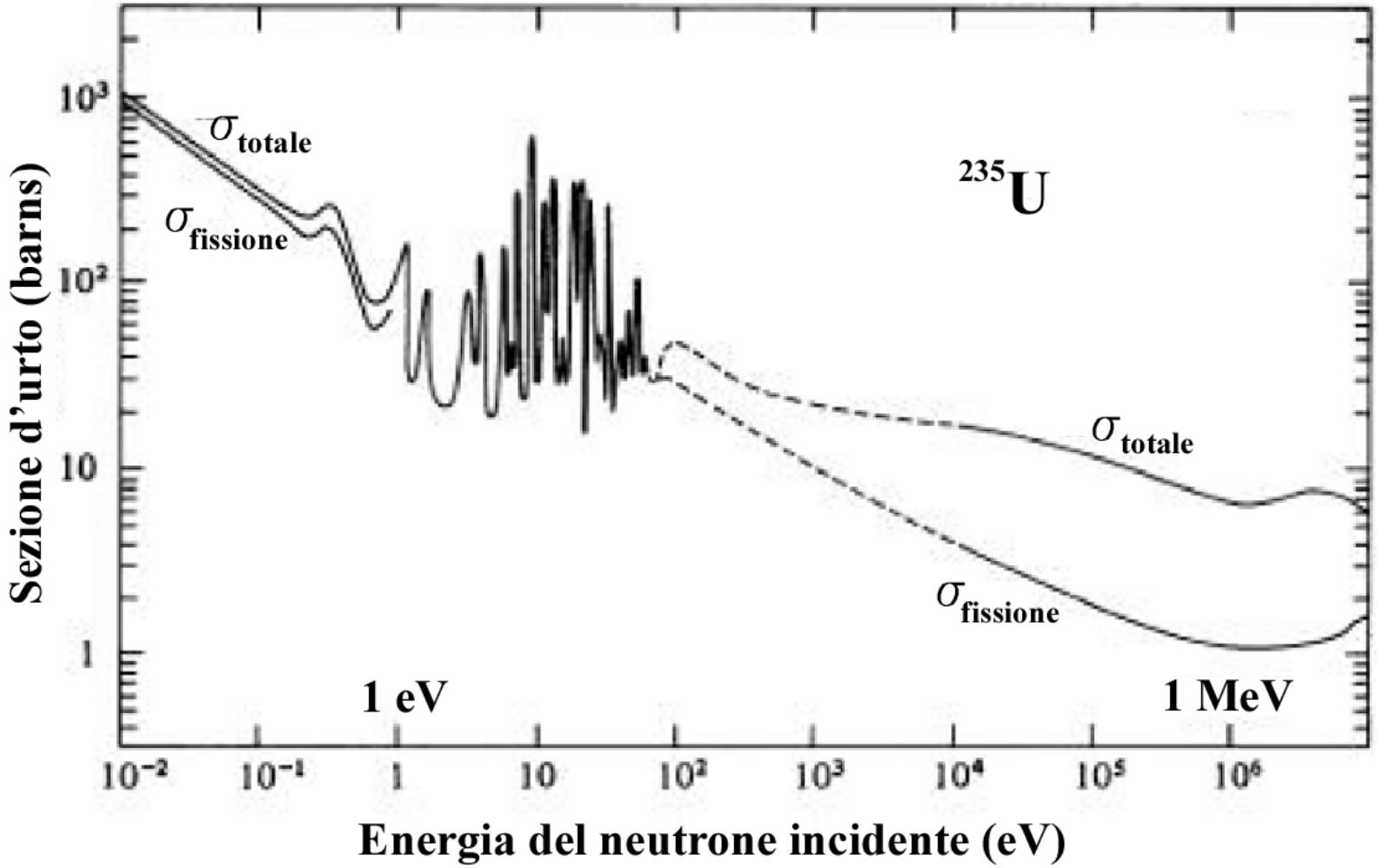
Anche se i nuclei di tutti gli elementi con elevata massa atomica possono essere scissi se colpiti da un neutrone, è l'isotopo ^{235}U dell'uranio a possedere un'elevata probabilità per la fissione anche se colpito da un neutrone lento (un neutrone lento rimane più a lungo nelle vicinanze del nucleo 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.

La produzione di energia da reazioni nucleari

La fissione nucleare: la sezione d'urto di fissione

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI



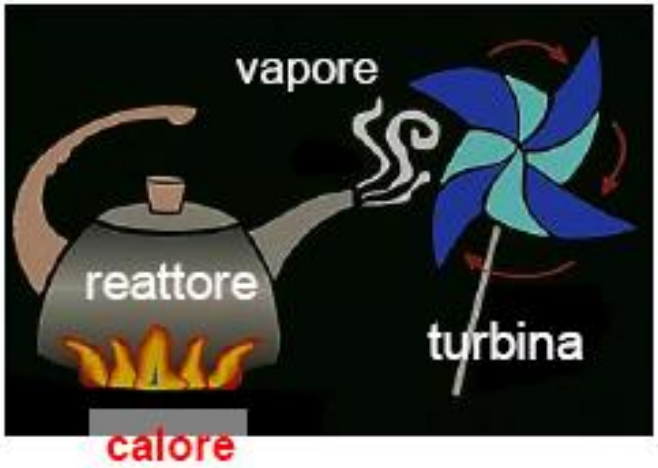
La produzione di energia da reazioni nucleari

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

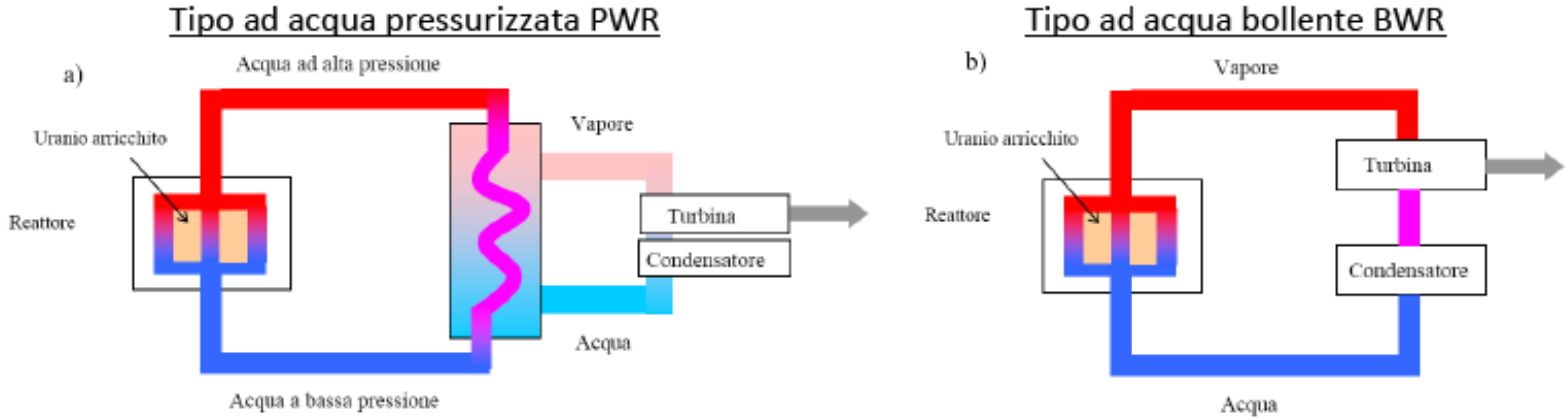
FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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

Iª 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.

IIª 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 IIª 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 entrerà in funzione in Finlandia 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 Deployement (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.

La produzione di energia da reazioni nucleari

Classificazione delle centrali elettro-nucleari

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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

IVª 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.

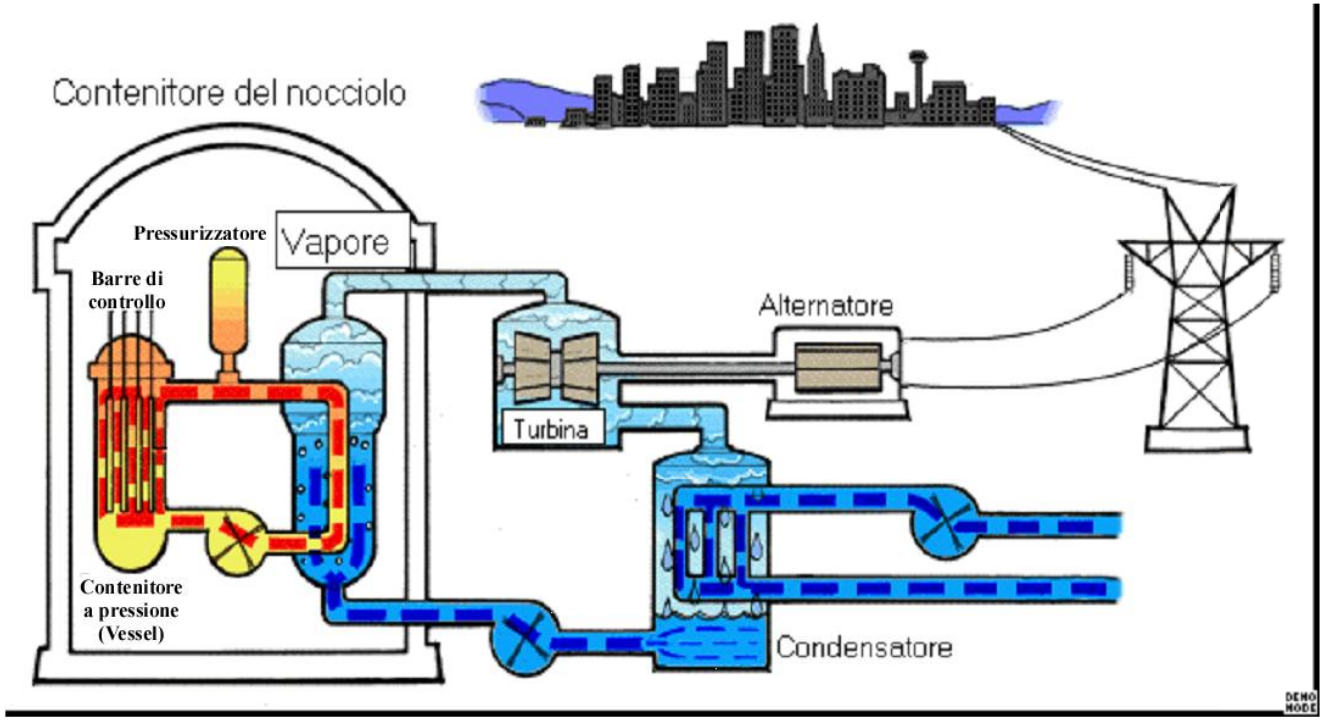
Tra i tipi di impianti individuati per la IVª generazione, tre sono nominalmente reattori termici ed altri tre sono reattori autofertilizzanti a neutroni veloci

La produzione di energia da reazioni nucleari

Schema di centrale elettro-nucleare a fissione

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

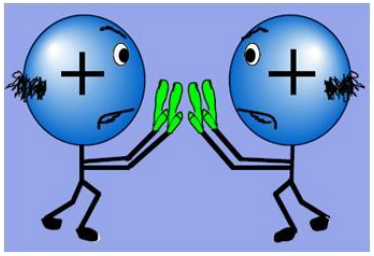


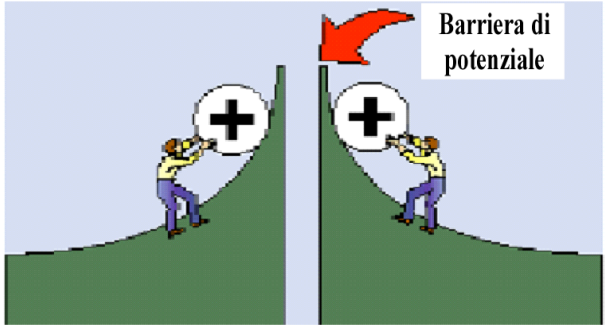
La produzione di energia da reazioni nucleari

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

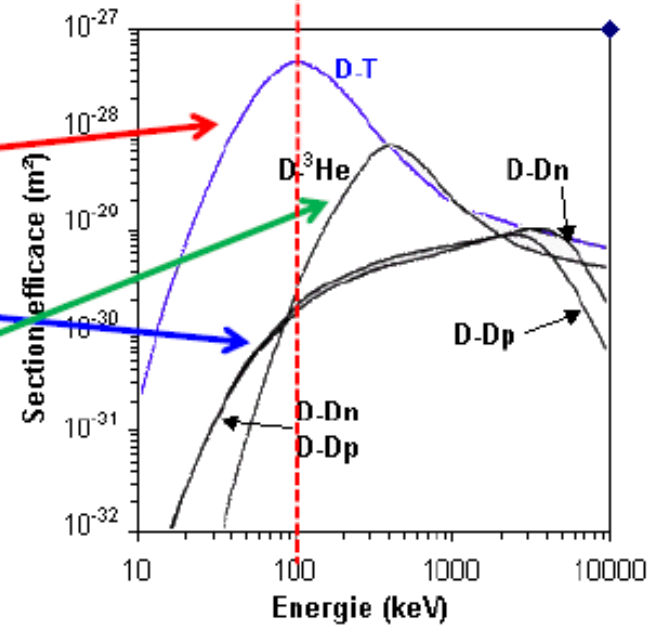
Sezione d'urto di fusione nucleare

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

Sezione d'urto di fusione per alcune reazioni

Alcune reazioni di fusione

D + T	⇒	^{4}He + n	+ 17.6 MeV
D + D	⇒	^{3}He + n	+ 3.3 MeV
		T + p	+ 4.0 MeV
D + ^{3}He	⇒	^{4}He + p	+ 18.3 MeV
.....			



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.

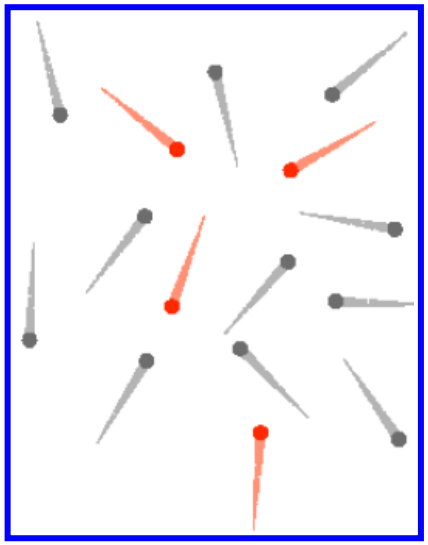
La produzione di energia da reazioni nucleari

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

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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 ➔ $\mathbf{Q = P_N/P_H}$

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** :

$$n\tau_E T \geq 1.2\times10^{21}\ \mathrm{m^{-3}\ keV\ s}$$

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 = ∞**, ed è detta **condizione di ignizione**.

Criterio di ignizione

$$n\tau_E T \geq 3\times10^{21}\ \mathrm{m^{-3}\ keV\ s}$$

per un plasma **D – T**

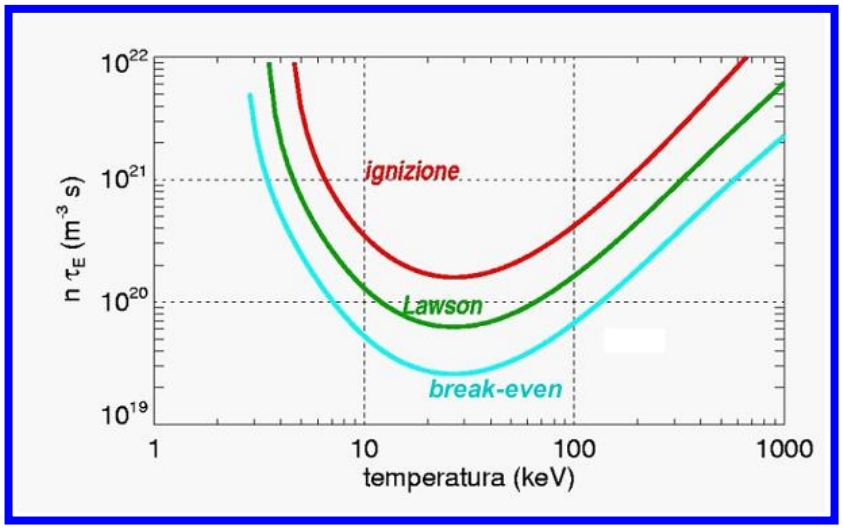
La produzione di energia da reazioni nucleari

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*** (≈ 10^{20} m^{-3}) e tempi di confinamento τ_E alti (≈ 1 secondo)
(**macchine a *confinamento magnetico***) (volume plasma ≈ 1000 m^3)

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

La produzione di energia da reazioni nucleari

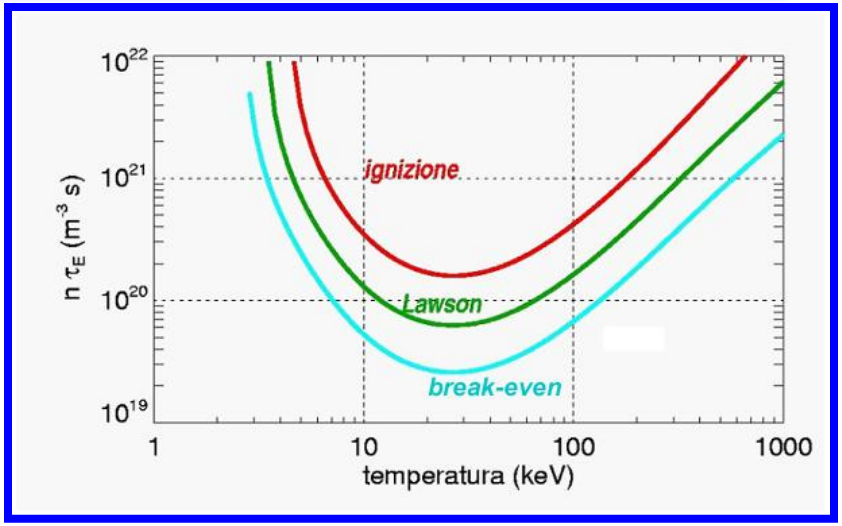
Fusione nucleare: la strada attuale

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 x 10^{20} m^{-3}
- τ_E = 1 secondo
- **T** = 20 keV (= 155 milioni di gradi)



A temperature così elevate il problema diventa:

come confinare il plasma in un recipiente ?

La produzione di energia da reazioni nucleari

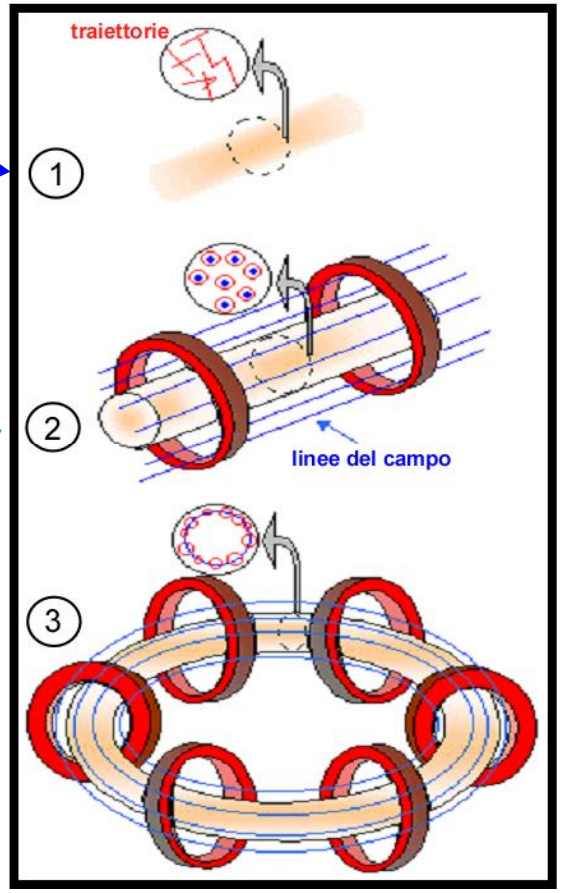
Fusione nucleare: il confinamento magnetico

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

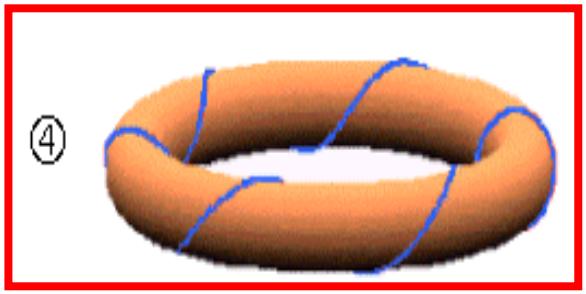
Fusione nucleare: il tokamak

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

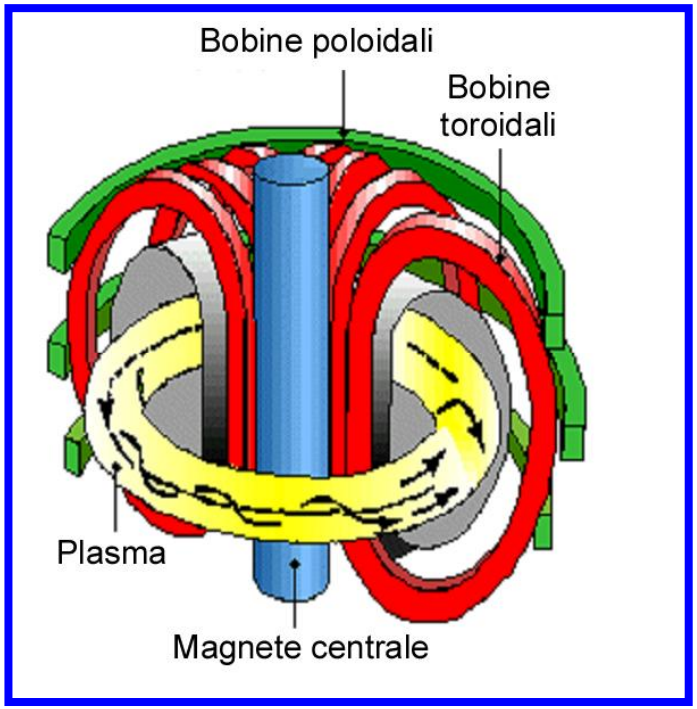
In realtà si è visto che per minimizzare la perdita di particelle di plasma (nuclei di deuterio e trizio) le linee del campo debbono essere elicoidali, come nella configurazione 4. Questo si ottiene aggiungendo al campo toroidale un altro campo ad esso perpendicolare (campo poloidale).

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

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

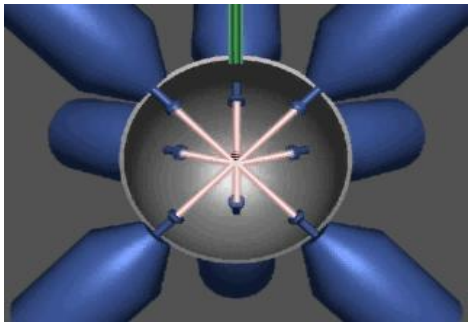
Cadarache (Francia): sito ITER

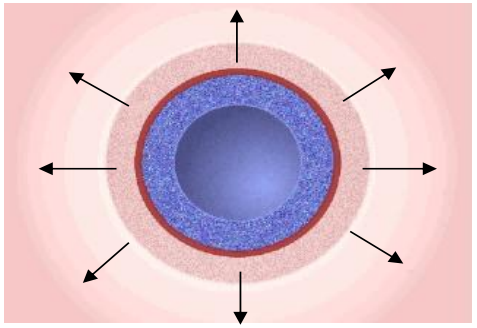
La produzione di energia da reazioni nucleari

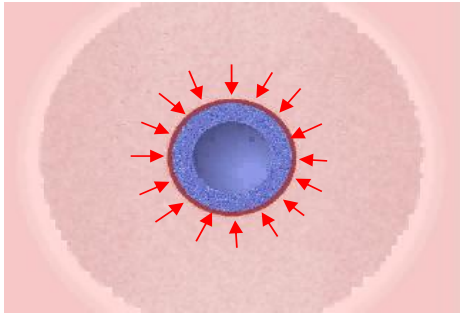
Fusione nucleare: il confinamento inerziale (cenni)

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/m^2) 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 $Li^6+n=He^4+T+4.86\ MeV$

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.

<u>Il combustibile per la fusione nucleare è pertanto costituito da</u>

Deuterio e Litio entrambi presenti in natura in quantità significative.

La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il reattore nucleare a fusione

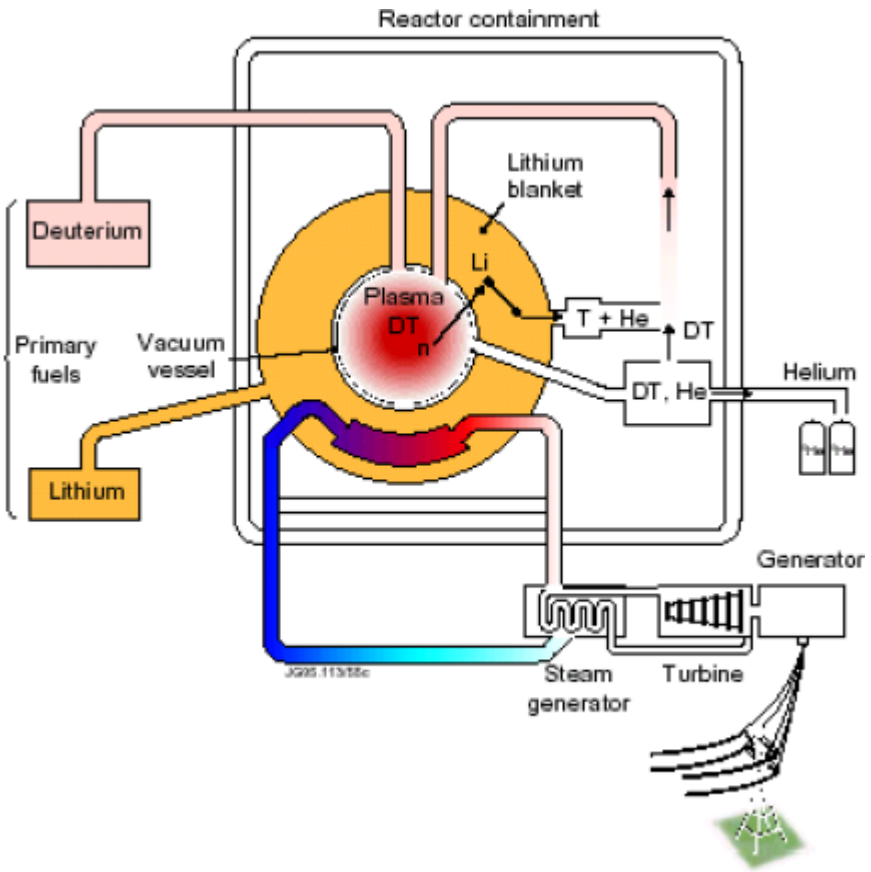
FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

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.

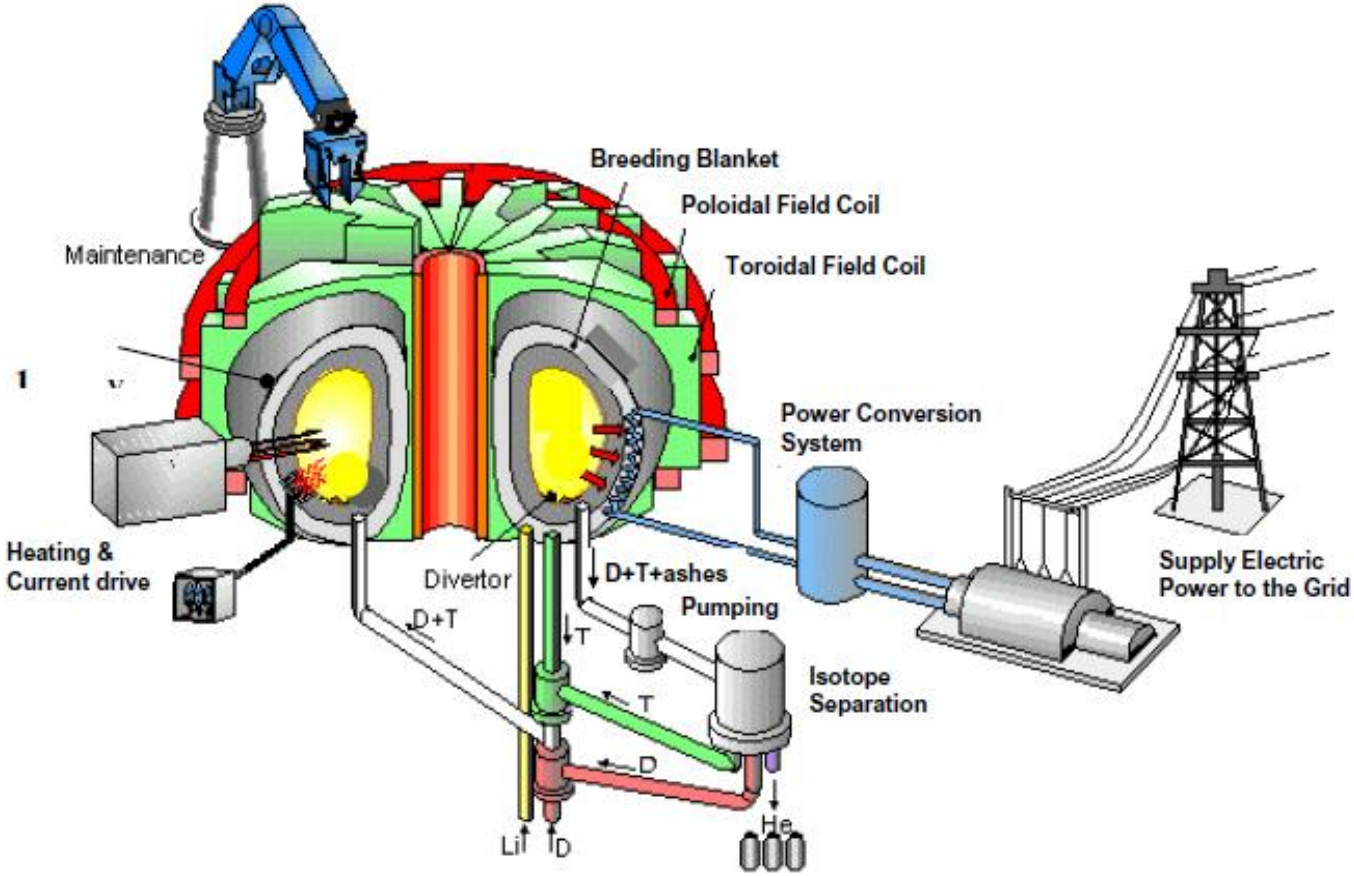
L'energia liberata dalle reazioni, in particolare quella trasportata dai neutroni, viene recuperata sotto forma di calore generato nel mantello e nella prima parete ed utilizzata per produrre vapore come in uno schema convenzionale di centrale elettrica .



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: centrale elettro-nucleare a fusione

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI



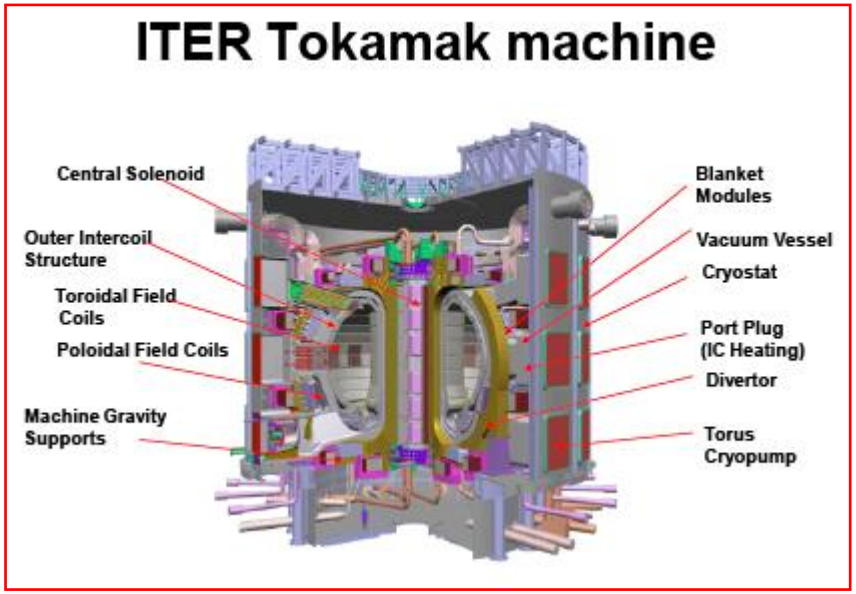
Schema concettuale di centrale nucleare di potenza a fusione (PPCS)

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).



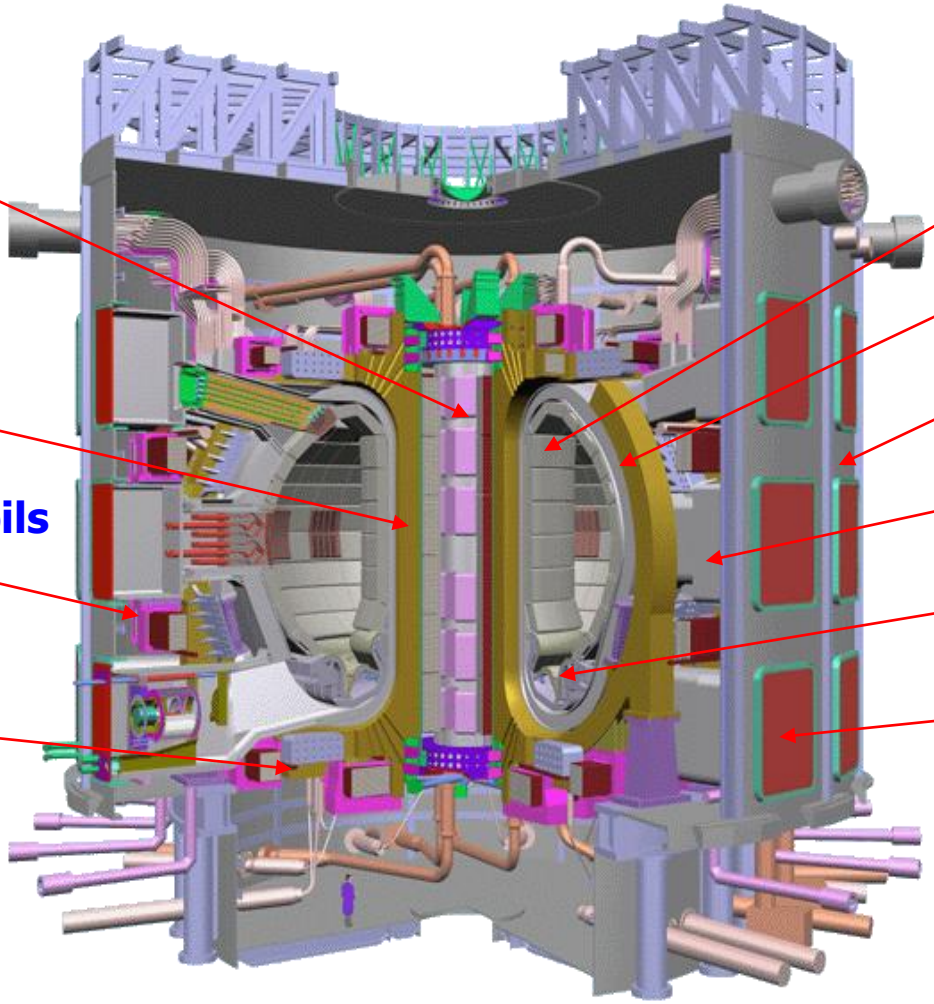
Tokamak : circa 29 m di altezza, 28 m diametro e circa 23000 t di massa

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



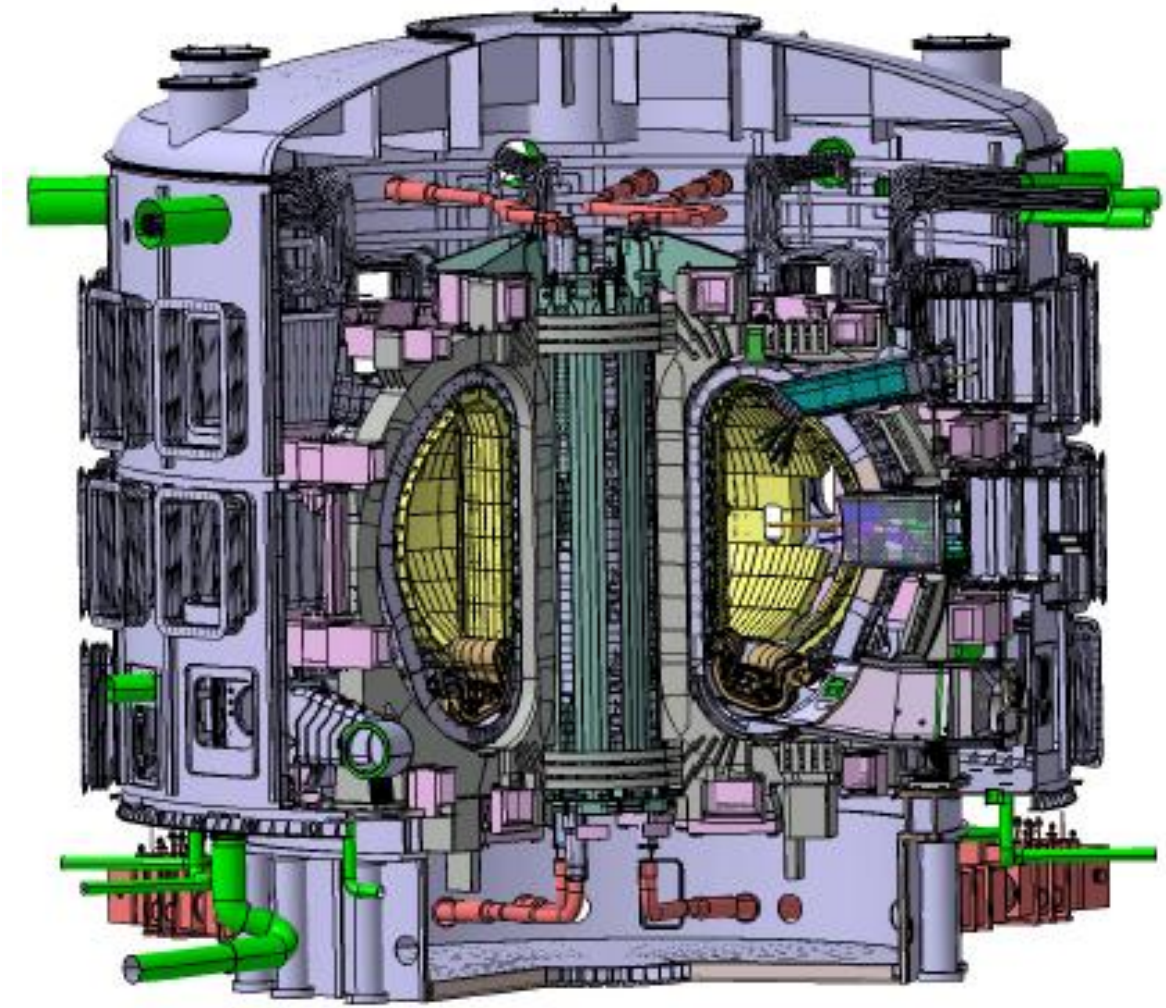
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

Il tokamak ITER

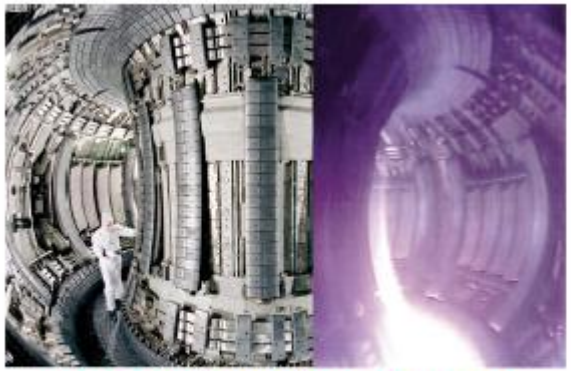
Design attuale



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER

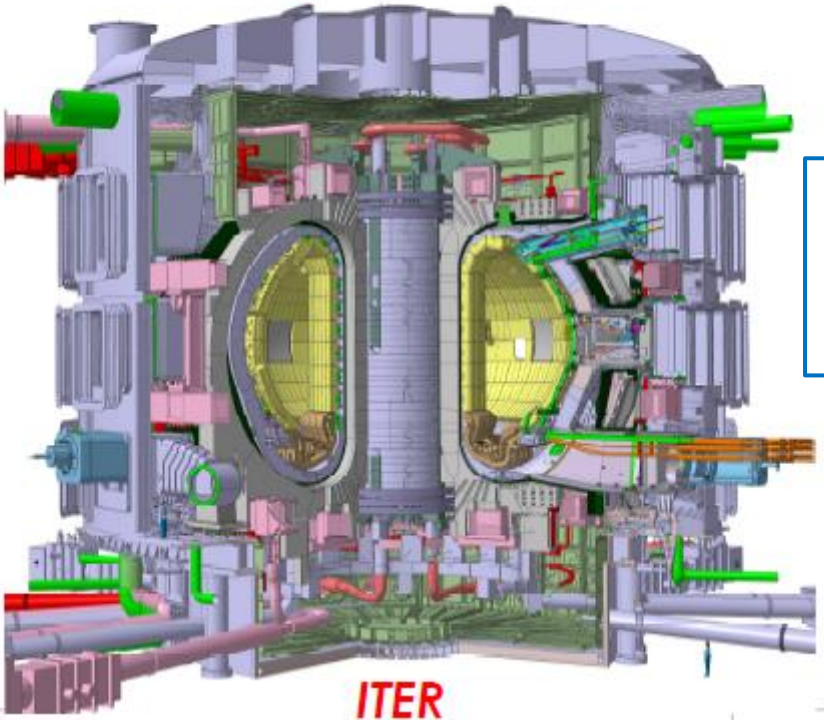
FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI



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

JET



ITER

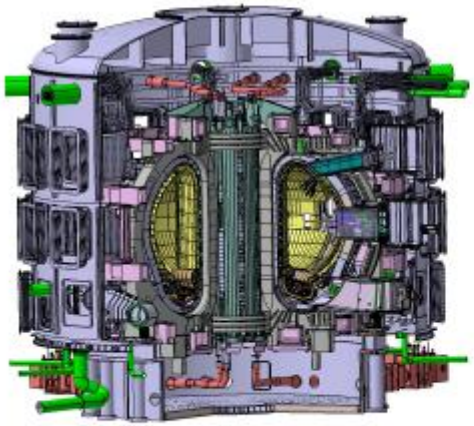
Un confronto tra JET, ITER … e un elefante !

La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

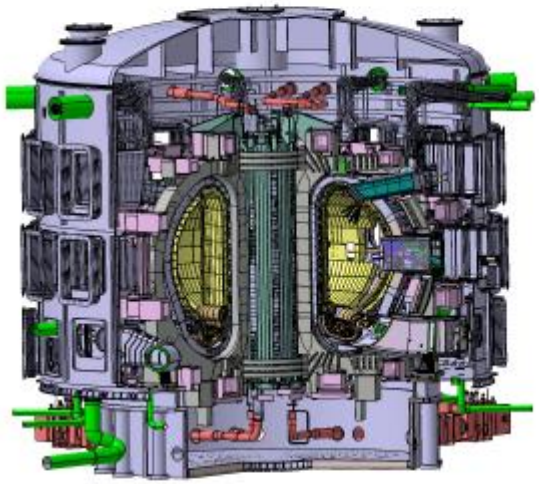
Cryostat Size Comparison



ITER Tokamak
29 m Tall x 28 m Wide

Arc de Triomphe
49 m Tall x 45 m Wide

ITER Tokamak – Mass Comparison



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

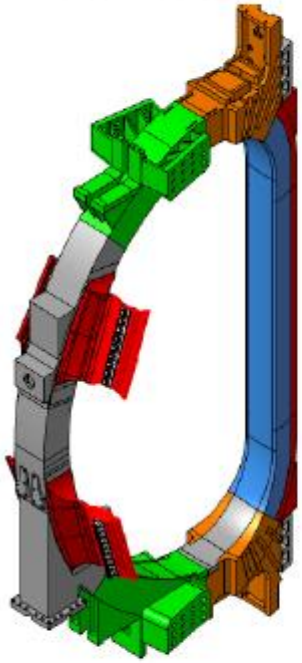
Charles de Gaulle mass:
~38000 t (empty)
856 ft (261 m) long
(Commissioned 2001)

La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: Alcuni aspetti dell'impianto ITER

FONDAZIONE GIUSEPPE OCCHIALINI

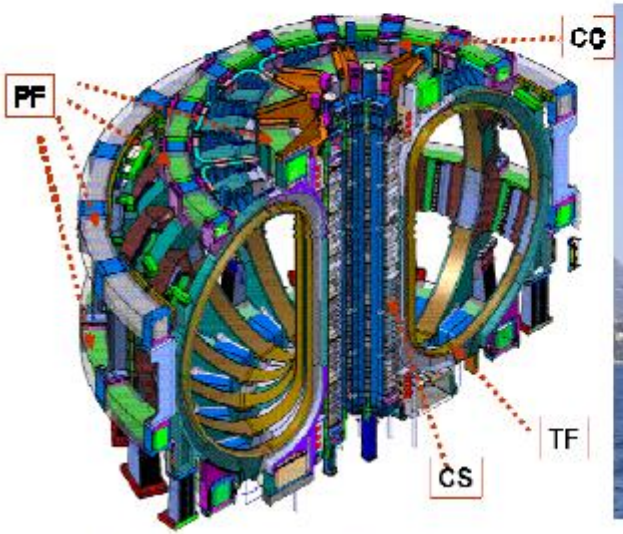
TF Coil – Mass Comparison



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

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

Magnet Energy Comparison



Superconducting Magnet Energy:
~51 GJ

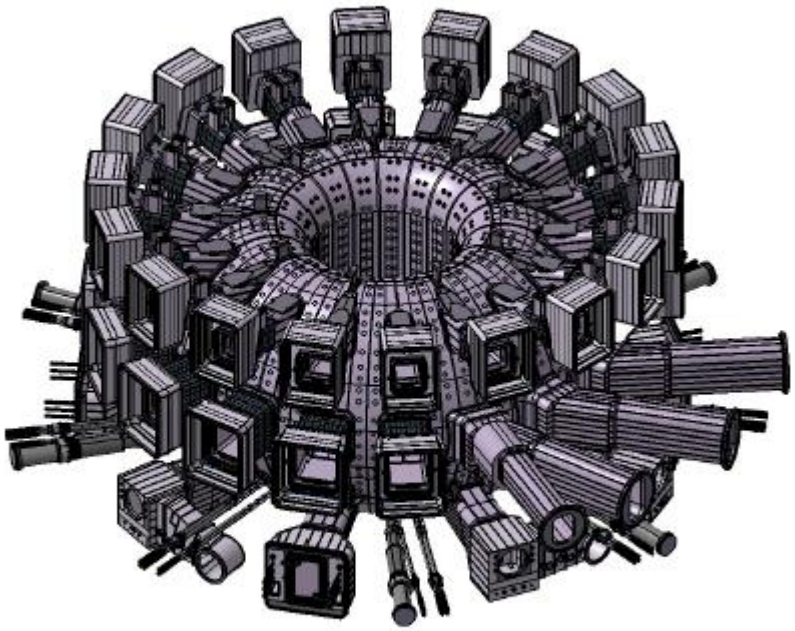
Charles de Gaulle Energy:
~38000 t at ~180 km/hr
or
The energy of ~19000
Audi A5's each at ~180 km/hr

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