



Parte 1 - La questione energetica

Parte 2 : alcune fonti per produzione di energia elettrica

- a) L'energia nucleare come fonte energetica:
fissione e fusione

- b) Conversione diretta dell'energia solare in energia elettrica:
i pannelli fotovoltaici

Gilio Cambi

INFN Bologna & Dipartimento di Fisica ed Astronomia Università di Bologna

Pesaro, 25 e 31 Maggio 2016



La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



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**
- ❖ **Energia dal sole: le celle fotovoltaiche**



La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Unità di misura

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

$$1 \text{ kWh} = 3600 \text{ J}$$

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

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

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

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

$$1 \text{ W} = 1 \text{ J}/1 \text{ s}$$

$$k = 10^3$$

$$M = 10^6$$

$$G = 10^9$$

$$T = 10^{12}$$



La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive

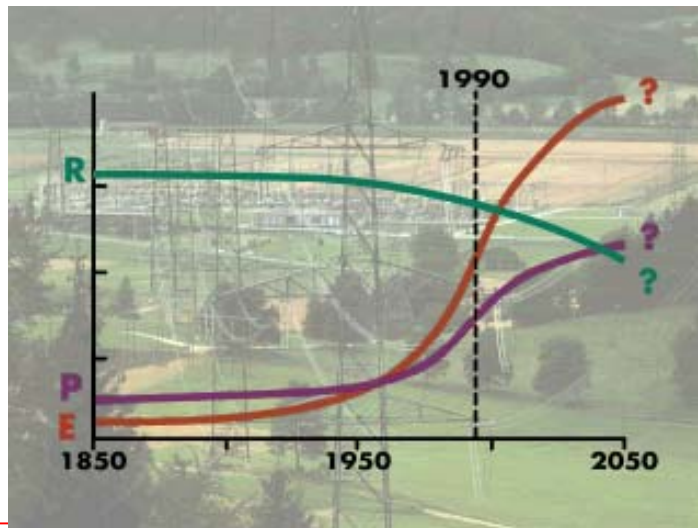


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La Domanda di Energia : Il trend

Secondo i nostri attuali modello di sviluppo, l'evoluzione dell'umanità non può fare a meno di adeguate risorse energetiche.

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**

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**

Previsioni difficili per: 1) tempi lunghi, 2) fattori non controllabili

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



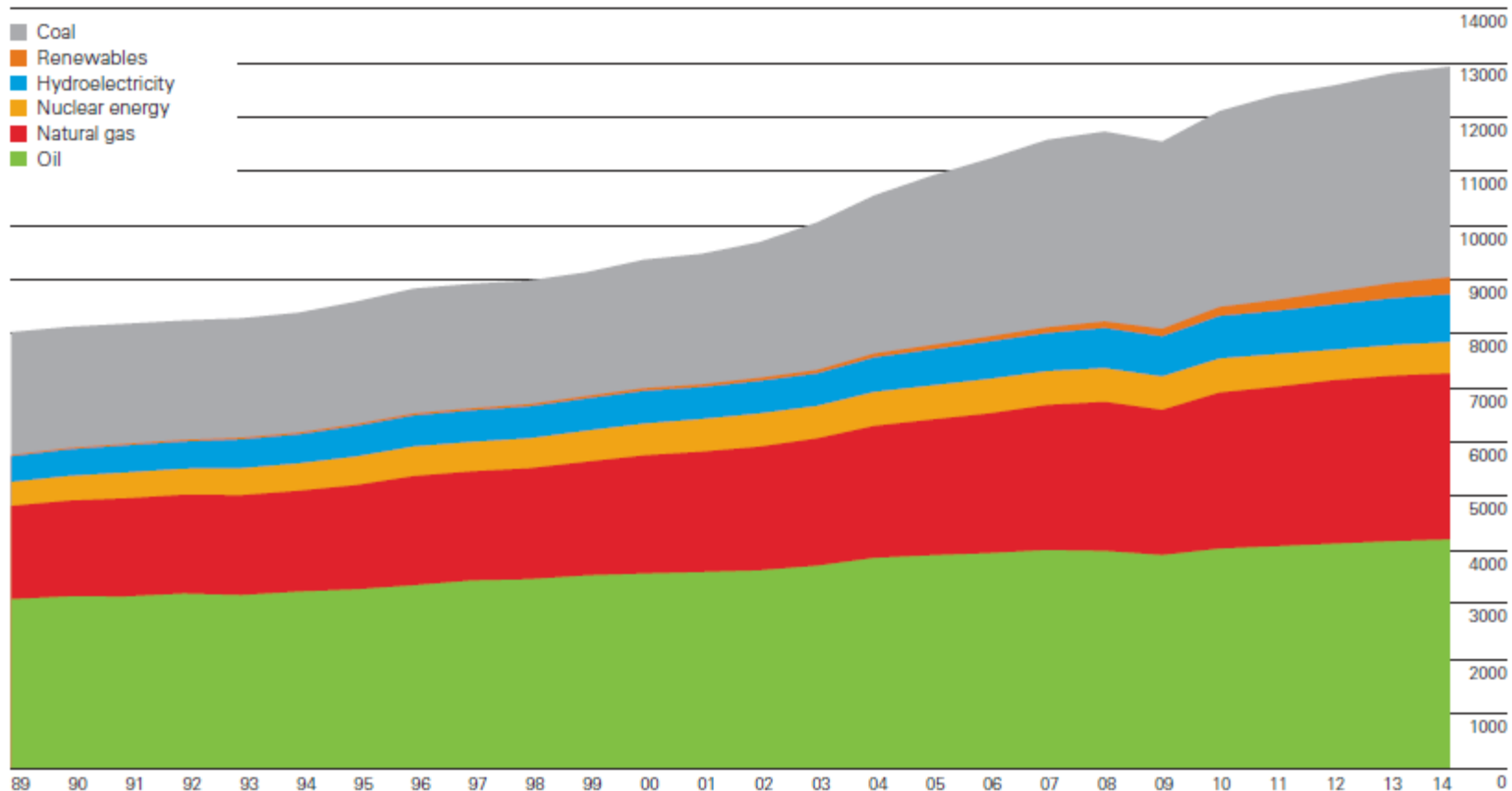
La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Il consumo totale di energia nel mondo è (valutazione per l'anno 2014) di circa **12.9 miliardi di tonnellate equivalenti di petrolio (tep)**.

World consumption
Million tonnes oil equivalent





La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Consumo di energia nel mondo nel 2014

REGIONE	Consumo totale [Mtep]	Consumo per fonti energetiche					
		Petrolio [Mtep]	Gas [Mtep]	Carbone [Mtep]	Nucleare [Mtep]	Idroelettrico [Mtep]	Rinnovabili [Mtep]
Nord America	2822.8	1024.4	866.3	488.9	216.1	153.5	73.6
Centro e Sud America	692.8	326.5	153.1	31.6	4.7	155.4	21.5
Europa-Eurasia	2830.3	858.9	908.7	476.5	266.1	195.7	124.4
Medio Oriente	827.9	393.0	418.6	9.7	1.0	5.2	0.3
Asia	5334.6	1428.9	610.7	2776.6	82.5	341.6	94.2
Africa	420.1	179.4	108.1	98.6	3.6	27.5	2.9
TOTALE	12730.5	4185.1	3020.4	3826.7	563.2	855.8	279.3

Fonte: BP Statistical Review of World Energy (giugno 2015)

Si ricorda che 1 Mtep = 1 milione di tep

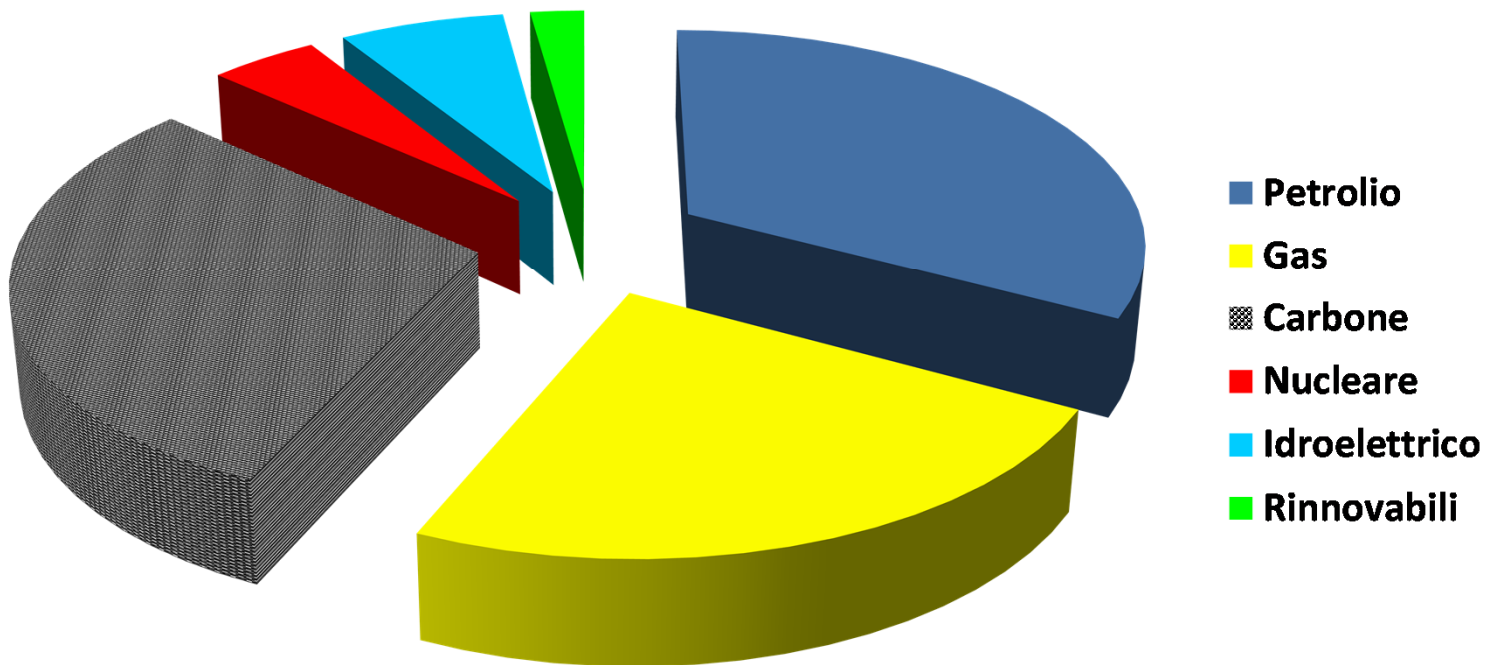


La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Consumo di energia nel mondo nel 2014
Fonti utilizzate





La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



**FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI**

Scenari futuri dell'energia, secondo il World Energy Council

Entro il 2050 la domanda globale di energia primaria salirà di un valore compreso tra il 27 e il 61%. E' quanto emerso dall'ultimo **World Energy Trilemma**, rapporto che valuta per 129 Paesi nel Mondo gli aspetti fondamentali del concetto di "sostenibilità energetica".

Non è solo questo dato a preoccupare: nel mondo infatti, oltre un miliardo di persone vive ancora senza elettricità, mentre quasi tre miliardi di esseri umani cucinano con metodi ancora rudimentali.



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

TRE SCENARI POSSIBILI

Per arrivare a tali conclusioni, sono stati presi in considerazione dallo studio tre scenari politici differenti per il 2060:

- **Modern Jazz** - market-driven (tecnologia),
- **Unfinished Symphony** – government-driven (regolamentazione politica),
- **Hard Rock** – local-driven (meno globalizzazione)

Alcune conclusioni generali:

- **picco di aumento di richiesta energetica attorno al 2030,**
- **raddoppio della domanda di elettricità,**
- **rapida crescita delle energie rinnovabili,**
- **continua predominanza delle sorgenti fossili (trasporti),**



La questione energetica: Aggiornamento al 2010



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Da: BP Statistical Review of World Energy
(bp.com/statisticalreview)

Alcune considerazioni riguardanti il 2014 Overview

Il consumo mondiale di energia primaria è cresciuto, nel 2014, dello **0.9%** (2.3% nel 2013), **al di sotto del valore medio degli ultimi 10 anni (2.1%)**. Il consumo nei paesi OECD è **diminuito** dello 0.9%; in EU c'è stato un calo del 3.9% e in Giappone una diminuzione del 3.0%. Negli US c'è stato un aumento del 1.2%.



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.

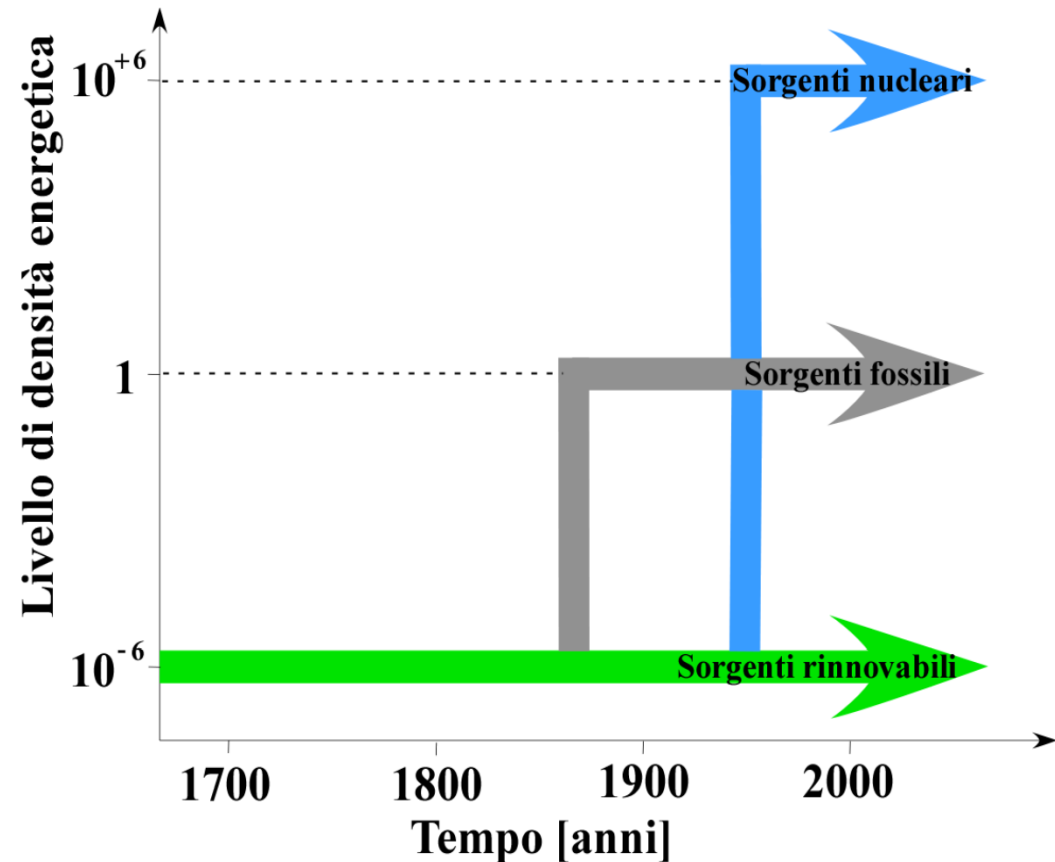


Figura estratta dal sito :

<http://www-drfc.cea.fr/fusion/principes/principes01.htm>



La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive

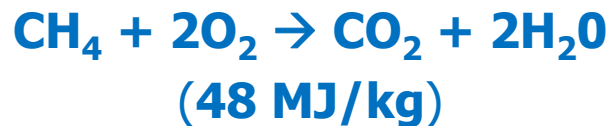


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La differenza fondamentale tra sorgenti fossili e sorgenti nucleari è che le **prime** si basano su reazioni chimiche che mettono in gioco fenomeni (ad esempio 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



$$1 \text{ MJ} = 10^6 \text{ J}$$

Esempio di reazione nucleare

fissione U^{235}



$$1 \text{ TJ} = 10^{12} \text{ J}$$



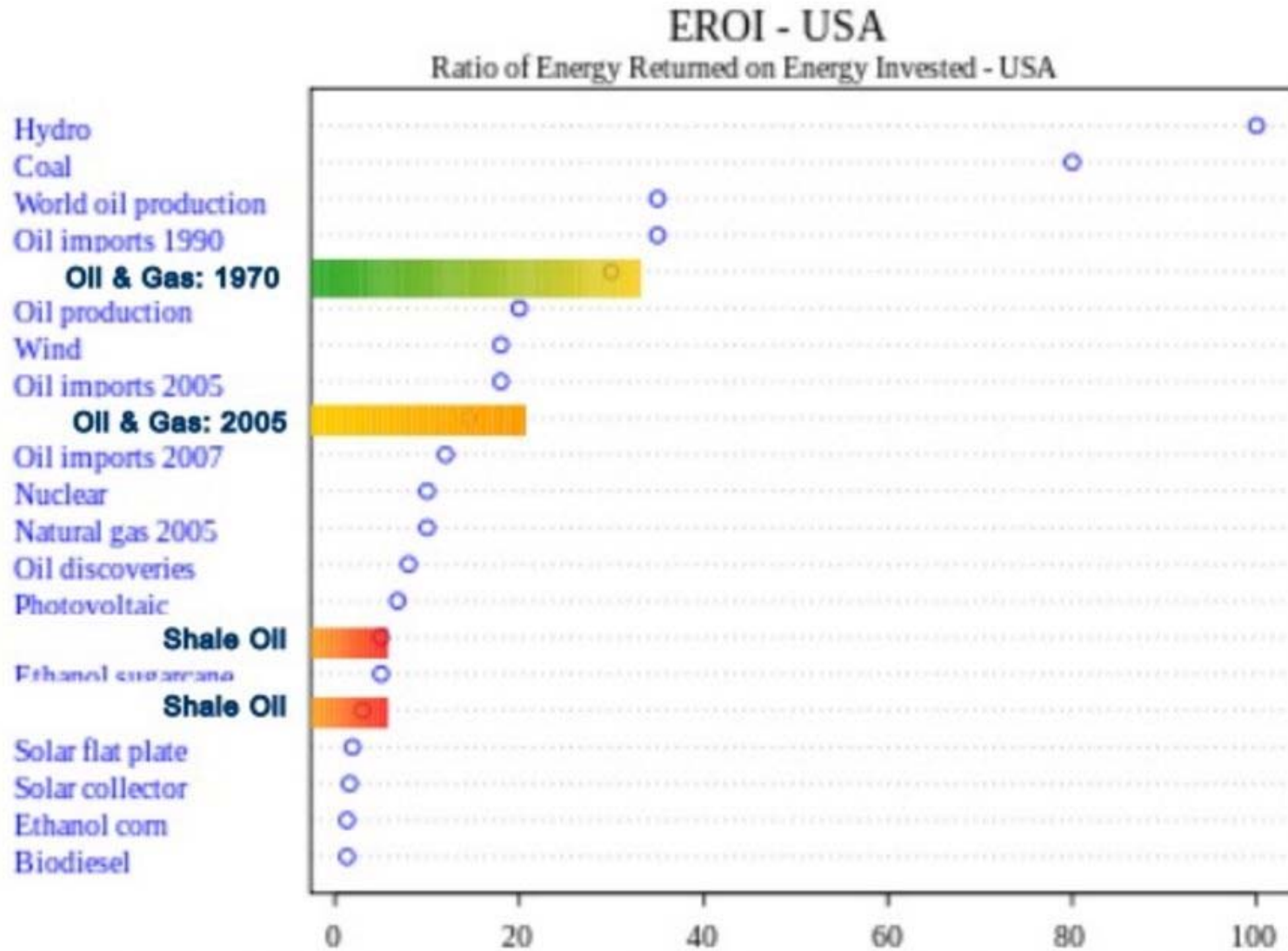
La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE



energy
returned on
energy
invested



REF Murphy, D.J.; Hall, C.A.S. (2010). **Year in review EROI or energy return on (energy) invested**. *Annals of the New York Academy of Sciences*

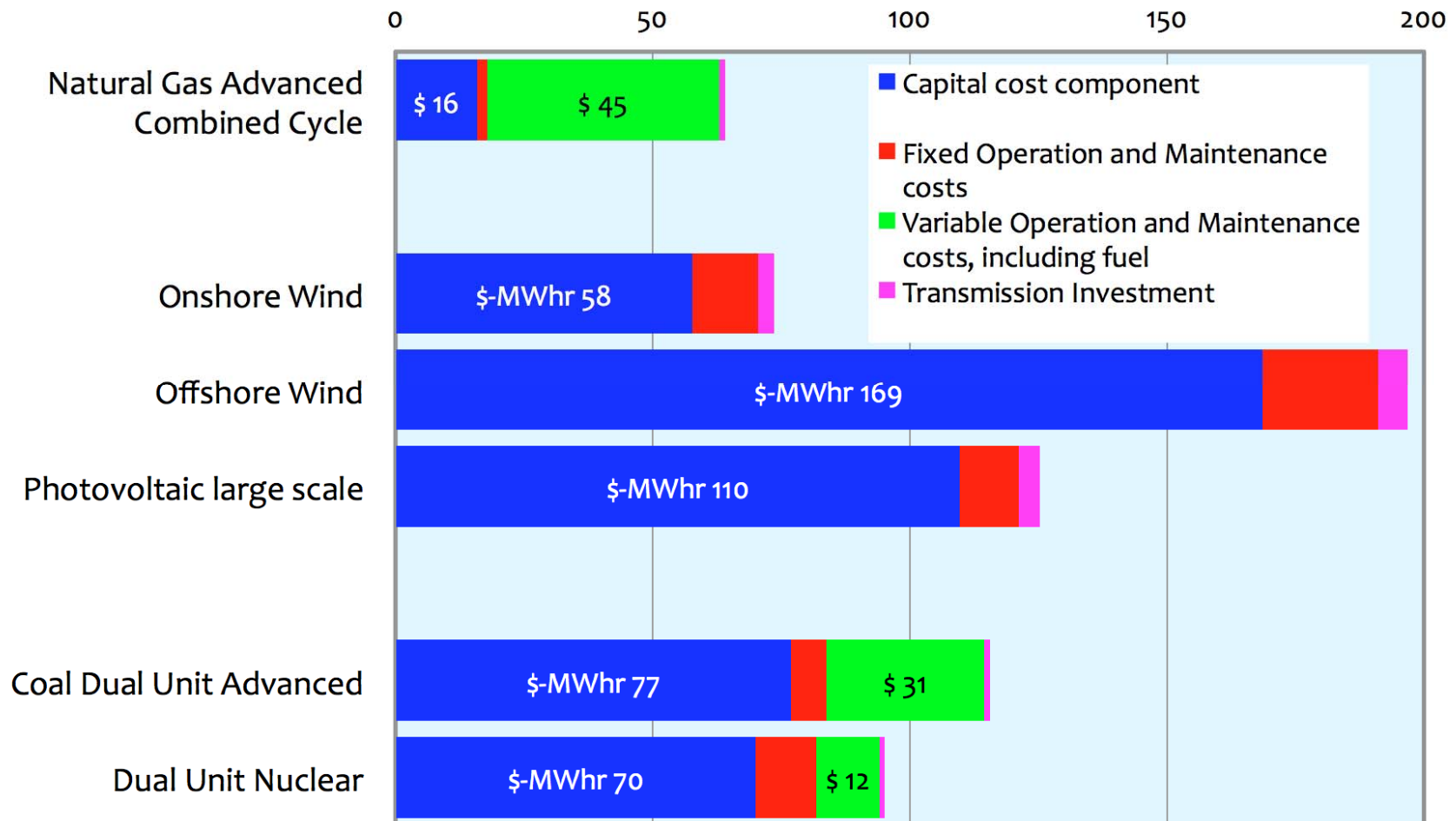


La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

US EIA data compative costs of electricity generation: \$ / MW hr





La questione energetica: implicazioni, problematiche e prospettive



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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 appetibile 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**.

- L'atomo, secondo il modello che useremo, ha un raggio $R_a \approx 10^{-10}$ m) ed 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 **$1 \text{ u} = 931.5 \text{ MeV}$**

Si ricorda che $1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$. ($1 \text{ MeV} = 10^6 \text{ eV}$)

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



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 ^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



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

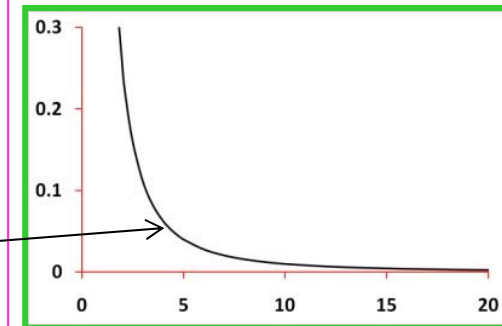
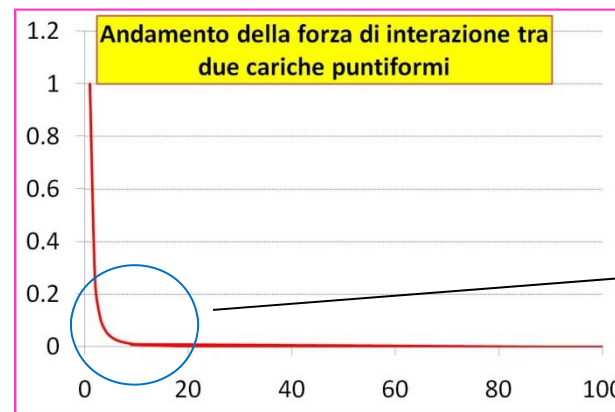
L'esistenza stessa del nucleo atomico ci pone un problema inesplicabile sulla base delle conoscenze della Fisica Classica dei primi del novecento: **come è possibile la stabilità dei nuclei** (più particelle positive che si trovano a distanze molto piccole, dell'ordine di 10^{-15} m) ?

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:

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

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

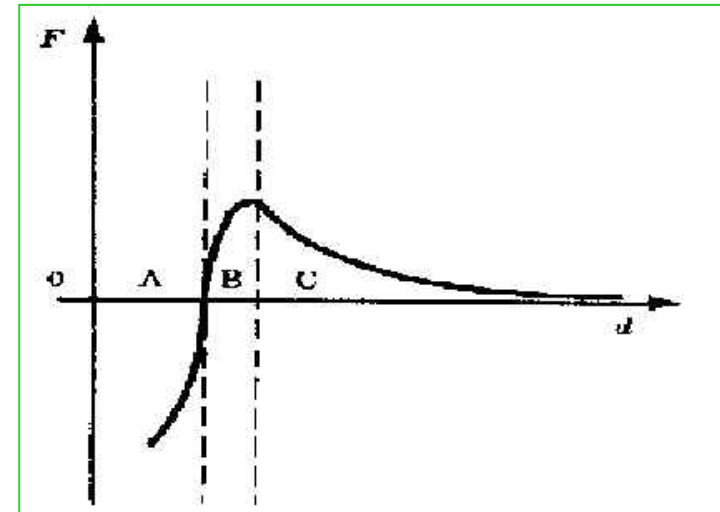
Forze nucleari (a breve raggio d'azione)



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 accade 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

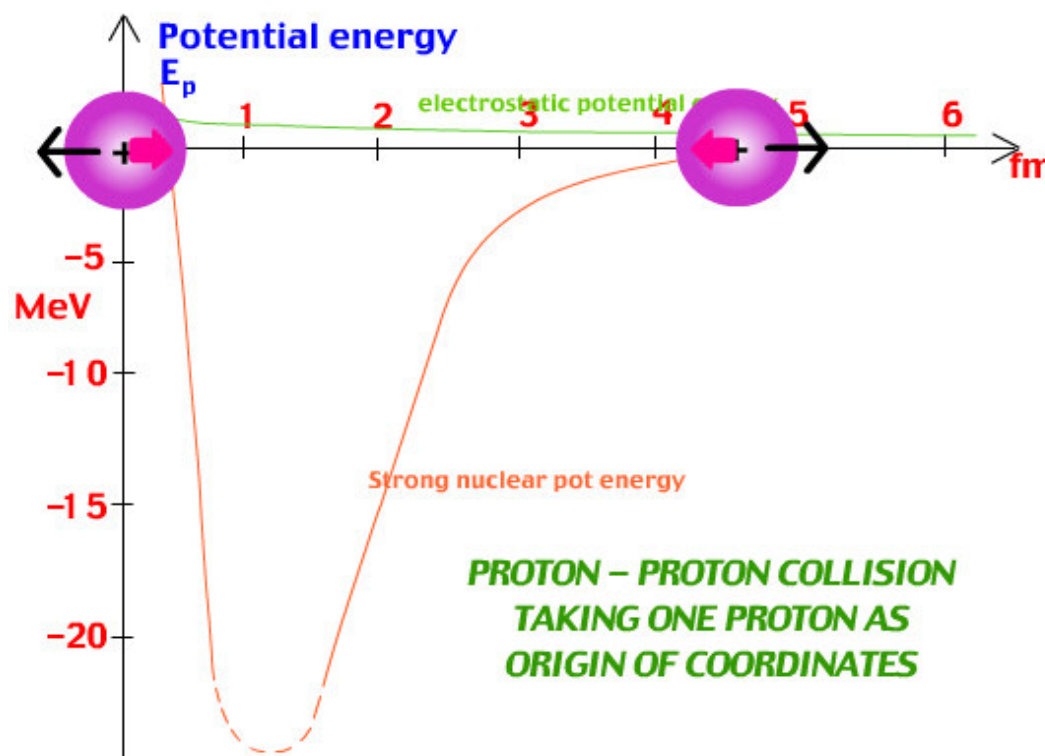
Le forze nucleari sono indipendenti dalla carica elettrica, agiscono tra neutroni e neutroni, tra protoni e neutroni, tra protoni e protoni.

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

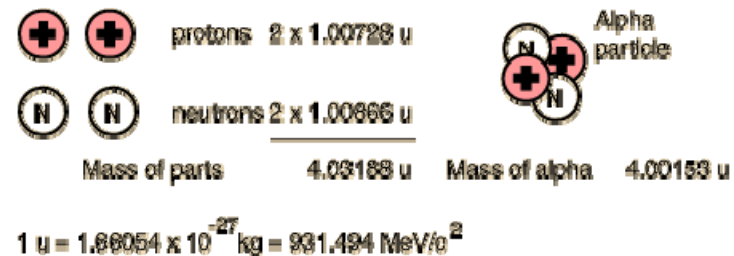
Si osserva che, per qualunque nucleo con più nucleoni (cioè tutti, tranne l'isotopo più leggero dell'idrogeno ^1H) si ha un *difetto di massa* $\Delta m = \Sigma m - M$, cioè:

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)*



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.**

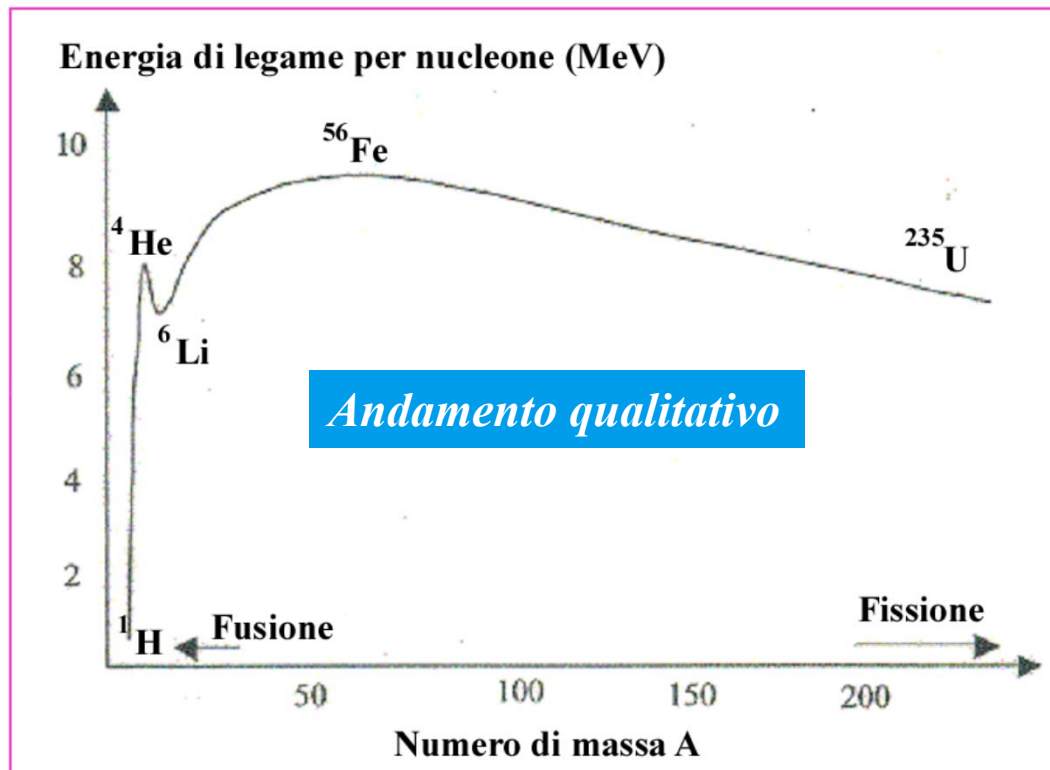


La produzione di energia da reazioni nucleari

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

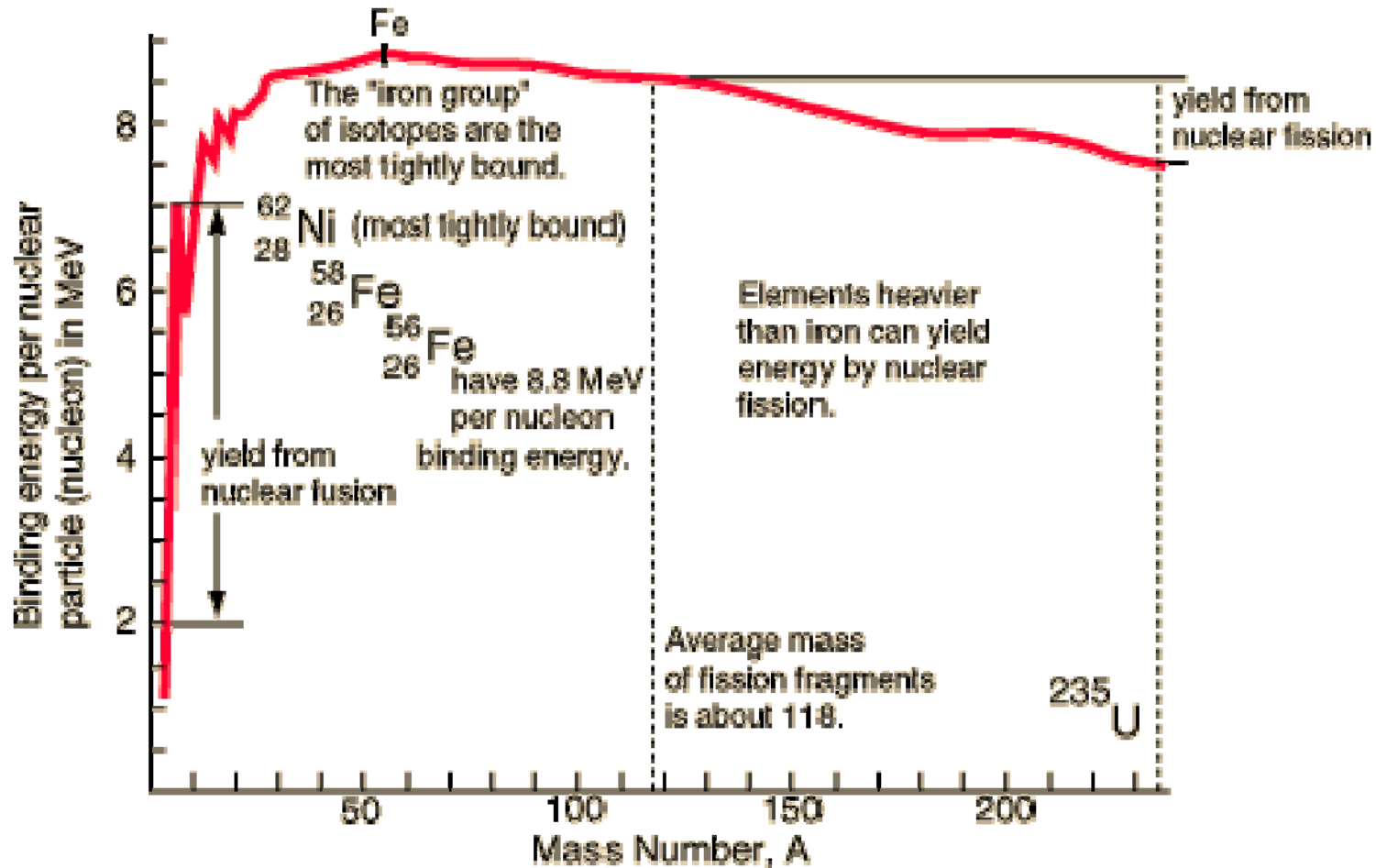


La produzione di energia da reazioni nucleari

Energia di legame per nucleone



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI





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

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.

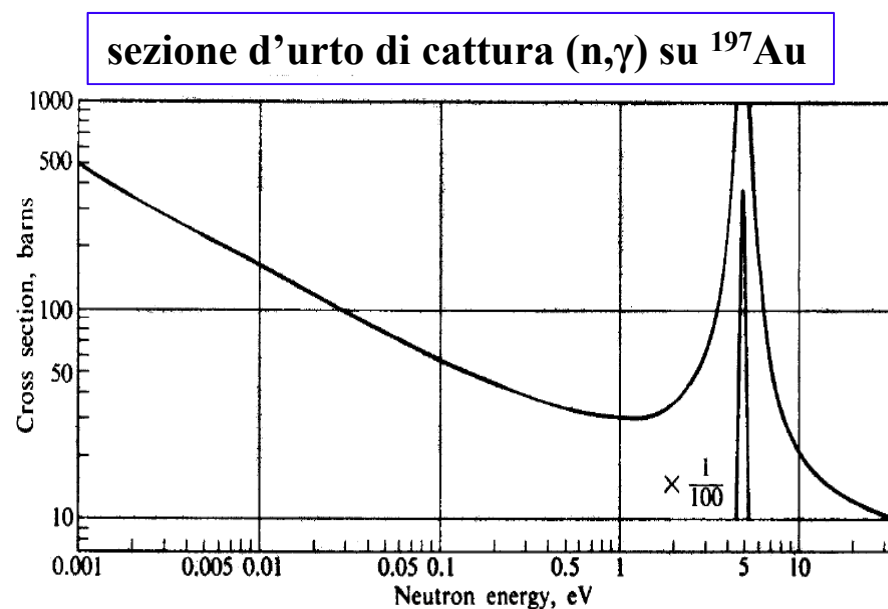
La σ rappresenta l'area con cui una particella incidente (“proiettile”) vede il nucleo bersaglio. Le dimensioni della sezione d'urto sono quindi quelle di un'area.

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.

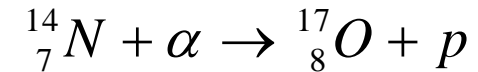
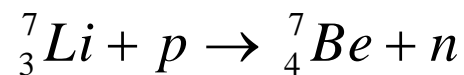
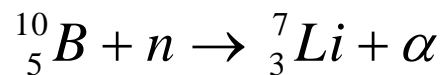




La produzione di energia da reazioni nucleari

Le reazioni nucleari

Alcuni esempi di reazioni nucleari



Si ricorda che $\alpha = {}^4_2He$ e che $p = {}^1_1H$

Due reazioni nucleari rivestono una particolare importanza :

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

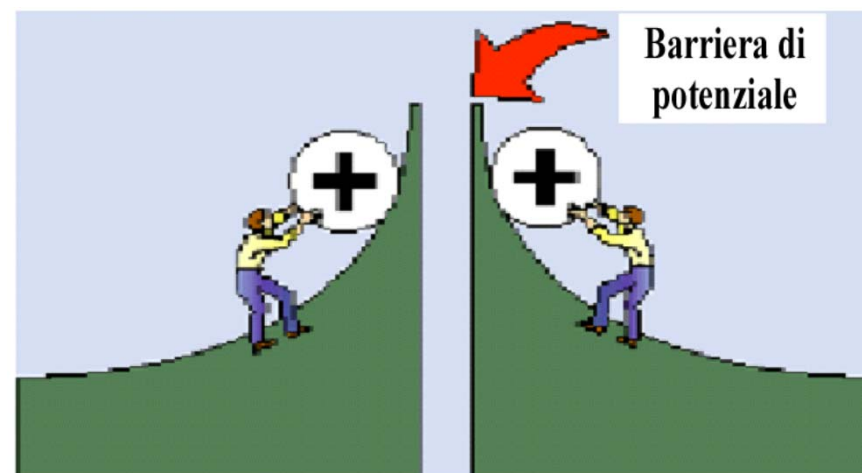
Energia da fusione nucleare



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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

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



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

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

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



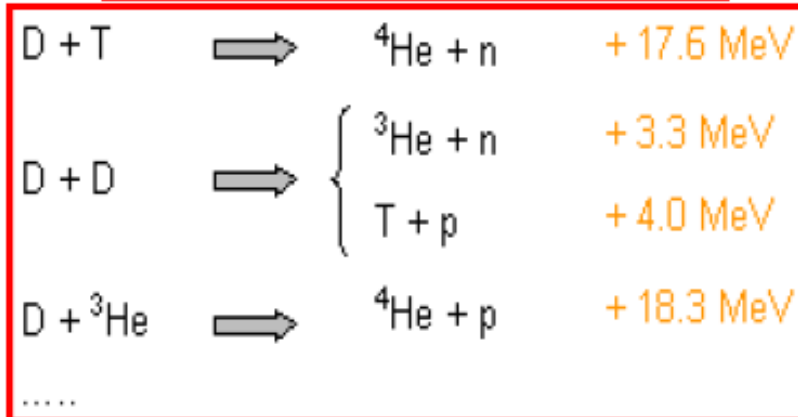
La produzione di energia da reazioni nucleari

Sezione d'urto di fusione nucleare

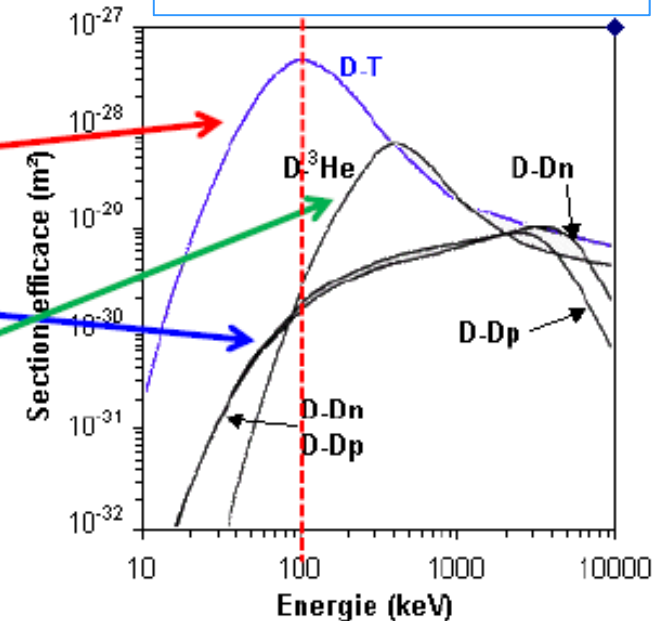


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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

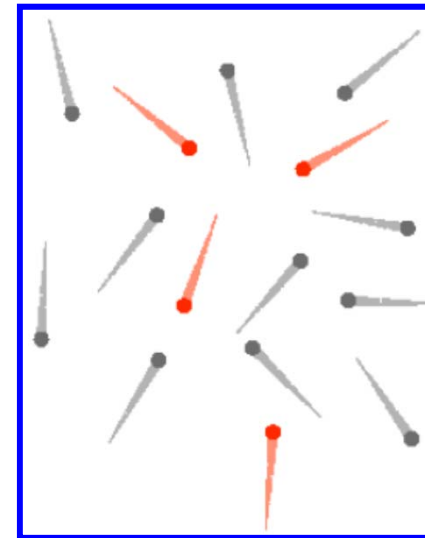
Fusione nucleare: il plasma



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 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 → **$Q = P_N/P_H$**

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

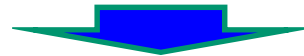
Fusione nucleare: il criterio di Lawson



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

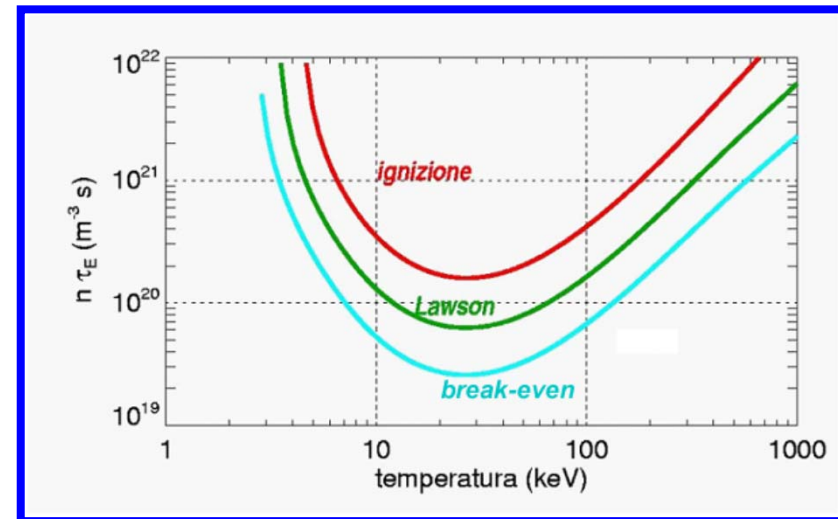
Fusione nucleare: condizioni reali (??) per la fusione



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 ($\approx 10^{20}$ m⁻³) e tempi di confinamento τ_E alti (≈ 1 secondo)
(**macchine a *confinamento magnetico***) (volume plasma ≈ 1000 m³)

alte densità n ($\approx 10^{31}$ m⁻³) e tempi di confinamento τ_E piccoli ($\approx 10^{-10}$ secondi)
(**macchine a *confinamento inerziale***) (volume plasma $\approx 10^{-12}$ m³)



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: la strada attuale

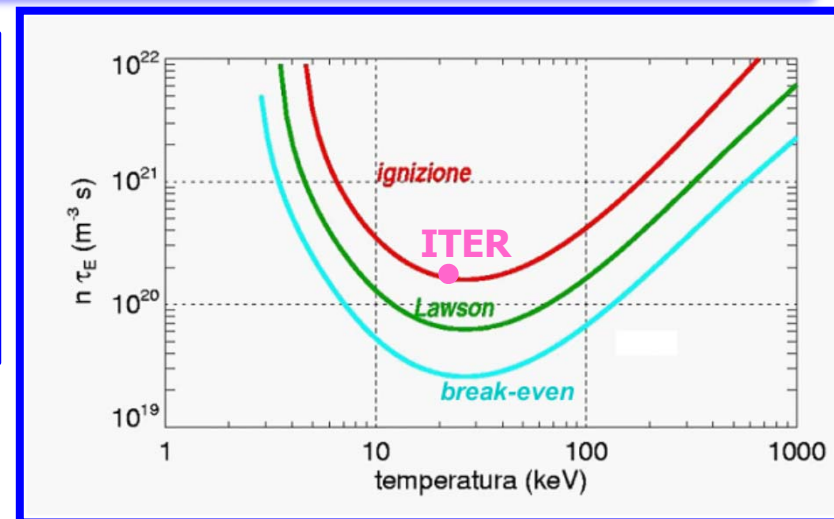


FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

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:

$$\left\{ \begin{array}{l} n = 1.5 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \\ \tau_E = 1 \text{ secondo} \\ T = 20 \text{ keV} (= 155 \text{ milioni di gradi}) \end{array} \right.$$



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

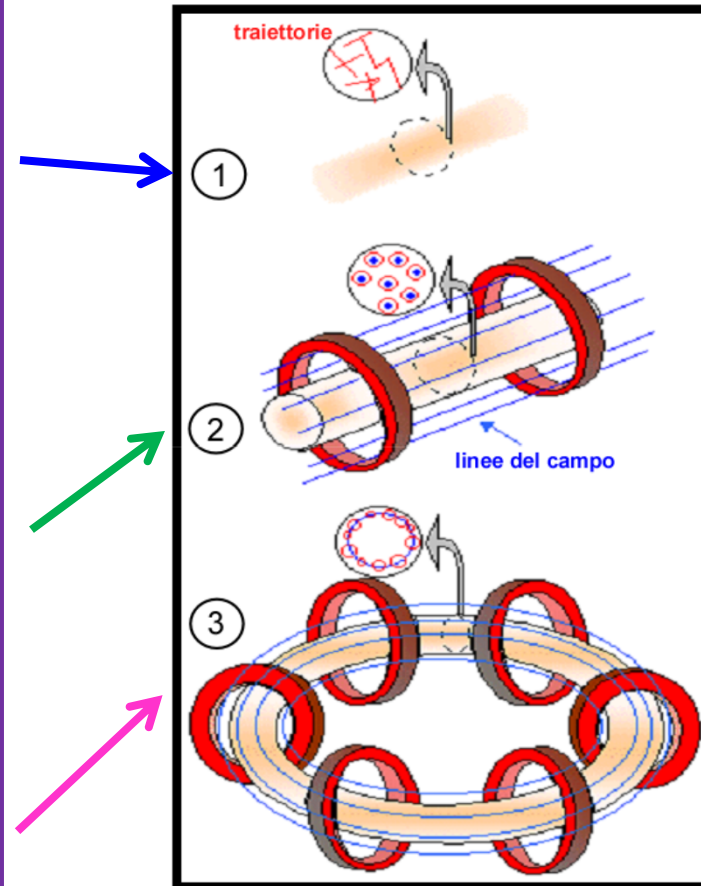


In linea di principio il plasma costituito da particelle cariche (ioni di deuterio e trizio) può essere **confinato mediante un campo magnetico**: in assenza di questo campo le particelle si muoverebbero a caso in tutte le direzioni, urterebbero le pareti del recipiente e il plasma si raffredderebbe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



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



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il tokamak



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Per minimizzare la perdita di particelle di plasma (nuclei di deuterio e trizio) le linee del campo debbono essere elicoidali.

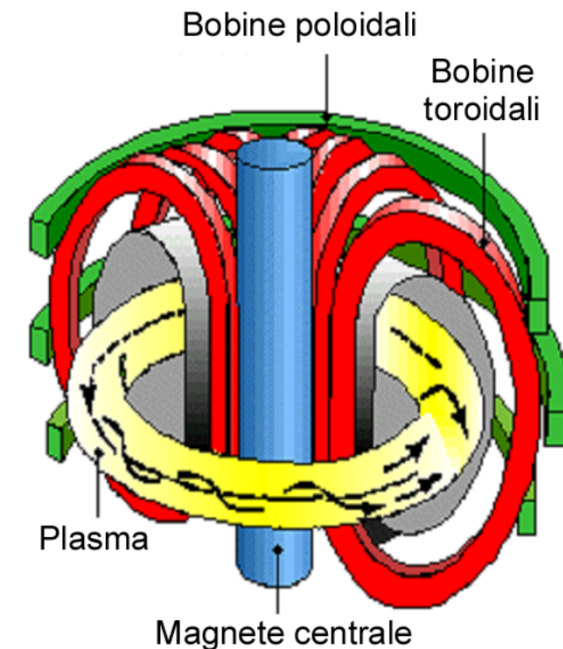
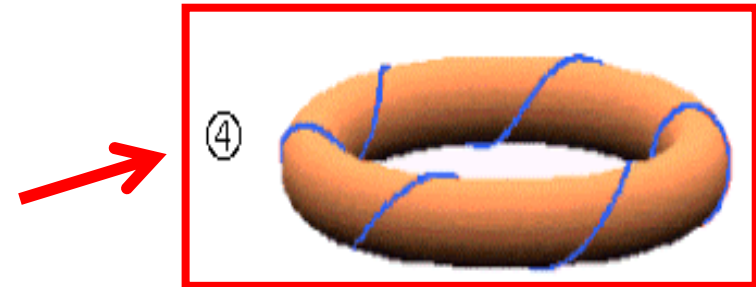
Questo si ottiene aggiungendo al campo toroidale un altro campo ad esso perpendicolare (campo poloidale).

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

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





La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il tokamak



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La piattaforma per
l'impianto ITER a metà 2011

Gli impianti tipo tokamak sono quelli attualmente più diffusi.

Circa 30 tokamak 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 International Thermonuclear Experimental Reactor (**ITER**) è in fase finale di progettazione ed è partita la preparazione alla costruzione a

Cadarache, Francia





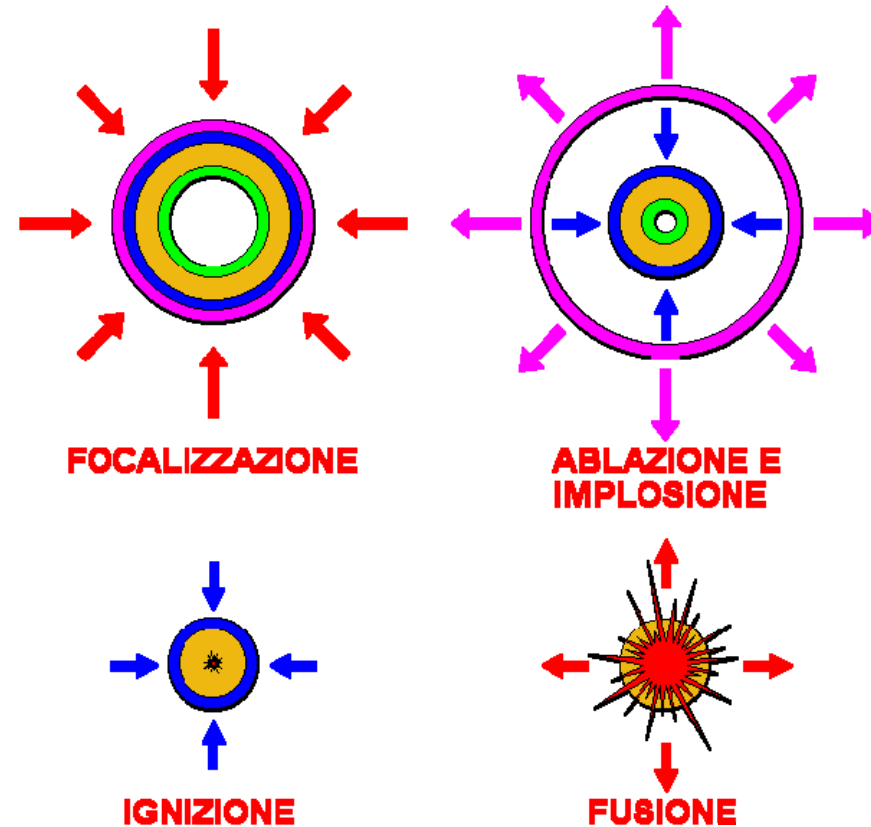
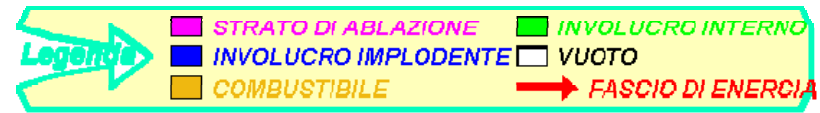
La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il confinamento inerziale

Nella fusione a confinamento inerziale una sferetta di combustibile (D + T, allo stato solido per la temperatura criogenica a cui sono 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).



•<http://www2.ing.unipi.it/dcmn/fusione/fusione.htm>



La produzione di energia da reazioni nucleari

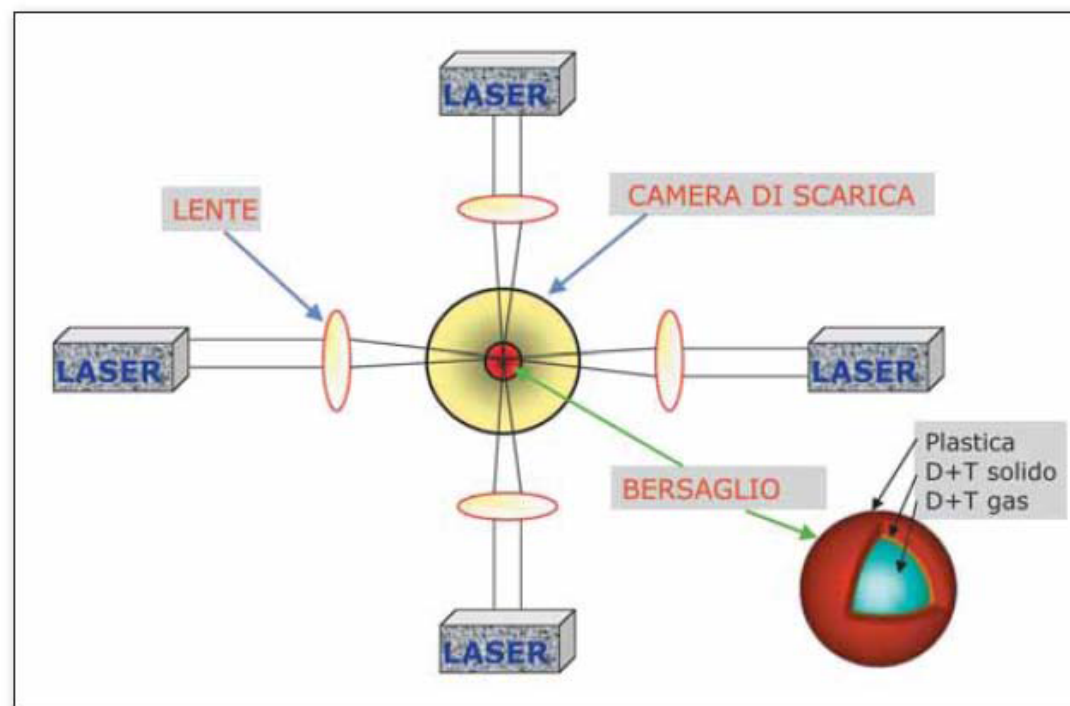
Fusione nucleare: il confinamento inerziale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

La **fusione a confinamento inerziale** (in inglese *Inertial confinement fusion*, in breve **ICF**) è un processo in cui l'innesco delle reazioni di fusione nucleare (*ignizione*) avviene per compressione e riscaldamento di un combustibile, costituito spesso da una miscela di deuterio e trizio, tipicamente nella forma di micro-sferula solida, per la temperatura criogenica a cui sono state prodotte le sferette.

L'energia per comprimere e riscaldare il combustibile viene somministrata allo strato esterno del bersaglio usando raggi di luce laser, elettroni o ioni. anche se, per una serie di motivi tecnici, quasi tutti gli ICF realizzati fino ad oggi hanno fatto uso di **laser**.





La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il confinamento inerziale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Per produrre plasmi a Confinamento Inerziale si usano piccole sferette, con diametro di circa 2 mm, costituite da un contenitore di materiale plastico, detto ***Ablator*** (p.es. CH + Br + O₂), ***contenente una sferetta cava di miscela di D-T solida***, che contiene meno ***di 0.1 mg di miscela di D-T gassosa***.

Più fasci di un medesimo Laser di grande potenza colpiscono la sferetta da più direzioni producendo un'evaporazione delle calotte del contenitore di plastica con conseguente compressione della sferetta cava solida di miscela di D-T.

La miscela gassosa D-T, sottoposta ai fasci Laser, viene spinta verso il centro geometrico della sferetta, raggiunge, nel centro della sfera, le densità elevatissime necessarie perché si verifichi la fusione della miscela gassosa.



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il confinamento inerziale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

Il 2 ottobre 2013, presso il National Ignition Facility del Laboratorio di Livermore negli Stati Uniti viene annunciato che per la prima volta viene raggiunto il punto di pareggio con la tecnica di fusione a confinamento inerziale e quindi l'energia prodotta dalla fusione era pari a quella usata per alimentare i 192 laser che l'hanno scatenata.

“Da sottolineare, però, – precisa l'ENEA in una nota – che questi risultati, ancorché importanti per lo sviluppo della fusione inerziale, sono inferiori a quelli già ottenuti con la fusione a confinamento magnetico. In particolare, se si considera tutta l'energia in gioco il rapporto tra quanto ottenuto e quanto speso, nell'esperimento di fusione inerziale è dell'ordine del 1%. Per confronto, con il confinamento magnetico, nell'esperimento JET si è ottenuto un rapporto significativamente più elevato. La strada del confinamento magnetico resta per l'Italia e l'Europa la strada maestra per ottenere l'energia da fusione.



La produzione di energia da reazioni nucleari

Fusione nucleare: il confinamento inerziale



FONDAZIONE
GIUSEPPE OCCHIALINI

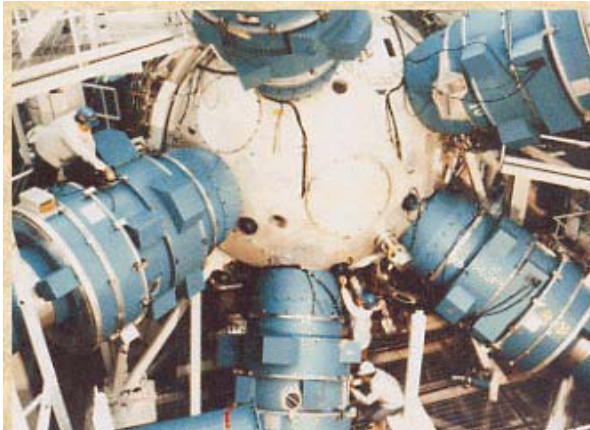


Immagine dell'esterno e dell'interno della camera di fusione o di scarica con confinamento inerziale Lawrence Livermore Laboratory USA



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

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.

