

**Fusione termonucleare
controllata**

Outline

- ❑ Problema energetico mondiale
- ❑ Principi di fusione termonucleare controllata
- ❑ Confinamento magnetico
- ❑ Esperimenti per la fusione termonucleare controllata
- ❑ Progetti del gruppo di elettrotecnica

Fonti per la produzione di energia

Le fonti per la produzione di energia elettrica possono essere classificate in :

- *fonti di energia tradizionali*

Le fonti di energia tradizionale sono quelle che utilizzano i *combustibili fossili* per ottenere energia meccanica e/o elettrica. Esse costituiscono fonti di energia non rinnovabili. Derivano dalla trasformazione di *sostanza organiche*, rimaste sepolte sotto terra in assenza di aria, in forme più stabili e ricche di carbonio. Sono fonti *energetiche non rinnovabili*, e il loro utilizzo ai ritmi attuali pregiudica la loro disponibilità per le generazioni future. Attualmente con queste fonti si genera l'aliquota maggiore di energia.

- *fonte di energia alternativa*

Le fonti di energia alternativa producono energia meccanica e/o elettrica senza usare combustibili fossili. Le energie rinnovabili sono un sottoinsieme delle energie alternative.

Fonti per la produzione di energia

Fonti energetiche tradizionali:

- ✓ Petrolio e suoi derivati (benzine, gasolio, solventi, cherosene, olii lubrificanti, catrame)
- ✓ Carbone
- ✓ Gas naturale (tra cui il metano)

Fonti energetiche alternative:

- ✓ Energia nucleare: generata con la fissione o con la fusione
- ✓ Energia idroelettrica
- ✓ Energia geotermica
- ✓ Energia eolica
- ✓ Energia solare: generata con le centrali solari termiche o centrali fotovoltaiche
- ✓ Energia del moto ondoso e delle maree
- ✓ Energia prodotta dalla dissociazione molecolare (rifiuti urbani, biomassa...)
- ✓ Energia marina
- ✓ Agroenergie
 - ✓ *biogass*: prodotto dalla fermentazione batterica in assenza di ossigeno dei residui organici provenienti da rifiuti.
 - ✓ produzione di *biocarburante*: biodisel, green diesel, olio di colza, biometanolo etc.

Fonti per la produzione di energia

Le fonti energetiche principalmente utilizzate nel mondo industrializzato



COMBUSTIBILI
FOSSILI



IDROELETTRICA



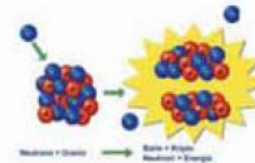
EOLICA



GEOTERMICA




SOLARE



FISSIONE

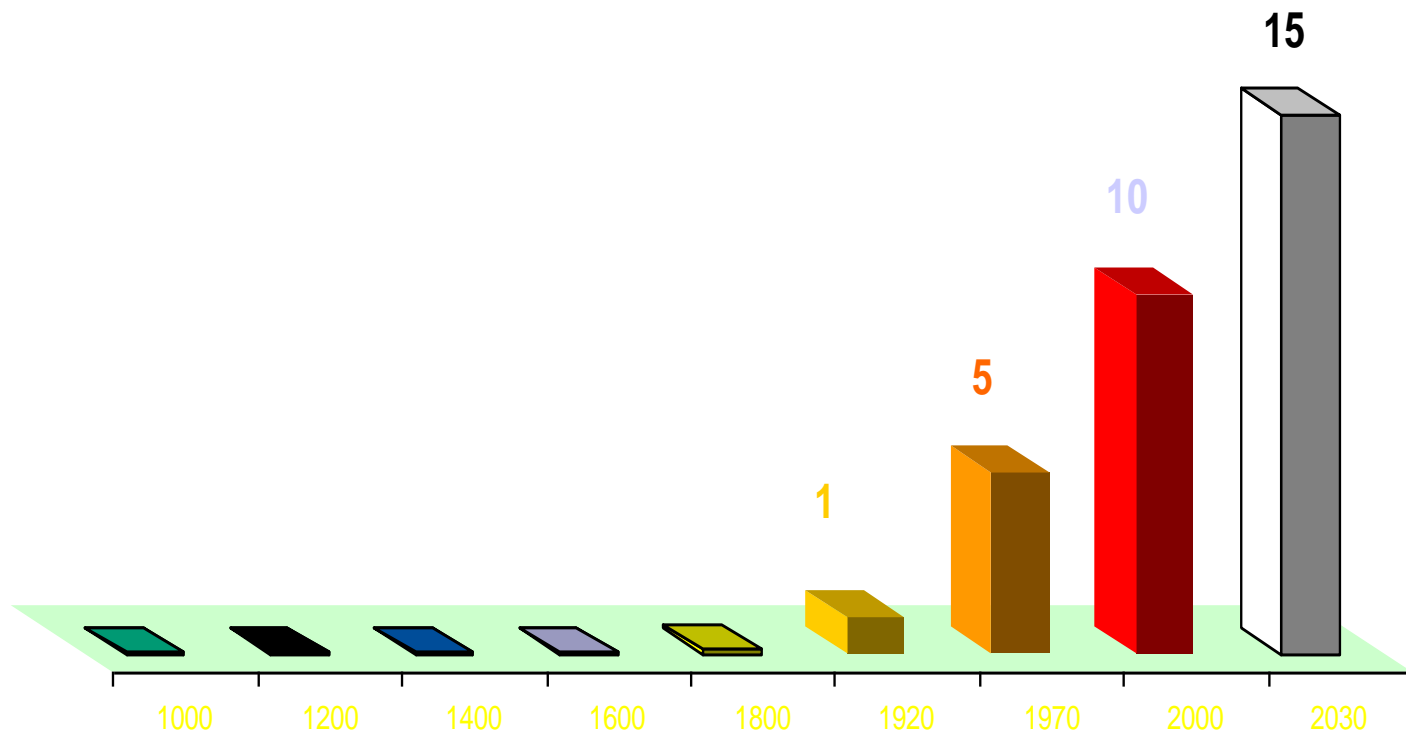
Unità di misura per quantificare i consumi di energia è relativa a quella prodotta da 1t di petrolio grezzo è Il TOE (Tonne of Oil Equivalent): rappresenta la quantità di energia rilasciata dalla combustione di una tonnellata di petrolio grezzo e vale circa **42 GJ**

1 TOE  41,868 GJ o 11,639 MWh

Consumo energetico mondiale

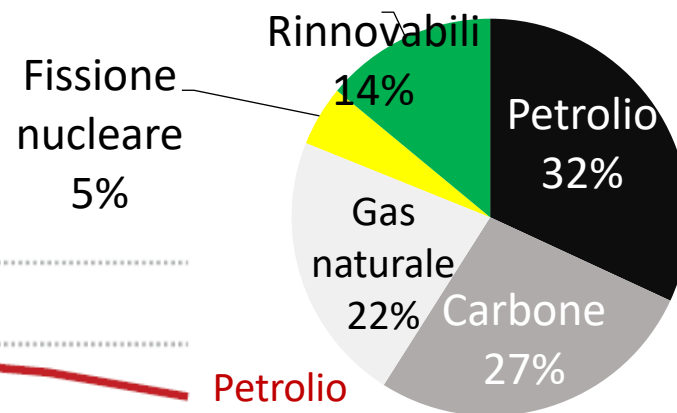
Negli ultimi decenni il *consumo mondiale di energia* nel pianeta ha subito rapidi cambiamenti.

- In 30 anni dal 1970 al 2000 il consumo mondiale di energia è raddoppiato
- Nel 2000 ha raggiunto i 10 miliardi di **TEP** (Tonnellate Equivalenti di Petrolio)
- Per i 30 anni successivi al 2000 è previsto un ulteriore aumento del 50%

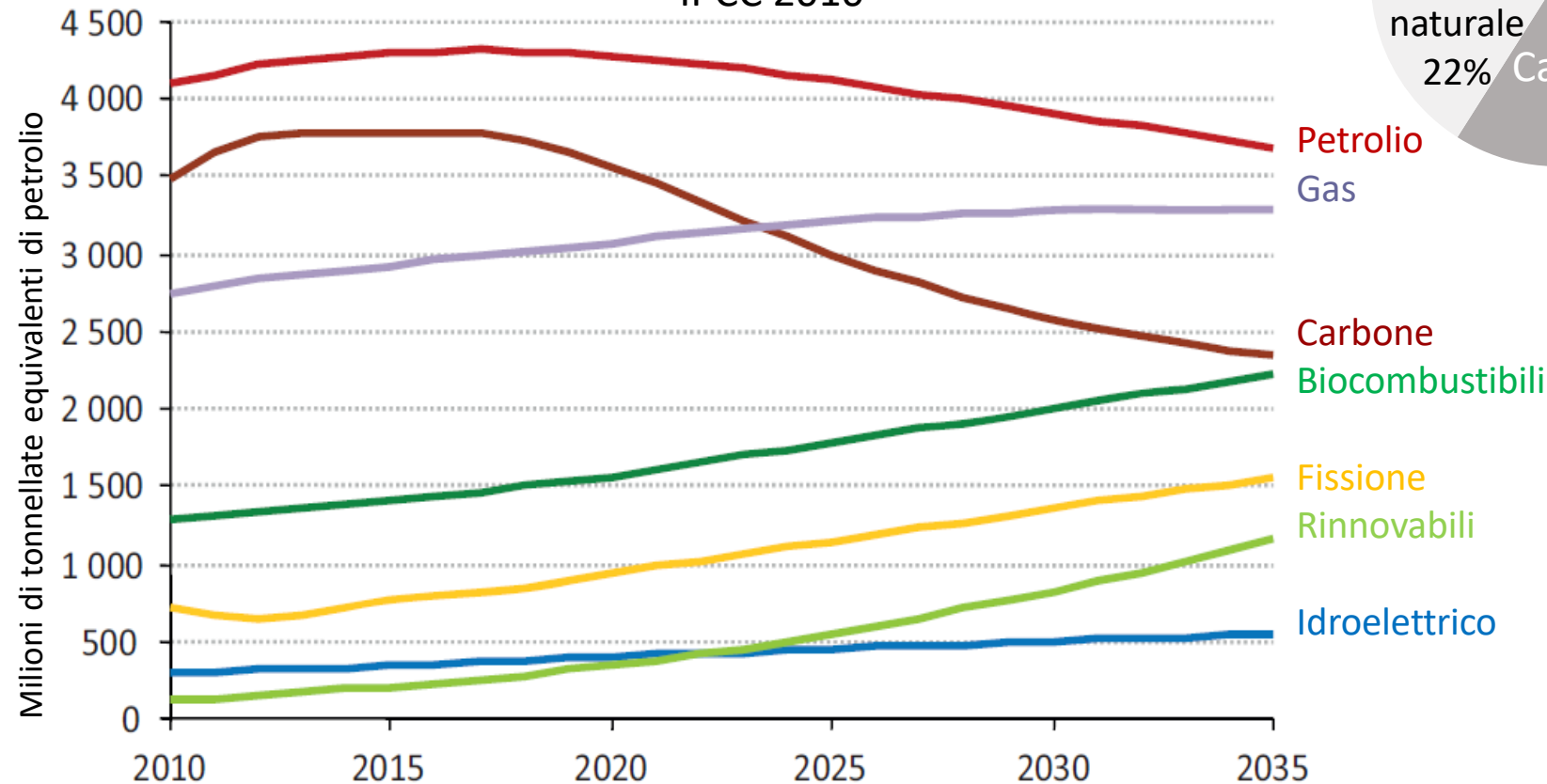


Consumo energetico mondiale

L'81% del consumo energetico globale viene soddisfatto da combustibili fossili



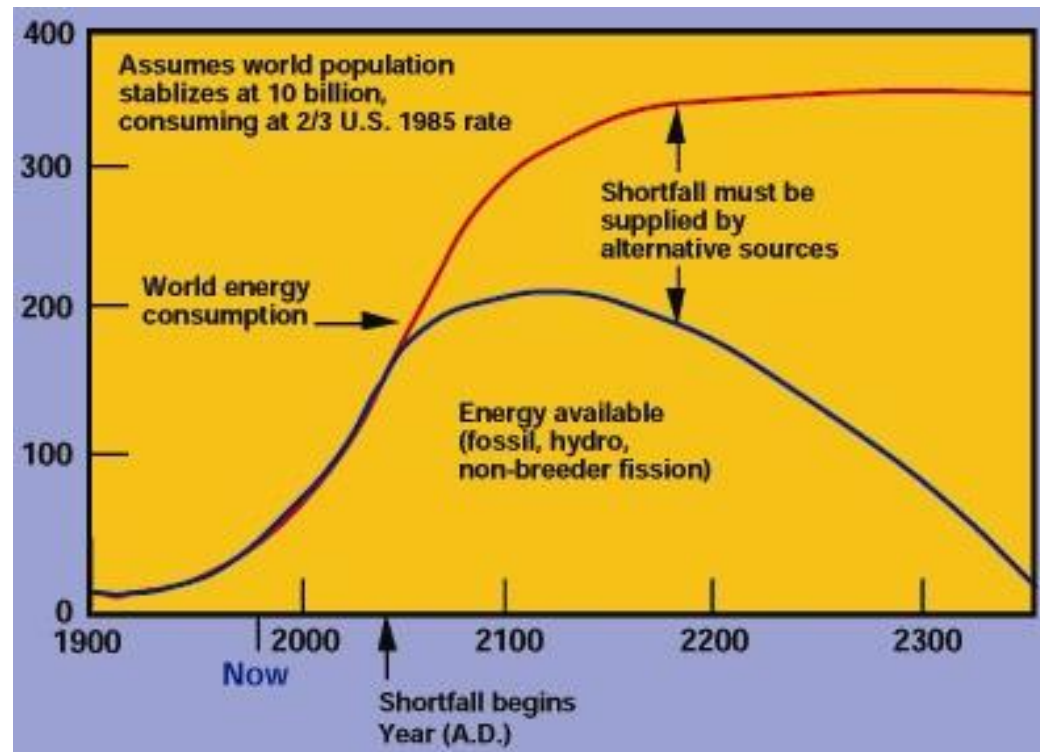
IPCC 2010



Consumo energetico mondiale

Quanto dureranno le fonti di energia convenzionali?

Il deficit di energia rispetto al valore richiesto (**shortfall**) dovrà essere fornito con fonti alternative



fonti fossili VS fonti alternative

Vantaggi e svantaggi delle fonti fossili rispetto alle fonti di energia alternative

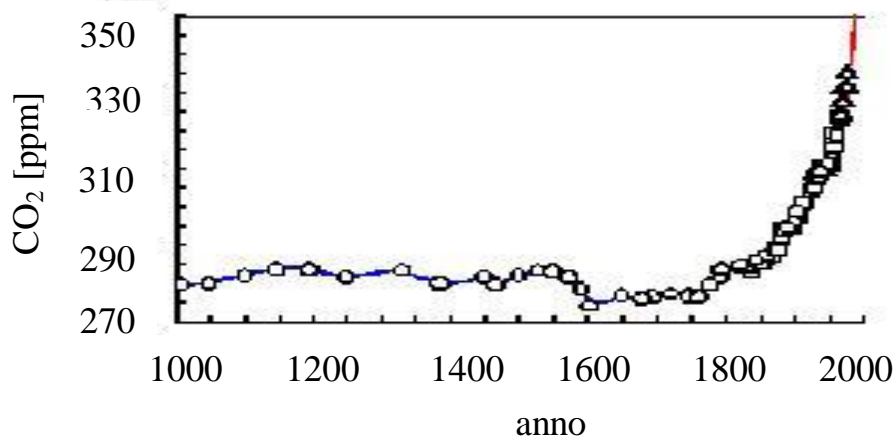
	vantaggi	svantaggi
Petrolio	• alto rapporto energia/volume	• inquinanti
Carbone		• Incremento di CO ₂
Gas		• Non rinnovabili

Vantaggi e svantaggi delle fonti alternative rispetto alle fonti di energia fossili

	vantaggi	svantaggi
Fissione	● senza CO ₂	● scorie ● sicurezza ● costosa
Idroelettrica	● senza CO ₂	● dighe ● limitata geograficamente
Eolica	● senza CO ₂	● ampio spazio ● limitata geograficamente
Geotermica	● senza CO ₂	● limitata geograficamente
Solare	● pulita	● basso rendimento ● ampio spazio ● costosa ● limitata geograficamente

Prezzo delle fonti fossili

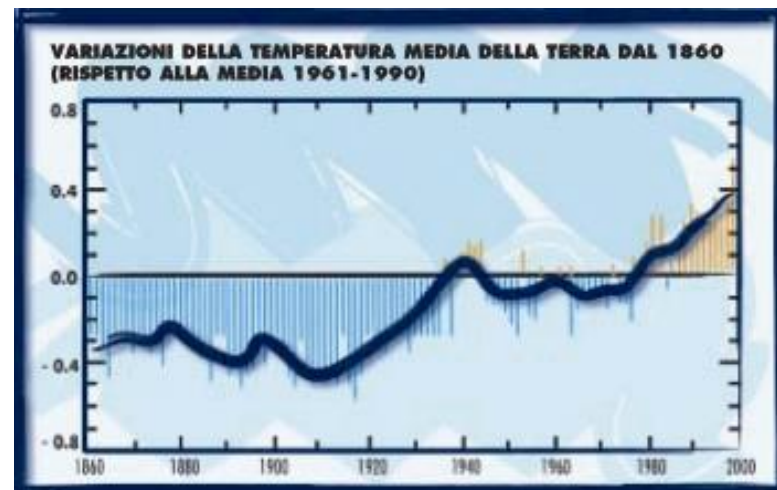
- Piogge acide prodotte dall'immissione nell'atmosfera di Zolfo
- Continuo aumento della concentrazione dei **gas serra** nella atmosfera terrestre come: anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄), protossido di azoto (N₂O) e dell'Ozono (O₃)



Aumento dell'effetto serra

Effetto serra

- Aumento della temperatura della superficie terrestre
- Aumento delle precipitazioni
- Diminuzione dei ghiacciai
- Crescita del livello del mare



Prezzo delle fonti rinnovabili



1 GW

~ 300 000 000 di cellulari in ricarica

Rinnovabili



486 km²



50 km²



20 000 000
di maiali

Fusione Nucleare

Linee guida mondiali attuali:

- Utilizzare meno petrolio e più gas e/o carbone
- Ricorrere ad una rigorosa politica di uso intelligente dei combustibili
- Sviluppare tutte le tecnologie che non producono CO₂.

Una soluzione alternativa per il futuro potrebbe essere:



La fusione termonucleare controllata



1 g



25 GWh

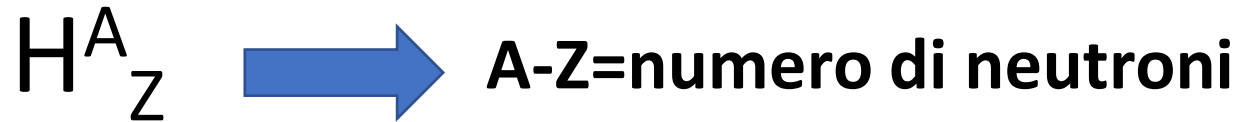
1 kg di idrogeno \approx 10 000 t di carbone

disponibilità dei materiali richiesti di 1.000.000 di anni

Difetto di Massa

numero di massa A = numero protoni + numero neutroni

numero atomico Z = numero protoni



composizione atomica di alcuni elementi di nostro interesse:

- l'atomo di Idrogeno, H^1_1 , è formato da un protone e un elettrone;
- l'atomo di Elio, H^4_2 , è formato da due protoni, due neutroni e due elettroni;
- l'atomo di Litio, Li^6_3 , è formato da tre protoni, tre neutroni e tre elettroni;

In un elemento chimico con numero di massa A , il cui nucleo contiene N neutroni e Z protoni, la massa totale delle particelle isolate superano la massa effettiva del nucleo (m_A)

$$Z \cdot m_p + N \cdot m_n > m_A$$

La differenza di massa si è trasformata in energia di legame E_B tramite *l'equazione del difetto di massa*

$$E_B = \Delta m \cdot c^2 (Z \cdot m_p + N \cdot m_n - m_A) \cdot c^2$$

E_B è l'energia che permette alle particelle del nucleo di rimanere unite, ed è lo stesso valore di energia che bisogna fornire per riottenere le particelle elementari che lo compongono

Difetto di massa

Teoria della Relatività di Einstein

In una trasformazione nucleare si verifica una riduzione della massa Δm che libera un'energia proporzionale alla riduzione di massa Δm e al quadrato della velocità della luce c^2 :

$$E = \Delta m c^2$$

essendo c^2 un numero elevato, $c^2 = 910^{16}[\text{m}^2/\text{s}^2]$

conseguente che *piccole variazioni della massa possono comportare la generazione di una* un'elevata quantità di energia, principalmente sotto forma di energia cinetica dei prodotti della fusione.

Deuterio H_1^2

$$m_p = 938,272029 \quad m_n = 939,565360$$

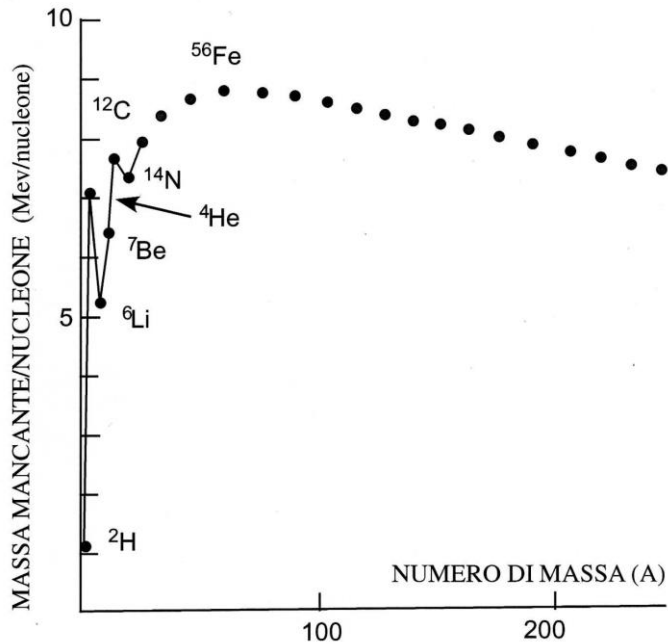
Massa del nucleo di deuterio $m_D = 1875,612762$

$$m_D < m_p + m_n, \text{ mancano } 2,2 \text{ MeV}/c^2$$

Sperimentalmente si trova che se si bombarda il nucleo di deuterio con 2,2 MeV il nucleo si spacca.

Difetto di massa nucleare

Difetto di massa nucleare

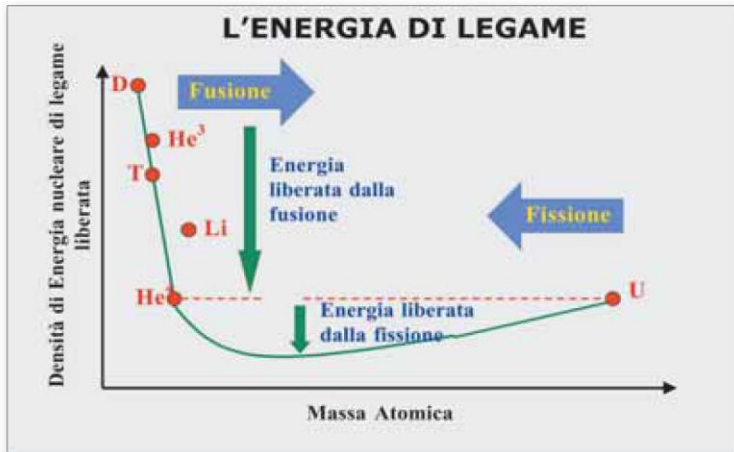


Una quantità conveniente per valutare il difetto di massa è E_B/A che misura il valore medio dell'energia che lega ogni nucleone al nucleo (energia di legame). Se la si calcola per tutti gli elementi si ottiene il diagramma di difetto di massa nucleare. E_B/A è bassa sia per gli atomi leggeri che per gli atomi più pesanti. Quindi per questi è più facile dare vita ad una reazione nucleare. Più E_B/A è alta più il nucleo è stabile perché i nucleoli sono maggiormente legati.

Tutti i processi che provocano la formazione di nuclei più stabili liberano energia totale a favore dell'energia di legame. In natura evolvere verso una configurazione più stabile significa evolvere verso una condizione di energia totale inferiore. Ma diminuire l'energia totale significa diminuire la massa complessiva perché energia e massa sono la stessa cosa.

Difetto di Massa

*A < 60 all'aumentare della massa del nucleo Δm aumenta e il nucleo è più legato \rightarrow conviene fondere i nuclei piccoli per formarne uno più grande con E_B/A maggiore
A > 60 all'aumentare della massa del nucleo Δm diminuisce e il nucleo è meno legato \rightarrow conviene dividere il nucleo grande in due più piccoli con E_B/A maggiore*



Sono perciò stabili:

- ❖ la **razione di fusione** di due nuclei leggeri
- ❖ la **reazione di fissione**, in cui un nucleo molto pesante si spezza in due nuclei più leggeri.

In entrambe la massa complessiva dei frammenti è minore della massa del nucleo di partenza.

Sia la razione di fusione che di fissione sono del tipo:

$$A_1 + A_2 + A_3 + \dots + A_i = B_1 + B_2 + B_3 + \dots + B_j + \text{energia}$$

dove:

$$\text{energia} = (m_{A_1} + m_{A_2} + m_{A_3} + \dots + m_{A_i} - m_{B_1} - m_{B_2} - m_{B_3} - \dots - m_{B_i}) \cdot C^2$$

Reazioni nucleari

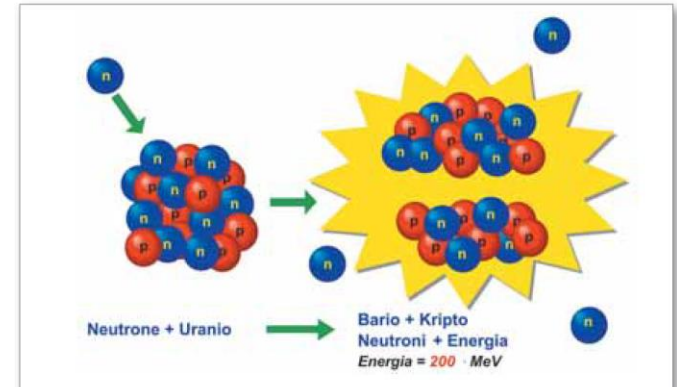
Le reazioni nucleari riguardano la trasformazione del nucleo di un atomo di uno specifico elemento chimico, in un altro a diverso numero atomico, è necessario variare il numero di massa A , quindi il numero di neutroni e protoni presenti nel nucleo.

FISSIONE

si bombardano i nuclei con dei neutroni. Si utilizzando il neutrone come proiettile perché, essendo neutro, non interagente con le cariche dei protoni e degli elettroni

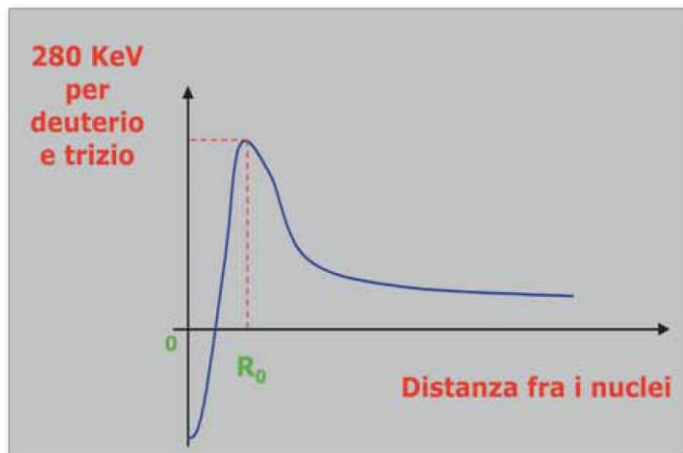
FUSIONE

per effettuare la fusione è necessario fornire ai nuclei l'energia sufficiente a vincere repulsione elettrostatica (legge di Coulomb)



$$F = \varepsilon \frac{q_1 \cdot q_2}{d^2}$$

È provato sperimentalmente che, per distanze d minori di $R_0 = 5 \cdot 10^{-12}$ m, la forza di repulsione elettrostatica è vinta dalle forze nucleari di attrazione (*forze presenti e che permettono a più protoni di rimanere uniti in uno stesso nucleo*). I nuclei devono essere portati a distanze tali che da superare la barriera coulombiana in modo che le **energia di legame vinca sulle repulsione elettrostatica**.



Contributo dell'energia da Fissione

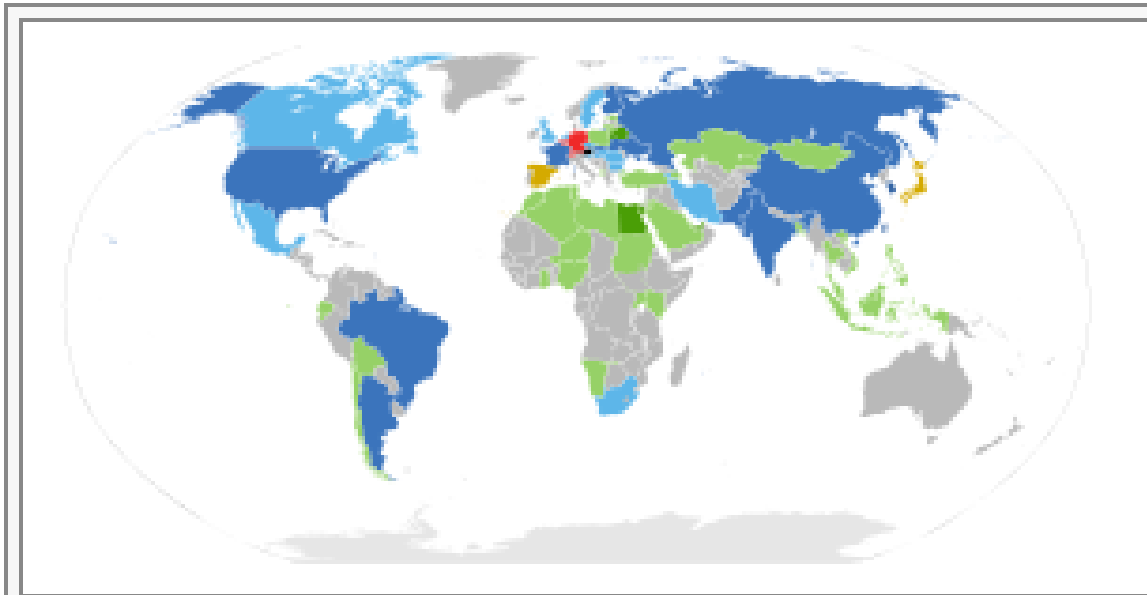
La **fissione**, o **scissione nucleare** avviene quando il nucleo di un elemento chimico pesante (ad esempio **Uranio-235** **Plutonio-239**) viene bombardato da un neutrone e si scinde in atomi i cui nuclei hanno: *masse che, se sommate, non raggiungono la massa originaria*, numero atomico inferiore, questo è accompagnato da emissione di una grande quantità di energia e radioattività.

L'alta aliquota della energia prodotta con il petrolio potrebbe essere prodotta con le **centrali nucleari a fissione**, ma non tutti i paesi le utilizzano e molti intendono dismettere le centrali esistenti per i grossi problemi relativi allo stoccaggio dei residui di combustione radioattivi.









La disponibilità dell'Uranio necessaria per la fissione nucleare è prevista per un massimo di 100 anni. Stiamo andando incontro al picco di disponibilità dell'uranio, analogamente al picco di disponibilità del petrolio (già raggiunto nel 2004)



Contributo dell'energia da Fissione



La situazione delle centrali nucleari nel mondo ad oggi 

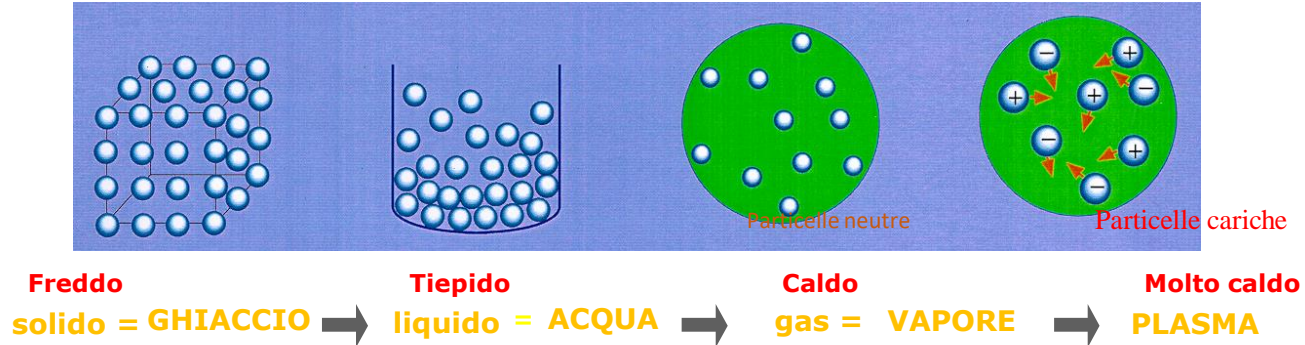
-  Reattori in funzione, nuovi reattori in costruzione
-  Reattori in funzione, nuovi reattori in considerazione
-  Nessun reattore in funzione, nuovi reattori in costruzione
-  Nessun reattore in funzione, nuovi reattori in considerazione
-  Reattori in funzione, situazione stabile
-  Reattori in funzione, in considerazione la loro chiusura
-  L'energia nucleare non è legale
-  Nessun reattore

Stati della materia

L'energia necessaria per superare la repulsione coulombiana e realizzare la fusione tra 2 nuclei può essere fornita portandoli ad altissima pressione (altissima temperatura, circa 10^7 kelvin, e/o altissima densità).

Microscopicamente, i diversi stati della materia dipendono dal bilanciamento tra :

- **l'energia associata alle forze coulombiane** che tendono a legare tra loro le particelle
- **l'energia cinetica** delle particelle (energia di agitazione termica che aumenta con la temperatura).

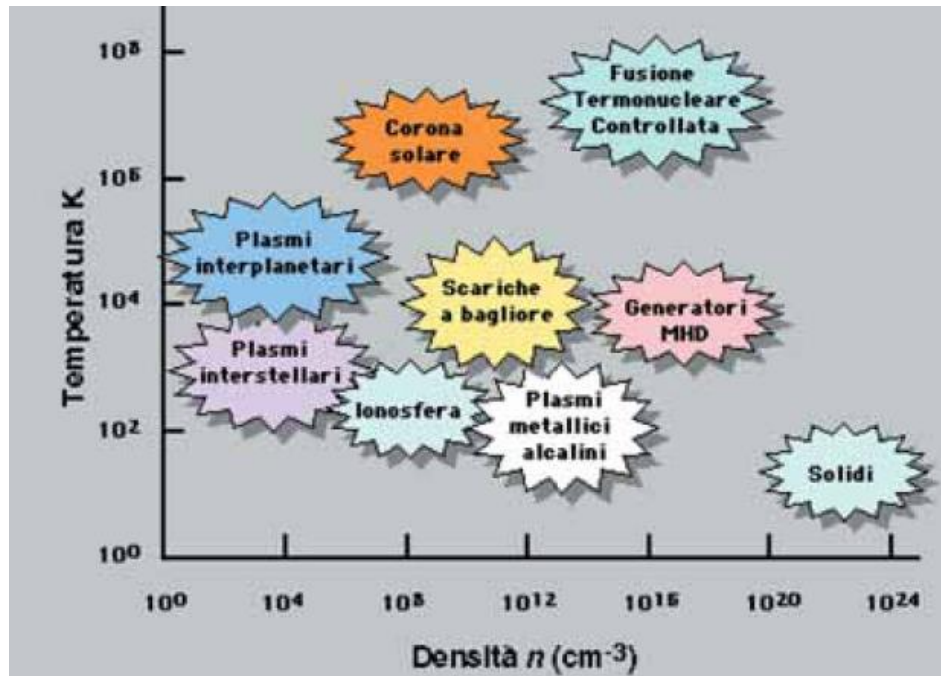


Il plasma è ritenuto il quarto stato della materia, è costituito da molecole dissociate in atomi in massima parte ionizzati, ovvero i nuclei sono separati dagli elettroni. Il plasma è quindi una miscela di **ioni e elettroni ma si presenta globalmente neutra**. A differenza dei gas il plasma è estremamente sensibile all'applicazione di campi elettromagnetici.

Differenti tipi di plasma

Esempi di manifestazioni naturali dei plasmi:
il sole, la ionosfera, i fulmini, le aurore boreali, nebulose.

Esistono innumerevoli tipi di plasma con *densità* e *temperatura* estremamente differenti.



K= temperature tipiche in [K°]
necessarie per raggiungere la
fusione di vari plasmi

n= Densità dei nuclei, espressa
come numero di nuclei presenti
in un cm³

Se vogliamo fornire ai singoli atomi della miscela, ad esempio Deuterio-Trizio, abbastanza energia da superare la Barriera di Coulomb e raggiungere la fusione, dobbiamo riscaldarli così tanto che si arriva a creare un plasma

Generazione del Plasma nei tubi di Crookes

I primi esperimenti sui plasmi hanno utilizzato *i tubi di Crookes*. Essi sono costituiti da tubi di vetro o quarzo, nei quali viene creato il *vuoto* e chiusi alle estremità con due *elettrodi*. Immettendo nel tubo una *piccola quantità di gas* (qualche milligrammo) e applicando una *tensione* via via crescente e sufficientemente elevata (ordine dei kV), ai due elettrodi sino a quando il gas subisce una improvvisa *transizione allo stato di plasma* diventando luminoso.

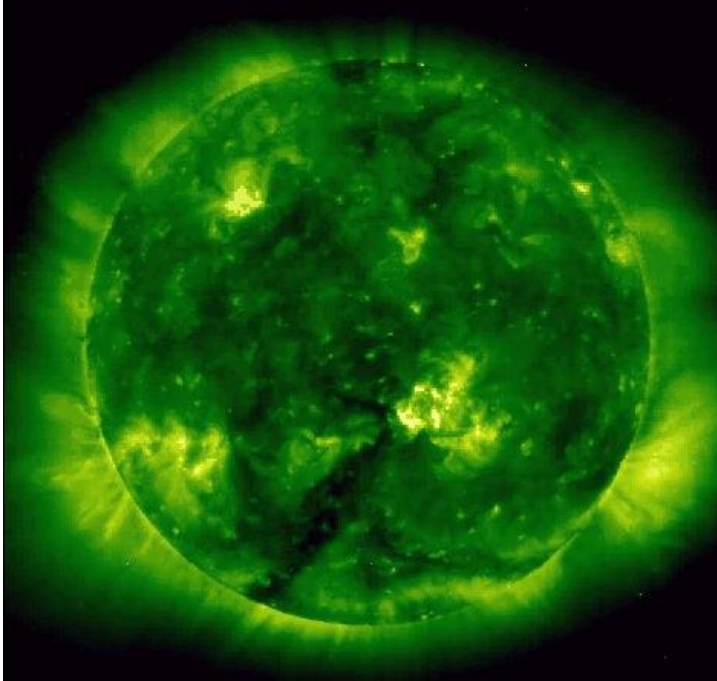
Questo fenomeno, chiamato “*scarica*”, è simile alla scarica elettrica che avviene naturalmente nei fulmini, e rappresenta il passaggio, riprodotto in laboratorio, dallo stato gassoso allo stato di plasma.

Una applicazione ancora attuale di questo fenomeno sono le scariche prodotte nelle lampade a *neon*, utilizzate ancora oggi per le lampade delle insegne luminose o per l’illuminazione interna di ambienti.



Colonna luminescente di un plasma di Argon.

La Fusione nucleare nel sole



Per non disperdere energia è necessario che il plasma resti confinato.

Nelle *stelle* e nel *sole* il confinamento si ha grazie alla pressione legata alla **forza di gravità**. Infatti la loro massa esercita una forte compressione nella parte centrale.

La materia risulta così densa e così calda (milioni di gradi centigradi) che i nuclei non possono più respingersi (la forza di gravità supera le forze coulombiane).

Il *sole* è una centrale a fusione nucleare naturale il *plasma dovuto alla fusione* non ha contenitori; esso rimane “*confinato*” naturalmente per *la legge di gravità o di attrazione reciproca della materia*, essendo:

$$F = G \frac{M_1 M_2}{d^2}$$

$G = 6.672 \cdot 10^{-11} \text{ Nm}^2 \text{ kg}^{-2}$ = *costante gravitazionale di Cavendish*;

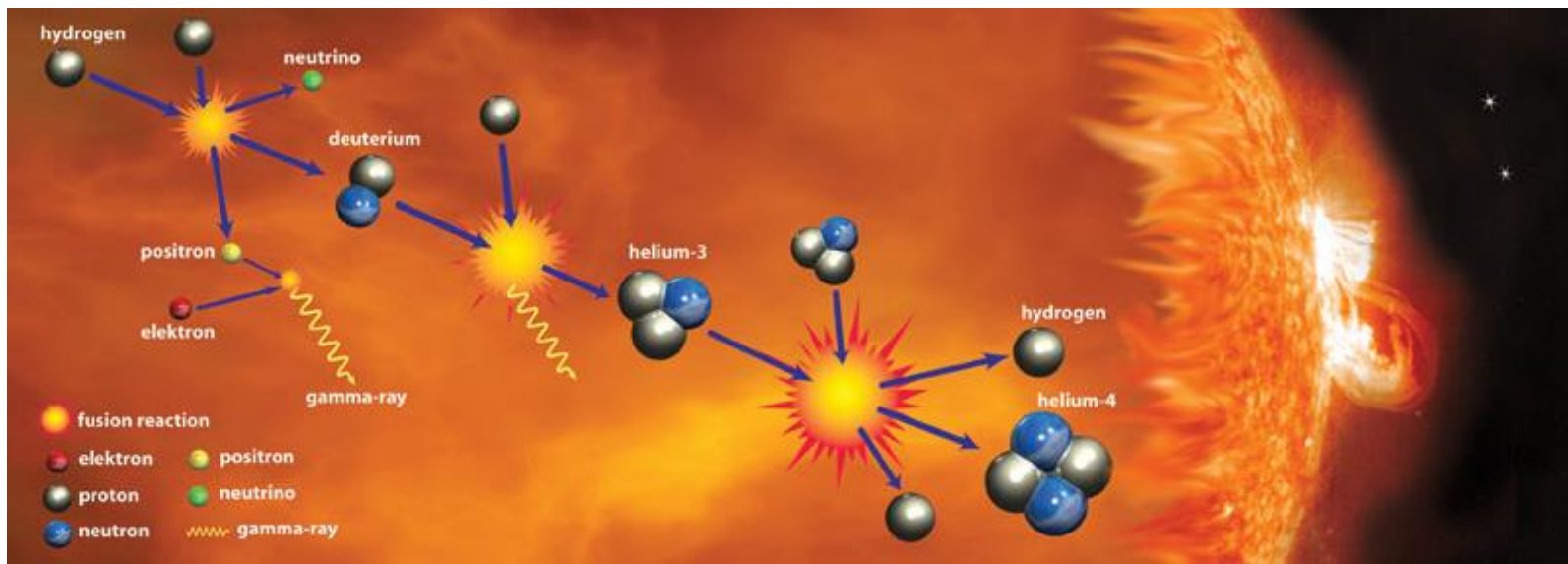
M_1, M_2 = masse gravitazionali in kg;

d = distanza fra i corpi in m.

Il processo di fusione nel sole

Il sole produce continuamente energia con una potenza di $3.7 \cdot 10^{17}$ **GW** e quindi converte al secondo 600 milioni di tonnellate di **Idrogeno (H)** → in 596 milioni di tonnellate di **Elio (He)**.

Il flusso di ***potenza che arriva sulla terra***, valutato al di sotto della atmosfera, senza assorbimento, è di **1.4 kW/m²**.



Il processo di fusione nel sole

L'**Idrogeno** viene convertito in **Elio** secondo la reazione di fusione nucleare attraverso **3 fasi**:

1) 2 atomi di **Idrogeno** si fondono generando \rightarrow 1 atomo di **Deuterio** e liberando un **Positrone**, un **Neutrino** ed **Energia** (raggi gamma).



2) l'atomo di **Deuterio** appena formatosi si combina con un nuovo atomo di **Idrogeno** generando un atomo di **Elio-3** (isotopo dell'elio) e **Energia** sotto forma di **raggio gamma** “ γ ”.

3) formazione dell'**Elio-4**, ossia **particelle α** che costituiscono una forma di radiazione corpuscolare ad alto potere ionizzante.

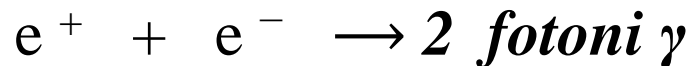
Quando la densità aumenta per le forze gravitazionali, provoca un forte incremento della temperatura del nucleo.

Il processo andrà avanti fino a quando il nucleo ha temperature tali da innescare le reazioni di fusione termonucleare.

Il processo di fusione nel sole

Il **Protone** è una particella subatomica composta dotata di carica elettrica positiva, costituisce il nucleo assieme al neutrone

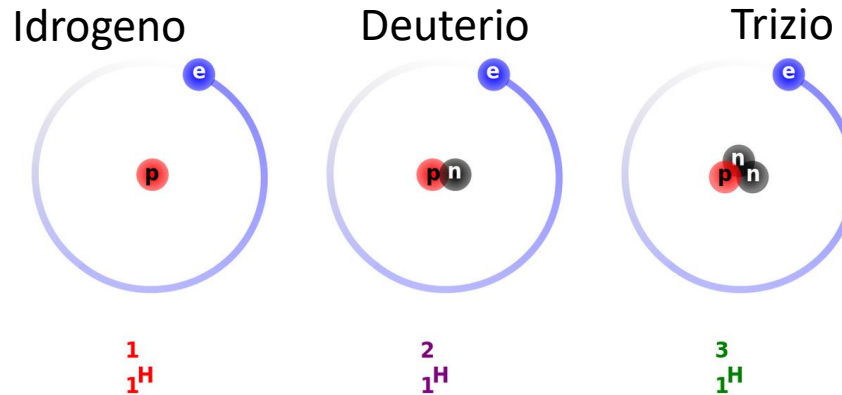
Il **Positrone** e^+ presenta una carica positiva uguale in valore assoluto a quella dell'elettrone, il suo simbolo fisico è “ e^+ ”. Quando un positrone viene in contatto con un elettrone si ha un processo di **annichilazione** e la loro massa viene convertita in **energia**, nella maggior parte dei casi sotto forma di due fotoni ad altissima energia nella **banda dei raggi gamma**, secondo il seguente processo:



Un **Neutrino** ν è una particella di cui si conosce poco, esso è neutro e circa 100000 volte più piccolo dell'elettrone, si muove a velocità relativistiche prossime a quelle della luce.

Isotopi dell'idrogeno

Gli isotopi di un elemento hanno lo **stesso** numero atomico **Z**, e quindi uguale numero di protoni (e quindi elettroni), ma un **diverso** numero di massa **A** (numero di neutroni differente)



Il Deuterio (D) e il **Trizio (T)**, detto anche **idrogeno-3** sono isotopi dell'idrogeno: L'**Idrogeno** ha un nucleo composto da **un solo protone**

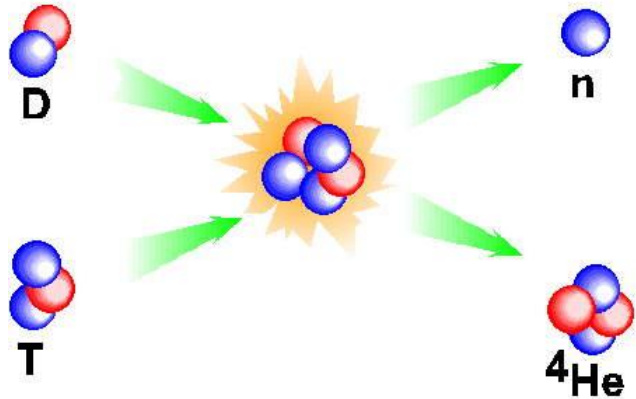
Il **Deuterio** ha un nucleo è composto **da un protone e un neutrone**.

Esso costituisce lo 0.01% dell'idrogeno presente in natura ed è quindi *abbondante in qualsiasi materiale contenente idrogeno*, come l'acqua: un litro d'acqua contiene circa 120 mg di Deuterio, nell'acqua di mare 30 g /m³.

il **Trizio** ha un nucleo è composto da **un protone e due neutroni**.

isotopo radioattivo dell'Idrogeno. Esso è praticamente inesistente in natura perché è un elemento instabile e decade spontaneamente (in 12,32 anni).

La Fusione nucleare in laboratorio



La massa atomica del Deuterio è $3.3432 \cdot 10^{-24}$ g;
 la massa atomica del Trizio è $5.0066 \cdot 10^{-24}$ g;

Nel bilancio di massa *restano*:

- un neutrone, la cui massa è $1.6749 \cdot 10^{-24}$ g
 - un atomo di Elio-4, la cui massa è $6.6443 \cdot 10^{-24}$ g
- Mancano* $0.0306 \cdot 10^{-24}$ g di materia, che secondo il principio di Einstein sono diventati $2.74 \cdot 10^{-12}$ J di energia

$$2.74 \cdot 10^{-12} \text{ J}$$

$0.54 \cdot 10^{-12}$ J (20%)
 energia cinetica
 della particella α

$2,2 \cdot 10^{-12}$ J (80%)
 energia cinetica
 del neutrone

Per le reazioni nucleari è conveniente usare una unità di misura dell'energia più consona, **l'elettronvolt (eV)**: è l'energia acquisita da un elettrone ($q = 1.6021 \cdot 10^{-19}$ C) accelerato dalla differenza di potenziale di 1 V. **$1 \text{ eV} = 1.6021 \cdot 10^{-19}$ Joule.**

$$2.74 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 17.6 \text{ MeV}$$

Le energie prodotte da ciascuna reazione di fusione sono milioni di volte maggiori di una reazione chimica

La Fusione in laboratorio

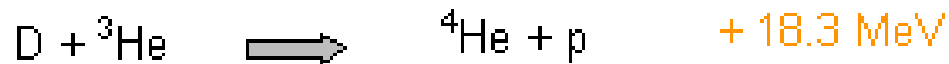
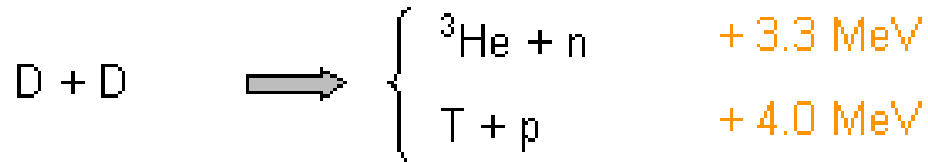


Trizio (${}^3\text{H}$) A differenza degli isotopi più leggeri (protio e deuterio), il *trizio* è *radioattivo*. La *radiazione beta β* a bassa energia emessa dal decadimento del trizio non può penetrare la pelle umana e quindi il trizio è dannoso solo se ingerito od inalato. Il tempo di decadimento di 12,3 anni.

Elio (${}^4\text{He}$)

L'isotopo *elio-4* prodotto dai processi di fusione è un isotopo dell'elio leggero e non radiativo. È l'isotopo dell'elio più abbondante, costituendo il 99,99986% di tutto l'elio sulla terra. *Se inalato in concentrazioni elevate può portare all'asfissia, esso inoltre, se non è contenuto, evapora istantaneamente provocando ustioni.*

La Fusione nucleare in laboratorio



.....

La reazione D-T è la più vantaggiosa *100 mg di miscela Deuterio-Tritio* producono una quantità di energia equivalente a quella producibile con una *1 tonnellata di carbone*.

Il Deuterio o *idrogeno pesante*, è abbondante nell' acqua di mare (30 g /m³)

Il trizio si ottiene dal litio all'interno della stessa reazione di fusione. Il litio è trasformato in *Trizio* ed *Elio* utilizzando l'energia contenuta nei *neutroni* generati dalla stessa reazione.



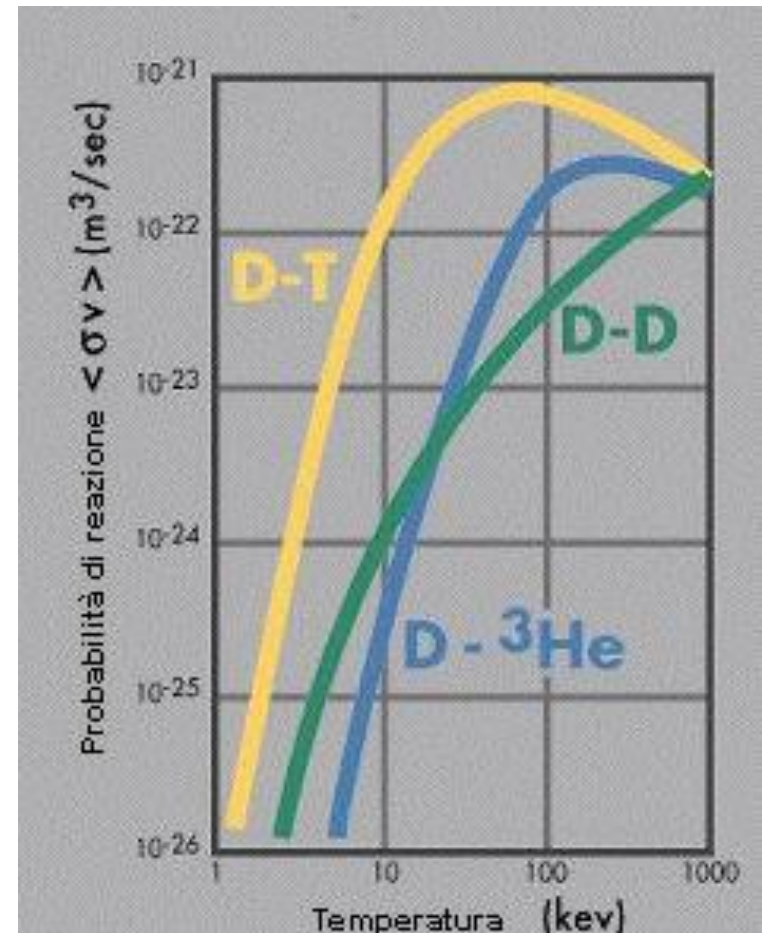
Il *Litio* è presente in quantità elevata e si estrae prevalentemente dai laghi salati, ma anche da rocce ignee (rocce formate dal raffreddamento e dalla cristallizzazione di un magma fuso).

La Fusione in laboratorio

Probabilità di reazione

Sulla base di dati empirici, è stata definita sperimentalmente la probabilità di reazione in funzione della temperatura. Tale probabilità è quantificata da una grandezza chiamata *sezione efficace* « σv ».

Per le diverse possibili reazioni di fusione indicate nei grafici, se si moltiplica il valore della probabilità di reazione per le densità dei nuclei interagenti [N° nuclei interagenti/ m^3], si ottiene il numero di reazioni di fusione per unità di tempo e unità di volume, per una temperatura data.



Fattore di guadagno della fusione

Il mio sistema produce più energia di quella che devo immettere per mantenere attiva la reazione?

$$Q = \frac{\text{potenza prodotta dalla reazione di fusione}}{\text{potenza immessa dall'esterno}} = \frac{P_f}{P_H}$$

Il fattore di guadagno Q della fusione è definito come il rapporto fra la potenza nucleare P_f prodotta in un reattore nucleare a fusione e la potenza di riscaldamento P_H spesa (immessa dall'esterno) per mantenere il plasma in equilibrio in uno stato stazionario.

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

Per produrre energia elettrica in modo continuo si deve andare a **$Q > 1$** . Bisogna compensare gli inevitabili e irreversibili processi di perdita di potenza per conduzione, convezione, emissione di radiazione (Bremsstrahlung) che si hanno nel plasma.

Prodotto triplo della fusione

Poiché le reazioni di fusione si basano sostanzialmente sulla collisione di atomi di deuterio e trizio, è intuibile che la probabilità che si inneschi la reazione dipenda da tre i fattori primari:

La **densità ionica del plasma** n , che deve essere al di sopra di un certo numero di particelle per volume per assicurare una ragionevole possibilità di collisione tra i nuclei.

la temperatura T del plasma, dalla quale dipende la velocità con cui i singoli nuclei si muovono. Più veloce è il loro movimento, maggiore è la possibilità che i nuclei si avvicinino abbastanza da fondere prima che la repulsione elettrostatica possa allontanarli.

Il **tempo di confinamento** τ_E è il tempo impiegato dal plasma per disperdere all'energia prodotta dalla reazione di fusione all'esterno per conduzione, convezione, emissione di radiazione. Questo è il tempo entro il quale devono avvenire le reazioni.



Temperature



Density



Confinement Time

questo può essere espresso in modo sintetico in termini del cosiddetto prodotto triplo

$$n\tau_E T \geq f(T)$$

Criterio di Lawson e fattore di guadagno

Le condizioni da raggiungere in un plasma di D-T affinché le coppie di nuclei si fondano in un numero sufficiente perché l'energia prodotta dalla fusione liberata dalle reazioni di fusione compensi sia le perdite che l'energia immessa nel sistema è dato dal criterio di Lawson:

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

La condizione 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 $Q = \infty$, è detta condizione di **ignizione** e si verifica se:

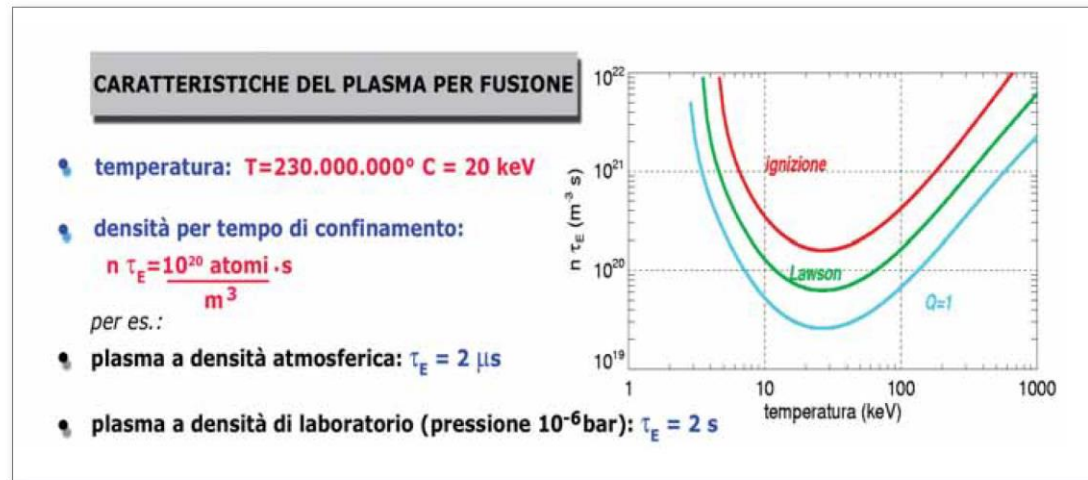
$$n\tau_E T \geq 3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$$

$$Q = \begin{cases} 1 & \text{Breakeven} \\ 3 & \text{Criterio di Lawson} \\ \infty & \text{Ignizione} \end{cases}$$

$10 \leq Q \leq 100$
Il plasma è un amplificatore controllato di potenza

Criterio di Lawson e fattore di guadagno

la funzione $n\tau_E=f(T)$ presenta un minimo per cui si ottiene il grafico riportato a lato che mostra le regioni, nel piano $(n\tau_E, T)$, corrispondenti alle condizioni di: **breakeven**, **Lawson**, **ignizione**



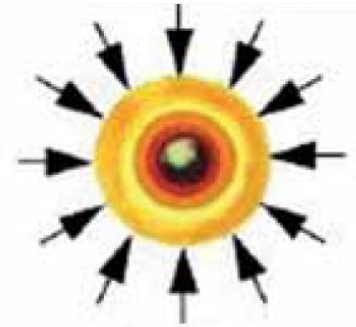
Per raggiungere i criteri necessari a un reattore, si può operare in due modi differenti, rimanendo a temperature T “relativamente basse”:

- ❑ macchine a **confinamento magnetico**: basse densità n ($\approx 10^{20} \text{ m}^{-3}$) e tempi di confinamento τ_E alti (≈ 1 secondo), volume plasma $\approx 1000 \text{ m}^3$
- ❑ macchine a **confinamento inerziale** alte densità n ($\approx 10^{31} \text{ m}^{-3}$) e tempi di confinamento τ_E piccoli ($\approx 10^{-10}$ secondi), volume plasma $\approx 10^{-12} \text{ m}^3$

Confinamento inerziale

Per il confinamento Inerziale si usano piccole sferette cave di materiale plastico, con diametro di circa 2 mm, dentro la quale stanno meno di 0.1 mg di miscela di D-T gassosa.

La sferetta è sparata dentro la camera di scarica in alto vuoto. Più fasci di un Laser di grande potenza colpiscono la sferetta da più direzioni. Il D-T, spinto verso il centro geometrico della sferetta, raggiunge densità elevatissime n.

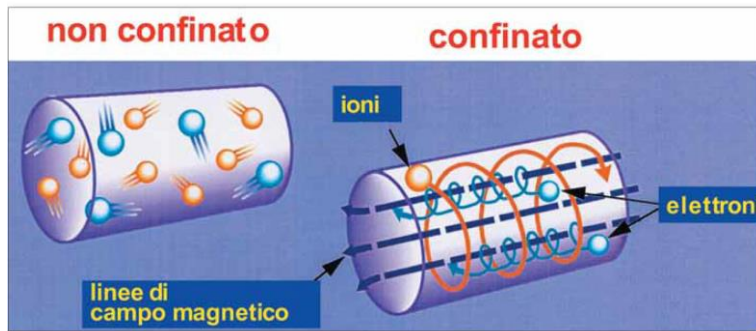


Il tempo che il materiale impiega per attraversare il raggio della sfera (tempo di confinamento) è sufficiente perché il prodotto $n\tau_E$ soddisfi la prima condizione del criterio di Lawson; la compressione sviluppa una temperatura che si soddisfa la seconda condizione di Lawson

In un reattore a fusione inerziale sarebbe in qualche modo simile a un motore a scoppio, infatti si dovrebbero iniettare e bruciare nella camera a vuoto sferette di D-T una dopo l'altra ad elevatissima frequenza.

Campi elettromagnetici e plasma

Il plasma, essendo costituito da ioni ed elettroni, è sensibile all'azione dei campi elettrici e magnetici esterni, per cui particolari configurazioni di campi magnetici possono essere usate *per mantenerlo confinato in una zona limitata dello spazio*.



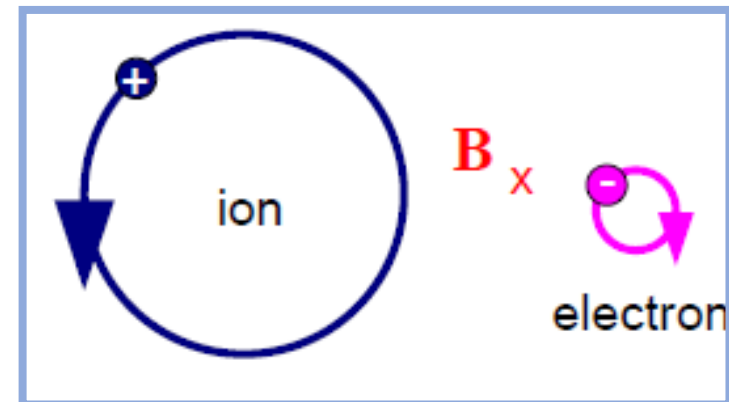
La forza impressa dal campo magnetico esterno, $\vec{F}_m = q \vec{u} \times \vec{B}$, impone alla particella carica (ione e elettrone) un movimento, senza aumentarne la velocità.

L'equilibrio fra forza magnetica e quella centrifuga determina una traiettoria elicoidale di raggio r in direzione parallela alla linea di campo





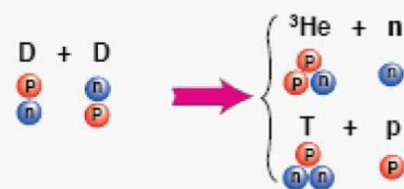


$$q u B \sin \alpha = \frac{m \cdot u^2}{r}$$

I raggi di rotazione sono diversi per gli ioni e gli elettroni perché diversa è la loro massa

$$m_i > m_e \rightarrow r_{oi} > r_{oe}$$



Fusione termonucleare controllata

Reazione		Ignizione		Energia prodotta	
Combustibile	Prodotti	Milioni di °C	keV		keV
$D + T$ 	${}^4\text{He} + n$	220	20		17600
$D + {}^3\text{He}$ 	${}^4\text{He} + p$	350	30		18300
$D + D$ 	${}^3\text{He} + n$	400	35		3300
	$T + p$	400	35		4000

la reazione D-T è quella energeticamente più conveniente. *le temperatura di ignizione* della reazione D-T è *sensibilmente più bassa* rispetto a quella richiesta per le altre reazioni di fusione possibili e quindi è minore anche la *pressione da contrastare per contenere il plasma*. Pressioni più basse, a parità di densità di potenza, richiedono campi magnetici di intensità inferiore.

La reazione D+D con produzione di He^3 è quella più indicata per i reattori perché ha il vantaggio, rispetto alla reazione D-T, di produrre neutroni con energie più basse, e quindi più facili da assorbire e schermare in un ipotetico reattore. Tuttavia ha una probabilità molto più bassa di verificarsi, e quindi richiede densità e temperature ancora più alte della reazione D-T.

Fusione termonucleare controllata



I nuclei di Elio, prodotti dalla fusione ${}^4\text{He}$, hanno energia più bassa e urtando gli ioni del plasma si caricano positivamente (particelle α) e rimangono confinati all'interno del plasma. *La loro energia contribuisce ad aumentare l'energia del plasma.*

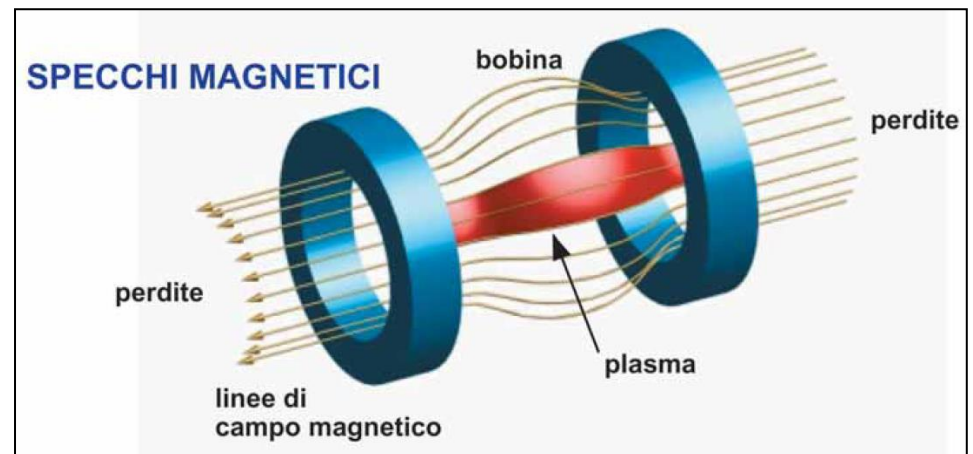
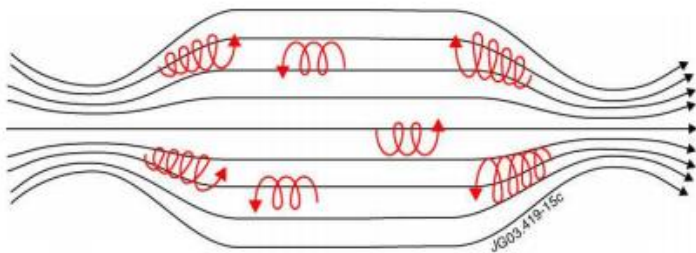
Quasi l'80% dell'energia prodotta è ottenuta dai neutroni, che non sono elettricamente carichi e perciò non subiscono gli effetti del campo magnetico di confinamento. *I neutroni abbandonano rapidamente il plasma e vengono assorbiti dalla parete del reattore.* L'energia dei neutroni viene convertita in calore. Questo calore sarà usato per la produzione di vapore che entra in un ciclo di turbina e alternatore, per produrre elettricità.

Il principale svantaggio della reazione D-T è legato alla necessità di ottenere il Trizio, elemento non presente in natura e radioattivo, per cui sono richieste *soluzioni progettuali particolarmente sofisticate per preservare l'integrità delle strutture di contenimento.* Inoltre considerato l'effetto del flusso neutronico c'è la necessità di utilizzare tecniche remottizzate per l'intervento all'interno del reattore

Confinamento magnetico del plasma

Con una *camera di contenimento cilindrica* è difficile preservare lo stato di plasma. Le particelle che compongono il plasma non vengono disperse radialmente, ma vanno comunque a sbattere sulle le due estremità del contenitore, perdendo così la loro energia con conseguente raffreddamento e decadimento della ionizzazione del plasma.

Per ovviare a tale problema, in principio si è creato un effetto, chiamato a *specchio magnetico*, nel quale tramite un collo di bottiglia ottenuto intensificando il campo alle estremità del contenitore, si ottiene un rimbalzo delle particelle. Ma *i risultati ottenuti in non sono soddisfacenti per le applicazioni energetiche*, il plasma si neutralizza in tempi molto rapidi.



Confinamento magnetico del plasma

Il campo magnetico limita il numero di gradi di libertà del moto delle particelle ad un solo grado nella direzione delle linee di forza del campo. Per due tipo di confinamento sono stati sviluppati diversi modelli di macchine sperimentali

1) Confinamento in geometria cilindrica

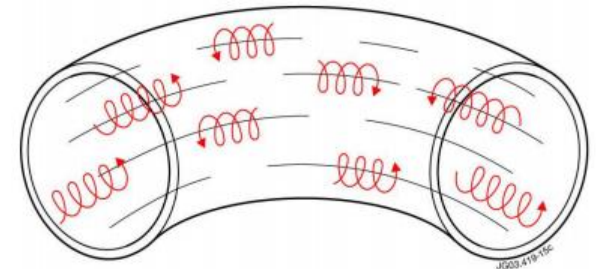
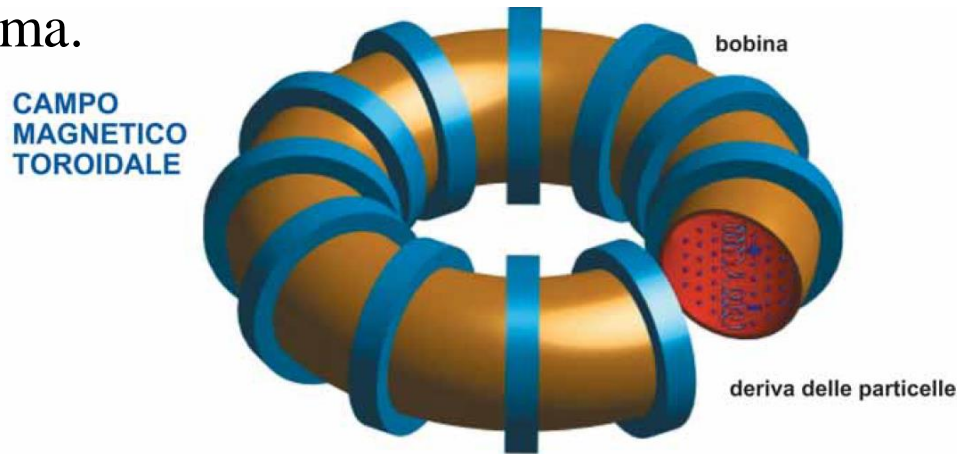
- ❖ Z-Pinch lineari
- ❖ Theta-Pinch lineari
- ❖ Specchi Magnetici

1) Confinamento toroidale, ottenuto chiudendo su se stesse le linee di campo. Esistono diverse configurazioni

- ❖ Stellarator
- ❖ Tokamak
- ❖ Reversed Field Pinch

Confinamento magnetico del plasma

Per ovviare agli inconvenienti presenti alle estremità del contenitore cilindrico si è pensato di *richiudere il contenitore su se stesso*, utilizzando *contenitori toroidali*, e creando il campo magnetico mediante solenoidi disposti concentricamente alla camera, a diverse angolazioni toroidali, ed egualmente inter-spaziati. In questo modo sono state *eliminate le interfacce trasversali* e quindi il raffreddamento e decadimento della ionizzazione del plasma.

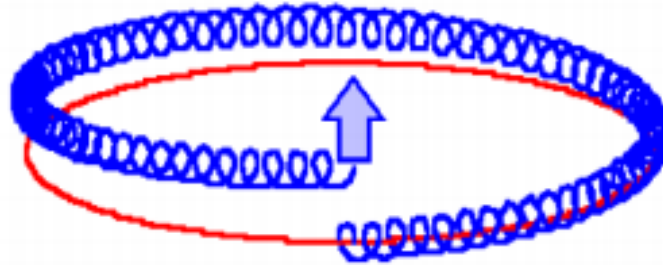


B è dell'ordine di alcuni Tesla

Purtroppo la curvatura delle linee di campo determina e un movimento di diffusione radiale, dovuto agli urti fra particelle, che le spinge contro le pareti.

Effetti del Campo Toroidale

La disomogeneità del campo magnetico toroidale, dovuta a diversi fattori tra cui la forma toroidale della macchina, produce inoltre sulle *particelle moti di deriva*, mentre queste si muovono descrivendo una spirale intorno alle linee di campo.



I moti di deriva a cui si assiste sono dovuti principalmente a:

- 1) alla *non uniformità del campo* magnetico toroidale che decade come $1/R$ all'allontanarsi dall'asse di simmetria del toro
- 2) alla *forza centrifuga* sulle particelle in movimento non lineare perchè all'interno di una struttura a forma toroidale con pressione variabile.

Il solo campo toroidale non può confinare il plasma. Per il confinamento è richiesto anche un *campo poloidale*.

Bilancio Energetico

Per un reattore a fusione in regime stazionario, le condizioni di funzionamento ottimale comportano che il plasma di fusione sia mantenuto a *temperatura costante* $\rightarrow T=cost.$

In tali condizioni la potenza termica persa P_p deve essere uguale alla somma delle potenze fornite, ossia:

- potenza termica fornita dall'esterno P_h
- la potenza fornita dalle particelle α , P_α (ossia dagli isotopi di elio-4 prodotti dalla fusione e che rimangono confinati nel plasma),

$$P_h + P_\alpha = P_p$$

Questa condizione che garantisce una temperatura del plasma costante $T=cost$, perché **non si verifichi un accumulo di energia termica** W_{acc} e conseguente aumento della temperatura, risulta verificata se si fornisce al sistema energia termica con la stessa velocità con la quale il plasma perde energia.

In termini di potenza, indicando con P_{acc} la potenza accumulata:

$$(P_h + P_\alpha) = P_{acc} + P_p \quad \text{se } T=cost \rightarrow P_L + P_\alpha = P_{heat}$$

Il tokamak

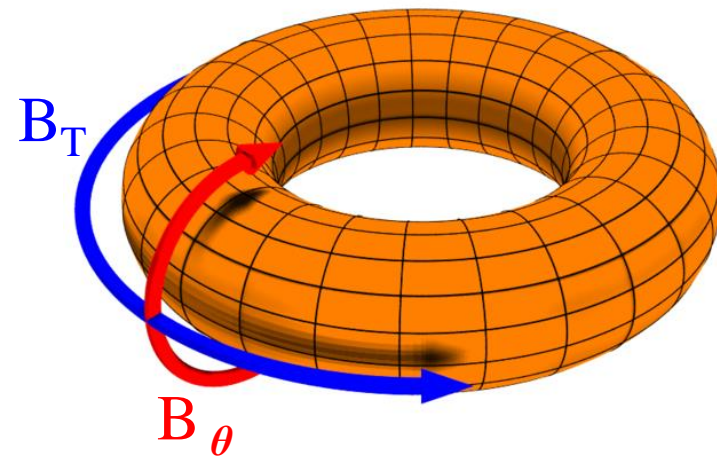
La soluzione al moto di deriva delle particelle dovuta alla curvatura delle linee di campo magnetico consiste nell'attorcigliare ad elica le linee di campo toroidale. Questo può essere fatto con la sovrapposizione di un campo magnetico poloidale, sostenuto da una corrente indotta nel plasma (I_{pla}) per effetto trasformatore. La forza elettromotrice indotta dalla variazione del flusso trasformatore innesca all'interno del plasma (conduttore) una circolazione di corrente che produce il campo magnetico poloidale:

Reazione tra corrente e campo poloidale: legge di Ampere

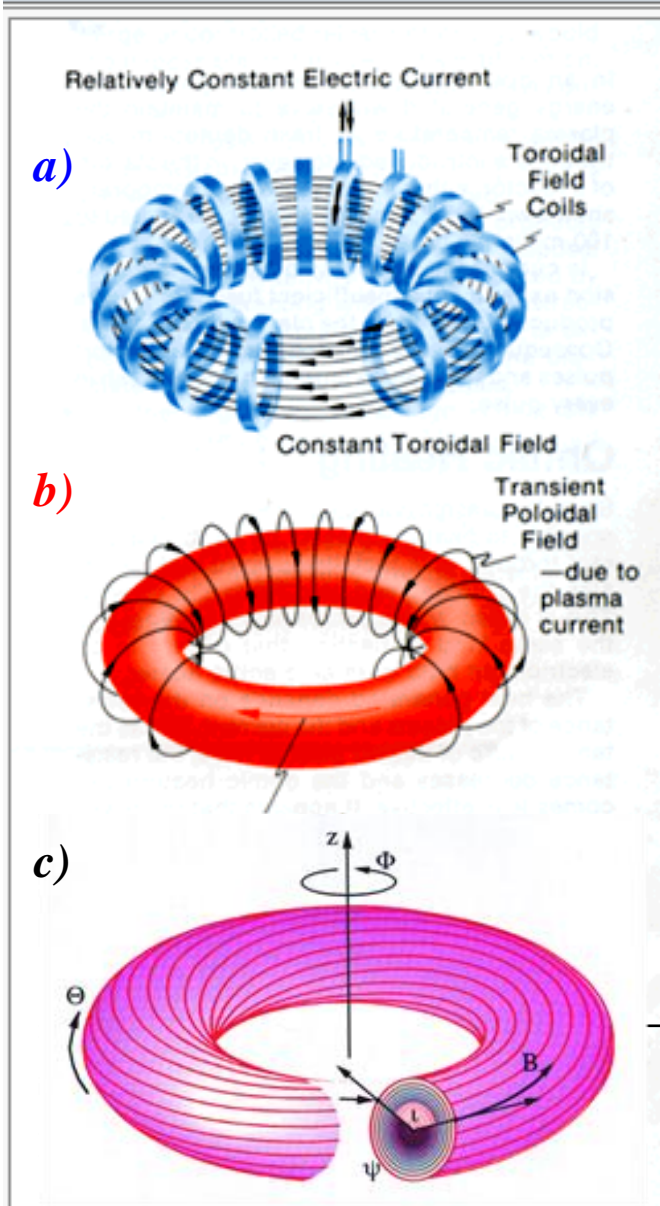
r =raggio minore della sezione toroidale del plasma

$$B_{\theta} = \mu_0 \frac{I_{pla}}{2\pi r}$$

La corrente di plasma viene sfruttata anche per riscaldare il gas iniettato nella fase di avviamento all'interno della macchina. Sebbene la resistività del plasma sia molto bassa, esse è comunque maggiore di zero e pertanto il passaggio di una corrente di elevata intensità nell'anello di plasma provoca un **riscaldamento per effetto Joule (riscaldamento ohmico)** che contribuisce a mantenere la temperatura del plasma ai valori necessari.



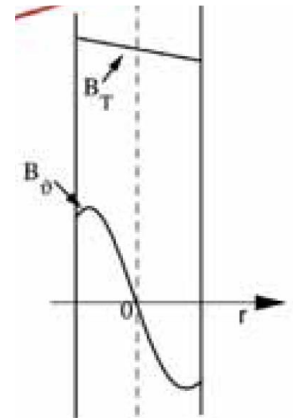
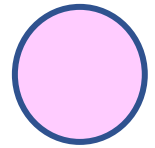
Confinamento nei Tokamak



a) *Campo magnetico principale o toroidale B_T generato da solenoidi toroidali egualmente inter-spaziati, da solo non consente il confinamento del plasma. Sono delle circonferenze concentriche all'asse principale del toro*

b) *Campo poloidale B_θ creato dall'anello di corrente di plasma. Sono delle circonferenze concentriche all'anello di plasma*

c) *Campo magnetico elicoidale risultante, che consente il confinamento del plasma, ha passo molto maggiore della lunghezza del toro .*

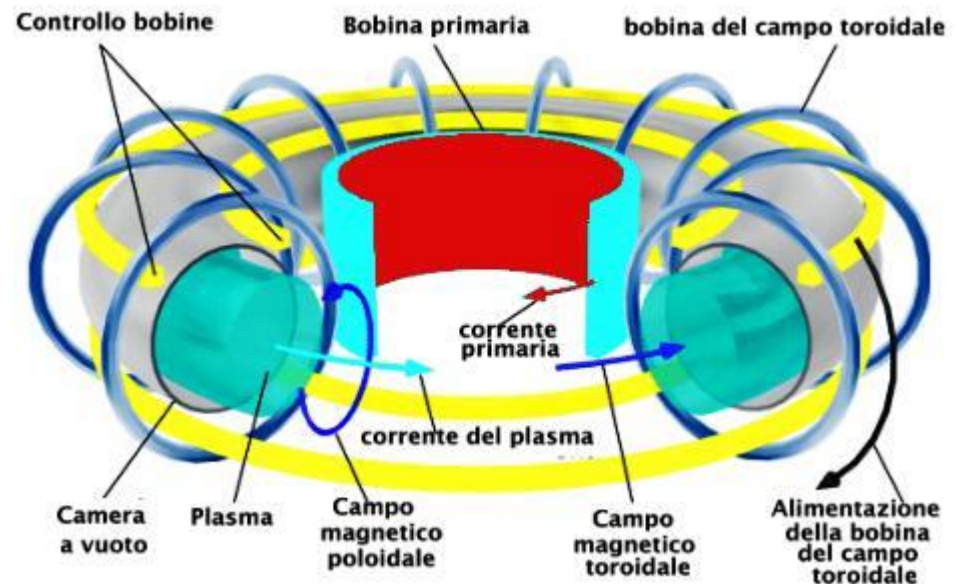


Confinamento nei Tokamak

La corrente nel plasma I_{pla} è indotta per mezzo strati di bobine orizzontali concentriche con l'asse principale del reattore (solenioide centrale) che rappresenta il primario del trasformatore. Questa bobina attraversata da una corrente variabile, ma unidirezionale I_{pol} genera, per induzione (legge di Faraday Neumanm), la corrente nel plasma proprio come in un trasformatore elettrico. Il *toro di plasma conduttore costituisce la bobina secondaria del trasformatore.*

Per avere l'induzione di corrente nel plasma il TOKAMAK deve funzionare ad impulsi, infatti la I_{pol} ha una durata piuttosto limitata, solitamente con andamento a rampa.

Il trasformatore deve indurre nel plasma **una corrente variabile pulsante unidirezionale**, in modo da non invertire la direzione della velocità del plasma creando instabilità



Confinamento nei Tokamak

Bobina toroidale



Magnete centrale



Principio di funzionamento del tokamak

L'accensione della corrente di plasma all'interno di un contenitore toroidale avviene in quattro tempi:

- I. - si immette corrente nelle bobine di campo toroidale che avvolgono il toro, creando il campo magnetico toroidale B_T ;
- II. - si immette la quantità di gas prevista nella camera di scarica; talvolta una sorgente ionizzante (per esempio il filamento di tungsteno di una lampadina senza bulbo di vetro) produce nel gas elettroni;
- III. - si immette corrente nel circuito primario del trasformatore, creando il flusso Φ nel nucleo;
- IV. - la corrente nel primario è fatta rapidamente calare, cosicché il flusso Φ nel nucleo diminuisce. Nell'anello toroidale, secondario del trasformatore, per effetto della variazione di flusso, si crea una forza elettromotrice E . Grazie ai pochi elettroni preesistenti o prodotti nel gas dalla sorgente ionizzante, si accende una scarica con elettroni via via più numerosi per effetto degli urti fra elettroni e atomi neutri e la corrente diventa via via più intensa. Tutto o gran parte del gas presente nella camera viene ionizzato creando il plasma.

La corrente elettrica indotta per effetto trasformatrice, riscalda il plasma stesso per effetto Joule.

Riscaldamento addizionale

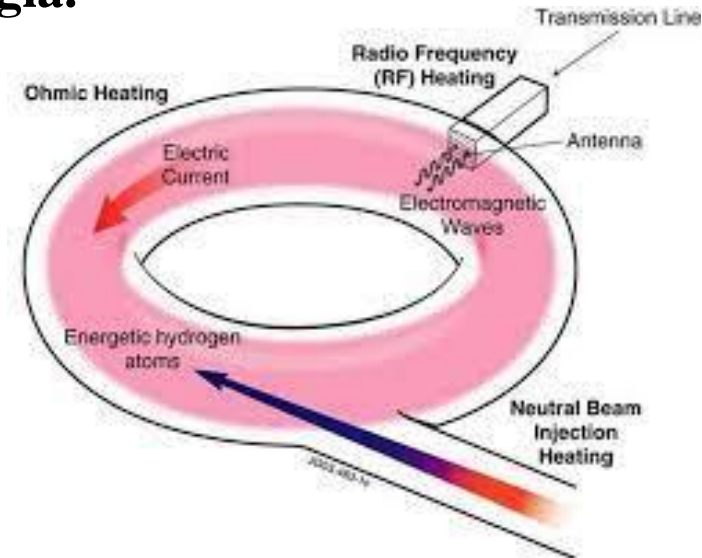
Per effetto della deriva, le particelle andranno ad impattare contro la prima parete della camera a vuoto (Vacuum Vessel) con una serie di conseguenze negative, tra le quali il raffreddamento del plasma. Inoltre, il riscaldamento della prima parete causa l'introduzione di impurità nel plasma, contribuendo al suo raffreddamento. Inoltre, all'aumentare della temperatura la potenza riscaldante di tipo ohmico diminuisce perchè diminuisce la resistenza del plasma stesso. Tutto questo ci fa capire che c'è la necessità di sistemi riscaldamento ausiliari.

I riscaldamenti ausiliari più impiegati sono di due tipi:

a- Riscaldamento a radioonde

b- Riscaldamento con fasci di neutri ad alta energia.

Le onde elettromagnetiche convogliate sul plasma dall'esterno, possono in condizioni adeguate, penetrare nel plasma e cedere ad esso la loro energia. Quindi tramite i campi elettromagnetici è possibile controllare la temperatura del plasma senza contatto tra la sorgente di energia termica e il plasma.



Riscaldamento addizionale elettromagnetico

All'interno del plasma si creano:

- ✓ campi elettrici oscillanti dovuti alla separazione delle cariche
- ✓ campi magnetici oscillanti causati da correnti elettriche oscillanti dovute alla circolazione di ioni ed elettroni

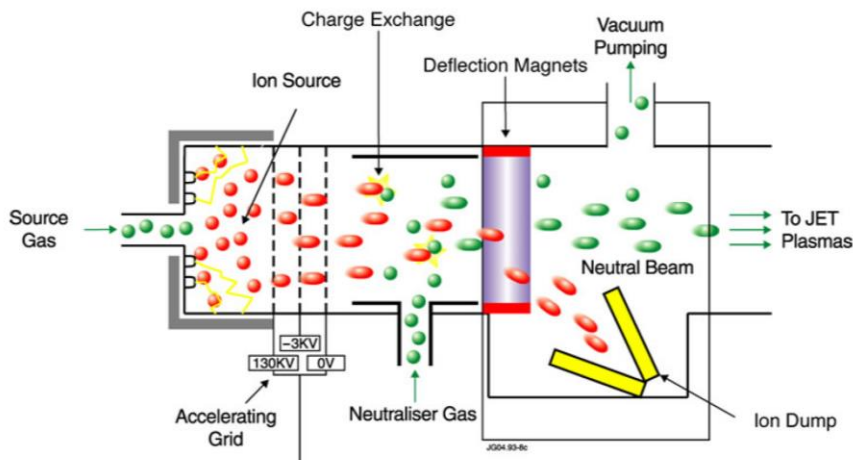
La combinazione di un campo elettrico e magnetico oscillanti genera un'onda elettromagnetica.

Attraverso le antenne si inviano nel plasma onde elettromagnetiche che, se hanno frequenza opportuna, vengono assorbite dal plasma perché tendono o ad esaltare (fenomeno della risonanza) i fenomeni oscillatori in esso già presenti o a provocare nuove possibili oscillazioni.

Tipi di riscaldamento elettromagnetico addizionale:

- risonanza ciclotronica elettronica (**ECRH**): decine di GHz ($f_{ce} = 2.8 \cdot 10^{10} \cdot B$). Sono stati recentemente realizzati con successo generatori gyrotron, e speciali guide d'onda
- risonanza ciclotronica ionica (**ICRH**): decine di MHz ($f_{ci} = 7.7 \cdot 10^6 \cdot B$, per ioni di deuterio) per potenze di decine MW

Riscaldamento addizionale con fasci di atomi neutri



Vengono iniettate delle particelle neutre che, essendo senza carica, sono insensibili ai campi magnetici ed elettrici e *procedono con traiettoria rettilinea fino a che non subiscono urti con gli ioni del plasma*. Nell'urto, gli atomi neutri cedono la loro energia riscaldando gli ioni del plasma, e perdono l'elettrone, diventando essi stessi ioni del plasma.

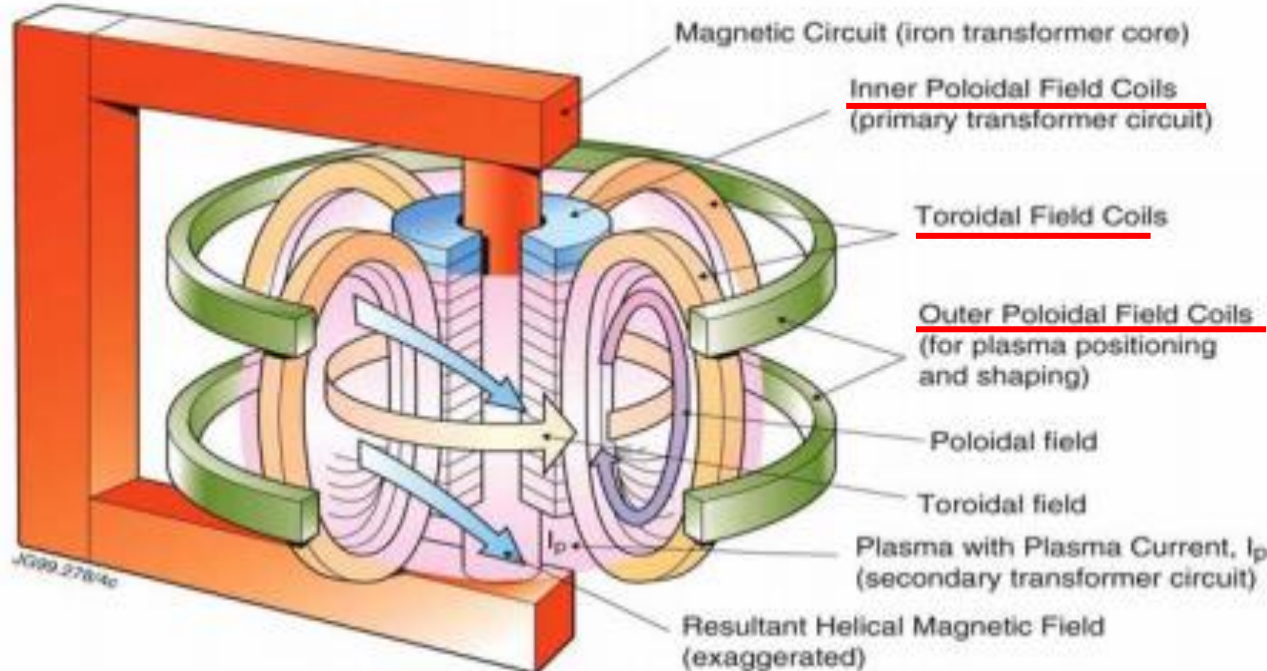
- I. Il fascio di ioni di Deuterio, D^+ , sono fortemente accelerati, tramite una tensione elevatissima (fino a 160 kV)
- II. Il fascio di ioni attraversa una camera, il "neutralizzatore", nella quale gli ioni *catturano un elettrone* in seguito ad un urto con le molecole D_2 , senza perdita di energia. Il 24% del fascio ionico entrato nel neutralizzatore esce neutro.
- III. Il 76% rimanente del fascio ionico, ancora carico, viene deviato e disperso (ion Dump)

Dal generatore di neutri di JET esce una "corrente" di 30 A di particelle accelerate a 160 kV, cioè di circa 5 MW di potenza.

Confinamento nei Tokamak

Oltre alle bobine del primario del trasformatore e alle bobine toroidali si hanno anche le *bobine poloidali esterne* che hanno lo scopo principale di generare un campo magnetico con una *componente verticale* (parallelo all'asse z del toro e normale al campo toroidale) che consente di controllare:

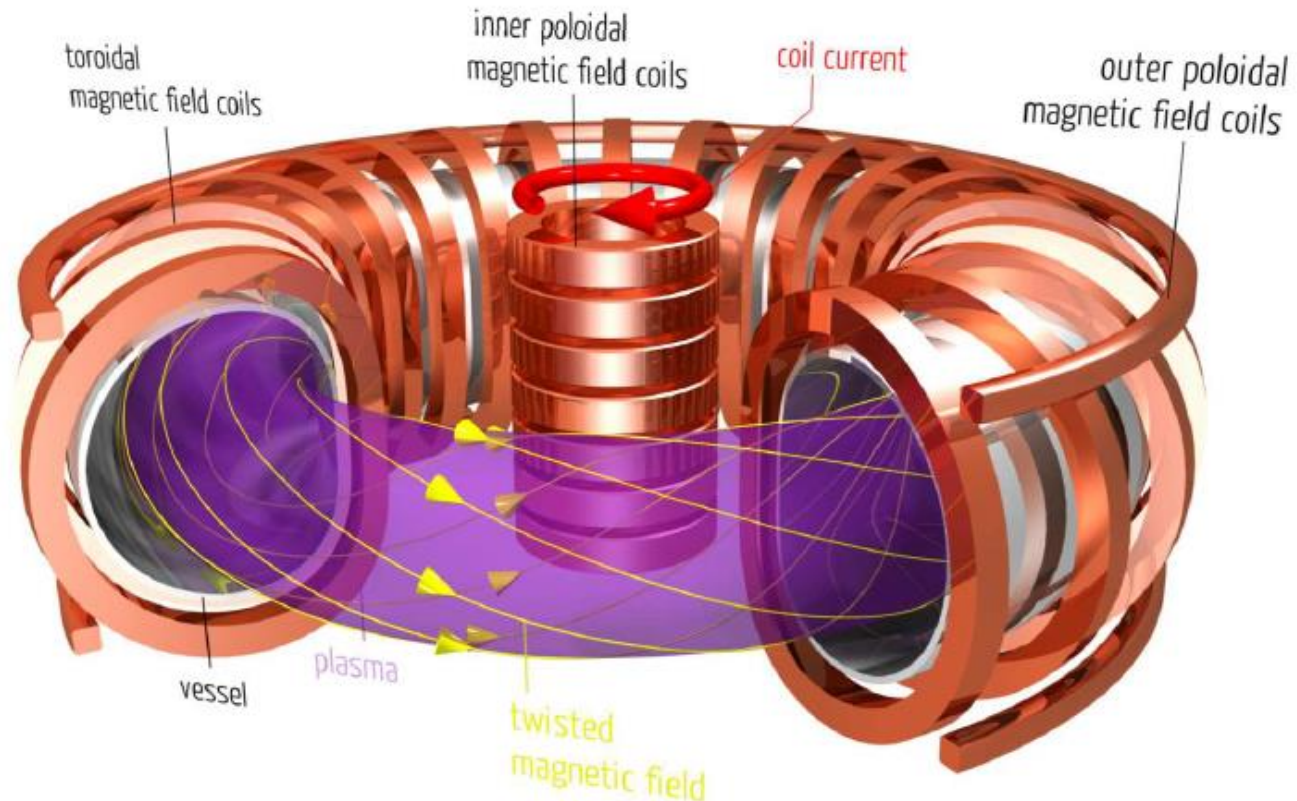
- *equilibrio*
- *forma*
- *posizione del plasma confinato, (questo compito è principalmente ottenuto attraverso i campi magnetici generati dalle bobine Poloidali esterne).*



Confinamento nei Tokamak

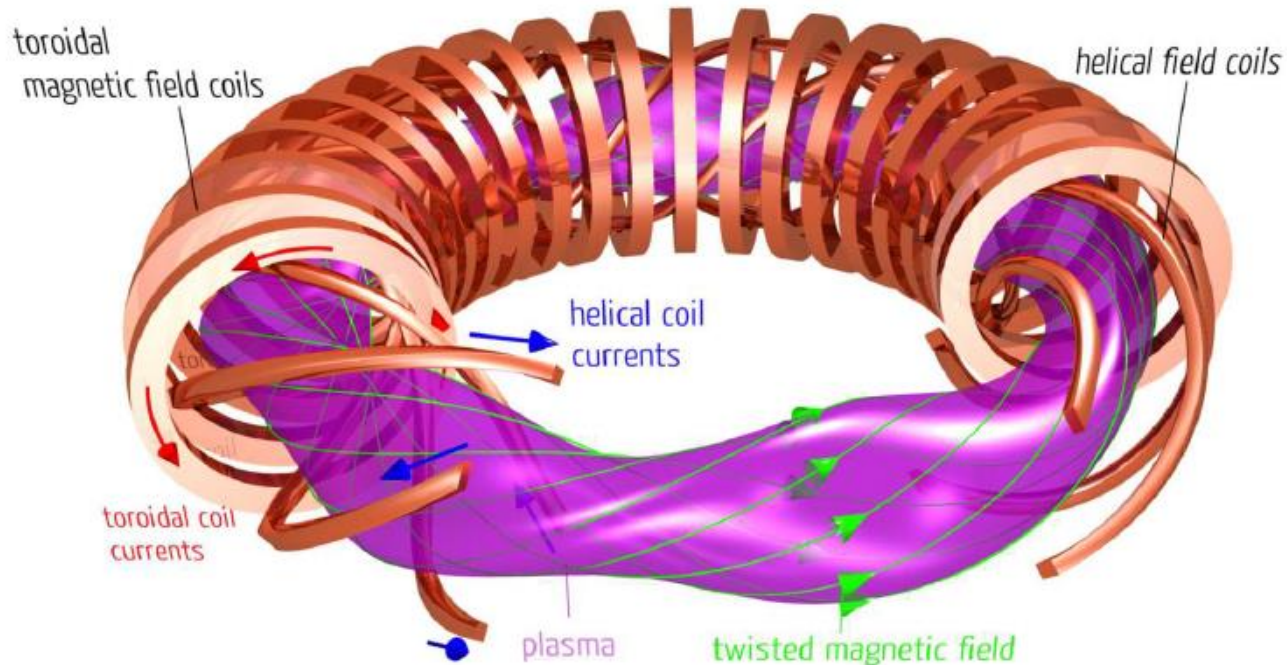
Il Tokamak è ad oggi la macchina per la fusione termonucleare controllata che ha permesso di raggiungere i più elevati valori di $n\tau_E$ e di temperatura ionica

Simmetria azimutale realizzata con bobine tutte uguali e uniformemente distribuite



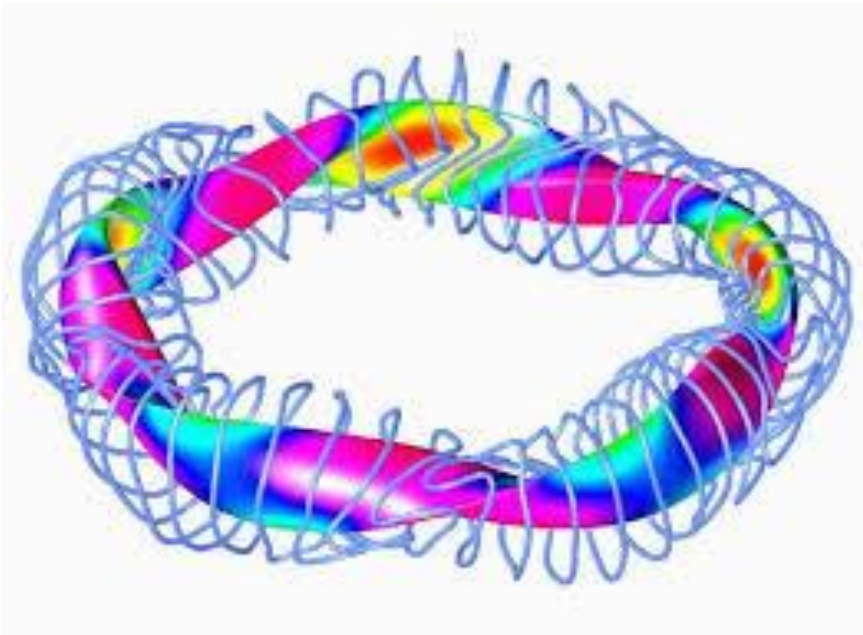
Confinamento negli Stellarator

In questa macchina a confinamento magnetico il campo viene interamente generato da generati da bobine esterne. Unitamente agli ordinari solenoidi toroidali sono presenti degli *avvolgimenti elicoidali lungo il toro*. Questi avvolgimenti addizionali generano un campo magnetico elicoidale nella camera toroidale, la cui direzione varia man mano che ci si sposta lungo il toro.



Confinamento negli Stellarator

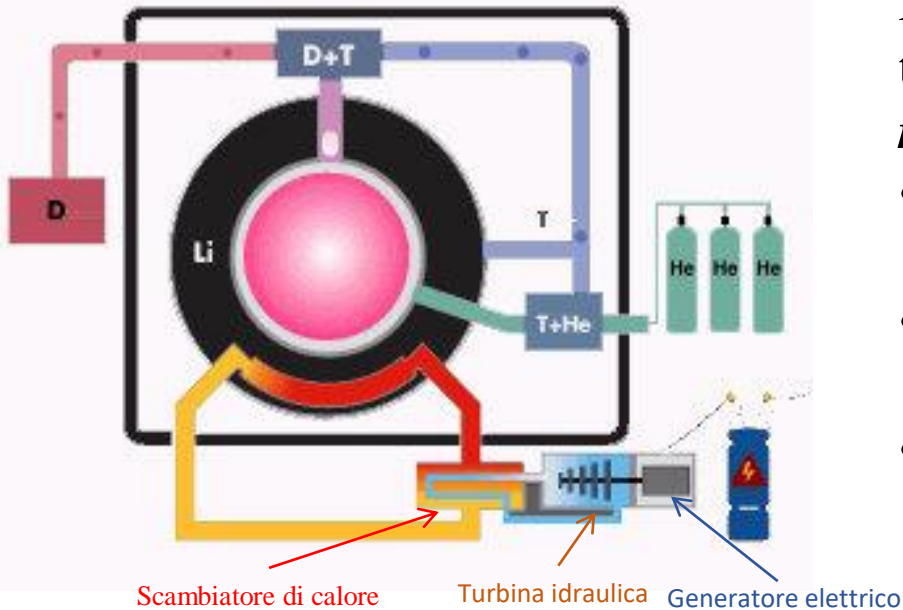
Il vantaggio dello stellarator è che non è richiesta alcuna corrente di plasma, necessaria invece nel Tokamak per rendere il campo elicoidale. Perciò *non necessita per il suo funzionamento di un trasformatore e può quindi funzionare a regime con continuità, senza richiedere un funzionamento pulsato* .



Simmetria azimutale discreta realizzata con moduli di bobine che si ripetono

Lo stellarator può essere realizzato con le sole bobine toroidale che prendono la forma del della colonna di plasma. *La geometria dei magneti toroidali* non viene realizzata con bobine tutte uguali, ma sono differenti a seconda della posizione che occupano lungo la periferia della macchina. In particolare, si hanno un certo numero di moduli, ognuno dei quali ha diversi magneti ognuno di forma differente dall'altro.

Reattore a fusione termonucleare



Nel futuro reattore a fusione termonucleare *la potenza liberata nella reazione* sarà proporzionale:

- alla *densità dei nuclei reagenti* n [N° nuclei interagenti/m³]
- alla *probabilità che ha la reazione di verificarsi* e
- alla *temperatura del plasma* T [K] o [°C].

Nel futuro reattore a fusione la reazione dovrà autosostenersi: si prevede che le *particelle alfa α* , intrappolate nel volume di plasma, cedano ad esso la loro energia tale da mantenerlo sufficientemente caldo, dopo *l'iniziale riscaldamento* ottenuto con mezzi esterni. I **nuclei di Elio**, infatti essendo più pesanti e sensibili al campo magnetico, rimangono intrappolati nel plasma e trasferiscono ad esso la loro energia, ottenendo così l'autosostentamento della reazione senza ulteriore riscaldamento dall'esterno.

Fusione termonucleare controllata

Parallelamente i *neutroni*, che non sono elettricamente carichi e quindi insensibili ai campi magnetici, abbandonano il plasma e si trasferiscono la loro energia al *Blanket* (mantello) *modulare del reattore* che riveste il Vacuum Vessel. I blanket contengono *Litio* così che il bombardamento neutronico attivi la da generazione di *Trizio* tramite la reazione $\text{Li}^4 + \text{n} = \text{He}^4 + \text{T} + \text{n}^* - 2.5 \text{ MeV}$, e contemporaneamente ceda energia termica utilizzabile per produrre energia elettrica (flusso termico stazionario $10\text{MW}/\text{m}^2$). Il mantello di litio deve essere sufficientemente spesso (circa 1 m) per assorbire i neutroni di fusione (con una energia di 14 MeV).

Infine l'energia assorbita dal mantello di Litio, attraverso uno scambiatore di calore, riscalda un fluido e l'energia termica trasmessa al fluido, sarà utilizzata per produrre energia elettrica con un sistema tradizionale *turbina idraulica–generatore elettrico*.

Vantaggi della fusione

- L'unico materiale radioattivo presente nel processo della fusione è dunque il *Trizio*. Il 90% delle scorie dovute al Trizio hanno una bassa radioattività che si esaurisce in 12,5 anni.

Gli impianti a fusione nucleare potrebbero ridurre notevolmente le quantità di materiale di stoccaggio di materiale radioattivo, che ha caratterizzato i processi attuali della fissione nucleare che produce scorie ad altissima radioattività che impiegano da 100 a 1000 anni per esaurirsi

- Le centrali a fusione producono *un gas di scarico non radioattivo* (Elio-4)
- *Non si producono gas ad effetto serra* che influisce sul riscaldamento globale.
- L'energia di fusione costituirebbe una fonte di *energia sostenibile su grande scala, indipendente dalle condizioni climatiche e consente un'erogazione continua* per tutto l'arco di tempo giornaliero

Vantaggi della fusione

Combustibile abbondante e disponibile ovunque == acqua

- Deuterio disponibile per milioni di anni (33 mg/l acqua)
- Litio (per produrre Trizio) disponibile per migliaia di anni

Vantaggi ambientali

- Nessun gas che produca effetto serra: CO, CO₂
- Nessun gas che produca piogge acide: SO₂, NO₂
- Solo radioattività a vita breve (T=12 anni, attivazione strutture)

Sicurezza (Resistente ad attacchi terroristici)

- Impossibile perdita di controllo della reazione
- Meno di 5' di combustibile presente nella camera di reazione
- Quantità combustibile sul sito non richiede evacuazione popolazione

Nessun di rischio di proliferazione

- Assenza di materiali fissili o fertili

Costi stimabili simili a quelli del Carbone o della Fissione

Svantaggi della fusione

- Ad oggi, i meccanismi della fusione *non sono ancora sufficientemente conosciuti* per una dimostrazione scientifica e tecnologica esaustiva della fusione come principio per la generazione di energia elettrica
- Il rapporto fra potenza generata e volume in cui viene generata questa potenza, è nettamente inferiore a quella della fissione nucleare e a quella dei combustibili fossili, quindi la fusione nucleare *richiede strutture più voluminose e costose*.
- Necessità di far lavorare l'impianto *alle temperature* richieste per ottenere un plasma che garantisca un funzionamento efficiente degli impianto ($T=150 \cdot 10^6$ C°).
- Come *vettore termico* (cioè come fluido che trasferisce l'energia da dove viene generata a dove viene trasformata in energia elettrica) non si può utilizzare acqua (come nelle centrali elettriche a combustibili fossili o nei reattori a fissione nucleare ad acqua - PWR e BWR), ma si devono usare *metalli liquidi o gas*.
- Dovranno essere *impossibili gli incidenti* che causino meltdown (danneggiamento del cuore del reattore per sovra-temperatura)

La sfida della fusione

La *sfida della ricerca attuale per la fusione nucleare* consiste nell'utilizzare le conoscenze *scientifiche e tecnologiche* per confinare e controllare il plasma al fine di poter usufruire di una fonte di energia affidabile, sicura, rispettosa dell'ambiente e producibile in grandissima quantità.

Uno dei limiti principale per l'applicazione dei Tokamak è legato alla **potenza dei campi magnetici che devono contenere il plasma, affinché esso non tocchi mai il contenitore toroidale (vessel).**

Quando si riuscirà a produrre **magneti sufficientemente potenti** i tokamak diventeranno reattori in grado di produrre enormi quantità di energia. *Per ottenere campi magnetici intensi occorre realizzare bobine che possano essere attraversate da correnti elevate e per questo motivo si cerca di realizzarle con i **superconduttori** che lavorano a temperature molto basse per ridurre la loro resistenza (**fisica della criogenia**) e le insostenibili perdite di potenza per effetto Joule*

Ricerca sulla fusione

- La **Comunità Europea dell'Energia Atomica (EURATOM)** è stata inizialmente istituita per coordinare i programmi di ricerca degli Stati Membri per l'uso pacifico dell'energia nucleare.
- Negli anni 70 l'**ENEA** realizza nei laboratori di Frascati il primo **Tokamak FT (Frascati Tokamak)** operativo dal 1977 e il **Tokamak FTU (Frascati Tokamak Upgrade)** operativo dal 1990.

http://www.enea.it/it/Ricerca_sviluppo/energia/nucleare/fusione-nucleare

- Nel 1978 inizia la realizzazione del **JET (Joint European Torus)** nei pressi di **Oxford**, il primo Tokamak costruito dalla Comunità Europea, che ottiene risultati incoraggianti.

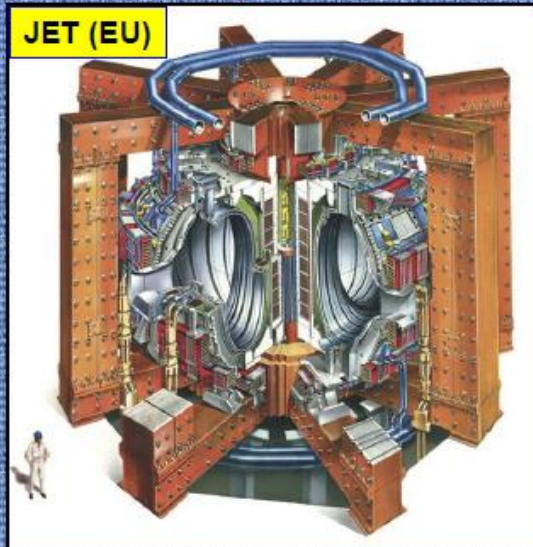
<http://www.ccf.ac.uk/JET.aspx>

In Italia le ricerche coordinate dall'ENEA sono svolte in collaborazione con:

- **CNR** (Istituto di Fisica del Plasma di Milano)
- **Consorzio RFX di Padova**
- **Consorzio CREATE** (Università di Cassino, Napoli e Reggio Calabria)
- **Università della Tuscia**
- **Politecnico di Torino**
- **Università di Cagliari**
- **l'Università di Catania**
- **Università di Roma Tor Vergata e La Sapienza.**

Il gruppo di ricerca ENEA e la sue terze parti, per volume di attività, secondo solamente a quello tedesco. Nella collaborazione europea riveste particolare rilevanza la gestione comune del grande esperimento di fusione JET (Joint European Torus-Regno Unito), la partecipazione ai programmi sperimenta nei TOKAMAK di media dimensione AUG, MAST e TCV e dello stellarator W7-X.

Joint European Torus (JET)



JET (EU)

JET è situato nel centro UKAEA di Culham (Oxfordshire, UK).
E' il tokamak più grande al mondo ed è l'unico, attualmente, che **può** operare con una miscela di D e T.

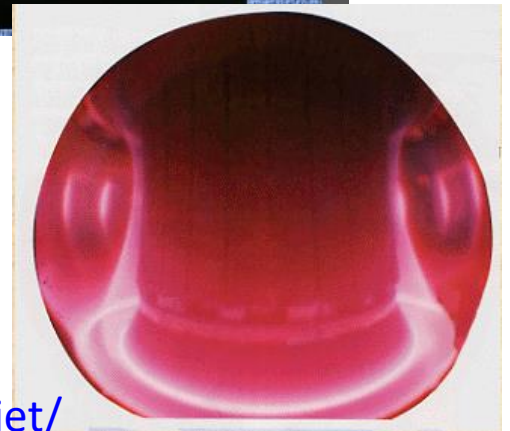
Nel 1997 le operazioni al JET includono esperimenti che, con plasma deuterio-tritio, raggiungono il record di 16 MW di potenza da fusione nucleare (**con $Q = 0.7$ circa**).

$$Q = \frac{\text{potenza prodotta dalla fusione}}{\text{potenza fornita dall'esterno}}$$

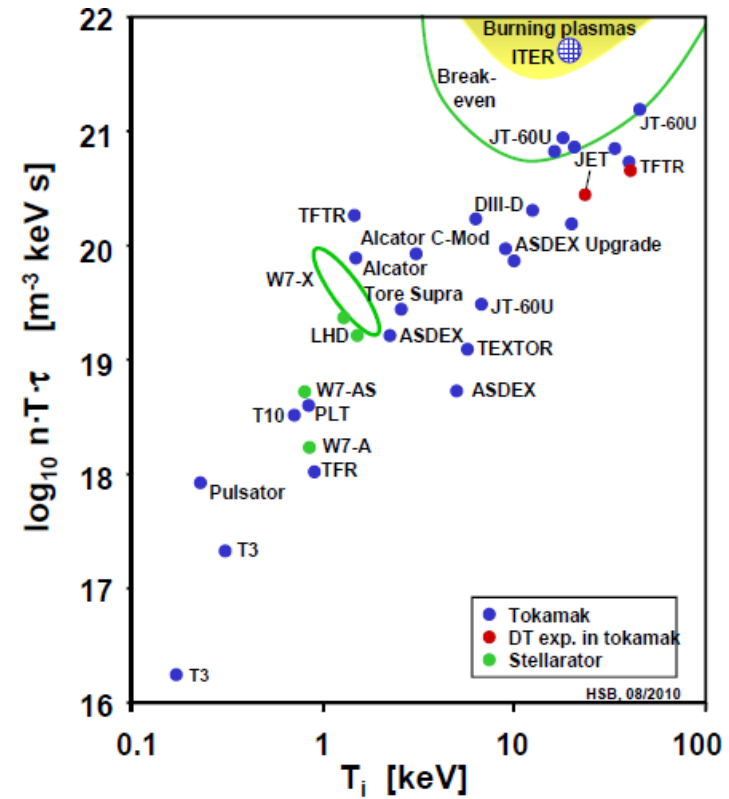
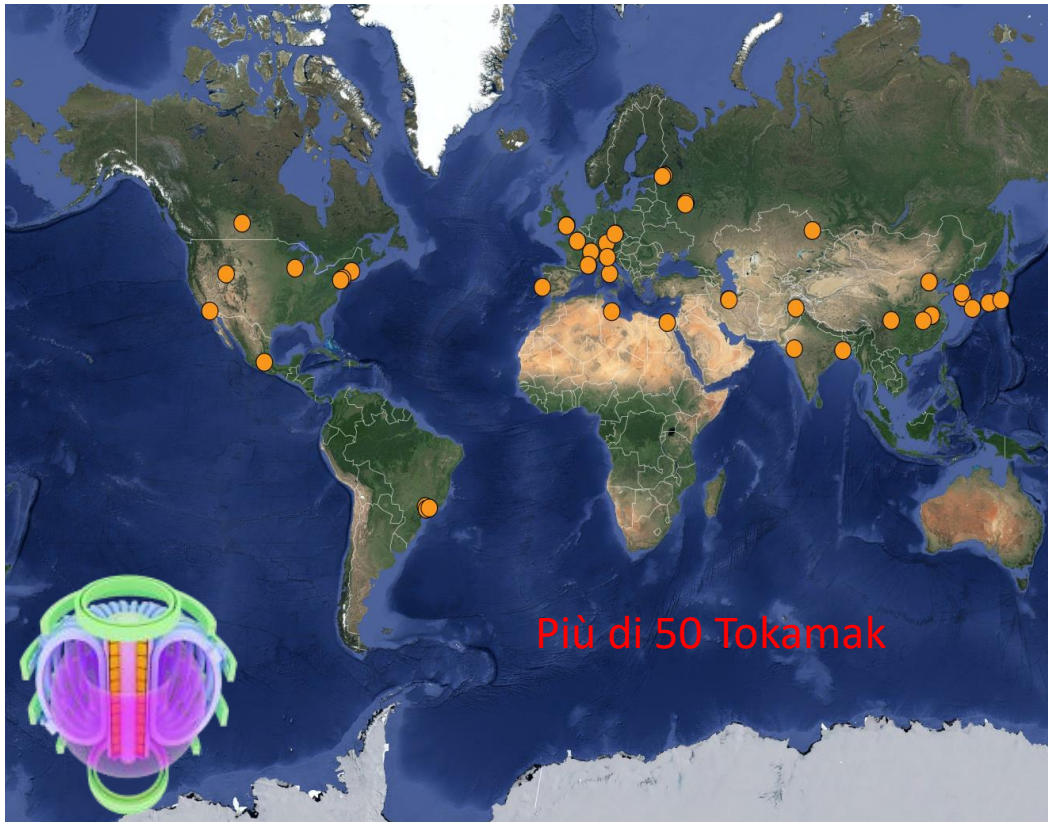
Edificio del JET, situato nel centro UKAEA di Culham, (Oxfordshire, UK)



Il volume del plasma nel JET raggiunge circa 150 metri cubi

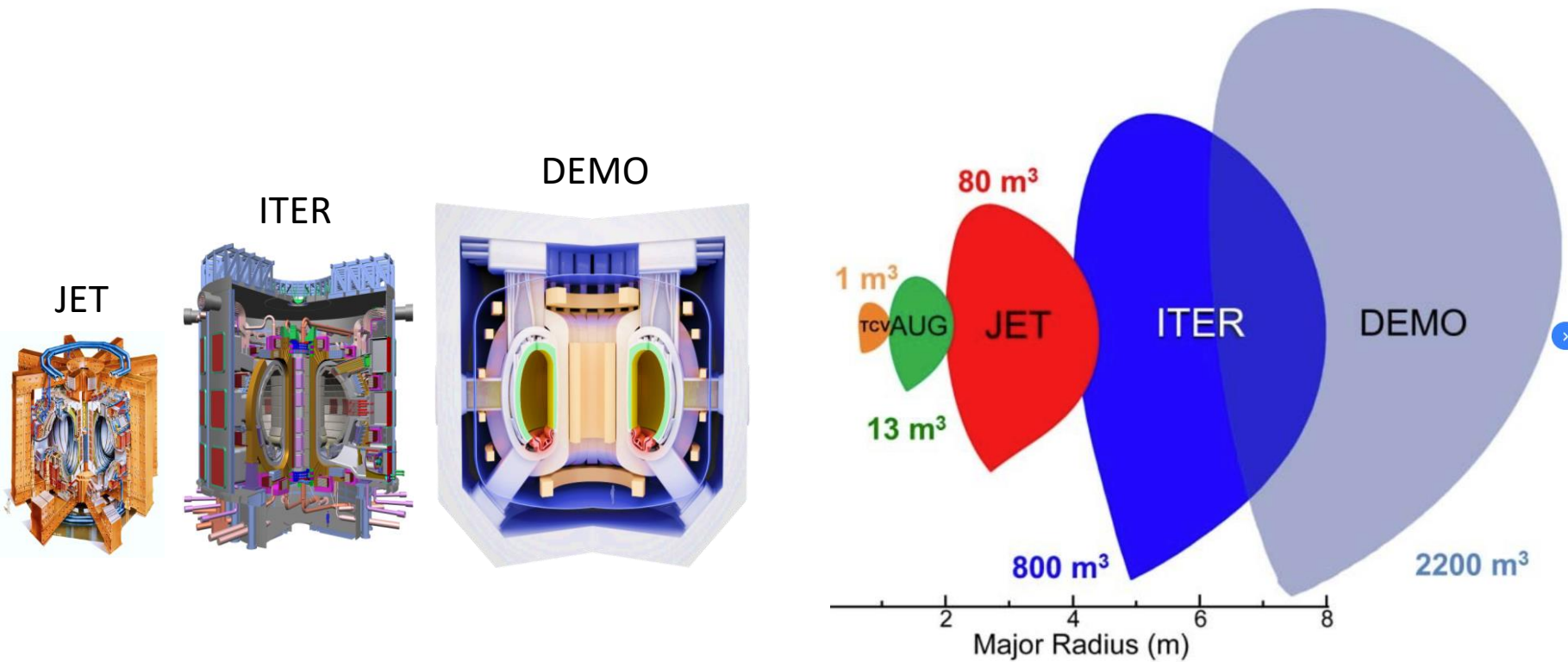


Tutti i Tokamak nel mondo



Sugli altri tokamak e facilities dislocati nei vari centri di ricerca in diverse parti del mondo, vengono compiuti studi sulla fisica dei plasmi, sulle tecnologie dei plasmi e la ricerca su nuovi materiali in grado di sopportare le temperature di esercizio.

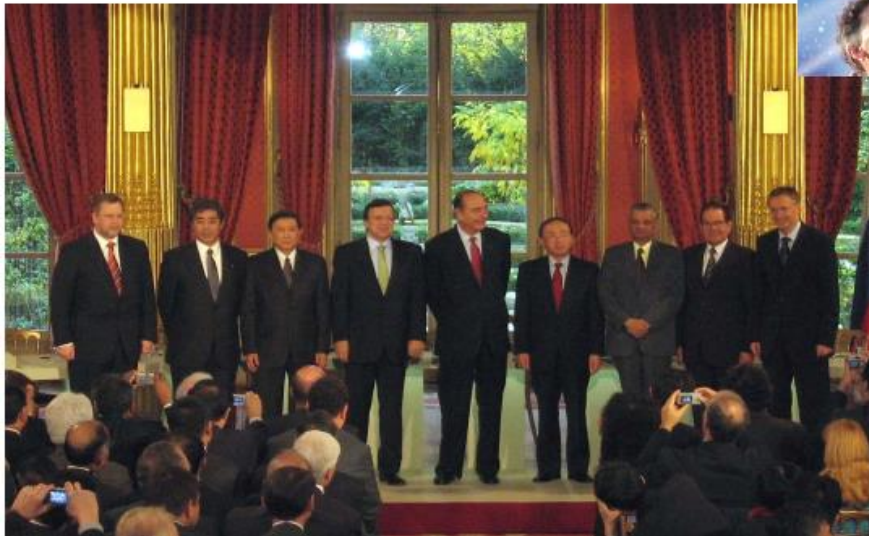
I piani per il futuro



	JET	ITER	DEMO
Volume	90 m ³	840 m ³	1000 – 2400 m ³
Fusion power	16.1 MW	500 MW	1.8 – 2.1 GW
Power factor (Q)	0.7	10	15 – 40

International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

ITER Agreement



21 Novembre 2006
Firma del trattato
ITER a Parigi
(Elysée Palace)

Nascita dell' ITER
Fusion Energy
Organization.

Attualmente il **progetto ITER** si pone come la più importante collaborazione scientifica internazionale

<https://www.iter.org/>

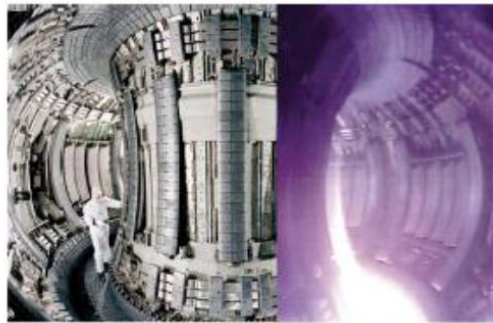
ITER parties:



Obiettivi di ITER

- ❖ Reazione di fusione D-T stabile alimentata solo dalla reazione di fusione
- ❖ Produrre energia termica con una *potenza massima di 500 MW a partire da una potenza in input di 50 MW*, in un plasma di fusione toroidale con un volume di 800 m³.
- ❖ Dimostrare la fattibilità di un impianto a fusione dal punto di vista **tecnologico**
- ❖ Dimostrare che un reattore a fusione è sicuro
- ❖ Dimostrare la fattibilità di produrre trizio all'interno del reattore

ITER

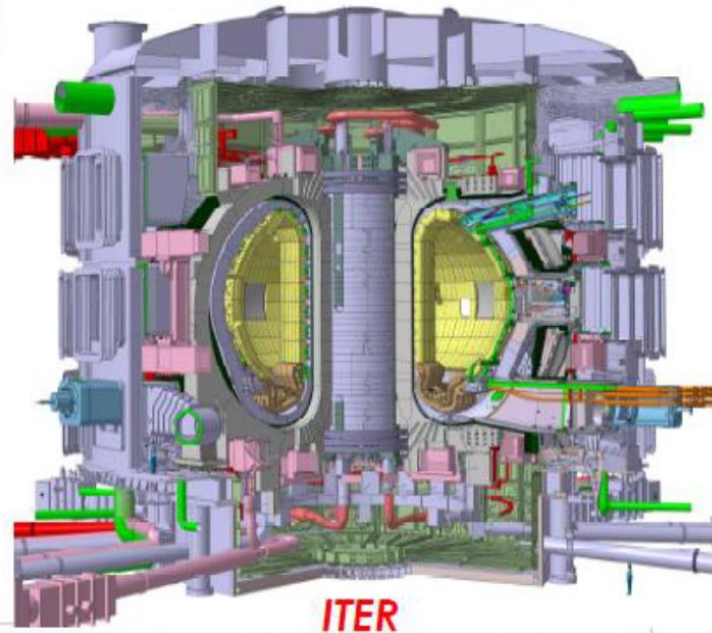


JET - Internals & Plasma

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

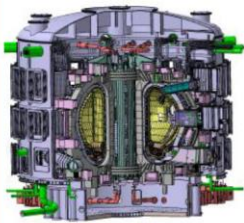


ITER

Il tokamak ITER, sorgerà in Francia a Cadarache (Provenza). Alto 24 metri e largo 30 metri sarà più piccolo di una centrale elettrica convenzionale.

ITER

Cryostat Size Comparison

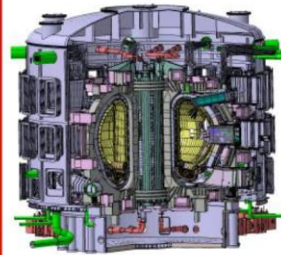


ITER Tokamak
29 m Tall x 28 m Wide



Arc de Triomphe
49 m Tall x 45 m Wide

ITER Tokamak - Mass Comparison

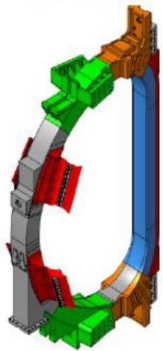


ITER Machine mass:
~23000 t
28 m diameter x 29 m tall



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

TF Coil - Mass Comparison

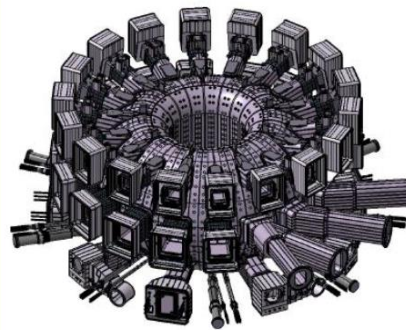


Mass of (1) TF Coil:
~360 t
16 m Tall x 9 m Wide



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

Vacuum Vessel Mass Comparison

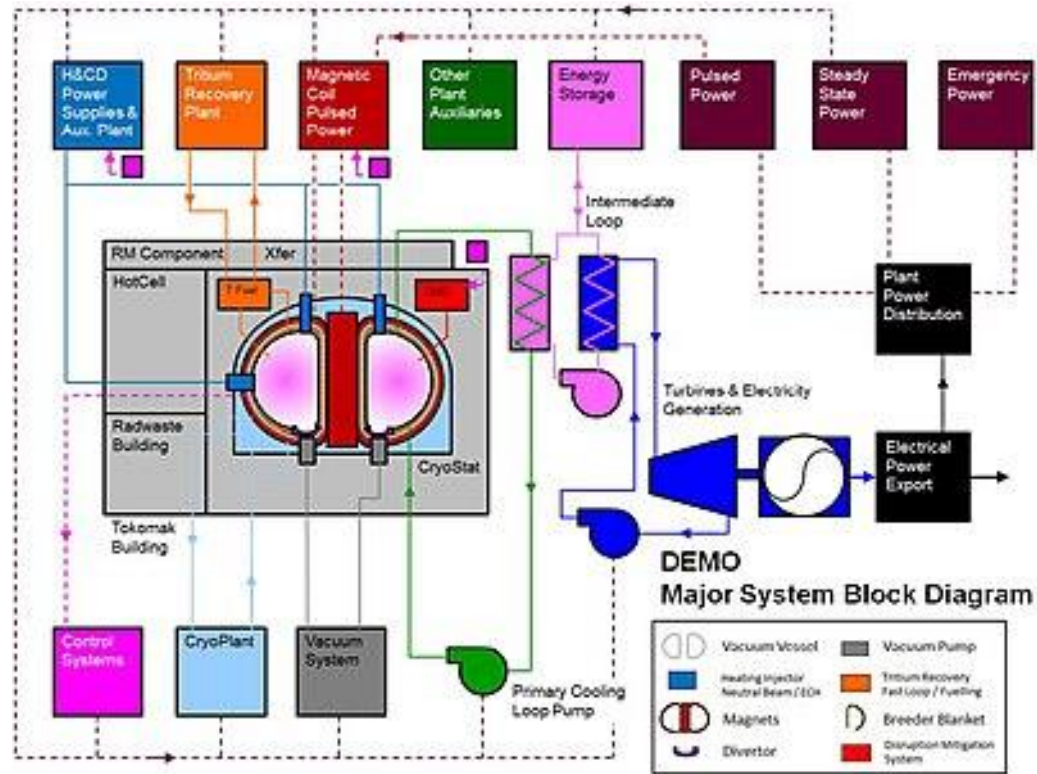


VV & In-vessel components mass: ~8000 t
19.4 m outside diameter x 11.3 m tall



Eiffel Tower mass: ~7300 t
324 m tall

Demonstration Power Plants (DEMO)



Lo scopo principale del progetto DEMO è quello di dimostrare esplicitamente la possibilità di generare energia elettrica tramite reazioni di fusione nucleare. In demo si deve ottenere un plasma in grado di sostenere *la reazione di fusione stabile per un tempo abbastanza lungo (1000s)*.

Progetti Gruppo di Elettrotecnica (ING-IND/31)

❖ TOKAMAKS

- ❑ **JET**: Culham Centre for Fusion Energy, Culham, nell'Oxfordshire (UK)
Predizione e classificazione delle disruptioni
- ❑ **AUG**: IPP-Max Planck Institut für Plasmaphysik, Garching, Munich (DE)
Predizione e classificazione delle disruptioni
- ❑ **MAST-U**: Culham Centre for Fusion Energy, Culham, nell'Oxfordshire (UK)
Riconoscimento dei Filamenti
- ❑ **DEMO**: IPP-Max Planck Institut für Plasmaphysik, Garching, Munich (DE)
Analisi di perturbazioni MHD
- ❑ **DTT**: ENEA, Frascati (IT)
Ricostruzione inversa della mappa di flusso e identificazione del boundary del plasma

❖ STELLARATORS

- ❑ **W7-X**: IPP-Max Planck Institut für Plasmaphysik, Greisfswald (DE)
Monitoraggio e controllo di eventi termici

❖ FACILITIES per ITER

- ❑ **SPIDER**: IGI-CNR, Padova (IT)
Ricostruzione dei profili dei beamlet della sorgente di ioni per ITER