

Fusione Nucleare

La fusione nucleare e' il processo che avviene nel sole e le stelle. Nel nucleo centrale del sole, alla temperatura di 10-15 M Kelvin, nuclei di H sono convertiti in He per mezzo della fusione liberando abbastanza energia per mantenere la reazione e

Guardando il plot della energia di legame/nucleone si capisce che c'e' un'altro modo per estrarre energia dal nucleo: si risale la curva partendo dai nuclei piu' leggeri invece che da nuclei pesanti. Combinando due nuclei leggeri a formare un nucleo con $A \leq 56$ si ottiene energia. Questo processo si chiama **fusione**.

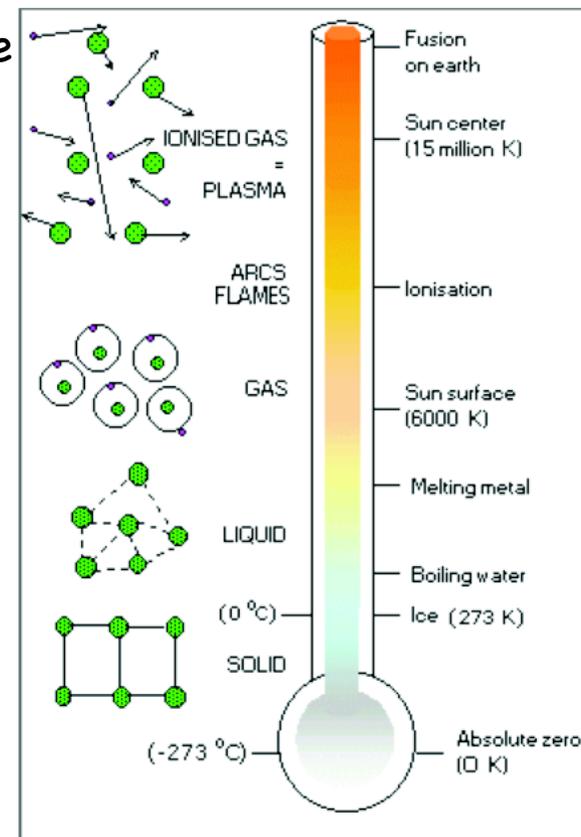
Vantaggi sono:

- i nuclei leggeri sono piu' facili da procurare
- i prodotti sono leggeri e stabili e non radioattivi (?)

Svantaggi: la barriera coulombiana che ostacola

Si consideri la fusione di due nuclei, sia ^2_1H , a formare il nucleo ^4_2He . Il Q value e' circa 20.7 MeV, ~ 0.5 MeV/nucleone confrontabile all'energia rilasciata per nucleone nella fissione.

La barriera di Coulomb e' 21.2 MeV, per cui se i due nuclei hanno sufficiente energia da superare la repulsione l'energia disponibile sara' 21.2+20.7, quasi il doppio di quella impiegata. (Image courtesy CEA, France)
Quindi operazione energeticamente vantaggiosa!



Plasmas occur at very high temperatures - the electrons are stripped from the atomic nuclei.

Dov'è il problema? -> intensità

Accelerare ioni di ^{20}Ne a 21.2 MeV contro una targhetta di ^{20}Ne facile con acceleratori, MA intensità di corrente massima di ~microampere.

Altro modo:

portare ad alta temperatura un gas di neon finché due nuclei abbiano probabilità di avvicinarsi e collidere con 21.2 MeV di energia,
-> fusione termonucleare.

MA...

Se energia cinetica per molecola di gas è $\frac{3}{2} kT$, = $\frac{1}{2}$ di 21.2 MeV, deve essere $kT=7\text{MeV}$.

Temperatura ambiente $kT=0.025\text{eV}$, quindi 3×10^8 volte maggiore,

La comunità internazionale tutta è impegnata nel cercare di perfezionare la tecnica della fusione termonucleare.

Processi base di fusione

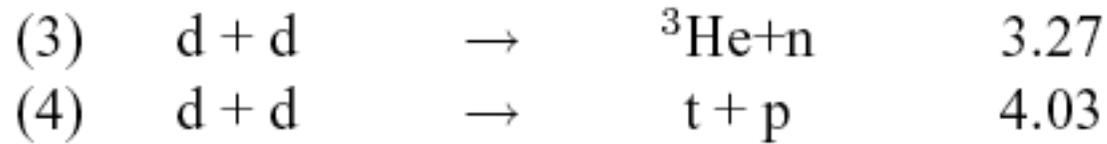
Il processo piu' semplice: $p+p \rightarrow {}^2\text{He}$ non avviene perche' instabile.

I processi da prendere in considerazione sono :

		Reaction		Q-value(MeV)
(1)	$p + d$	\rightarrow	${}^3\text{He} + \gamma$	5.49
(2)	$d + d$	\rightarrow	${}^4\text{He} + \gamma$	23.85
(3)	$d + d$	\rightarrow	${}^3\text{He} + n$	3.27
(4)	$d + d$	\rightarrow	$t + p$	4.03
(5)	$d + t$	\rightarrow	${}^4\text{He} + n$	17.59
(6)	$d + {}^3\text{He}$	\rightarrow	${}^4\text{He} + p$	18.35

I processi (1) e (2) hanno piccole sezioni d'urto ed inoltre i raggi γ che portano via tutta l'energia sono penetranti e sfuggono, per cui l'energia rilasciata non puo' essere rimessa in circolo per mantenere la reazione.

Le reazioni D-D



sono le piu' adatte per un processo di fusione continua perche' particelle cariche si portano via parte dell'energia di fusione e queste possono essere tenute nello spazio del reattore a compensare per l'energia persa e per mantenere la temperatura.

N.B. nucleo finale + stabile = + energia rilasciata nella reazione.



ha CB simile e $\sigma_{\text{D-T}} > \sigma_{\text{D-D}}$, una efficienza energetica per unita' atomica grande, $17.6/5 \approx 3.5 \text{ MeV u}^{-1}$, un rilascio di energia elevata perche' il prodotto finale e' una alpha molto legata, Ma il Tritio e' radioattivo e prodotto nei reattori a fusione, quindi difficile da procurarsi.

La reazione $(6) \quad d + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p \quad 18.35$

ha un Q-value alto, i prodotti finali non radioattivi, solo carichi facilmente confinabili, MA una alta CB che richiederebbe, in un reattore, una temperatura 6 volte la temperatura occorrente per il D-T.

La fusione di 4 protoni per formare ${}^4\text{He}$ (in + passi) e' responsabile dell'energia termonucleare rilasciata nelle stelle simili al sole, ma sono altre condizioni.

La catena a reazione di fusione, nelle stelle, coinvolge tutti i nuclei con $A \leq 56$; quando tutto l'H consumato, possibile la reazione



ma difficilmente osservabile perche' il ${}^8\text{Be}$ si divide subito in due ${}^4\text{He}$, ($< 10^{-16}$ s); piu' probabilmente e' $3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C}$

Naturalmente +alta CB maggiore energia termica necessaria, quindi stelle + calde.

anche se difficile avere reazione diretta di 3 nuclei, ma possibile con passaggi intermedi.

Caratteristiche della fusione

Rilascio di energia

Le KE delle particelle reagenti, nelle reazioni di fusione, sono nel range 1-10KeV, piccole rispetto al Q-value, per cui solo le particelle finali b e Y

$$\frac{1}{2}m_b v_b^2 + \frac{1}{2}m_Y v_Y^2 \cong Q$$

e trascurando il moto iniziale, i momenti finali

$$m_b v_b \cong m_Y v_Y$$

da cui

$$\frac{1}{2}m_b v_b^2 \cong \frac{Q}{1 + m_b / m_Y} \quad \text{e} \quad \frac{1}{2}m_Y v_Y^2 \cong \frac{Q}{1 + m_Y / m_b}$$

Questo significa che le particelle prodotte finali piu' leggere si portano via la parte maggiore di energia, circa il 75-80% come nel caso D-T e D-D, come si vede dal rapporto delle KE.


$$\frac{\frac{1}{2}m_b v_b^2}{\frac{1}{2}m_Y v_Y^2} = \frac{m_Y}{m_b}$$

Barriera coulombiana

La CB nella fusione agisce in modo simile alla CB nel decadimento alpha. La CB e' pari al potenziale repulsivo che le due particelle, a e X , sperimentano quando sono a contatto

$$V_c = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{Z_a Z_X}{R_a + R_X}$$

per due nuclei H la CB e' di circa 200 KeV e, classicamente, la σ va rapidamente a ZERO se le EK delle particelle a e X sono sotto questo valore. Ma la fusione avviene anche a energie piu' basse della CB, per effetto tunnel quantistico.

$Z_a Z_X$ prodotto appare nell'esponenziale della probabilita' di penetrazione della barriera e cosi' la σ e' molto sensibile alla CB.

La probabilita' di fusione decresce rapidamente come ZZ , questo significa che e' piu' bassa per gli isotopi dell'H.

Per reazioni D-T, $V_c=0.4$ MeV, alta per energie di 1-10 KeV.

Sezione d'urto

La σ per fusione e' simile a quella delle reazioni nucleari, con formazione di nucleo composto, tenendo conto che la reazione avviene lontano della zona energetica delle risonanze.

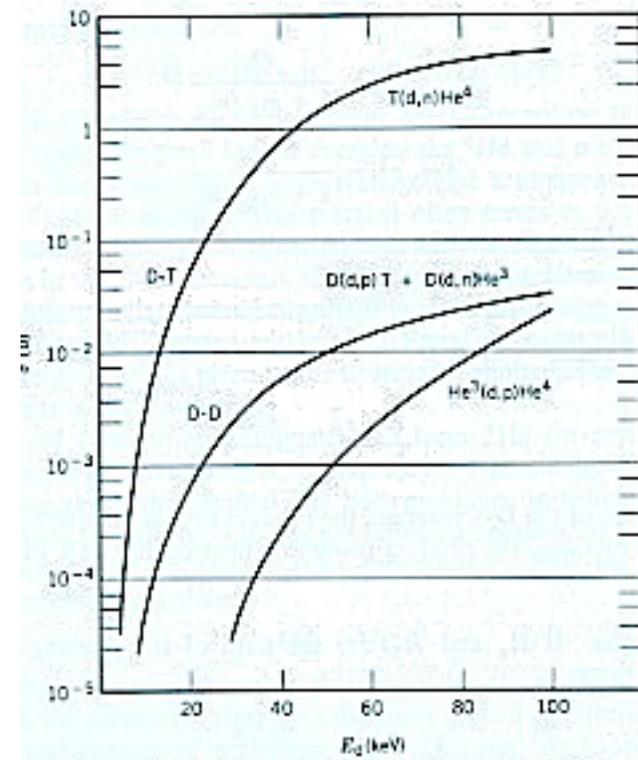
La σ dipendente essenzialmente da due termini:

- il fattore k^{-2} (dipendenza da v^{-2})
- la probabilita' parziale di reazione che tiene conto del fattore di penetrazione della barriera, con G fattore di Gamow.

$$G \approx \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \frac{\pi Z_a Z_X}{\hbar v}$$

$$\sigma \propto \frac{1}{v^2} e^{-2G}$$

I fattori includono elementi di matrice nucleare, fattori statistici degli spin, ma la σ rappresenta bene la dipendenza dall'energia.



Rate di reazione

La rate di reazione di una reazione nucleare dipende da σv
 nella fissione i neutroni termici $\sigma \propto \frac{1}{v} \rightarrow \sigma v = \text{const}$

nella fusione ci sarà una distribuzione di velocità, eq. di M-B

$$n(v) \propto e^{-mv^2/2kT}$$

la probabilità di trovare una particella con velocità tra v e $v+dv$ in un insieme in equilibrio termico a temperatura T

→ $n(v)v^2 dv$

Nella fusione termonucleare, importa la $\langle \sigma v \rangle$ media

$$\langle \sigma v \rangle \propto \int_0^\infty \frac{1}{v} e^{-2G} e^{-mv^2/2kT} v^2 dv$$

come si vede dalle curve
 la distribuzione di M-B si sovrappone alla $\langle \sigma v \rangle$

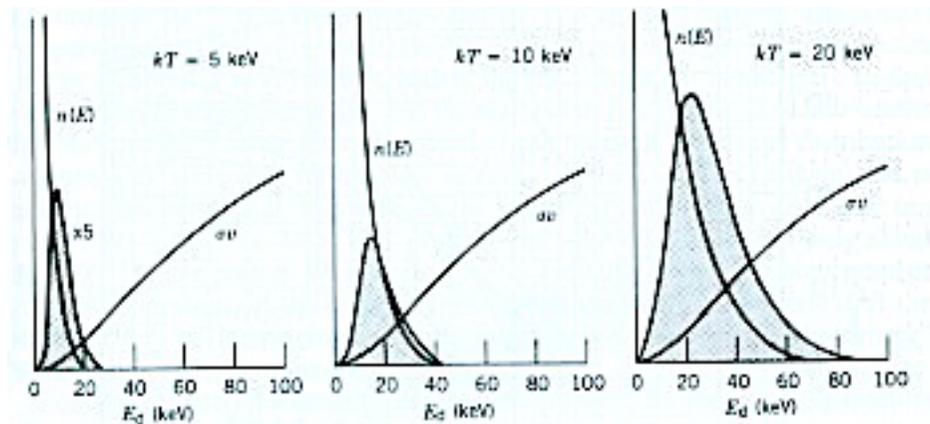
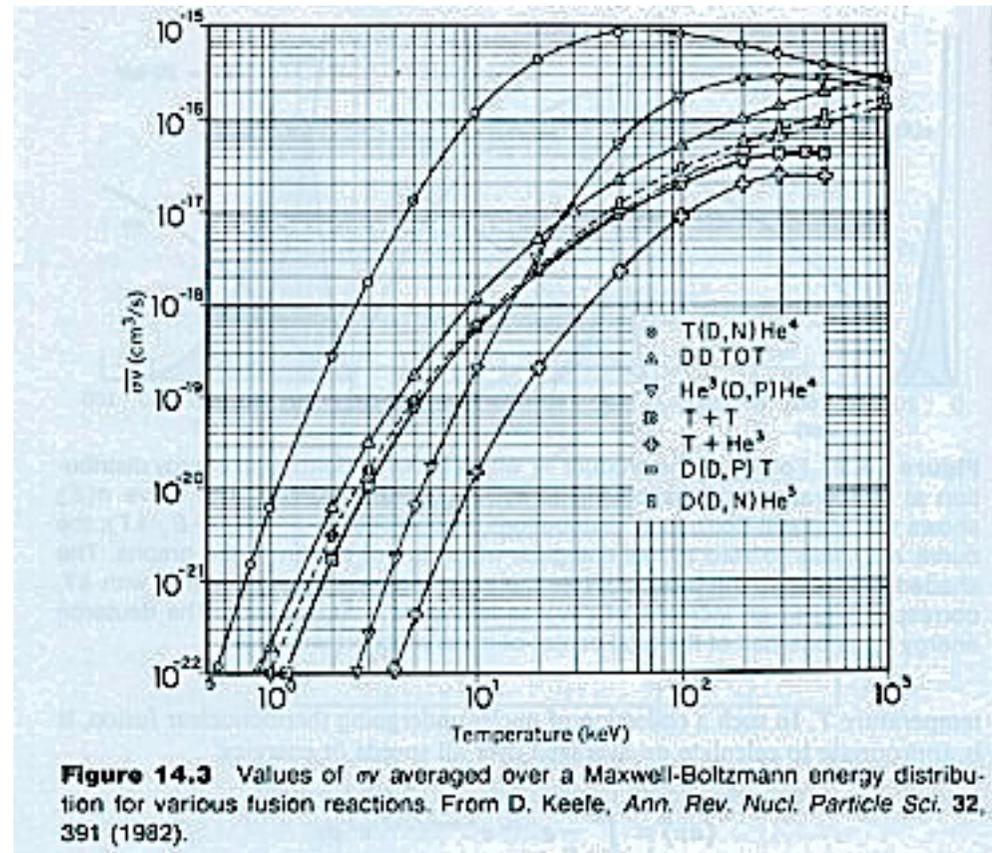


Figure 14.2 Folding of the product σv with a Maxwell-Boltzmann energy distribution at temperatures corresponding to $kT = 5, 10,$ and 20 keV. The curve $n(E)$ shows the Maxwell-Boltzmann distribution, proportional to $E^{1/2} \exp(-E/kT)$; the curve $n(E)$ falls to zero at low energies, which is not shown in the graphs. The shaded area shows the product. Note the great increase in shaded area with kT , corresponding to an increase of $\langle \sigma v \rangle$ as is shown in Figure 14.3. The deuteron energy E_d is one-half of the total center-of-mass reaction energy E .

Il grafico mostra le $\langle \sigma v \rangle$ per le diverse reazioni. Ad energie molto alte $T \sim 10^{10} \text{K} \rightarrow \sim \text{MeV}$, la reazione D-T non è favorita, mentre ad energie intermedie raggiungibili nei reattori termonucleari (1-10 KeV $T = \sim 10^7 - 10^8 \text{K}$) la D-T è chiaramente favorita.

N.B.

La teoria semplificata usata per calcolare $\langle \sigma v \rangle$ è appropriata solo per D-D, mentre per reazioni del tipo D-T bisognerebbe tenere conto delle velocità medie relative e la media fatta sulla distribuzione di M-B di entrambi.

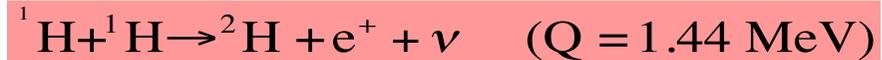


Fusione solare

Il sole e' un buon esempio di reazione a catena di fusione autosostenentesi a regime quasi costante da 10^9 Y.

L'H e' l'elemento piu' abbondante, circa il 90%, l'He solo 1%, formatosi nella fase primordiale .

Il processo base e' la fusione di H in He.



Richiede un β decay con xsect che alle energie del KeV e' $\sim 10^{-33}\text{b}$ mentre per energie del MeV la xsect $\sim 10^{-23}\text{b}$, quindi molto piccole.

La $\langle T \rangle$ al centro del sole e' di $\sim 15 \times 10^6$ K \rightarrow 1KeV, ma quello che conta e' la $\langle \sigma v \rangle$ per cui la bassa xsect alle energie basse e' compensata dalla xsect grande alle energie del MeV.

la rate di reazione e' solo di $5 \times 10^{-18}/\text{s}$ per protone, ma la reazione di fusione e' mantenuta dato il grande n. di protoni, $\sim 10^{56}$, per cui la rate di reazione e' di $\sim 10^{38}/\text{s}$, ugualmente enorme. Questo step e' detto "**bottleneck**" perche' e' il piu' lento e poco probabile.

il ciclo, chiamato *proton-proton cycle*, prosegue con la formazione di ${}^3\text{He}$, in quanto la reazione D-D e' poco probabile essendoci pochi D, uno ogni $\sim 10^{18}$ di protoni, per cui il D e' portato a ricombinarsi



Il ${}^3\text{He}$ potrebbe legarsi al H ma il Li non esiste come stato legato, oppure legarsi con un D, ma ce ne sono pochi e inoltre il D si lega al H per dare ${}^3\text{He}$, quindi il ${}^3\text{He}$ si

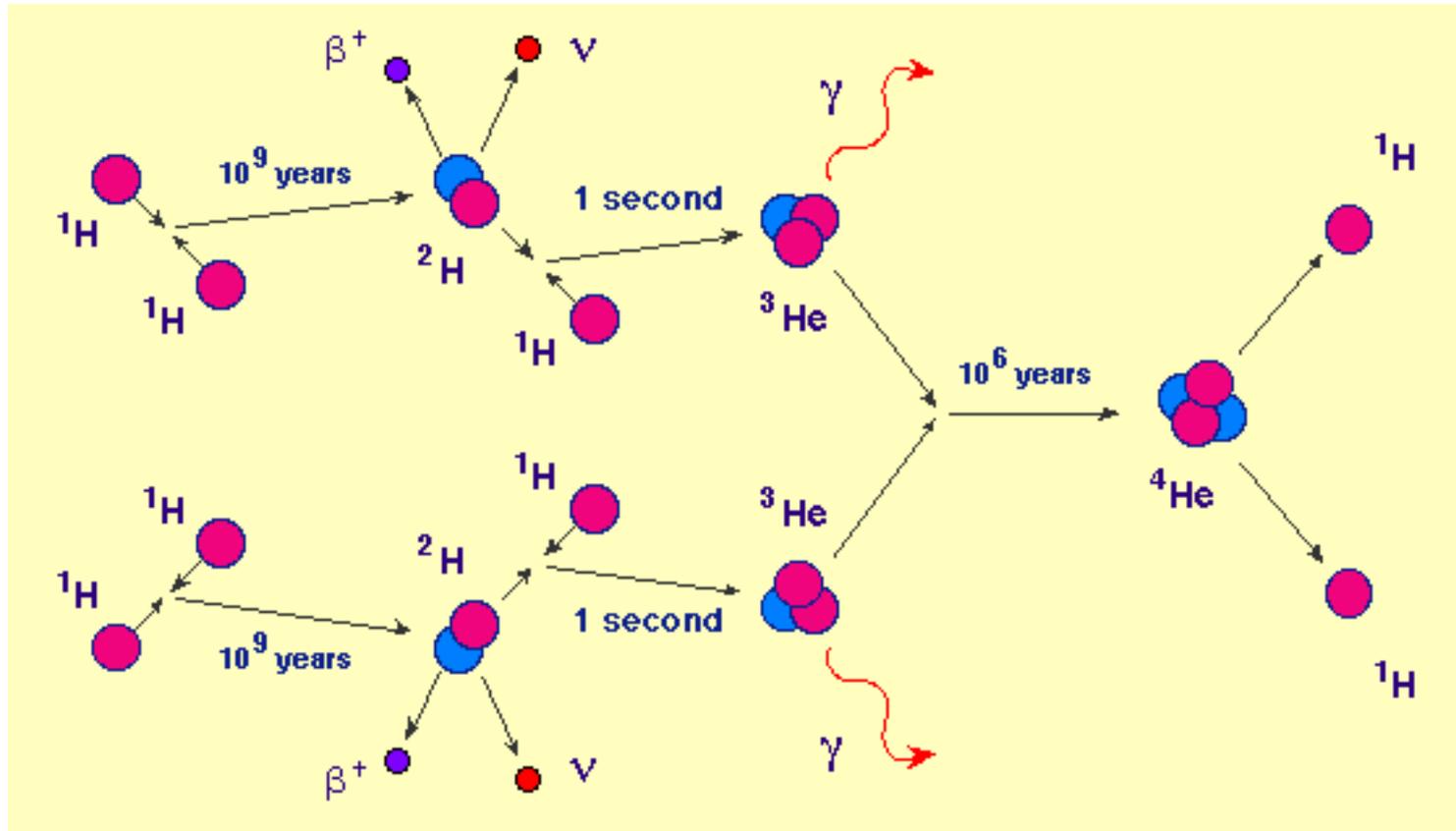


Il risultato netto della catena e' la conversione di 4 protoni in elio



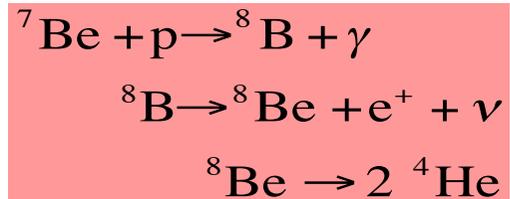
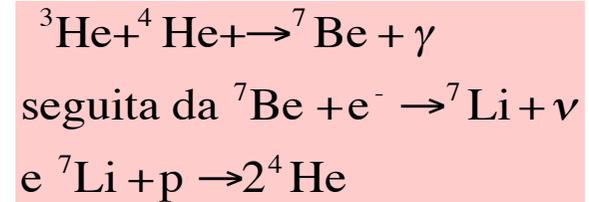
Il Q-value si calcola includendo anche gli elettroni, 4 per parte, per cui si ha $Q=26.7 \text{ MeV}$; l'energia convertita in radiazione solare per ciclo e' leggermente minore perche' i neutrini sfuggono.

La catena P-P



Reazioni possibili che conducono alla formazione di ${}^4\text{He}$, sono
la reazione di ${}^3\text{He}$ con α 

o partendo dal Be



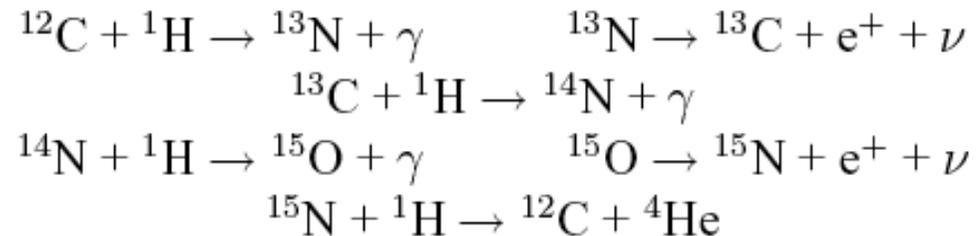
Il Q-value delle tre sequenze e' lo **stesso**, indipendente dal processo.
Quale processo di fusione e' attivato dipende dalla composizione della stella e dalla T.

Per il sole, si misura la rate delle tre sequenze dal flusso dei neutrini e la loro energia. Nella prima sequenza l'energia dei neutrini e' continua con un massimo di 0.42 MeV, nel secondo caso la cattura elettronica da' un neutrino monoenergetico di 0.862 MeV, nel terzo caso si ha una distribuzione continua di neutrini con un massimo di 14 MeV.

C'e' un problema nel flusso dei neutrini solari: se ne misurano meno di quanti aspettati. Una spiegazione richiede che i neutrini oscillano e che almeno un neutrino abbia massa diversa da zero

CNO cycle

Accanto a H ed He nelle stelle ci sono elementi piu' pesanti e quindi sono ipotizzabili altre serie di reazione di fusione, una di queste e' il CNO cycle.



In questa catena il ${}^{12}\text{C}$ funziona da catalizzatore per il processo di fusione, il cui bilancio netto e'

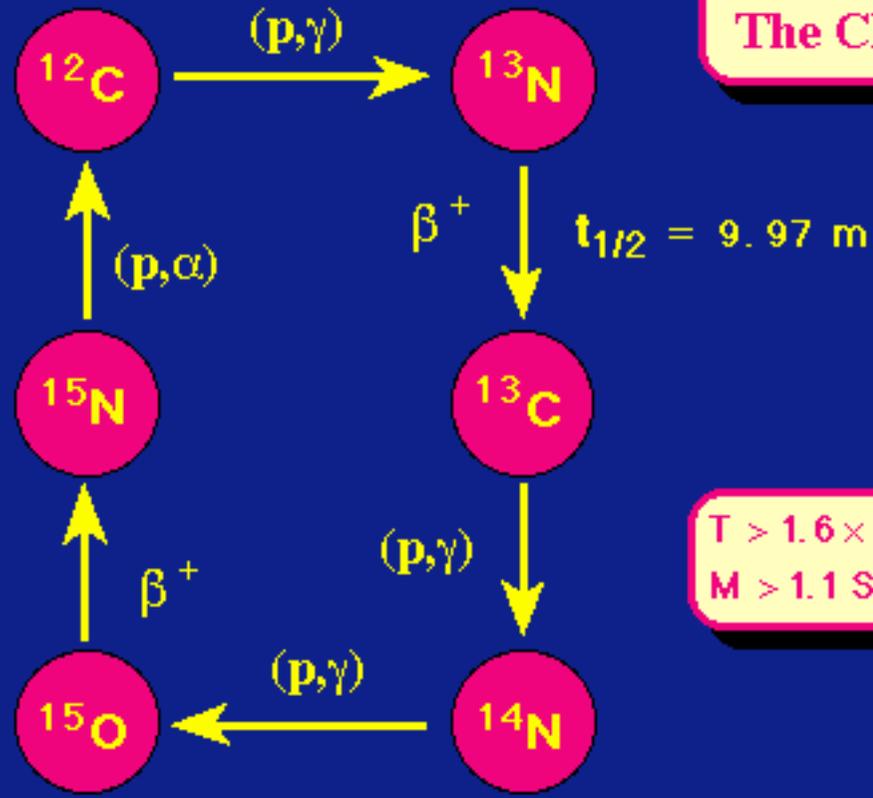


esattamente come il ciclo protone-protone e stesso Q-value.

This Carbon-Nitrogen-Oxygen or CNO cycle converts hydrogen to helium according to the following sequence of reactions:

- 1. The mass-12 isotope of Carbon captures a proton and emits a gamma-ray, producing the mass-13 isotope of Nitrogen.**
- 2. Nitrogen-13 is unstable and beta decays to the mass-13 isotope of Carbon with a half-life of approximately 10 minutes.**
- 3. The mass-13 isotope of Carbon captures a proton and emits a gamma-ray to become the mass-14 isotope of Nitrogen.**
- 4. The mass-14 isotope of Nitrogen captures another proton and emits a gamma-ray to become the mass-15 isotope of Oxygen.**
- 5. The mass-15 isotope of Oxygen undergoes a beta decay to become the mass-15 isotope of Nitrogen.**
- 6. The mass-15 isotope of Nitrogen captures a proton and emits an alpha-particle (that is, a nucleus of helium) to close the cycle and return to C-12.**

The CNO Cycle



$T > 1.6 \times 10^7 \text{ K}$
 $M > 1.1 \text{ Solar Masses}$

Il *CNO o carbon cycle* non ha il bottleneck e quindi più veloce. La CB è 6-7 maggiore che per reazioni p-p, ragione per cui il CNO cycle domina ad alti T.

La radiazione solare sulla terra è di $\sim 1.4 \cdot 10^3 \text{ W/m}^2$ equivalente ad output medio del sole di $4 \cdot 10^{26} \text{ W}$.

Consumo in termini di H: una reazione di fusione produce $\sim 25 \text{ MeV}$, ci sono quindi 10^{38} reazioni/s,

$$\rightarrow 4 \cdot 10^{38} \text{ H/s}$$

a questa rate ci si aspetta che continui a bruciare H per altri 10^{10} y .

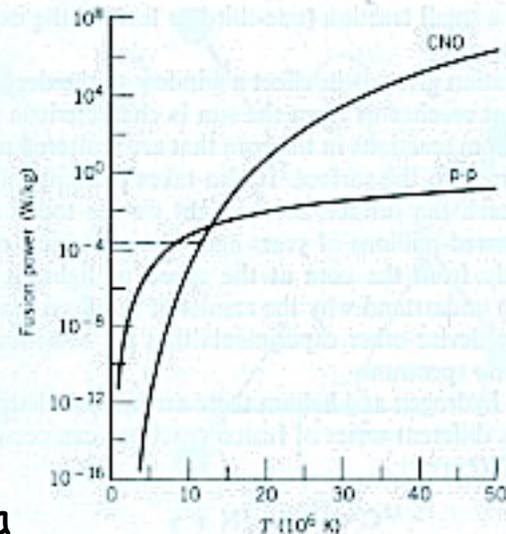


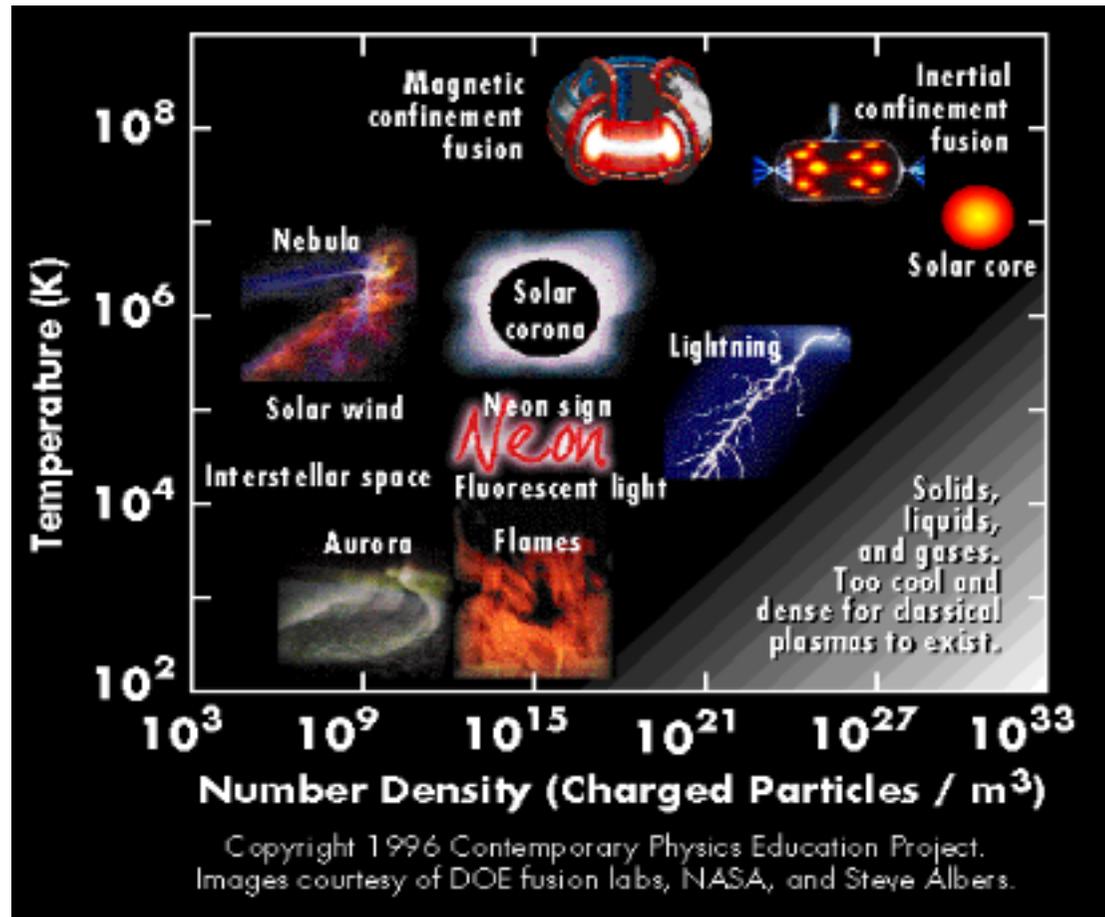
Figure 14.5 Power generation per unit mass of fuel for proton-proton and CNO processes. The dashed line indicates the sun's power of about $2 \times 10^{-4} \text{ W/kg}$.

Quando una stella ha esaurito il suo carburante di H, inizia la reazione di fusione del elio che richiede una T maggiore per via della CB. $3^4 \text{ He} \rightarrow ^{12} \text{ C}$

Reazioni di fusione di nuclei leggeri ed α hanno luogo fino al $^{56} \text{ Fe}$, dopo non c'è più guadagno in energia.

Plasma: what is?

Plasma consiste di una miscela di particelle neutre, ioni positivi ed elettroni che si muovono liberamente in uno spazio confinato, gas ionizzato. In un plasma debolmente ionizzato l'interazione carica-neutro è ancora importante mentre in un plasma fortemente ionizzato sono dominanti le interazioni Coulombiane.



Neutralita' elettrica del plasma

Una proprieta' del gas parzialmente ionizzato e' la sua tendenza verso la neutralita' elettrica. Se in un volume macroscopico la differenza di densita' di carica e' PICCOLA

$$\rho^c(+)\approx\rho^c(-)$$

si creano forze elettrostatiche per cui l'energia potenziale delle particelle superera' di molto l'energia termica media e le particelle si muoveranno rapidamente per ridurre questa energia potenziale e ristabilire la neutralita', a meno di particolari meccanismi.

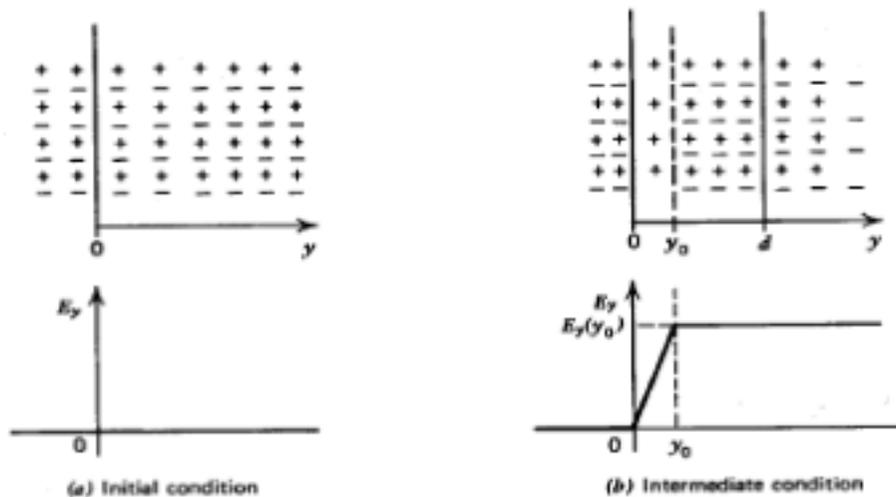
Per stimare quantitativamente le dimensioni per cui puo' avvenire la deviazione dalla neutralita' di carica si supponga di avere un gas ionizzato elettricamente neutro

con le densita' $n=n_e=n_i$.

Si calcola il lavoro necessario per creare una regione ad. es. di sole cariche positive, quindi spostamento di tutte le cariche negative dalla regione.

Il campo elettrico E creato da una distribuzione di cariche e' determinata dall'eq. di Gauss

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho^c}{\epsilon_0}$$



(a) Initial condition

(b) Intermediate condition

Figure 1. Work necessary to create a region of net positive charge.

In una dimensione, assumendo che il C.E. sia nullo prima dello spostamento e che E_y sia continuo si ha la situazione:

$$y \leq 0, \frac{dE_y}{dy} = 0 \Rightarrow E_y = 0$$

$$0 \leq y \leq y_0, \frac{dE_y}{dy} = \frac{ne}{\epsilon_0} \Rightarrow E_y = \frac{ne}{\epsilon_0} y$$

$$y_0 \leq y, \frac{dE_y}{dy} = 0 \Rightarrow E_y = E_y(y_0) = \frac{ne}{\epsilon_0} y_0$$

Nella regione $y > y_0$ il C.E. agente su ciascun elettrone e' $E_y(y_0)$; il lavoro per spostare ciascun elettrone di dy_0 e' $dW = eE_y(y_0)dy_0$

il lavoro totale su ciascun elettrone per produrre una separazione d e'

$$W = \int_0^d eE_y(y_0)dy_0 = \frac{ne^2}{\epsilon_0} \frac{d^2}{2}$$

In particolare se l'energia deve essere fornita dall'energia termica $1/2 kT$, lungo y , la corrispondente distanza $d = \lambda_D$ e' chiamata lunghezza di Debye e vale

$$\frac{ne^2}{\epsilon_0} \frac{\lambda_D^2}{2} = \frac{kT}{2} \quad \text{da cui} \quad \lambda_D = \left(\frac{\epsilon_0 kT}{ne^2} \right)^{1/2}$$

nel sistema MKS

$$\lambda_D = 69.0 \left(\frac{T}{n} \right)^{1/2} m.$$

Come esempio, per $T=2500^\circ K$ e $n=10^{20} m^{-3}$, si ha $\lambda_D \sim 3.4 \cdot 10^{-7} m$.

da confrontarsi con il libero cammino medio di elettroni nel plasma a quelle condizioni di $\lambda \sim 1.3 \cdot 10^{-6} m$.

Il termine plasma fu introdotto da Langmuir nel 1929 per un gas parzialmente ionizzato in cui λ_D e' piccola rispetto ad altre lunghezze macroscopiche, es. la scala macroscopica di variazione della densita' di elettroni. In quelle condizioni, quindi, si puo' parlare di neutralita' elettrica, i.e. $n_i \approx n_e$.

La lunghezza di Debye ha il significato di distanza di "screening", schermaggio, o la distanza oltre il quale il campo Coulombiano, $1/r$, e' abbattuto esponenzialmente dalla polarizzazione del plasma

$$V(r) = \frac{Qe^{-r/\lambda_D}}{4\pi\epsilon_0 r}$$

Condizioni per la fusione nucleare

Le condizioni primarie per ottenere la fusione sono:

Alta Temperatura - La fusione richiede temperature di circa 10^8 °K
a questa temperatura gli atomi sono quasi del tutto strappati degli elettroni
e le cariche (ioni ed elettroni) si muovono liberamente (**plasma**)

Alta pressione - Significa alta densità. E' necessario che la densità del plasma sia elevata al fine di avere una grande sezione d'urto

INOLTRE e' necessario:

Contenimento: Il plasma deve essere contenuto in uno spazio isolato.

Confinamento: il plasma deve essere mantenuto per un tempo sufficiente per autosostenere il processo di fusione

Reattori a fusione controllata

Innescare e controllare una reazione di fusione termonucleare richiede portare il fuel alla temperatura di $\sim 10^8\text{K}$ ($\sim 10\text{ KeV}$) e mantenere una alta densita' per un tempo sufficiente perche' la rate di reazioni sia grande da generare la potenza voluta.

A $T = \sim 10^8\text{K}$ gli atomi sono ionizzati, per H 13.6 eV necessari.

Si forma un plasma di ioni positivi ed elettroni con carica elettrica totale neutra.

Le proprieta' elettrostatiche del plasma sono fissate dalla dimensione della Debye length.

$$L_D = \left(\frac{4\pi\epsilon_0 kT}{e^2 4\pi n} \right)^{1/2}$$

$n \rightarrow$ densita'
media di ioni o elettroni

Su una scala di densita' di un solido ($\sim 10^{28}\text{m}^{-3}$) la scala di Debye per un plasma a 10 KeV e' $\sim 10^{-8}\text{m}$ e la densita' in quella scala e' $\sim 10^4$.
per un plasma piu' rarefatto ($\sim 10^{22}\text{m}^{-3}$) la L_D vale $\sim 10^{-5}$ e il n. di particelle in un volume di 1 L_D e' $\sim 10^7$.

Il significato fisico della L_D e' la distanza di "schermatura" o la distanza oltre la quale il campo Coulombiano ($1/r$) e' annullato dalla polarizzazione del plasma.

Questo parametro e' di massima importanza nella fisica del plasma, infatti definisce il plasma.

Un gas di particelle in cui questa lunghezza e' maggiore della dimensione del gas (ad es. un fascio di bassa densita' in acceleratore) non forma plasma, ma se la L_D e' minore della dimensione del gas, come avviene nelle fiamme, nel vento solare, nel sole, nella fusione allora si ha plasma.

Nel caso del plasma, quindi, bisogna tener conto che i campi elettrici applicati non penetrano al suo interno piu' di qualche L_D .

Il plasma, materia a T elevata, non deve essere messo in contatto con il contenitore perché si raffredderebbe e fonderebbe le pareti.

Il problema maggiore per la fusione controllata è il confinamento:

- *confinamento magnetico* -> il plasma è confinato da un campo magnetico

- *confinamento inerziale* -> una sferetta solida è scaldata e compressa

Il plasma può perdere energia in molti modi, il principale è la bremsstrahlung, in cui lo scattering Coulombiano di due particelle produce un'accelerazione con conseguente emissione di radiazione.

Bremsstrahlung

Gli elettroni, massa minore, hanno più accelerazione e quindi maggiore perdita di energia, ma UGUALMENTE gli ioni, in equilibrio termico con gli elettroni, sentono la variazione e perderanno energia, quindi minore probabilità di penetrare la CB.

Un elettrone con accelerazione

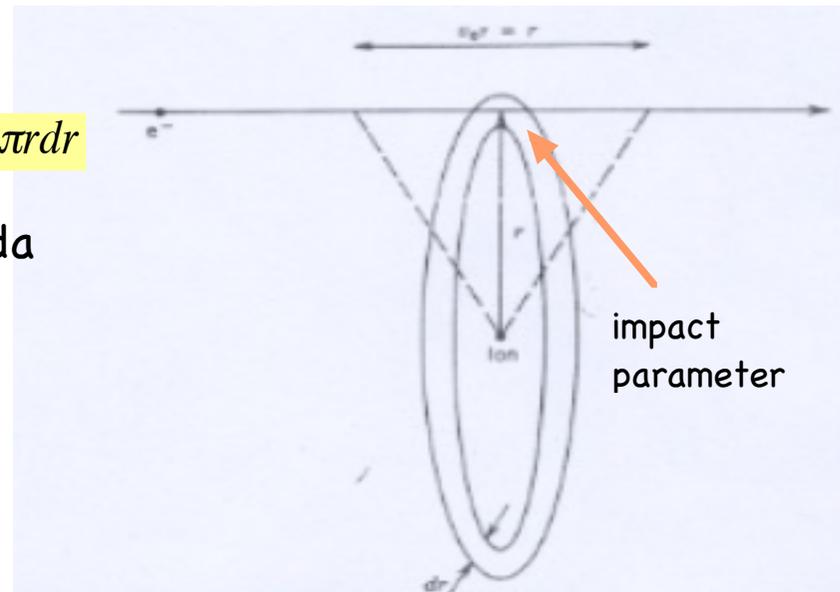
irradia una potenza $P = \frac{e^2 a^2}{6\pi\epsilon_0 c^3}$

$$a = \frac{F}{m_e} = \frac{Ze^2}{4\pi\epsilon_0 m_e r^2}$$

se τ è tempo caratteristico dell'interazione coulombiana ione-elettrone, il numero di ioni incontrati ad una distanza r sarà $n \cdot v_e \tau \cdot 2\pi r dr$

e il contributo alla potenza totale da elettroni scatterati tra r e $r+dr$

$$dP = \frac{e^2 n}{6\pi\epsilon_0 c^3} \frac{Z^2 e^4 v_e \tau (2\pi r dr)}{(4\pi\epsilon_0)^2 m_e^2 r^4}$$



il tempo caratteristico $\tau = r/v_e$

quindi
$$dP = \frac{4\pi Z^2 e^6 n}{3(4\pi\epsilon_0)^3 m_e^2 c^3} \frac{dr}{r^2}$$

integrando tra r_{\min} e r_{\max} si ha la potenza irradiata

da un singolo elettrone; moltiplicando per n_e si ottiene la Potenza per unita' di volume radiata dal plasma:

$$r_{\min} = \hbar / m_e v_e \quad P = \int_{r_{\min}}^{\infty} \frac{4\pi Z^2 e^6 n}{3(4\pi\epsilon_0)^3 m_e^2 c^3} \frac{dr}{r^2} = \frac{4\pi n n_e Z^2 e^6 v_e}{3(4\pi\epsilon_0)^3 m_e c^3 \hbar}$$

prendendo per v_e la velocita' corrispondente all'energia cinetica media M-B, facendo un po' di conti si ottiene:

$$v_e = \sqrt{3kT / m_e} \quad P_{br} = 0.5 \times 10^{-36} Z^2 n n_e (kT)^{1/2} W / m^3 \quad \text{con } kT \text{ in KeV.}$$

La Rate di fusione e' $R_f = n_1 n_2 \langle \sigma v \rangle$

essendo n_1, n_2 le densita' delle due specie fusionanti, nel caso di D-D

il numero e' $1/2 n^2$ per non contare le reazioni due volte.

Confrontando la Potenza generata e quella radiata si determina la T per cui l'output della fusione eccede la perdita da bremsstrahlung

Notare:

per D-T, $T > 4 \text{ KeV}$

per D-D, $T > 40 \text{ KeV}$

Questo indica che D-T è il fuel più adatto alla fusione controllata.

La Potenza radiata per Bremsstrahlung cresce come Z^2 , quindi nuclei più pesanti di H hanno perdite maggiori e anche rate di reazione minore nella regione dei KeV per via della CB.

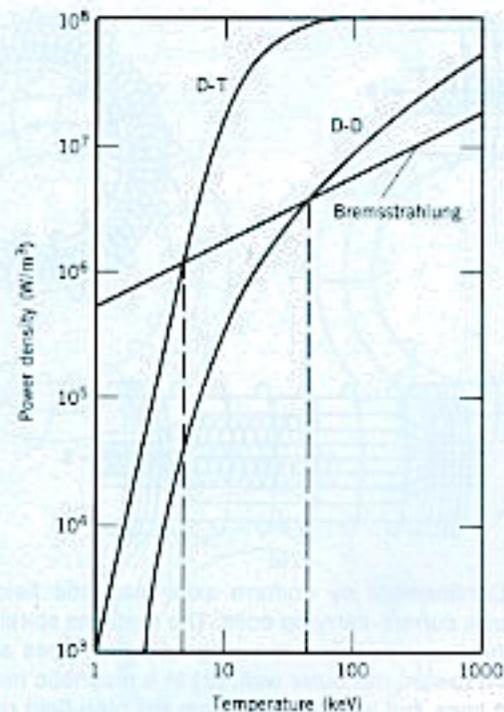
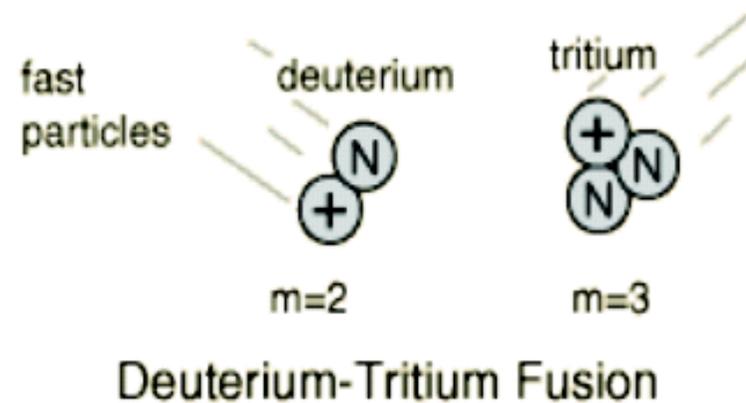


Figure 14.7 Comparison of bremsstrahlung losses with power outputs of D-D and D-T reactions, assuming an ion density of $10^{21}/\text{m}^3$. The vertical lines show the temperatures above which fusion power exceeds bremsstrahlung losses.

Altri tipi di radiation losses, quali radiazione da sincrotrone per particelle orbitanti in un campo magnetico, sono trascurabili rispetto alla bremsstrahlung.

Deuterio e Tritio

La reazione di fusione piu' pratica per la produzione di energia e' la reazione D-T.



dove sono le sorgenti di questi elementi?

Per il Deuterio non ci sono problemi, 1 parte su 5000 dell'H dell'acqua di mare e' Deuterio, quindi ci sono 10^{15} t di deuterio. Un litro di acqua di mare, come fuel, puo' produrre energia pari a 300 litri di benzina.

Per il Trizio il discorso e' diverso perche' non si trova in quantita' come sorgente naturale perche' radioattivo, ha una vita media di ~ 10 y, deve essere prodotto artificialmente, in processi di breeding o nei reattori.

Rendimento energetico

Il reattore a fusione avra' un guadagno di energia se: ***energia rilasciata nella reazione di fusione > Σ (energia persa per radiazione + energia iniziale per portare il plasma alla temperatura necessaria per attivare la fusione).***

Per D-T se si opera ad una $T > 4$ KeV, es. 10 KeV, il guadagno e' netto e quindi si puo' trascurare l'energia persa per radiazione.

L'energia rilasciata per unita' di volume dalla reazione di fusione nel plasma e': *rate di reazione per volume x l'energia rilasciata per reazione x il tempo durante il quale avviene la reazione*

$$E_f = \frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau$$

L' E_{th} per unita' di volume per portare ioni ed elettroni alla temperatura T , e' $\frac{3}{2} n k T$ (ioni) e $\frac{3}{2} n_e k T$ (elettroni) per cui se $n = n_e$

$$E_{th} = 3 n k T$$

La sequenza e': fornire energia E_{th} per creare il plasma, confinare il plasma caldo per un tempo t , si ottiene energia di fusione E_f .

Il reattore ha quindi un guadagno netto di energia se

$$E_f > E_{th}$$
$$\frac{1}{4} n^2 \langle \sigma v \rangle Q \tau > 3nkT$$

LAWSON CRITERION \Rightarrow $n\tau > \frac{12kT}{\langle \sigma v \rangle Q}$

Con una $T = 10$ KeV per una reazione D-T ,

$$\langle \sigma v \rangle \approx 10^{-22} \text{ m}^3 / \text{s} \Rightarrow n\tau > 10^{20} \text{ s} / \text{m}^3$$

questa stima del prodotto minimo necessario di densità di ioni e tempo di confinamento è chiamato Lawson criterion e rappresenta il goal dei progettisti per arrivare alla fusione controllata.

Il criterio di Lawson dipende dalle condizioni di lavoro, ad es. per una reazione D-D, 10 KeV sono pochi, bisogna lavorare ad una T di 100KeV che significa

$$\langle \sigma v \rangle = 0.5 \times 10^{-22} \text{ m}^3 / \text{s} \Rightarrow n\tau > 10^{22} \text{ s} / \text{m}^3$$

per D-D bisogna aumentare di 100 volte n o τ o la combinazione.

Confinamento

Raggiungere le condizioni che soddisfano i criteri di Lawson, assicura che il plasma supera il **Breakeven**- il punto dove la potenza da fusione supera la potenza richiesta per scaldare e sostenere il plasma.

Le condizioni simultanee quindi sono per D-T:

Temperatura del plasma: (T) $1-2 \cdot 10^8 \text{K}$

Tempo di confinamento: (t) 1-2 s

Densità centrale di plasma: (n) $2-3 \cdot 10^{20}$ particelle m^{-3} ($\sim 0.001 \text{gr}/\text{m}^3$)

La potenza derivata dalla fusione è ridotta se il fuel è diluito con impurità di atomi o dall'accumulo di ioni He prodotti dalla reazione stessa. Man mano che il fuel di ioni è bruciato nel processo di fusione essi debbono essere rimpiazzati da nuovo fuel e l'He prodotto ("scoria") deve essere tolto.

Il tempo di confinamento è il tempo in cui l'energia è trattenuta nel plasma, praticamente è il rapporto tra l'energia termica contenuta nel plasma e la potenza richiesta per mantenere questa energia nel plasma

Il tempo di confinamento cresce di molto con le dimensioni del plasma, grandi volumi contengono meglio il calore di piccoli volumi.

Triple product

Il limite $n\tau$ e' funzione della T del plasma.

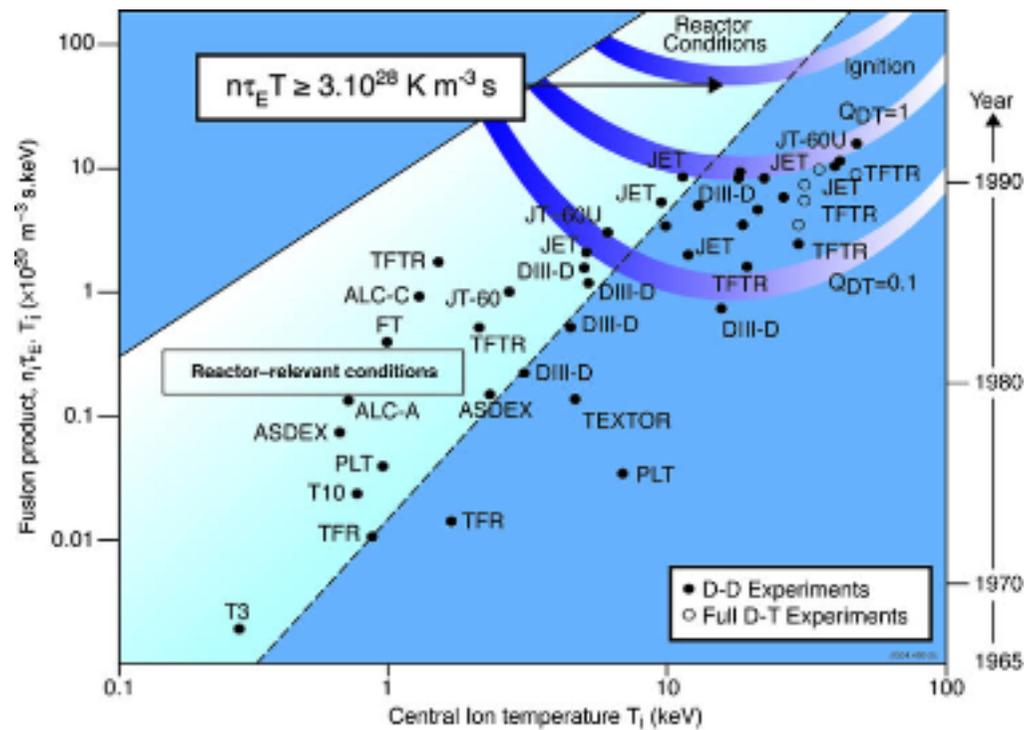
Per reazioni D-T, il limite $n\tau$ ha un minimo attorno a $3 \cdot 10^6$ K, ma col confinamento magnetico e' possibile ottenere $n\tau$ piu' grandi a temperature inferiori tra $1-2 \cdot 10^6$ K.

Questo significa che il prodotto triplo

$n\tau T$
fornisce un limite costante.

Questo limite e' chiamato "fusion product" e fissa il limite per ottenere fusione autosostenentesi al valore

$$n\tau T > 3 \cdot 10^{28} \text{K m}^{-3}\text{s}$$



Confinamento magnetico

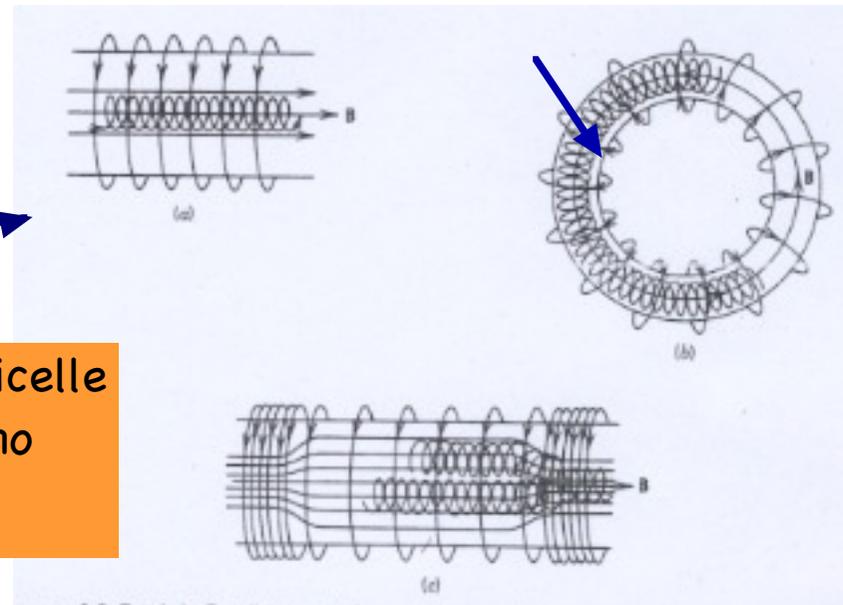
Campi magnetici sono utilizzati per isolare il plasma dalle pareti della vasca di contenimento. L'isolamento impedisce che il plasma venendo a contatto si raffreddi e che si "sporchi" con atomi alieni e quindi si raffreddi.

In un campo magnetico le particelle cariche del plasma sono forzate a spiralizzare lungo le linee del campo magnetico

Campo toroidale

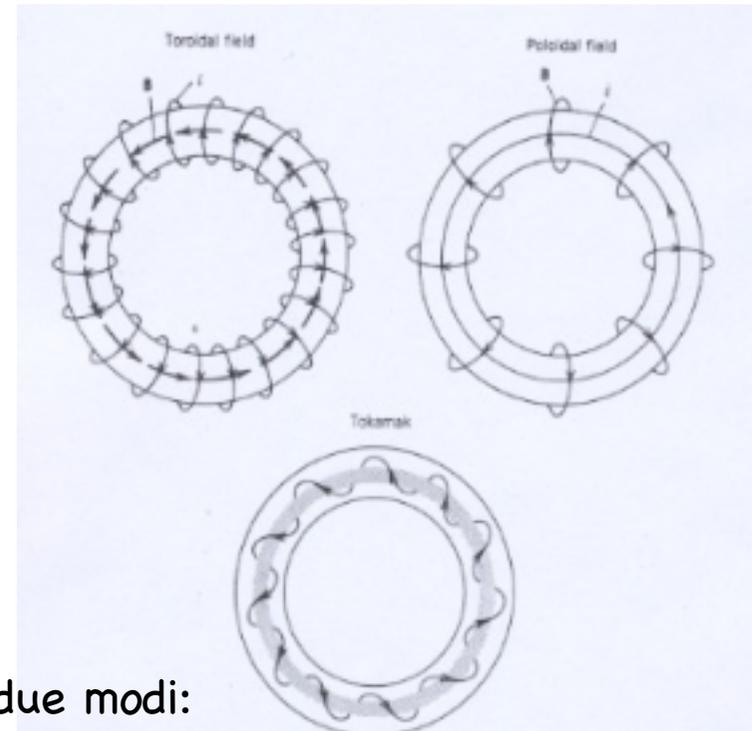
confinamento con campo uniforme assiale

in uno specchio magnetico le particelle seguono le linee del campo ma sono riflesse indietro dalla regione di alto campo



TOKAMAK

Il sistema di confinamento piu' promettente e' il sistema detto TOKAMAK (acronimo russo) in cui un campo magnetico toroidale si accoppia ad un campo magnetico poloidale. Il campo poloide ha lo scopo di confinare le particelle la centro della ciambella, altrimenti ci sarebbe dispersione perche' nel toroide il campo ai bordi e' piu' debole.



Il campo poloide puo' essere generato in due modi:

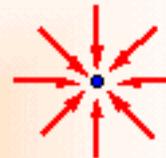
- attraverso un coil esterno (usato nello stellator)
- inducendo una corrente lungo l'asse del toroide attraverso il plasma stesso. La corrente e' indotta da avvolgimenti esterni che hanno la funzione di un primario di trasformatore.

La corrente in questo caso ha il duplice scopo di generare il campo magnetico e scaldare il plasma

JET (e ITER in futuro) sono i due Tokamak piu' grandi costruiti

☛ **FUSION using BEAMS (Inertial Fusion) :**

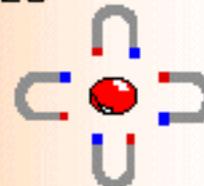
- compression of a millimetric target
- low volume
- high density : 10^6 x air density
- characteristic time : 10^{-11} s
- high temperature (100 millions of °K)



☛ **FUSION using MAGNETIC BOTTLES**

We try to confine particles

- high volume (1000 m³)
- low density : 10^{-5} x air density
- characteristic time : 10 s
- high temperature (100 millions de °K)

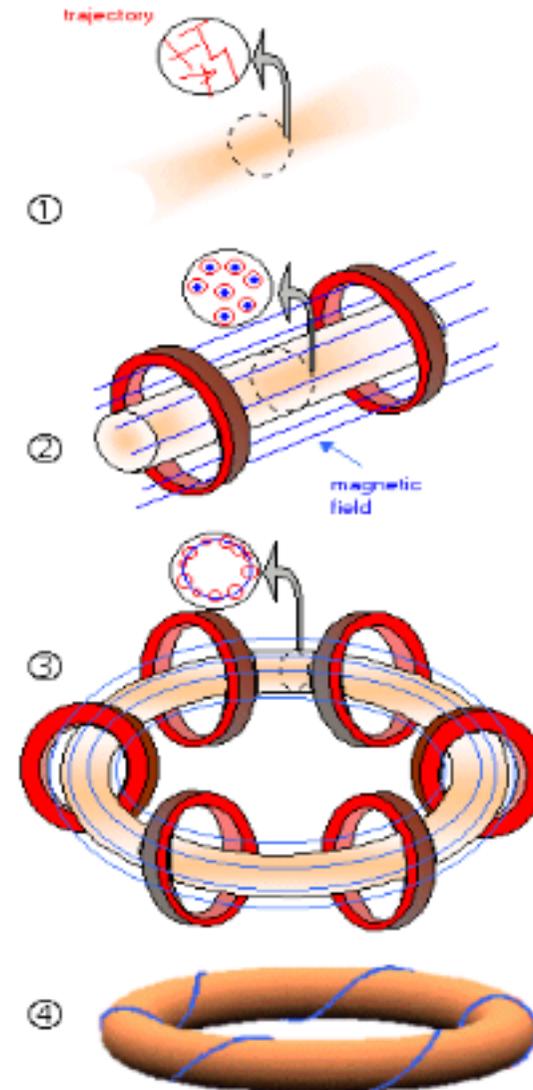


In order for the fuel in the form of plasma to produce enough thermonuclear reaction, it must be maintained in a limited volume and kept away from any structural material in order to maintain its high temperature. This is called confinement. In the free state of plasma, the particles' trajectory is random (picture 1 opposite) and the particles escape.

As the plasma is made up of charged particles, the magnetic fields may act on them. If this same plasma is bathed in a rectilinear magnetic field (picture 2), the particles wind around the field lines and will no longer touch the side walls.

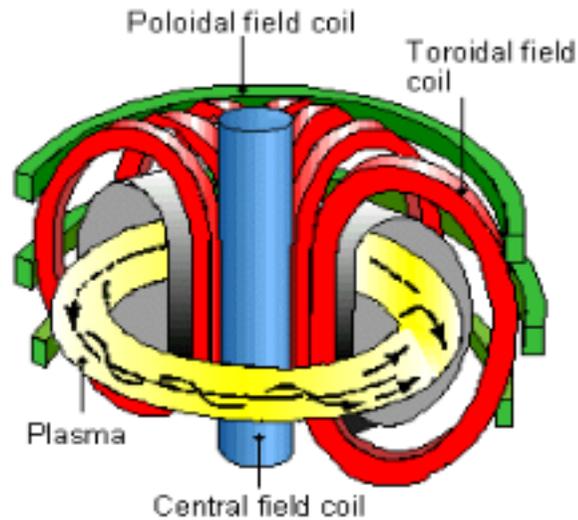
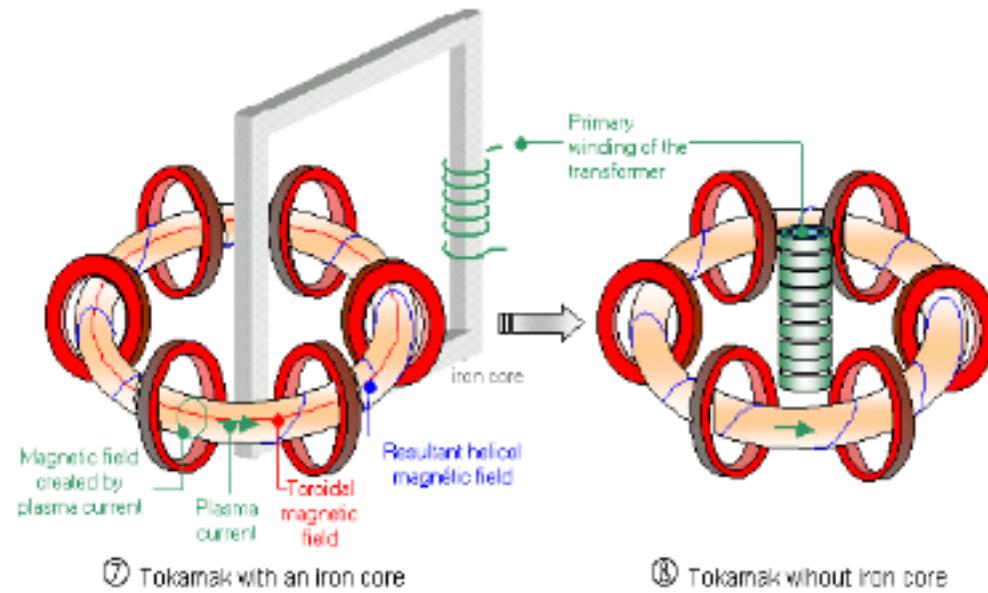
So as to avoid losses from the edges, we close off the magnetic bottle by creating a torus (picture 3). The magnetic field thus created by a series of magnets surrounding the plasma is called a toroidal magnetic field. The magnets generating this field are the toroidal magnets.

Here is shown that confinement is not quite enough and to minimise particle leakage even more, the field lines must be helicoidal (picture 4). This is achieved by adding another magnetic field to the toroidal field, which is perpendicular to it (the poloidal field). The method used to produce these helicoidal field lines has given birth to two types of machine:



The creation of plasma current

The basic means of producing this current consists in generating it by induction. We place a coil made up of horizontal layers in the centre of the configuration (the coil is placed in the "hole" of the torus). Using this coil, and provided that the current is varied, plasma current is created by induction exactly like in an electric transformer (picture 7). This type of operation may take place without an iron core (picture 8).

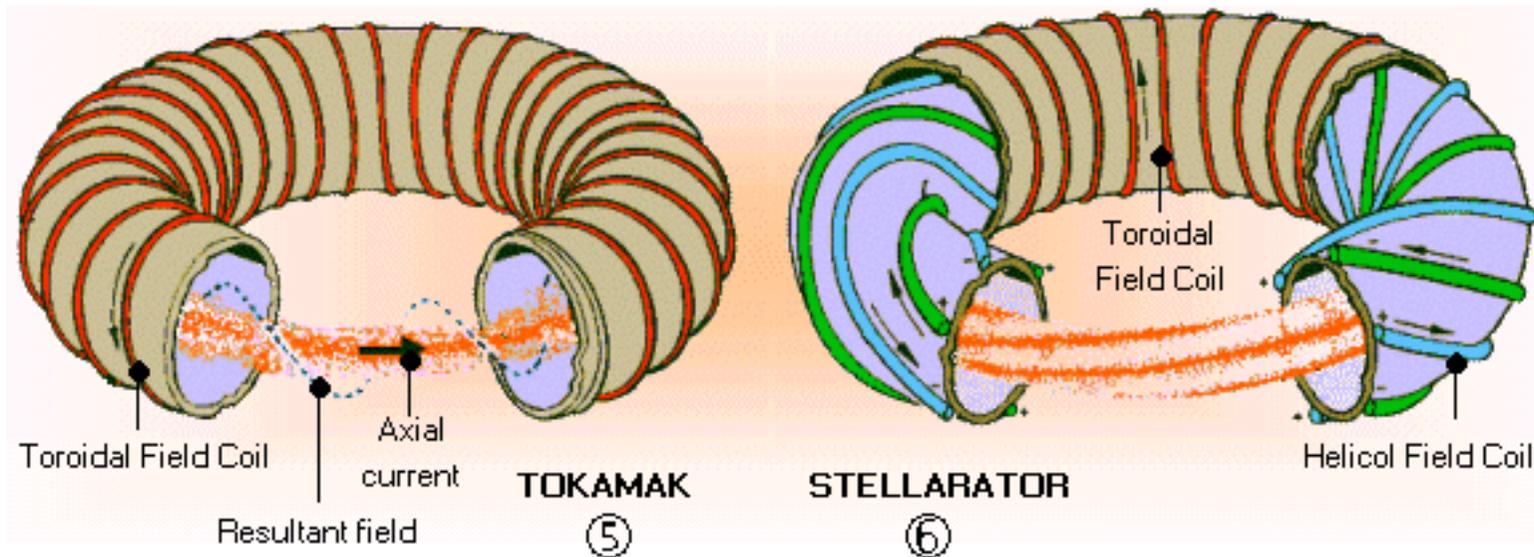


Stabilising plasma

The equilibrium of the plasma, its position, its shape and the control of the current are taken care of by the group of horizontal magnets called poloidal coils (picture opposite).

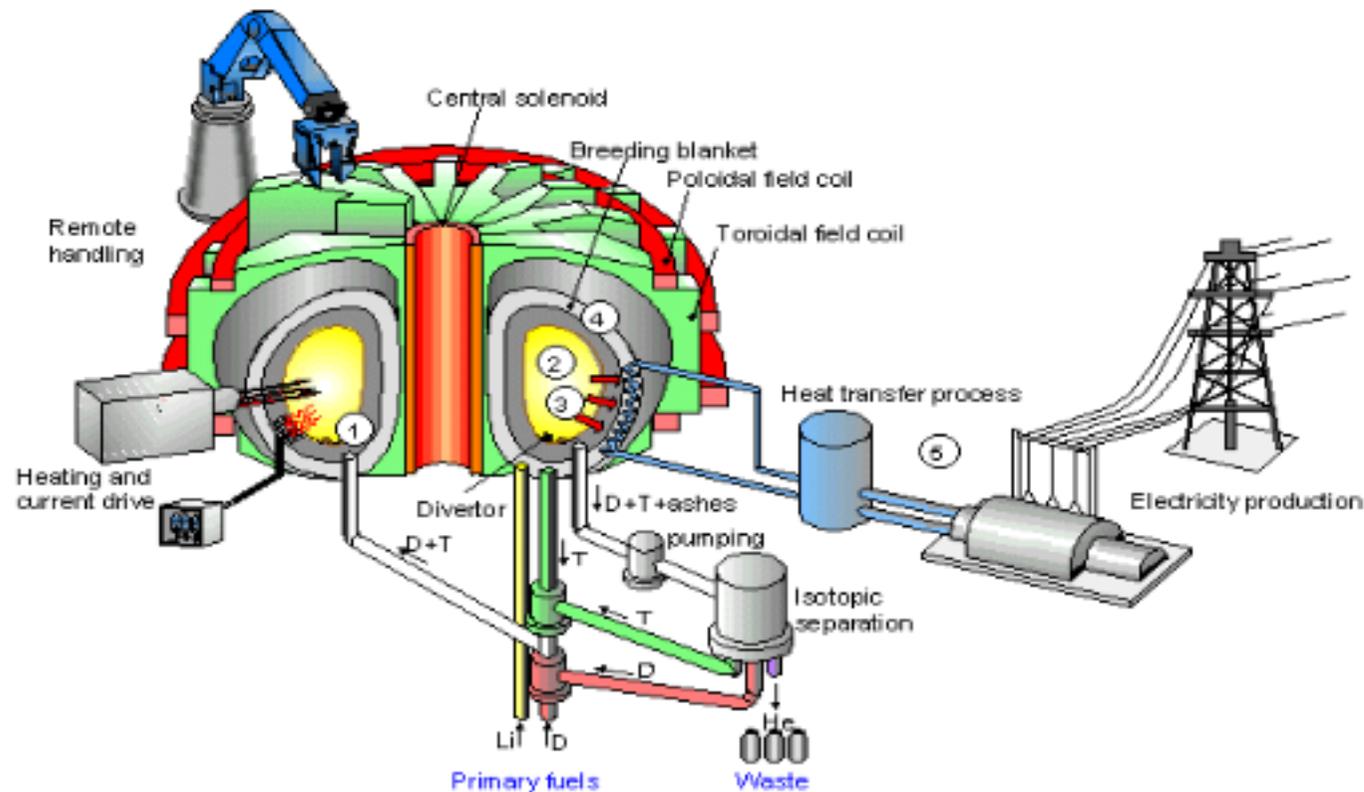
- In a « **tokamak** », an assembly of coils produces a magnetic field in the direction of the torus, to which is added the magnetic field created by an intense axial current flowing in the plasma itself. The two fields generate the helicoidal structure of the field lines (picture 5). This configuration has made considerable progress since its invention in the 1960s by Russian researchers. This is currently the path of research that is being studied the most (an example of a tokamak : [Tore Supra](#))

- In a « **stellarator** », magnetic configuration is entirely based on currents flowing in helicoidal coils (picture 6).

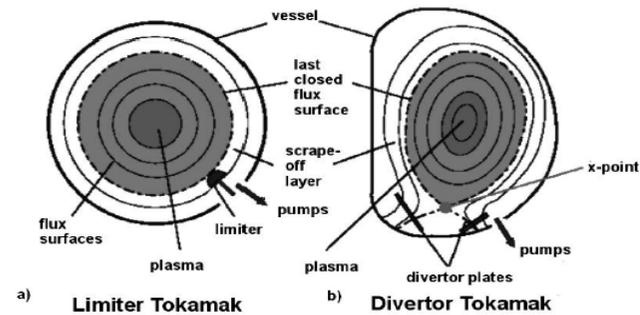
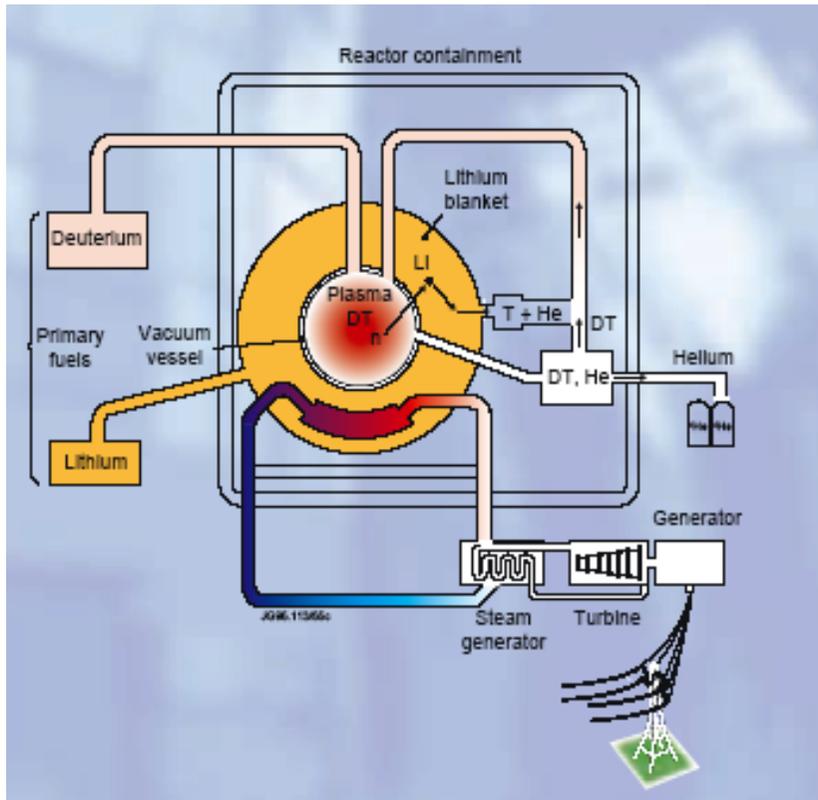


TOKAMAK FUSION REACTOR

The deuterium-tritium fuel mixture is injected (1) into a chamber, where, thanks to a system of confinement it goes into a plasma state and burns (2). In doing so, the reactor produces ash (helium atoms) and energy in the form of fast particles or radiance (3). The energy produced in the form of charged particles and radiance, is absorbed in a special component, the "first wall" which, as its name illustrates, is the first material element encountered by the plasma. The energy, which appears in the form of kinetic energy in neutrons, is, for its part, converted into heat in the [breeding blanket](#) (4) : which is the element beyond the first wall, but nevertheless inside the vacuum chamber. The vacuum chamber itself is the component enclosing the area where the fusion reaction takes place. The first wall, blanket and vacuum chamber are obviously cooled down by a heat extraction system. The heat is used to produce steam and supply a conventional turbine and alternator electricity producing system (5).



Tokamak fusion reactor



The fast neutrons (14.1 MeV) pass through the plasma containment wall and are stopped in a lithium blanket where they produce tritium.

Enriching the percentage of ${}^6\text{Li}$ enhances the tritium breeding ratio (TBR), which needs to be greater than 1 for self sufficiency. The ${}^7\text{Li}$ reaction produces a neutron which can make another T nucleus

Tritium breeding blankets

Role of blankets

In a tokamak, the blanket is the object situated immediately behind the first wall (Cf figure opposite).

Its main functions are as follows :

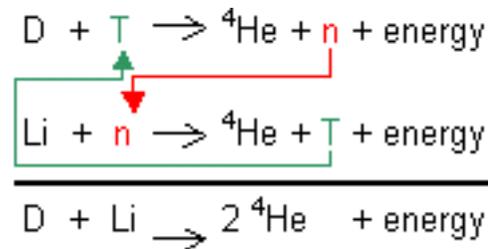
1. Protect the magnets and the vacuum vessel from neutron and gamma radiation.
2. Produce the tritium necessary for continued fusion reactions.
3. Convert neutron energy into heat and evacuate it to generate a cycle capable of supplying electricity.

These three functions may not be present at the same time (Cf chart below). In the first phase of [ITER](#) operation, only the 1st function is guaranteed (ie shield blanket). In a second phase of ITER operation, the 1st and 2nd functions are guaranteed (ie cold tritium breeding blanket). In the case of a reactor, functions 1, 2 and 3 are required (ie tritium breeding blanket).

	Current machines	ITER	Reactor
1 - Protection of magnets	x	x	x
2 - Production of Tritium		tests	x
3 - Converting neutron energy into heat			x

The "Production of Tritium" equation and notably reaching auto-sufficiency is a delicate balance. Performance in terms of auto-sufficiency is characterised by the TBR (Tritium Breeding Ratio). A TBR greater than 1 indicates that the blanket is auto-sufficiency.

The production of tritium is achieved through the reaction $n + {}^6\text{Li} \rightarrow \text{T} + \text{He}$. The lithium-based material may be in liquid (liquid metal like LiPb) or solid form (ceramic like Li_4SiO_4 or Li_2ZrO_3 or Li_2TiO_3), i.e. liquid or solid tritium breeding blanket. For solid blanket, auto-sufficiency necessitates use of a neutron multiplier like beryllium (for liquid blanket, lead in the tritium breeding material acting as multiplier).

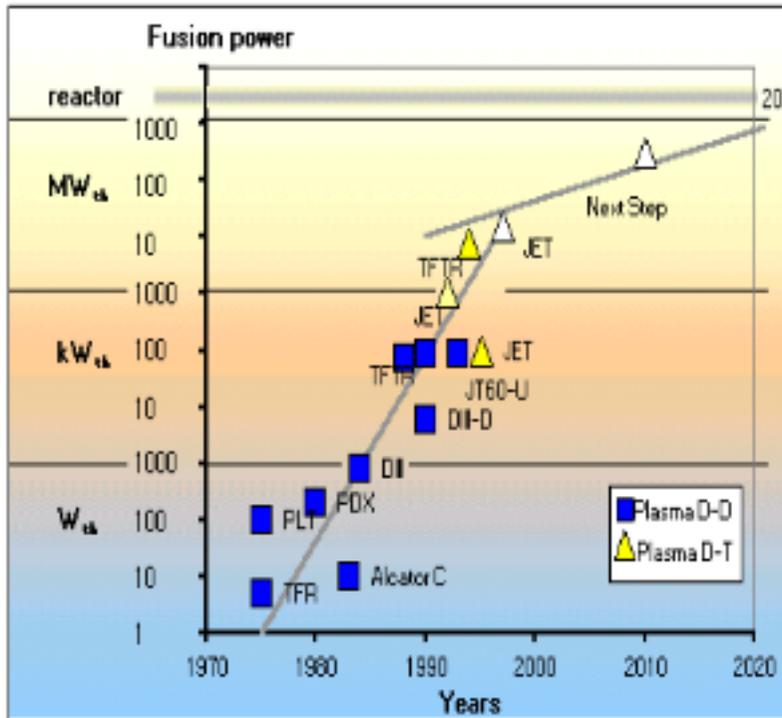


The fusion reaction

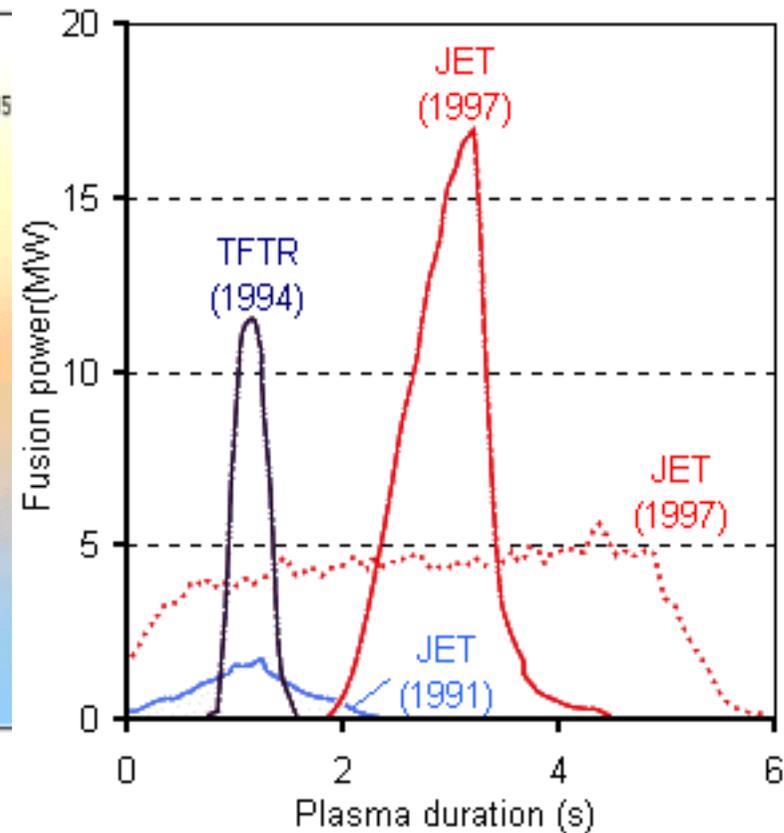
<-- PRODUCTION of tritium

The main results

Since the arrival of the tokamaks around 1970, plasma fusion power generated by various installations throughout the world has increased by 10,000 million. Many significant results have been obtained in all fields, whether in physics or in the technologies used.



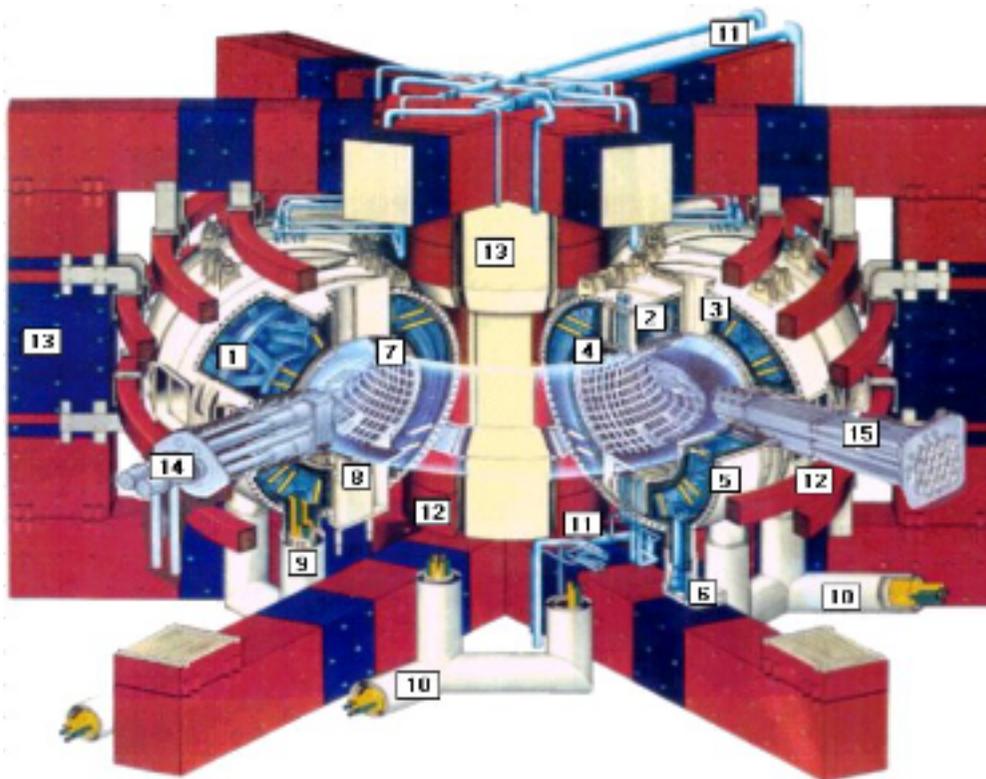
The progress in fusion power through the years



THE TORE SUPRA TOKAMAK

1 - General presentation

With a [major radius](#) of 2.25m (machine centre to plasma centre) and a [minor radius](#) of 0,70m, Tore Supra is one of the largest [tokamaks](#) in the world. Its main feature is the superconducting [toroidal magnets](#) which enable generation of a permanent toroidal magnetic field. Tore Supra is also the only tokamak with [plasma facing components](#) actively cooled. These two features allow the study of plasma with long pulse duration.

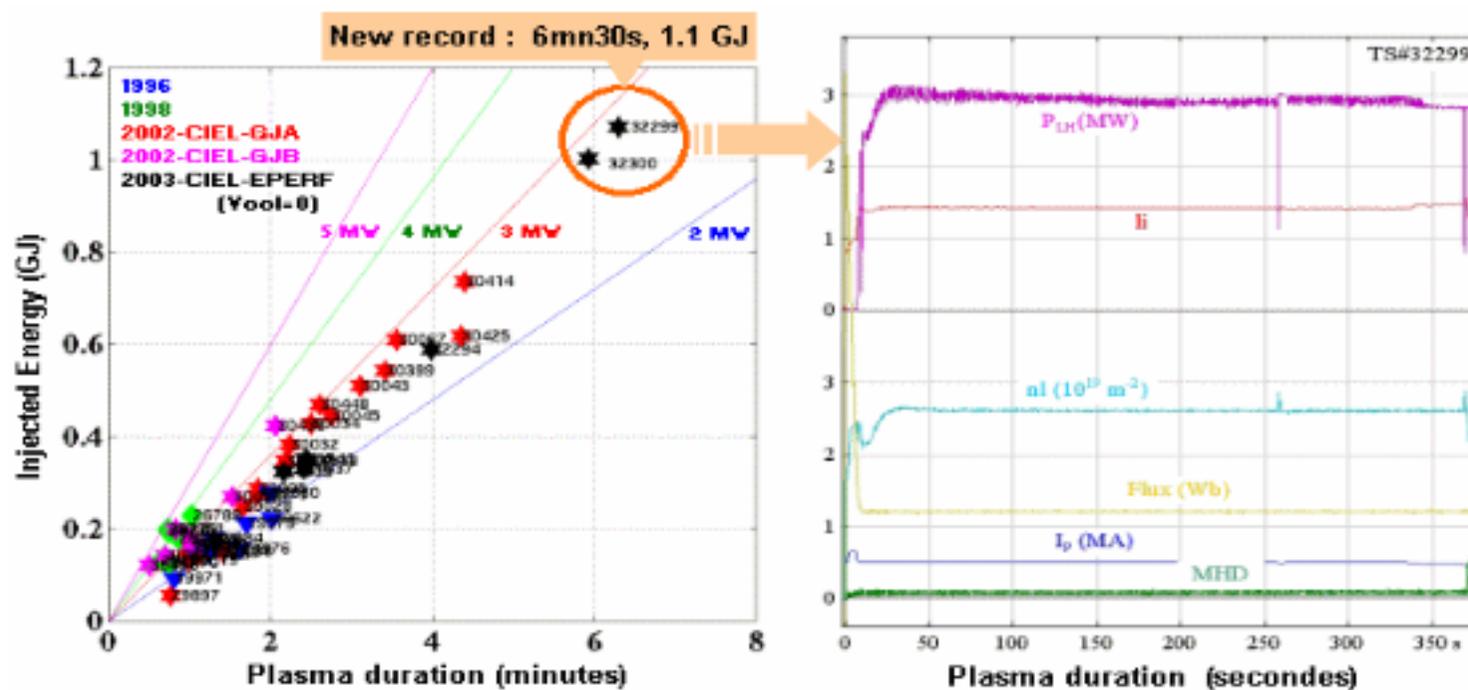


- 1.4°K mechanical structure of coils
- 2.Superconducting winding 1.8°K
- 3.80°K thermal screen
4. Cryostat, internal area at 220°C
- 5.Cryostat, external area at 20°C
- 6.Supporting pedestal for the cryostat and screens
- 7.First wall actively cooled to 220°C
- 8.Toroidal pumped limiter -
9. Cryogenic supply, 1.8 K, 4 K and 80 K
- 10.Towards exchanger, water pressurised at 220°C, 40 bars
- 11.et 12Poloidal field coils
- 13Magnetic circuit
- 14Heating antenna at ion cyclotronic frequency
- 15Heating antenna at lower hybrid frequency

6 - The main results

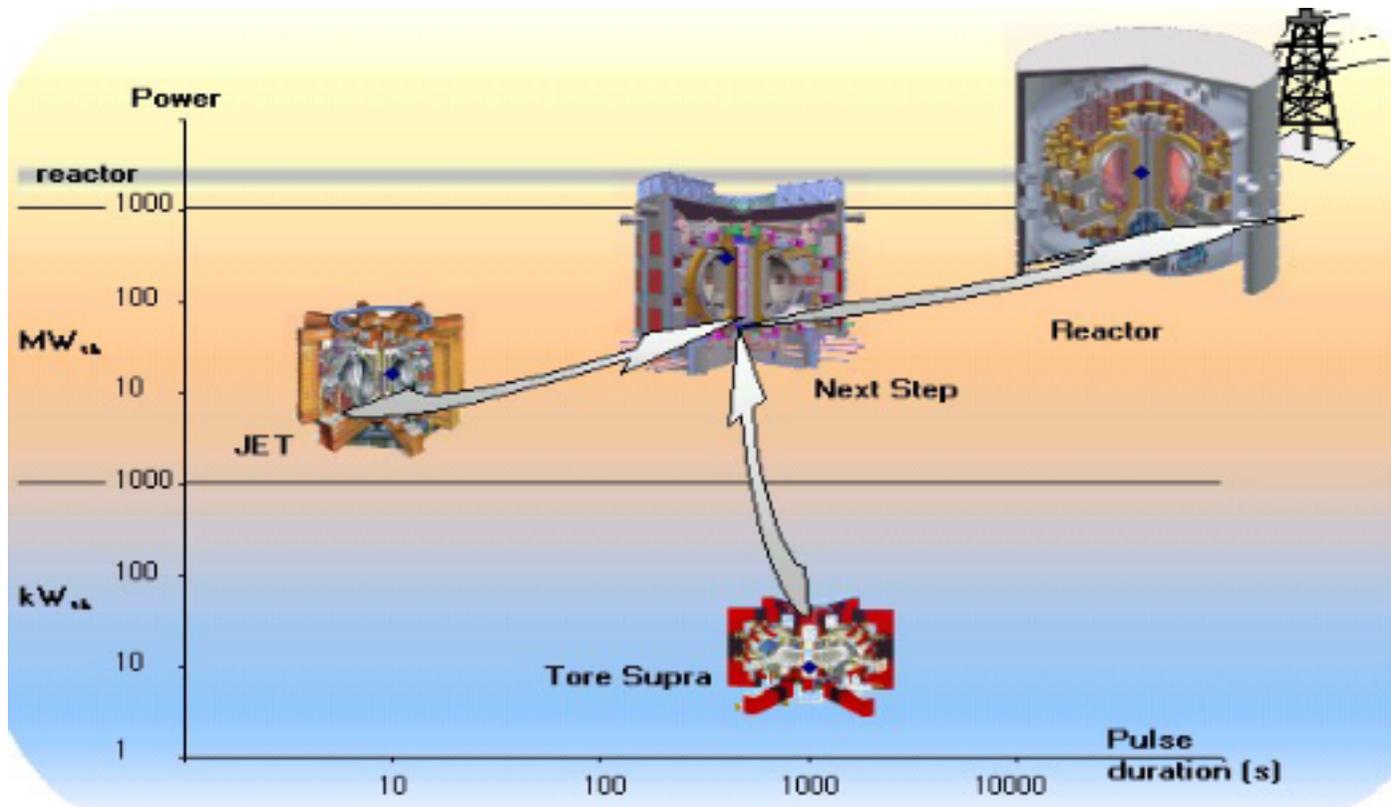
Tore Supra has been in operation since 1988 and has since this time produced more than 20 000 plasma discharges. Amongst the main breakthroughs achieved by Tore Supra are :

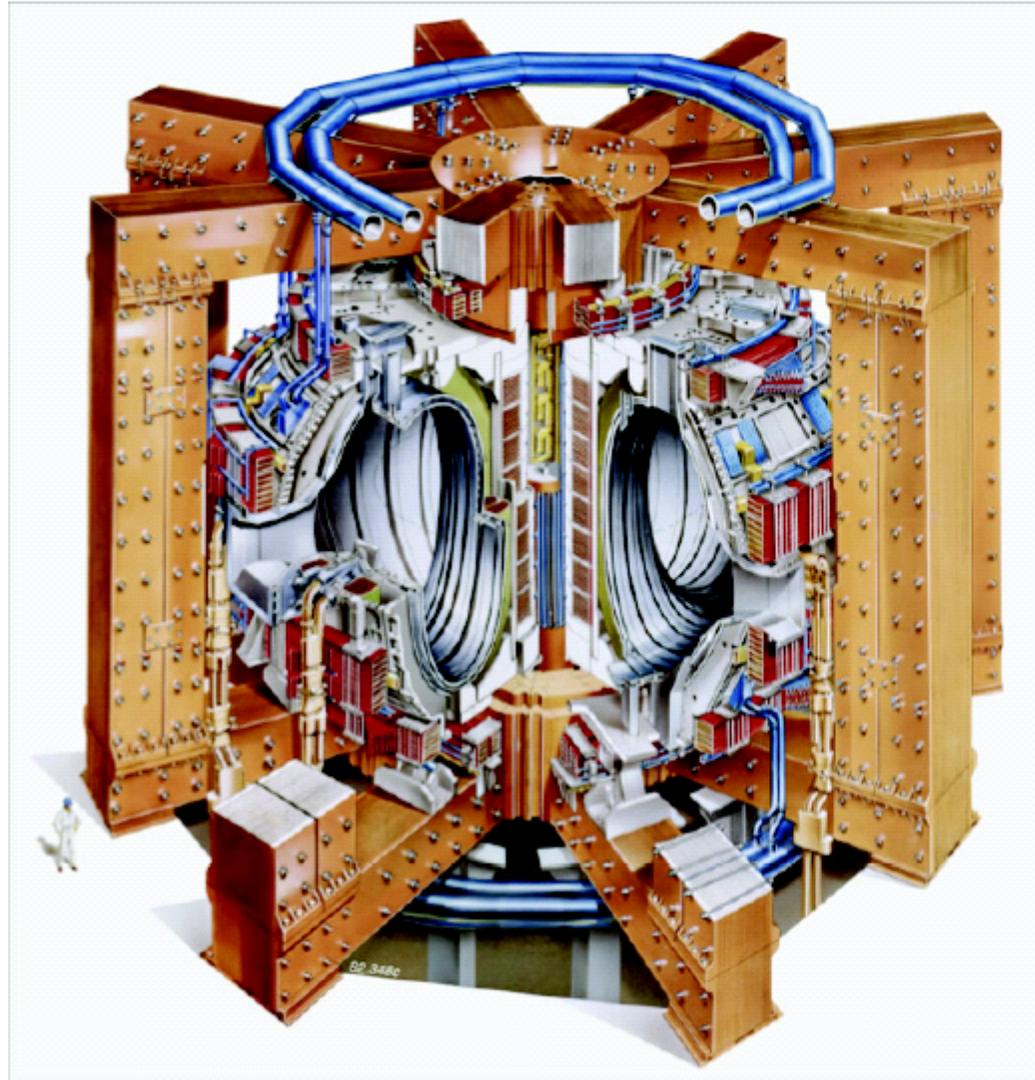
- The practically uninterrupted operation since 1988 of the Tore Supra superconducting magnet, which in itself is a great technological success and a considerable breakthrough for the controlled fusion programme and other industries.
- Mastery of long-duration plasmas (a record duration plasma of 6 minutes 30s achieved - 04/12/2003).



Long discharges in Tore Supra

If we exclude all the components dealing with energy production (breeding blanket for example), a reactor will look much like what an experimental installation of the next generation like [ITER](#) will be. This future installation will validate feasibility of energy production through thermonuclear fusion not only as regards physical principles but also as regards most of the main components within a reactor (huge superconducting magnetic coils for example). Performance in terms of plasma confinement required from an electricity generating reactor are only 4 or 5 times higher than the nominal performance of the [ITER](#) project. We can reasonably guess that the first electric kW produced by a thermonuclear fusion reactor prototype may see the light of day around 2050 that is to say about a hundred years after the initial research on controlled thermonuclear fusion. A period of a hundred years between the discovery of the concept and final use is not as unusual as that. After all, the discovery of the principle of solar cells goes back to 1839 (A. Becquerel) and the discovery of the principle of the fuel cell goes back to 1839 (W.R. Grove).





Simplified cutaway diagram of JET's tokamak

Riscaldamento del plasma

modi per scaldare il plasma:

- Ohmic heating

Una corrente di 5 MA
e' indotta , via trasformatori
o solenoidi

- Neutral Beam Heating

Fasci di ioni D o T sono accelerati
e poi neutralizzati per essere
immessi nel plasma (two step)
20 MW di potenza per calore.

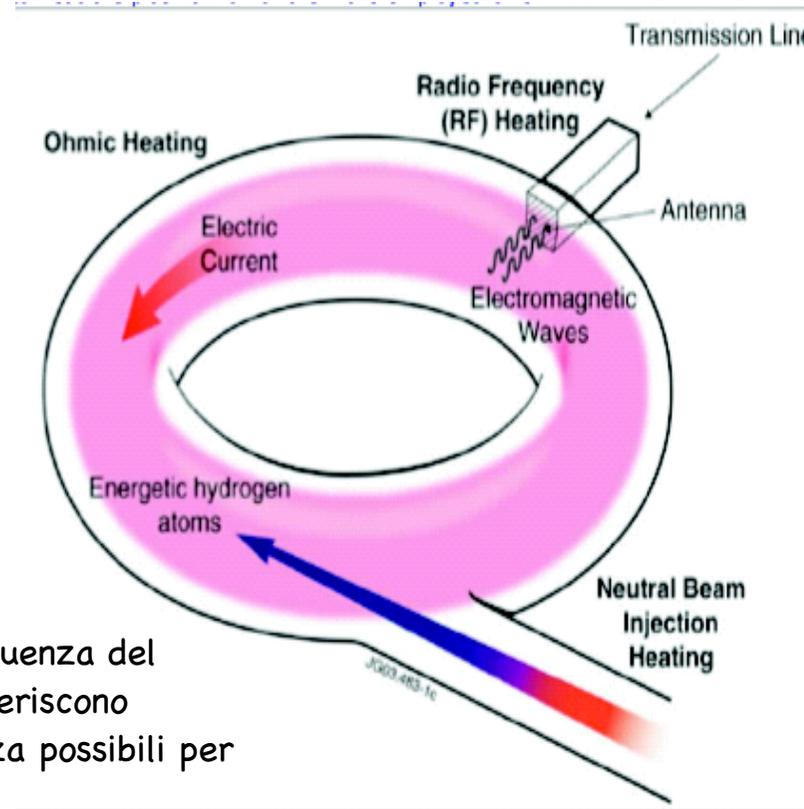
- Radio Frequency Heating

Onde em di frequenza pari alla frequenza del
plasma circolante risuonano e trasferiscono
energia al plasma, 20 MW di potenza possibili per
scaldare.

- Self Heating of Plasma

Le alpha prodotte nelle reazioni D-T cedono energia al plasma,
prima di essere fatte uscire dal plasma, divertor.

Quando c'è la condizione di self heating per sostenere la fusione. la condizione si
chiama ignition



Principle methods of heating a plasma

Misurare il plasma

Importante conoscere la T , densità e radiation losses per conoscere lo stato del plasma

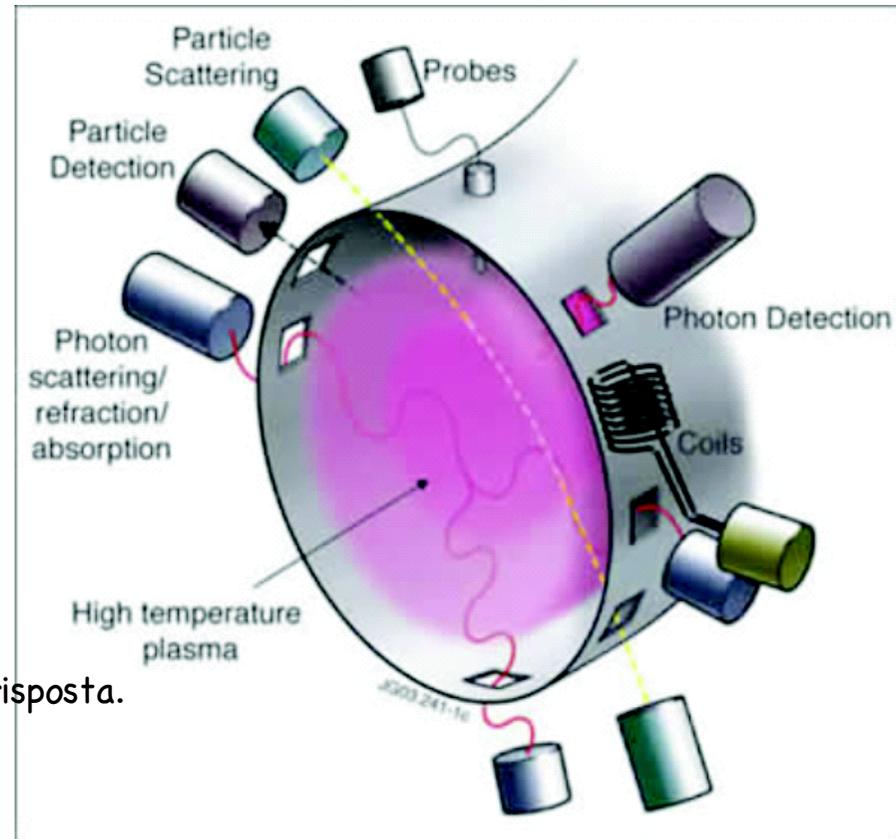
Il plasma, bassissima densità e alta T , contenuto in un vessel sotto vuoto, quindi difficile usare tecniche convenzionali.

2 tecniche:

-attive : il plasma è testato e si misura la risposta.

Microonde, laser, probes

Importante che il plasma non sia disturbato troppo



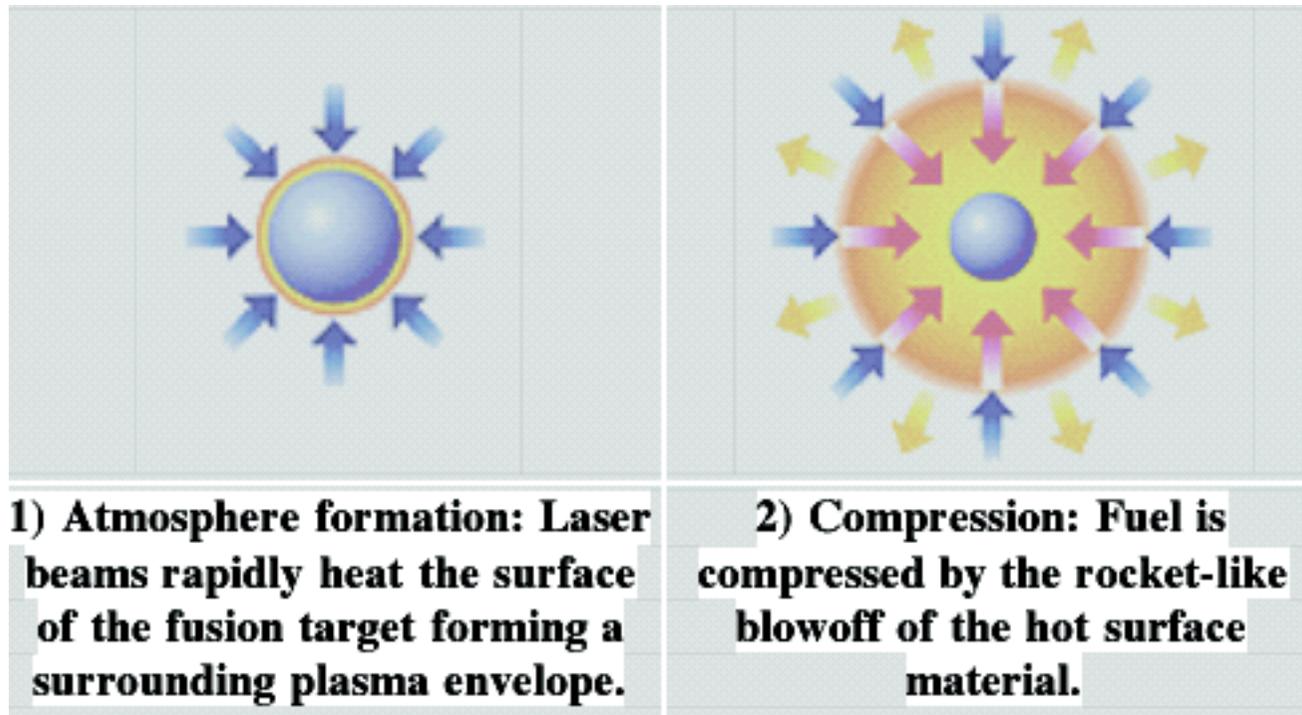
Some of the techniques used for measuring the properties of plasmas

e passive : si misurano le radiazioni (UV,X-ray, gamma, visibile) e le particelle, alpha, neutroni, che escono per capire lo stato del plasma

Inertial Confinement Fusion

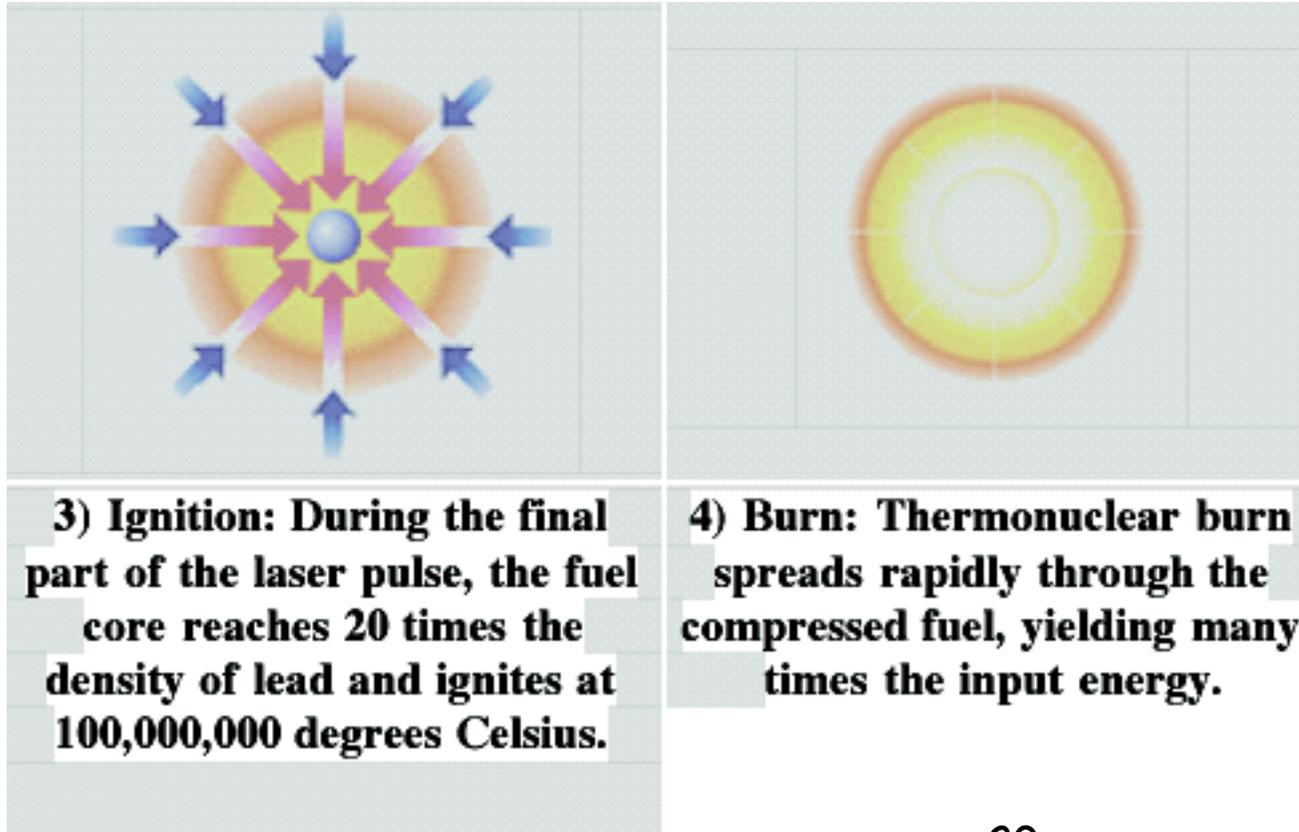
Alternativa alla fusione a confinamento magnetico la ICF utilizza per innescare le reazioni di fusione delle micro-esplosioni termonucleari attivate in piccole (~1-2 mm di diametro) sferette riempite con una mistura di fuel D-T.

Le sferette sono compresse ad una densità di 1000 volte quella di un normale liquido, usando intensi fasci laser o ionici che scaldano rapidamente la superficie delle sferette



- Laser energy
- Blowoff
- Inward transported thermal energy

Con la ICF e' necessario produrre una serie di impulsi molto brevi (~ 10 impulsi/s) per provvedere una energia costante



Ad es. la fusione completa di 1 mg di D-T ($2.4 \cdot 10^{20}$ atomi) libera ~350 MJ di energia; se un reattore IFC opera a 10 microesplosioni/s, ciascuna consumante 1 mg di fuel, questo significa 3.5 GW di potenza bruta, che sara' assorbita dal rivestimento termico e trasformata in

I parametri importanti nella ICF sono:

- il tempo di confinamento
- il fattore di compressione.

Il prodotto deve essere grande abbastanza per dar modo al materiale di innescare la fusione prima che i nuclei reagenti si allontanino.

Sia il caso, favorevole, di una miscela D-T reagenti a $kT = 20 \text{ KeV}$

Il tempo di confinamento τ è determinato dalla velocità relativa degli ioni (scaldati) e dal raggio r delle capsule compresse.

A 20 KeV , $v \approx 10^6 \text{ m/s}$ ed r del fuel compresso non sarà più di 0.2

con una stima del tempo di confinamento τ di $r/v \approx 10^{-10} \text{ s}$ (100 ps)

Il criterio di Lawson vale anche per la ICF quindi $n\tau = 3 \times 10^{19} \text{ s m}^{-3}$

$$n \approx 3 \times 10^{29} \text{ m}^{-3}$$

questa densità è 10 volte la densità atomica di un liquido convenzionale o idrogeno solido, il vantaggio è che per la fusione si richiede solo abbastanza energia per portare l'energia media di un atomo di D o T a 20 KeV .

Performance della ICF

Indicatore della performance ITC e' la frazione f di fuel consumato in un tempo t .

rate di consumo degli atomi di fuel $\frac{dn}{dt} = -2R$

R = rate di reazioni
2 nuclei/reazione

$n(t)$ =n. atomi
al tempo t , $n_1=n_2$ $\frac{dn}{dt} = -\langle\sigma v\rangle n^2(t) / 2$

Al tempo $t=\tau$ i nuclei rimasti $n(\tau)$ sono $-\int_0^\tau \frac{dn(t)}{n^2(t)} = \frac{1}{n(\tau)} - \frac{1}{n} = \frac{1}{2}\langle\sigma v\rangle\tau$

sostituendo $f = 1 - n(\tau) / n$ $n\tau = \frac{2f}{(1-f)\langle\sigma v\rangle}$

con $f=30\%$ e prendendo per $\langle\sigma v\rangle=4.5 \cdot 10^{-22}\text{m}^3\text{s}^{-1}$, per D-T a 20 KeV, si ricava $n\tau \sim 2 \cdot 10^{21}\text{m}^{-3}$.

con $\tau \sim 100\text{ps}$ la densita' deve essere portata a $\sim 2 \cdot 10^{31}\text{m}^{-3}$

Fattore 1000 meno della densita' normale; quindi per consumare 1/3 del fuel di una sferetta il raggio deve essere compresso di un fattore 10.

Side effect

La compressione del fuel ottimizza, d'altra parte, il rendimento energetico delle α , prodotto della reazione D-T.

Infatti il range di una α , in unita' di massa e per unita' di area (range in unita' di lunghezza per densita') e' indipendente dalla densita' e quindi $\rho x = \rho' x'$.

Come il materiale e' compresso la sua densita' cresce e quindi il range x' decresce. La α sara' fermata molto vicino al punto di formazione e scambiare la sua energia con il fuel ed iniziare un'altra reazione di fusione.

Così e' solo necessario iniziare la fusione in una piccola zona centrale della sferetta che la reazione termonucleare si espanderà dal centro verso l'esterno, come un'onda sferica.

L'energia richiesta per "accendere" una sferetta di 1 mm di diametro ad una temperatura di 10 KeV per particella

$$E_{th} \sim \frac{4}{3}\pi(0.5\text{mm})^3 \times 10^{29} \text{m}^{-3} \times 10^4 \text{eV} \approx 10^5 \text{J}$$

significa che bisogna fornire una energia di 10^5J in $\sim 10^{-9} \text{s}$ per una potenza netta di 10^{14}W .

Tenendo conto di inefficienze(laser efficiente $\sim 1\%$) e perdite si puo' stimare che la richiesta sia di 10^{17}W da confrontarsi con 10^{12}W di potenza della intera rete degli USA!!!

Il fatto e' che quella potenza e' richiesta solo per un tempo brevissimo, $t < \text{ns}$.

Accensione con acceleratore

Alternativamente si potrebbe usare, come trigger per la fusione, fasci di particelle cariche.

L'energia deve essere depositata principalmente sulla superficie delle capsule in modo da attivare l'implosione delle medesime.

Questo fissa in pratica il range energetico delle particelle.

Se materiale esterno e' spesso 0.1 mm di materiale con alto Z l'energia di un fascio di protoni deve essere di 5 MeV circa.

Per una energia in input di ~7.7 MJ, con un'efficienza del 10% nel cedere energia ad 1 mg di fuel per un valore medio per atomo di 20 KeV il numero di protoni incidenti deve essere

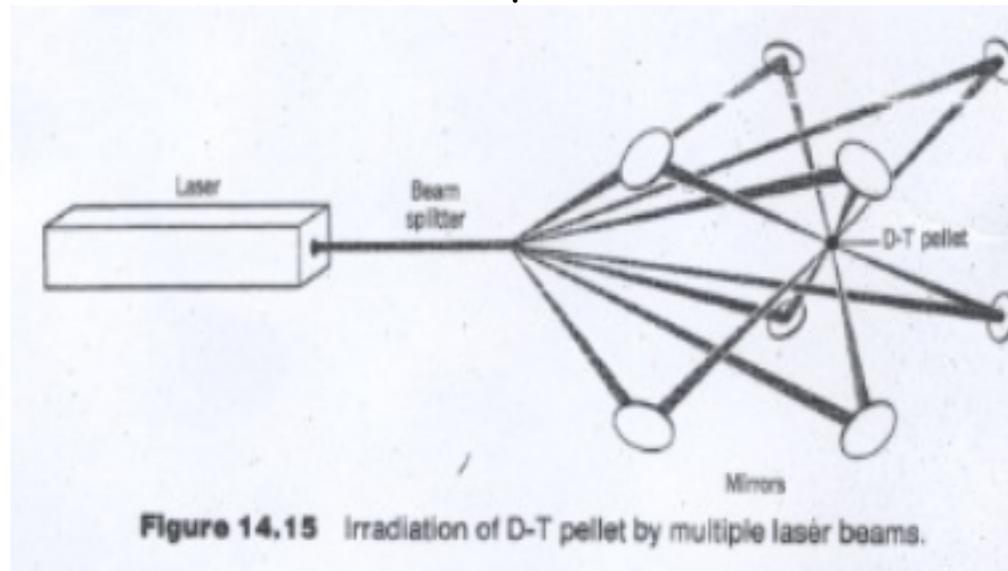
$$n_p = \frac{7.7 \times 10^6}{5 \times 1.6 \times 10^{-13}} \approx 10^{19}$$

che sparati in ~100ps significa una corrente dell'impulso di piu' di 10^{19} A!

Il programma di ricerca su ICF va avanti soprattutto negli USA

Impiego di raggi laser per attivare la ICF

La sorgente laser fornisce un raggio di grande intensità che viene moltiplicato mediante uno splitter e i raggi concentrati con precisione da una serie di specchi sulla sferetta di fuel.



Problemi riguardano la precisione del punto di concentrazione, gli specchi e la precisione temporale di incidenza.