



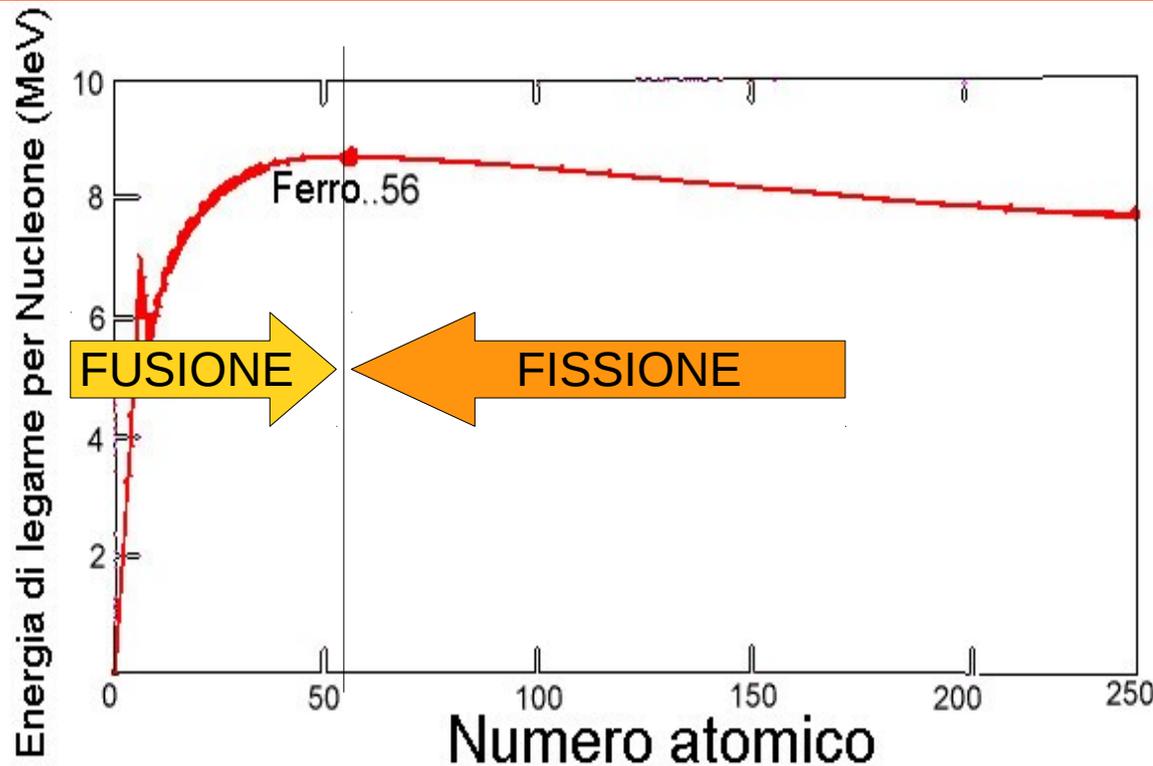
**scienza attiva<sup>®</sup>**

I processi di **fusione nucleare** e le loro applicazioni  
per la **produzione di energia**

Ivan Gnesi

INFN

# I processi di Fusione Nucleare: un fenomeno naturale



Nella figura viene riportata l'energia di legame per i diversi nuclei, in funzione del loro numero di massa (somma dei neutroni e dei protoni). E' evidente come i due processi di FUSIONE e FISSIONE siano energeticamente convenienti nelle due regioni indicate.

L'unita' di misura utilizzata e' l'elettronvolt (eV)

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

$$1 \text{ MeV} = 1.6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$$

I nuclei atomici sono composti da protoni e neutroni (nucleoni). L'energia di legame dei nuclei dipende dal numero di nucleoni che costituiscono il nucleo.

Il nucleo piu' stabile e' quello del ferro (56 nucleoni, 26 protoni e 30 neutroni).

In natura tutti i sistemi fisici tendono a raggiungere lo stato di massima stabilita'.

Per questo motivo, i nuclei di elementi piu' leggeri del ferro tendono a fondersi e a formare nuclei piu' stabili (FUSIONE NUCLEARE), mentre quelli piu' pesanti del ferro tendono a "rompersi" in frammenti piu' piccoli e quindi piu' stabili (FISSIONE NUCLEARE).

Ogniqualevolta avviene un processo di FUSIONE o FISSIONE NUCLEARE, l'energia di legame guadagnata viene liberata sotto forma di energia cinetica.

### Curiosita':

Nei processi nucleari e' possibile misurare l'energia di legame attraverso la nota equivalenza di massa ed energia  $E=MC^2$ : la massa dei nuclei risulta essere infatti inferiore alla massa della somma dei protoni e neutroni che li costituiscono, di una quantita' uguale all'energia di legame del nucleo stesso. Questo ammanco viene denominato DIFETTO di MASSA.

# La repulsione Coulombiana, un ostacolo per la Fusione Nucleare e come il Sole la risolve

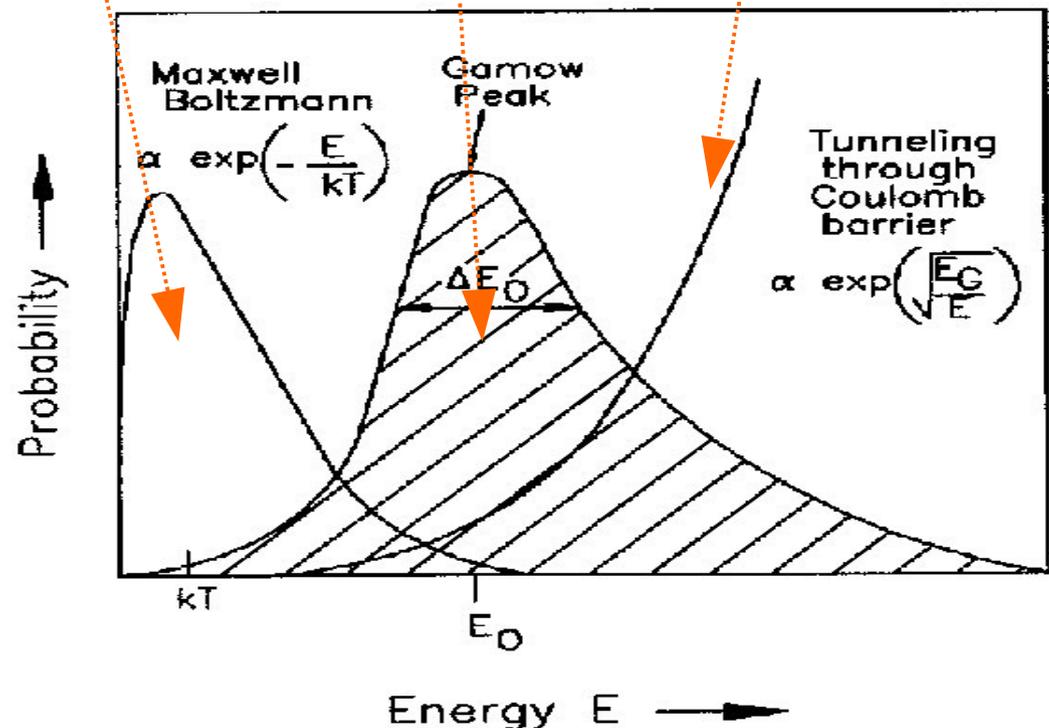
La FUSIONE tra nuclei e' ostacolata dalla carica coulombiana positiva dei protoni che costituiscono i nuclei reagenti. Essa provoca repulsione tra i due nuclei coinvolti nel processo di FUSIONE. Inoltre, la repulsione coulombiana dovuta alle cariche elettriche dei nuclei e' piu' importante, a distanza tipiche interatomiche ( $10^{-10}\text{m}$ ) rispetto all' interazione nucleare, che favorisce invece i processi di FUSIONE e FISSIONE. L'interazione nucleare diventa dominante rispetto alla repulsione coulombiana a distanze tipiche delle dimensioni dei nuclei ( $10^{-14}\text{m}$ ).

Le regioni interne delle stelle sono luoghi in cui avvengono naturalmente reazioni di FUSIONE. Le temperature tipiche in queste regioni profonde sono dell'ordine dei milioni di gradi. Cio' significa che almeno una parte degli urti tra nuclei avvengono ad energie tali da poter superare la barriera coulombiana e raggiungere distanze per le quali la fusione diventa il processo energeticamente conveniente. Questo avviene solo per gli urti tra nuclei che popolano la coda destra della distribuzione delle velocita', in caso contrario le stelle esploderebbero ed avrebbero vite molto brevi.

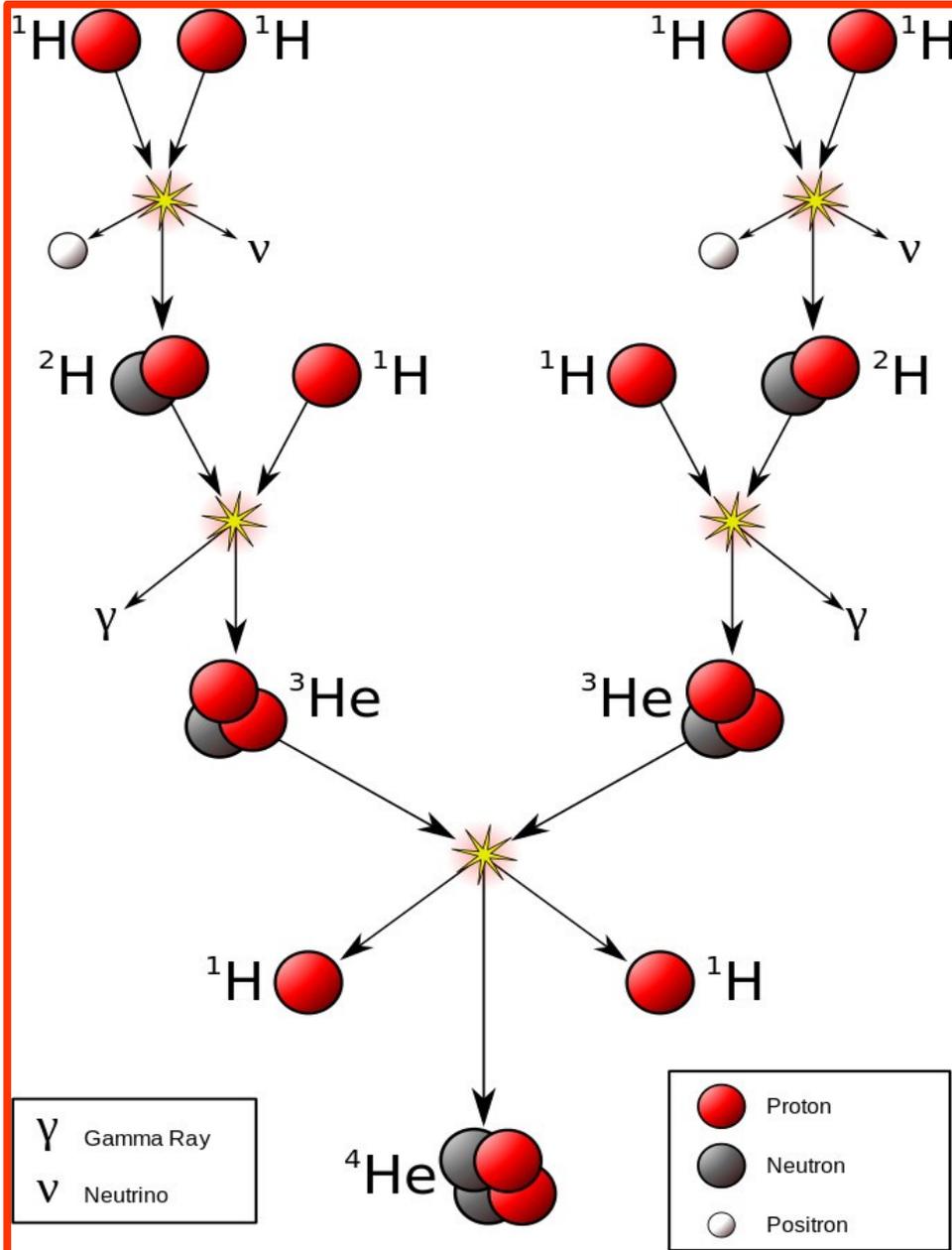
Nella figura vengono riportate:

- ✓ La distribuzione delle energie dei nuclei (ad es. all'interno di una stella) alla temperatura T
- ✓ La probabilita' di superare la barriera coulombiana per nuclei alle diverse energie
- ✓ I nuclei che effettivamente fanno processo di FUSIONE

Il picco di Gamov rappresenta l'energia alla quale i nuclei hanno maggiore probabilita' di andare incontro a FUSIONE



# Il Sole, il reattore a fusione naturale piu' vicino: qualche informazione



All'interno del Sole le condizioni di temperatura e densita'

$$T \sim 15.7 \cdot 10^6 \text{ K}$$
$$P \sim 150 \text{ kg/dm}^3$$

sono tali da rendere possibile la fusione di circa

$3.5 \cdot 10^{38}$  protoni al secondo ( $10^{-19}$  volte la sua massa)

producendo l'energia di  $10^{18}$  centrali nucleari

Tutto cio' e' possibile solo grazie alle temperature raggiunte nelle regioni centrali, grazie alla **compressione gravitazionale** prodotta dalla sua massa,  $M \sim 2 \cdot 10^{30} \text{ Kg}$  (300000 volte il nostro pianeta).

Questi dati sono interessanti per comprendere quali siano i **parametri fisici** che producono le maggiori **difficolta'** nel raggiungere e mantenere processi di **FUSIONE** nucleare in laboratorio.

La **catena di fusione** principale all'interno del Sole – ma non la sola – e' quella riportata nella figura a sinistra, dove, a partire da **4 protoni** si ottiene il **piu' stabile dei nuclei leggeri, l'elio**. E' interessante notare come la catena che porta alla formazione dell'elio sia in realta' complessa e sia un processo a diversi stadi.

# Fusione in laboratorio: un problema di confinamento

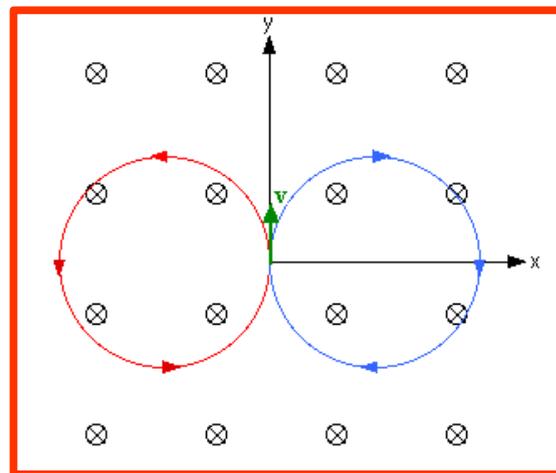
I principali problemi legati all'ottenimento di FUSIONE in laboratorio sono legati alle seguenti difficoltà:

1. **confinare** in un volume ridotto una **grande quantità di nuclei**,
2. **ionizzarli** (privarli degli elettroni)
3. e fornire loro un'energia di agitazione termica (che equivale ad innalzare la loro temperatura) al di sopra della **barriera coulombiana** per permettere il processo di FUSIONE

La prima idea di utilizzare un **campo magnetico per confinare** un plasma di ioni ed elettroni (ottenuto riscaldando un gas) risale al **1940**.

Grazie alla **Forza di Lorentz**, che un campo magnetico esercita su di una **particella carica in movimento**, i nuclei atomici **spiraleggiano** attorno alle linee di campo e vengono **"schiacciati"** tanto di più quanto più sono **veloci** (quindi quanto più è alta la loro temperatura).

Il primo **prototipo di REATTORE a FUSIONE** è di **Spitzer** e venne realizzato nel **1951** in una versione lineare. Si trattava di un **cilindro con campo magnetico uniforme solenoidale**, cioè con linee di campo lungo l'asse del cilindro, mentre più tardi (~1960) venne introdotta la **configurazione TOROIDALE**, la cui prima versione venne chiamata **STELLARATORE** (volendo essere un tentativo di riprodurre i processi di fusione nelle stelle)



# Il confinamento e l'ignizione della fusione

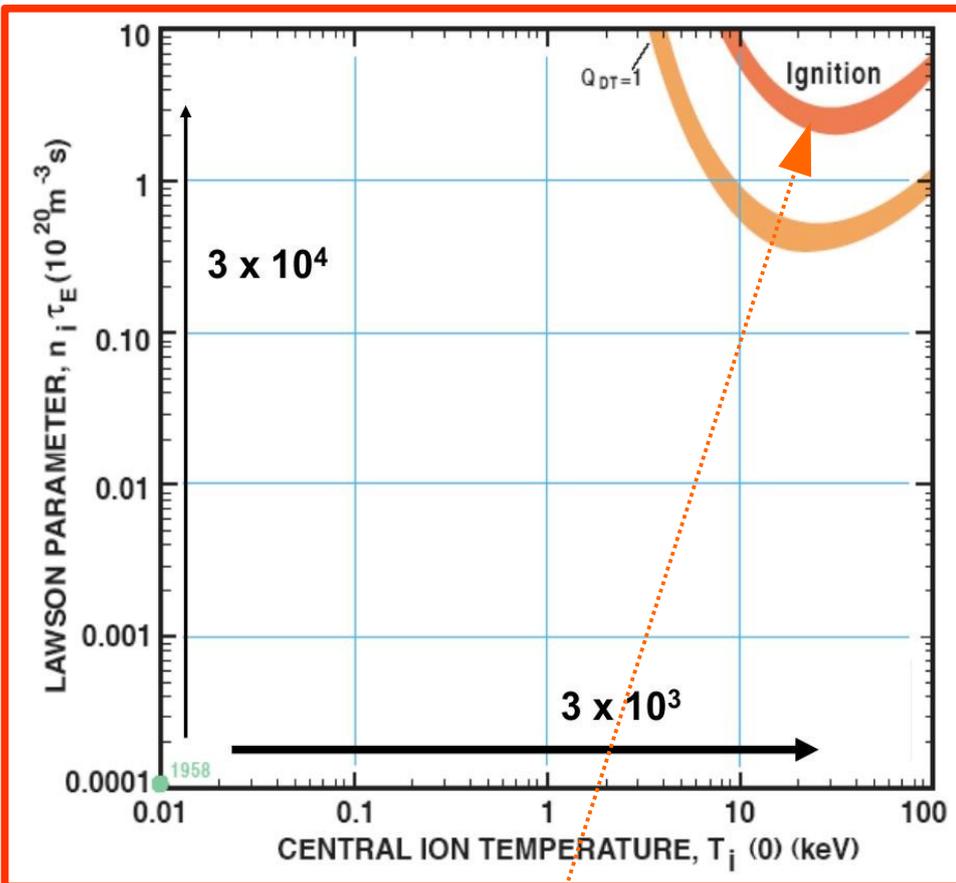


Diagramma di Lawson: sull'asse verticale il prodotto della densita' e del tempo di confinamento del plasma ( $n\tau$ ), sull'asse orizzontale la temperatura (in eV).

Solo ad alte temperature ( $\sim 10$ - $100$  keV) e per alte densita' e tempi di confinamento il fenomeno di FUSIONE diventa autosostentante

Gia' dai primi tentativi finalizzati alla realizzazione di reattori per la FUSIONE, fu subito chiaro che diversi processi fisici caratteristici dei plasmi di ioni ed elettroni ad alta temperatura ostacolavano il raggiungimento dell'ignizione della FUSIONE, cioe' le condizioni fisiche del plasma alle quali la FUSIONE si autosostenta e non ha bisogno di fonti esterne di energia per avvenire. In particolare

- La non-omogeneita' del campo magnetico
- Gli urti tra ioni in fase di compressione attorno alle linee di campo magnetico.

producevano fenomeni di diffusione degli ioni, tendendo quindi a diminuirne la densita' (diffusione di Bohm) e a contrastare l'ignizione del processo di fusione. Oltre a questi, anche altri effetti collettivi concorrevano ad ostacolare l'ignizione: queste problematiche diedero impulso agli studi in un campo di ricerca relativamente nuovo: la Magnetoidrodinamica (MHD).

D'altra parte gia' nel 1957, Lawson aveva definito i criteri fondamentali per il raggiungimento dell'ignizione:

- Alta densita'  $n$  ed alto tempo di confinamento del plasma,  $\tau$
- Alta temperatura  $T$  (per superare la barriera coulombiana)

# La rottura del limite di Bohm e i Tokamak

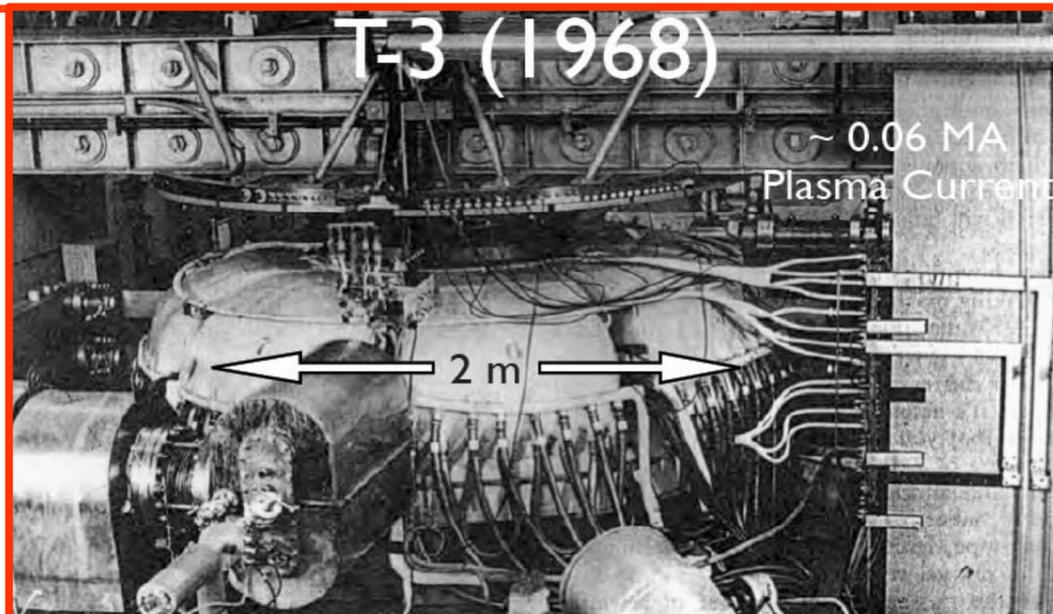
Nel 1968 al Kurchatov Institute (Russia) viene ottenuto un incredibile risultato. Per la prima volta la temperatura in una macchina raggiunge valori prossimi a quelli attesi per l'ignizione e il tempo di confinamento del plasma diventa piu' lungo del tempo di diffusione di Bohm: la possibilita' di arrivare all'ignizione non sembra piu' cosi' remota.

$$T_{\text{plasma}} \sim 1 \text{ keV} \quad \tau_{\text{confinamento}} \sim 30 \tau_{\text{diffusione}} \quad (25 \text{ volte quella ottenuta agli stellaratori di allora})$$

La macchina per fusione si chiamava T-3, ed era un TOKAMAK un reattore con una configurazione di campo magnetico di nuova concezione, diversa da quella degli stellaratori.

In seguito a questo successo, durante gli anni '70 vennero costruiti molti TOKAMAK e convertiti diversi stellaratori a questa nuova configurazione magnetica,

TFR, JFT-2a, Alcator A, Alcator C, ORMAK, ATC, PLT, DITE, DIII, PDX, ASDEX... nel tentativo di migliorare ancora il risultato e testare nuove tecnologie.



# Confinamento magnetico e i TOKAMAK

I TOKAMAK sono macchine con una configurazione di campo magnetico risultante dalla somma di tre componenti:

## ■ Campo toroidale

E' indotto dalla corrente che passa negli avvolgimenti attorno al toroide (in verde nello schema a fianco).

Le linee di campo sono parallele all'asse che passa all'interno del toroide (cerchi sul piano orizzontale).

E' il principale responsabile del confinamento del plasma all'interno del Tokamak.

Il campo toroidale **decresce** con la distanza dall'asse verticale seguendo la legge  $1/r$ .

Per questo motivo e' necessaria una seconda componente di campo magnetico che stabilizzi il plasma e contenga la sua deriva verso l'esterno del toro

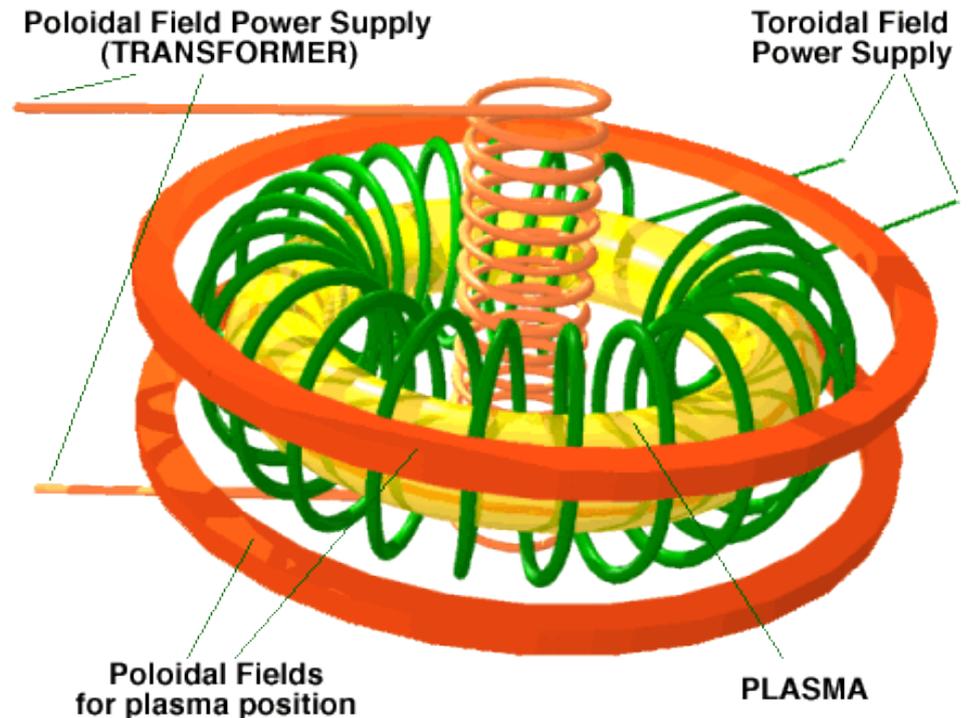
## ■ Campo poloidale

E' indotto dalle correnti che passano nei conduttori toroidali (in arancio nello schema di destra).

Le linee di campo sono linee chiuse che risiedono sui piani verticali che tagliano il toroide in sezioni trasversali.

Il solenoide centrale induce la componente principale del campo poloidale, mentre i grossi conduttori circolari ne controllano l'intensita' rispetto alla distanza dall'asse verticale del toro, determinando di fatto la **posizione radiale del plasma**.

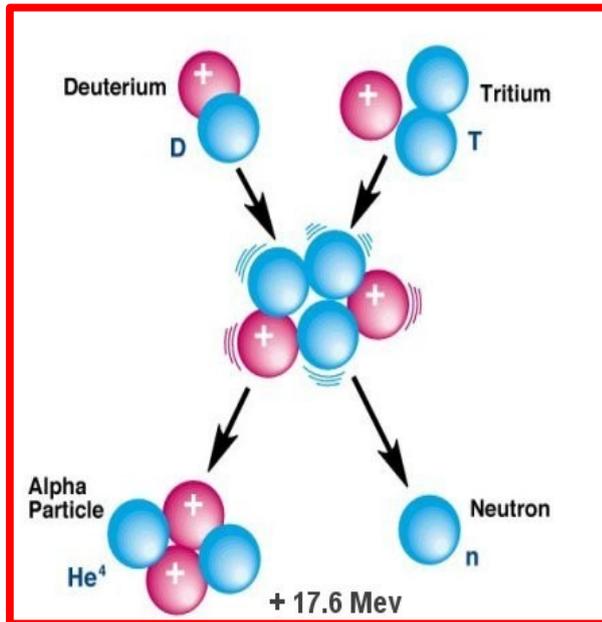
Il campo nel suo complesso assume una **geometria ad elica**, con la quale si sono ottenuti i **migliori risultati di confinamento** fino ad oggi.



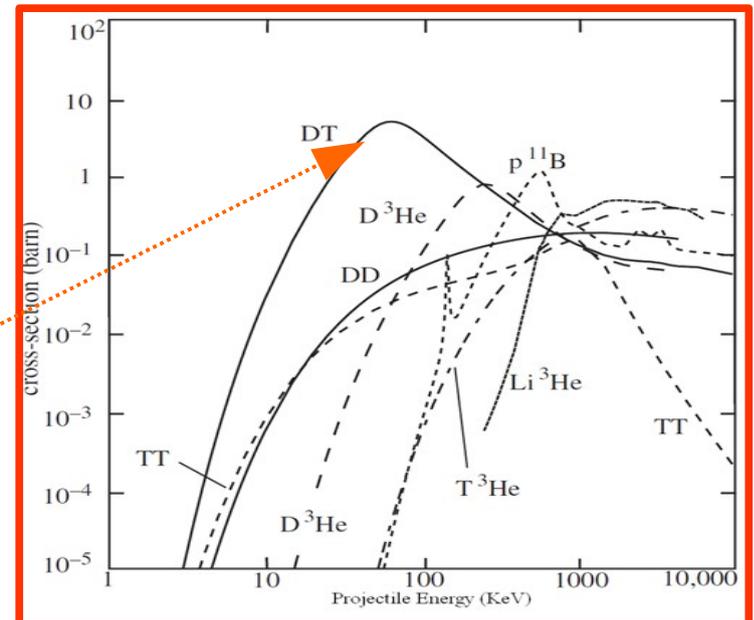
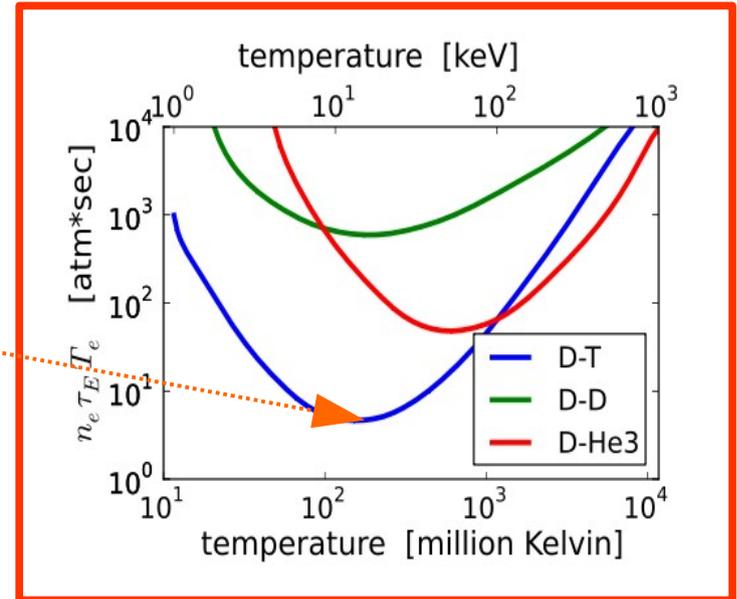
# I TOKAMAK: quali nuclei fondere?

La fusione di 4 protoni in un nucleo di elio, principale reazione termonucleare nelle stelle, e' particolarmente difficile da far avvenire in un Tokamak, a causa delle condizioni estreme di confinamento e temperatura che si dovrebbero raggiungere.

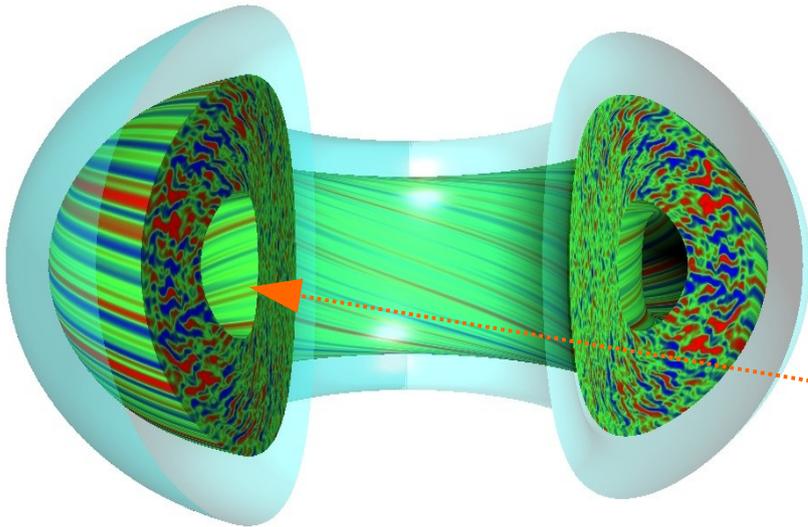
Se osserviamo il prodotto  $n_e n_T T_e$  (densita', tempo di confinamento, temperatura del plasma) in funzione della temperatura, ci accorgiamo che esso assume il valore minimo per l'ignizione a temperature piu' basse nel caso della reazione di fusione



Infatti, per la natura stessa delle forze nucleari, responsabili delle reazioni di fusione, la probabilita' di fusione e' massima a temperature inferiori rispetto ad altre reazioni, per la fusione di deuterio e trizio.



# I TOKAMAK: ... la seconda generazione



## L'osservazione dell' H-mode

Il 4 febbraio 1982 al Tokamak ASDEX del Max -Planck Institute di Garching (Monaco), Fritz Wagner osservò un effetto atteso ma mai ottenuto: un **aumento** importante del **confinamento del plasma** (chiamato H-mode) in seguito all'**iniezione di atomi neutri nel fascio**.

Questa scoperta costituisce un passo fondamentale verso la costruzione di Tokamak sempre più vicini all'ignizione.

## La sezione del Tokamak

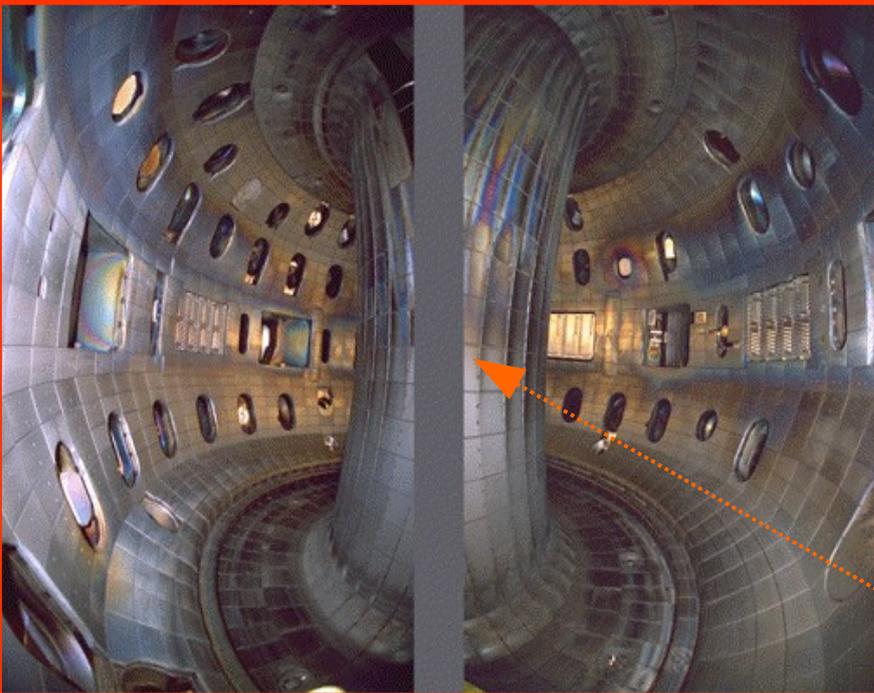
Nello stesso periodo diversi studi di Magnetoidrodinamica rivelano come una **sezione non circolare** favorisca una configurazione del campo magnetico che tende a **diminuire** le diffusioni, le **instabilità del fascio** e ad aumentare il confinamento del plasma.

## Il parametro $\beta$ e i problemi di scala:

In questi anni diventa chiaro che il raggiungimento dell'ignizione è possibile solo mediante la costruzione di **macchine di dimensioni maggiori**. Gli sforzi sono quindi concentrati nel risolvere i problemi di instabilità che si incontrano progettando Tokamak e Stellaratori sempre più grandi. In particolare Troyon pone le basi per portare su **grandi scale** il **parametro di stabilità  $\beta$**  che descrive il rapporto tra pressione magnetica e la pressione termica nel plasma.

Nasce quindi una seconda generazione di Tokamak:

**DIII-D, AUG, JT-60U, PBX, Alcator C-Mod**



# I TOKAMAK: riscaldare il plasma alla temperatura delle stelle ...

La necessita' di raggiungere temperature del plasma dell'ordine delle decine di milioni di gradi ( $\sim 10\text{-}100\text{ keV}$ ) per ottenere FUSIONE richiede lo sviluppo di sistemi di riscaldamento del plasma:

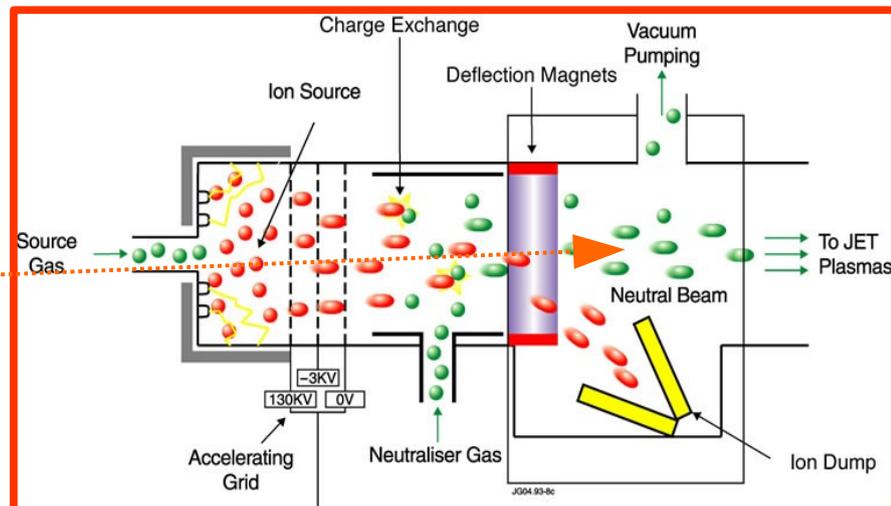
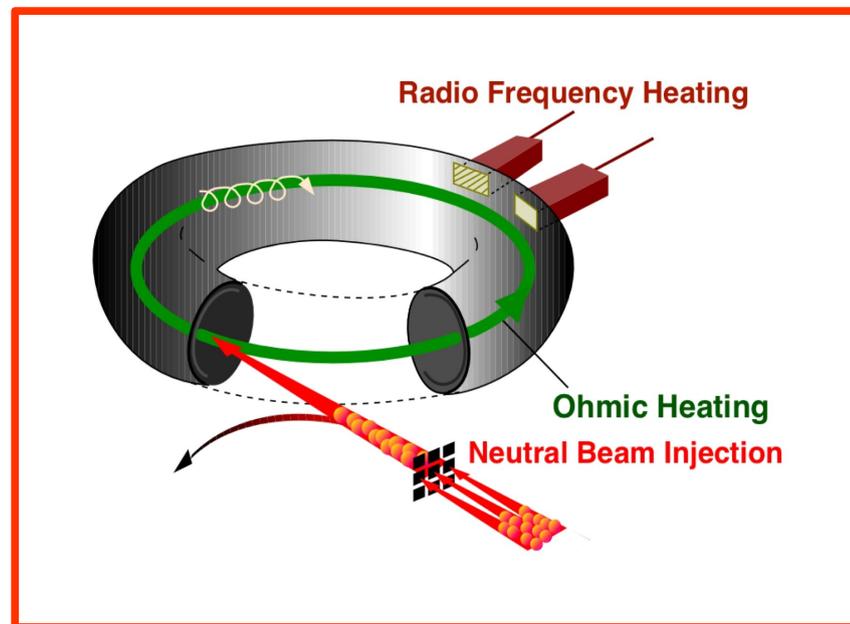
- **Riscaldamento ohmico:** viene ottenuto tramite il solenoide che produce il campo toroidale, mediante l'incremento del flusso di corrente nel solenoide stesso.

Il plasma si comporta come il secondario di un trasformatore. Questo sistema introduce pero' una limitazione importante al Tokamak: le fasi di riscaldamento devono essere impulsive, il reattore non puo' funzionare in modo continuo.

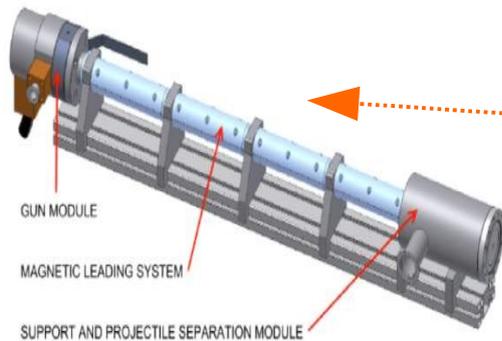
- **Riscaldamento a radio-frequenza:** si irradia il plasma con onde elettromagnetiche della frequenza propria di rotazione degli elettroni o degli ioni (frequenza di ciclotrone) all'interno del toro.

Questo sistema, efficace per il riscaldamento, introduce instabilita' all'interno del plasma e ha richiesto studi approfonditi per il suo utilizzo in Tokamak sempre piu' grandi e vicini all'ignizione.

- **Iniezione di atomi neutri ad alta energia:** atomi vengono ionizzati e accelerati da un campo elettrico; ne si ripristina poi la carica elettrica neutra e li si lascia entrare nel flusso del plasma. Qui vengono nuovamente ionizzati per urto con il plasma ed entrano a far parte del plasma stesso. Il plasma si scalda in seguito agli urti con questi ioni, che trasferiscono il loro eccesso di energia.



# I TOKAMAK: ... la tecnologia per la fusione progredisce...



A cavallo degli anni '90 nascono nuove tecnologie per il rifornimento del plasma e si studiano più a fondo le problematiche legate alla progettazione di un reattore realistico per la produzione di energia.

Il rifornimento di combustibile tramite iniezione di pellet:

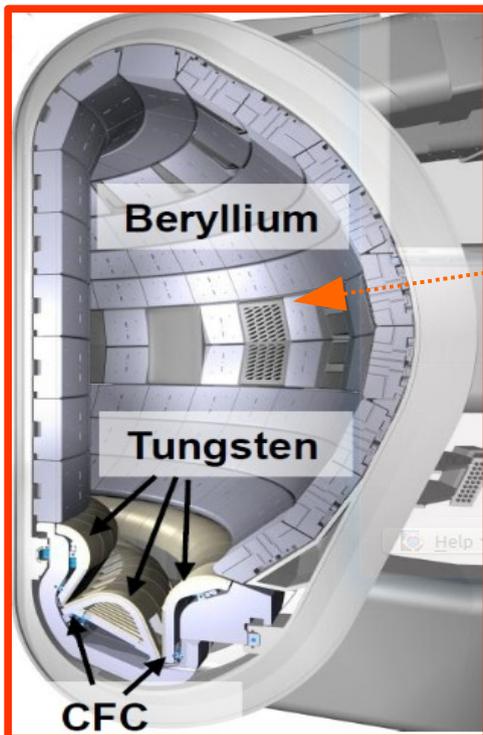
Al fine di rimpiazzare il combustibile "bruciato" si creano dei **pellet** (delle dimensioni del millimetro) di **trizio e deuterio** a temperature molto basse ( $10\text{ K} \sim -263\text{ °C}$ ). I pellet vengono successivamente **iniettati** tramite **delle pistole a pressione** all'interno del plasma, a velocità dell'ordine del  $\text{km/s}$ , dove ionizzano ed entrano a far parte del plasma in confinamento.

Si studiano i materiali PFC (Plasma Facing Components)

Le alte temperature del plasma tendono a **degradare le pareti del toroide** ed in generale tutte le componenti del Tokamak con le quali viene accidentalmente a contatto. Sebbene il confinamento magnetico riduca l'impatto del plasma su di esse, questo non è assente, in particolare per i prodotti di fusione, tra cui i **neutroni**, non confinabili mediante campo magnetico.

I materiali più utilizzati sono **Carbonio, Tungsteno e Berillio**, i quali presentano

- **Alta conducibilità termica**
- **Bassa reattività chimica** con deuterio, trizio e elio del plasma (non formano gas volatili)
- In caso di reazione nucleare con il flusso di neutroni da fusione, producono **isotopi a bassa vita media**, quindi scorie non pericolose.

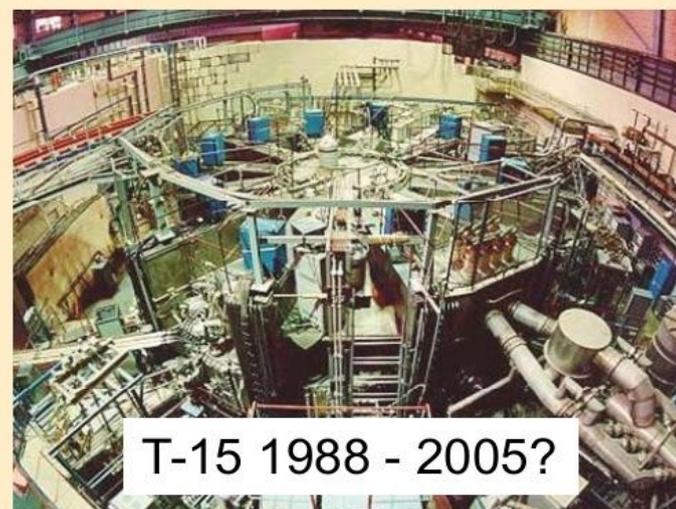
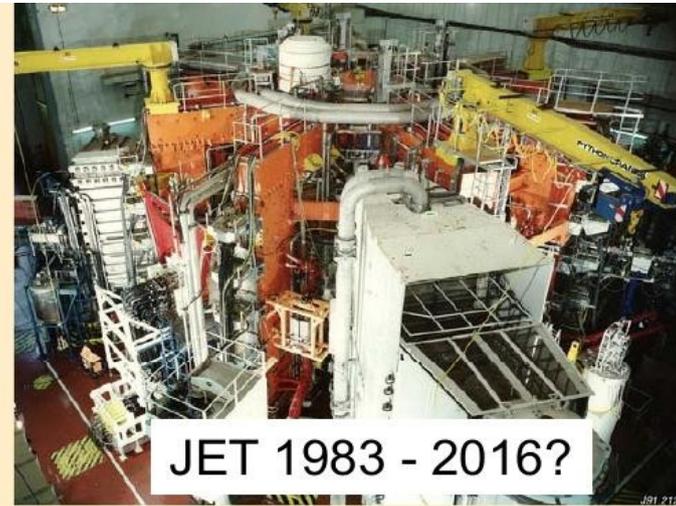
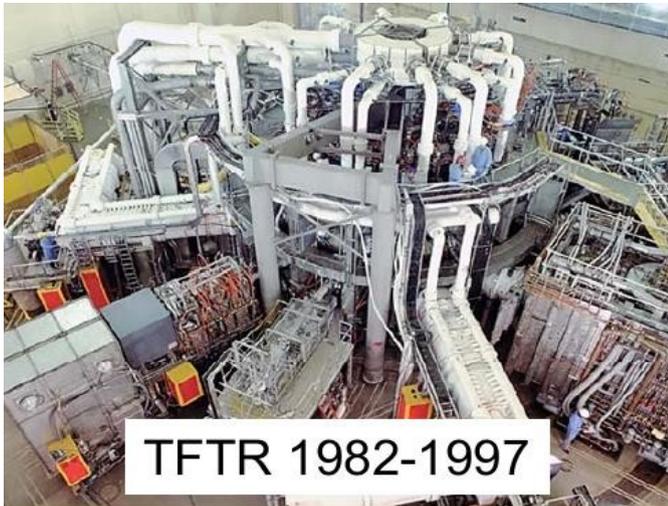


# I TOKAMAK: ... una nuova generazione

... grazie a questa serie di innovazioni tecnologiche nascono o vengono modificati i reattori della generazione successiva, molto prossimi all'ignizione:

★  $T_i \sim 20 \text{ keV}$  and  $nT_e \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}\text{s}$  con riscaldamento ad iniezione di atomi neutri

★  $T_i \sim 1,3 \text{ keV}$  e  $nT_e \sim 1.5 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}\text{s}$  con rifornimento a iniezione di pellet





# I TOKAMAK per la fusione: amplificatori di potenza

Uno dei fattori principali per la transizione dei Tokamak o di altre macchine per plasmi a reattori in grado di produrre energia è appunto il **fattore di guadagno Q** (qui inteso per la reazione di fusione deuterio-trizio):

$$Q_{DT} = \frac{\text{Potenza in uscita}}{\text{Potenza in ingresso}}$$

Un Tokamak che fosse in grado di **raggiungere l'ignizione** o anche solo di superare il limite di Break-Even sarebbe in grado di **produrre più energia (per fusione)** di quella necessariamente **introdotta dall'esterno** per il confinamento e il riscaldamento del plasma. In queste due regioni i Tokamak funzionano come **amplificatori di potenza**, cioè a fronte di un'energia introdotta  $E_{in}$ , restituiscono una quantità di energia  $E_{out} = QE_{in}$ . Si stima che un  $Q > 30$  dovrebbe permettere l'ignizione.

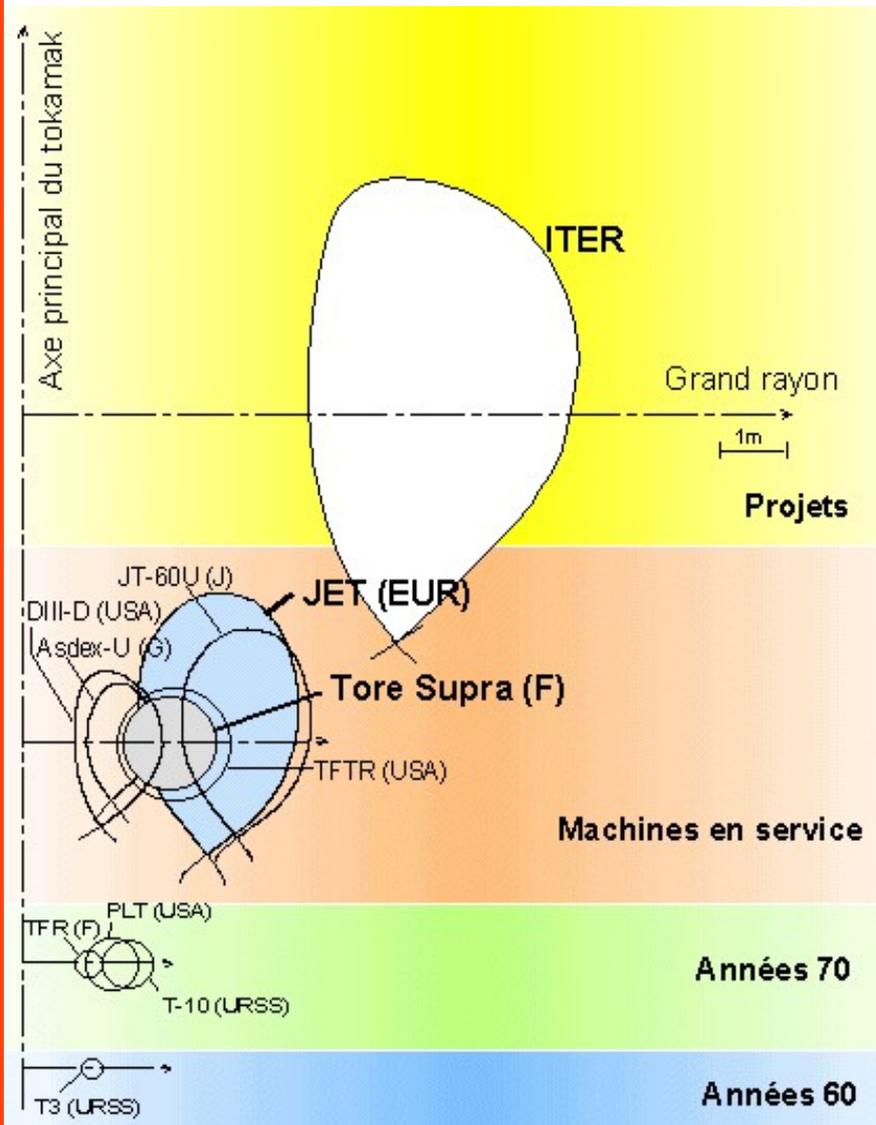
Durante gli anni '90 diversi esperimenti ottengono importanti risultati:

- 1991 **JET 90/10** - Deuterio/Trizio, 2 MJoules per impulso prodotti,  $Q \sim 0.15$
- 1993-97 **TFTR 50/50** – Deuterio/Trizio, 7.5MJ per impulso prodotti, 11 MW,  $Q \sim 0.3$ 
  - osservato il **riscaldamento del plasma** mediante **particelle  $\alpha$** : le particelle  $\alpha$  prodotte nella fusione di D e T rimangono confinate magneticamente nel plasma e trasferiscono per urto a D e T l'energia prodotta dalla fusione stessa → si apre la strada per l'ignizione.
- 1997 **JET 50/50** – Deuterio/Trizio, 22MJ per impulso prodotti, 16 MW,  $Q \sim 0.65$

→ riscaldamento alfa esteso

→ durata dell'impulso di compressione/riscaldamento aumentata

# I TOKAMAK come reattori: una questione di dimensioni



Il raggiungimento dell'ignizione dipende quindi da diversi fattori:

- ◆ Efficienza nel confinamento e riscaldamento
- ◆ Scelta della reazione di fusione con il più alto  $Q$  e alle condizioni migliori di  $T$  e  $n\tau$
- ◆ Efficienza nel riveicolare l'energia prodotta per fusione all'interno del plasma stesso (particelle alfa)
- ◆ Abbattimento delle dispersioni dal plasma di energia sotto forme non utilizzabili a scopo energetico.



Quest'ultimo punto si ottiene, oltre che tramite altri fattori, **minimizzando la superficie esposta all'esterno (forma "sferica" del toroide) e aumentando le dimensioni della macchina.** Per una sfera infatti il rapporto tra Volume (quantità di plasma) e la sua superficie (legata alla dispersione) segue la legge

$$\frac{V}{S} = \frac{R}{3}$$

E' chiaro quindi il trend crescente delle sezioni trasverse dei Tokamak (figura a sinistra) e il loro aspetto complessivamente sferico (sfondo).

# I combustibili per la fusione e possibili altre reazioni di fusione

Un reattore a fusione richiede una miscela di combustibile 50/50% di due isotopi dell'idrogeno : deuterio (D) e trizio (T). La convenienza energetica ed economico-politica e' palese rispetto alle fonti da combustione chimica:

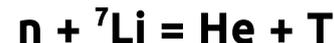
- 100 mg di miscela D-T producono un output energetico equivalente a 1 tonnellata di carbone.
- Il Deuterio esiste in natura in quantità quasi illimitata: è contenuto nell'acqua del mare ed è accessibile.
- Non esiste distinzione tra paesi produttori e consumatori (sicurezza dell' approvvigionamento energetico).

A differenza del Deuterio il Trizio non esiste in natura perché decade con una vita media di circa 12 anni. Si può tuttavia generare dal D con una reazione con il Litio.

La reazione principale D-T produce un neutrone:



Rendendo disponibile del Litio (metallo piuttosto comune) sulle pareti del Tokamak (ad esempio come copertura), si rende possibile la reazione



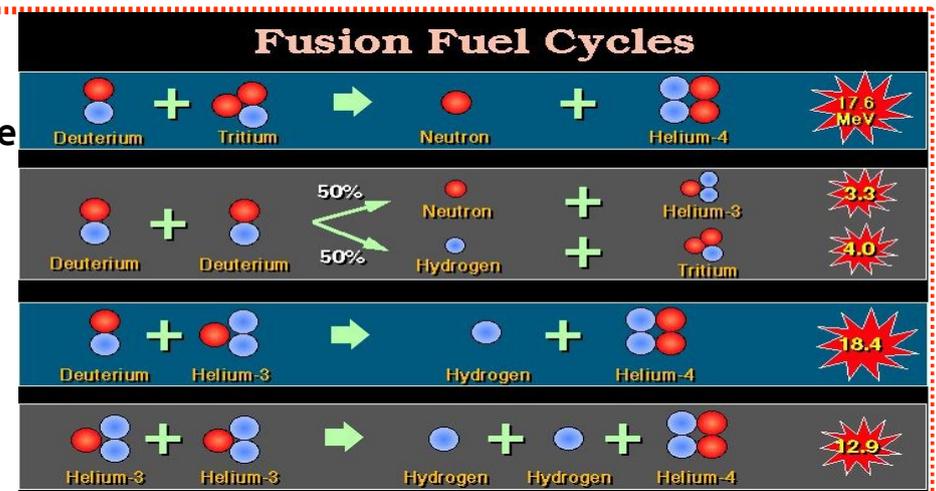
che produce Trizio, il quale viene poi naturalmente confinato nel plasma dai campi magnetici e riscaldato, rifornendo di combustibile il reattore.

In futuro, qualora si riuscisse a raggiungere temperature piu' alte nei Tokamak (100 keV – 1 MeV), sarebbe possibile utilizzare la reazione



Con due enormi vantaggi

1. evitare la produzione di neutroni
2. aumentare l'auto riscaldamento del plasma confinando il protone prodotto nel flusso



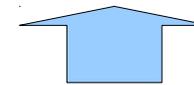
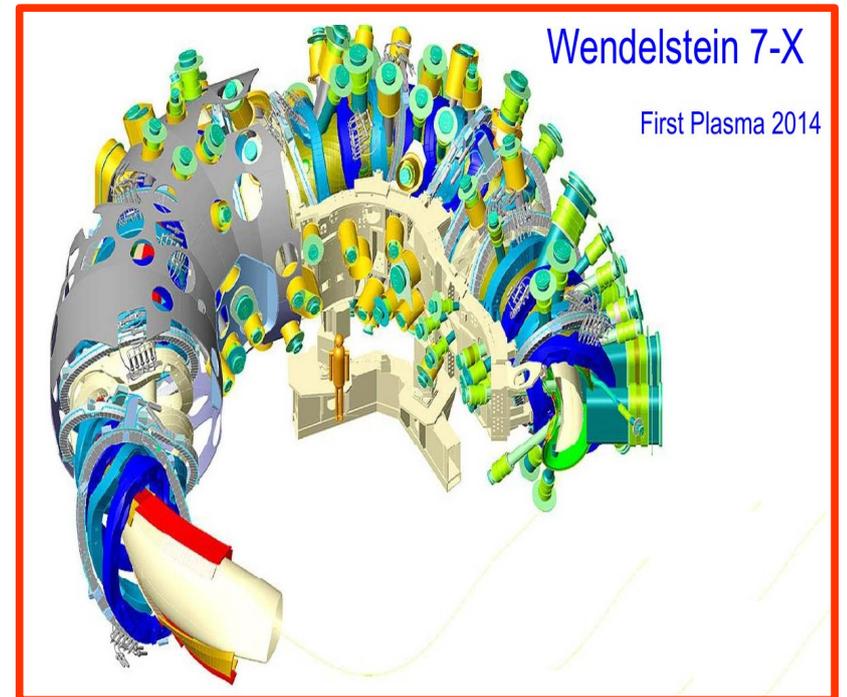
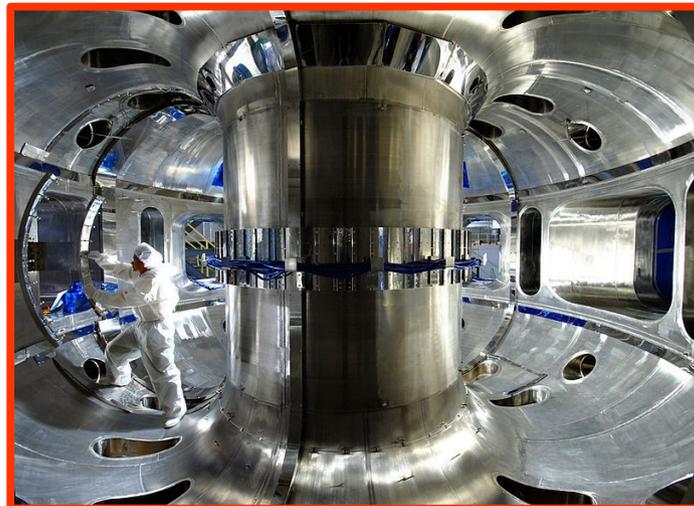
# Energia da fusione: verso macchine stazionarie

Al fine di produrre energia da fusione e' molto importante riuscire a progettare **macchine a confinamento magnetico** in grado di funzionare in modo **stazionario**, cioe' in grado di mantenere i parametri di confinamento e temperatura atti alla fusione a lungo nel tempo. Come abbiamo visto i Tokamak funzionano invece in **modalita' impulsata**.

A questo proposito sono stati costruiti diversi Tokamak, per i quali la **componente toroidale della corrente di plasma** nel toroide e' generata da **fenomeni interni di bilanciamento delle pressioni magnetiche e del plasma** (corrente di bootstrap). Questi Tokamak, basati su tecnologie a **superconduzione** per la generazione dei campi magnetici, sono in grado di lavorare a **regime impulsato ma con lunghi impulsi (quasi stazionari)**

TRIAM, EAST, KSTAR, SST-1, JT-60SA, T-7, T-7T-15, T-15, Tore Supra, Supra.

KSTAR  
Tokamak  
(Korea)



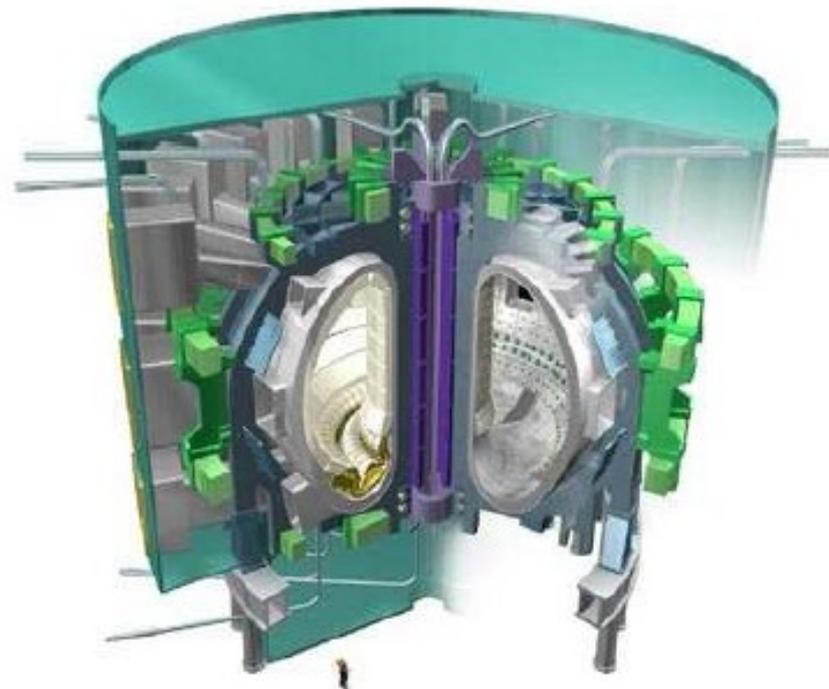
Gli **Stellaratori**, abbandonati negli anni '60 per i bassi livelli di confinamento allora ottenuti, sono invece **macchine naturalmente stazionarie**. Negli ultimi anni sono quindi state riprese e **perfezionate**, al fine studiare la possibilita' di raggiungere **parametri confrontabili a quelli dei Tokamaks**, senza il problema dei regimi impulsati.

# Il Tokamak ITER: verso la fusione controllata

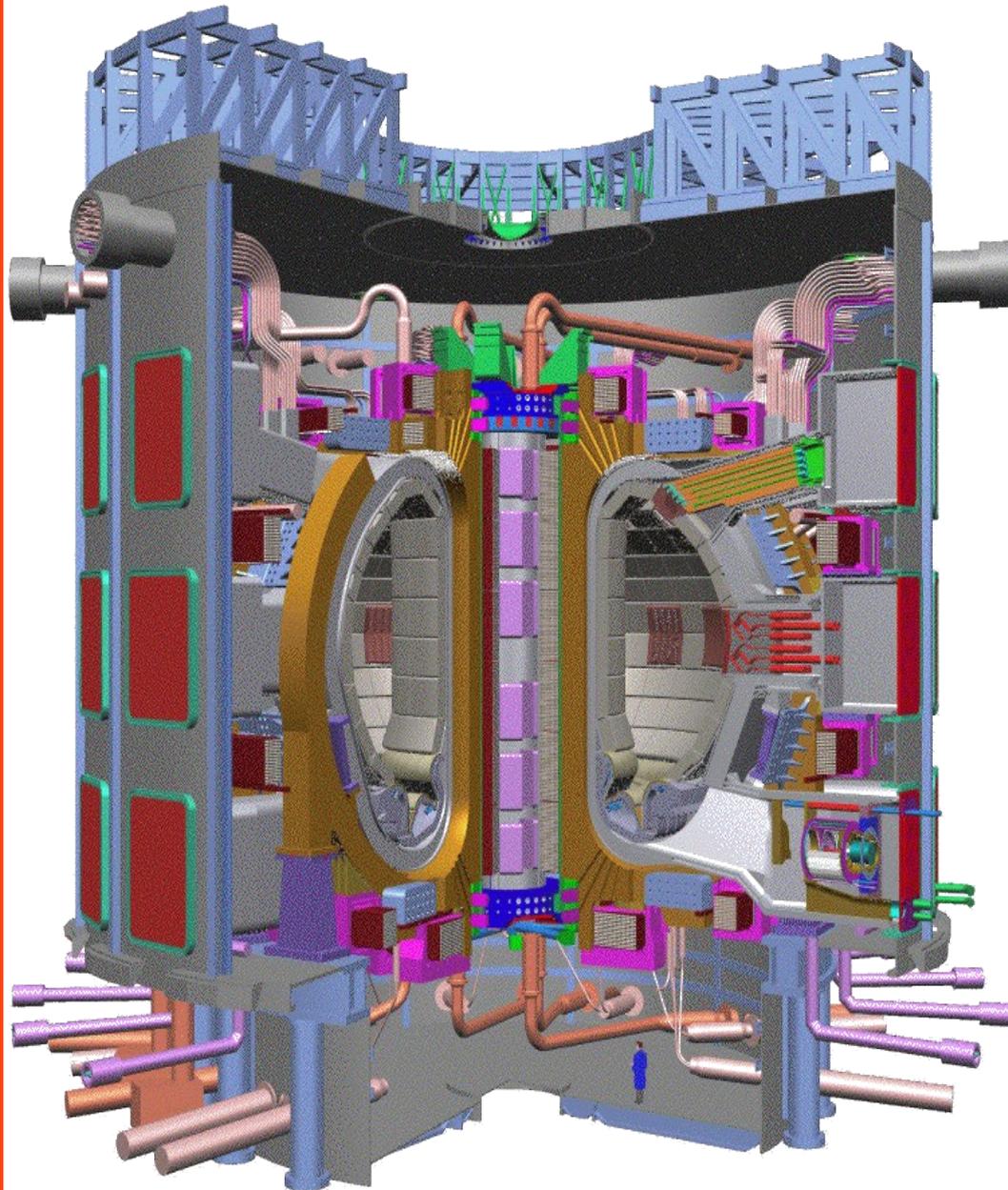
- Il progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) e' un progetto de collaborazione internazionale che sta partendo in Francia presso il centro del CEA di Cadarache, in Provenza.
- Il progetto ha lo scopo di dimostrare la fattibilita' scientifica e tecnologica di un reattore a fusione termonucleare quale credibile mezzo di produzione di energia per usi pacifici.
- Al progetto partecipano

EU, Giappone, Stati Uniti, Russia, Cina, Corea, India

- L'Unione Europea ha una partecipazione di maggioranza nel progetto (circa il 50% del costo) che e' di gran lunga il piu' importante progetto mondiale di ricerca sulla fusione nucleare.



# Il Tokamak ITER: i parametri della macchina



*Plasma Volume: 840 m<sup>3</sup>*

*B<sub>T</sub> = 5.3 T*

*I<sub>p</sub> = 15 MA*

*T<sub>p</sub> = 8.7 keV*

*n<sub>p</sub> = : 1.13 10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup>*

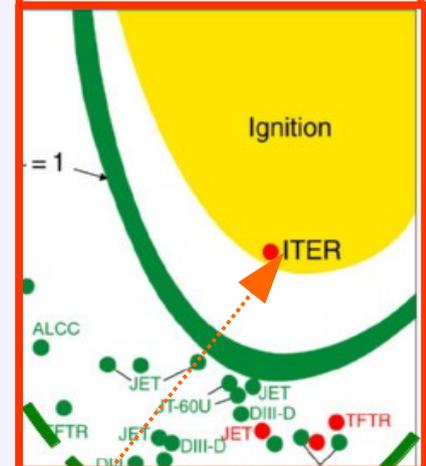
*P<sub>in</sub> = 50 MW*

*τ<sub>E</sub> = 3.4 s*

*Pulse length = 300 s*

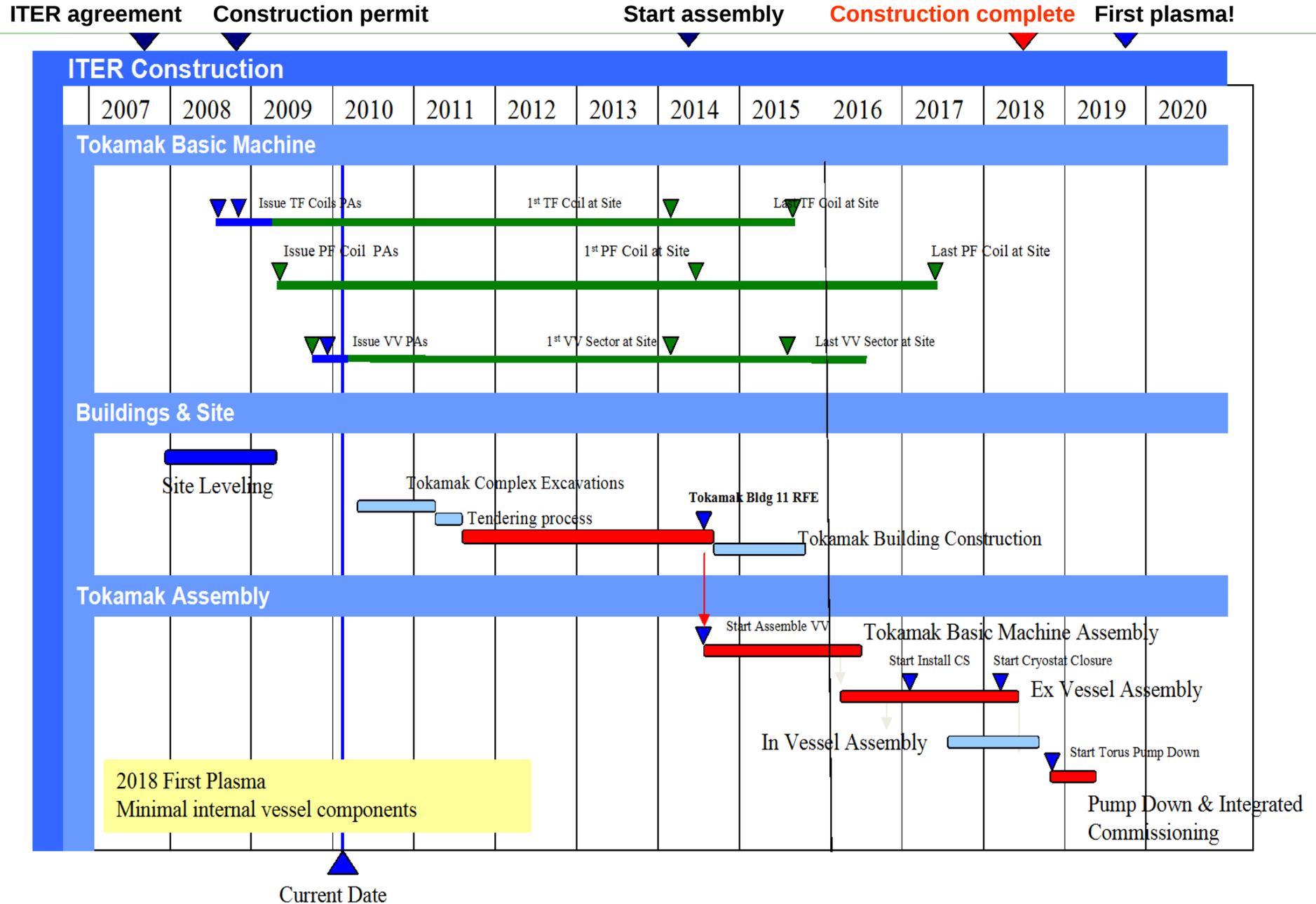
***Fusion Power: 500 MW***

*Q = 10*

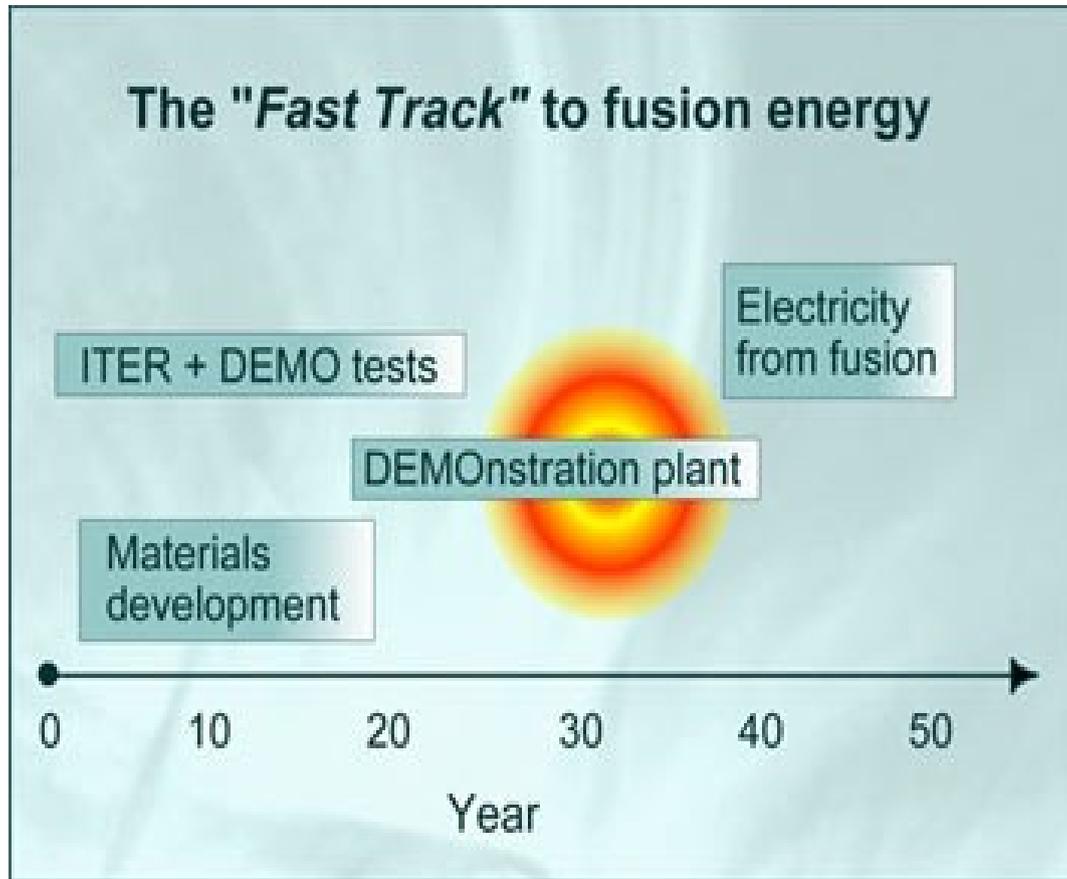


ITER studierà i confini della regione di ignizione, con parametri di guadagno alti (Q=10) e impulsi lunghi (300 s). Aprirà la strada a DEMO, un futuro dimostratore di reale reattore per la produzione di energia

# Il Tokamak ITER: le tempistiche



# Il DEMOnstration plant: un reattore per l'energia



La strada verso la fusione da confinamento magnetico per la produzione di energia e' ancora lunga (2050-2060), ma si staglia all'orizzonte questa nuova sorgente pulita ed inesauribile di energia per l'umanita'.

ITER sara' ancora una macchina finalizzata a studi sul comportamento fisico dei plasmi e costituirà un primo passo verso la realizzazione di un primo reattore a fusione per la produzione di energia, il quale si inoltrera' ancora piu' a fondo nella regione di ignizione, producendo 2-4 GW di potenza con un fattore di guadagno  $Q$  superiore a 10 e l'autoriscaldamento del plasma riveicolando l'energia di fusione sara' gia' la tecnologia dominante.



**ITER**  
800 m<sup>3</sup>  
~ 500 MW<sub>th</sub>

**DEMO**  
~ 1000 - 3500 m<sup>3</sup>  
~ 2000 - 4000 MW<sub>th</sub>

- Dominant self heating ----->

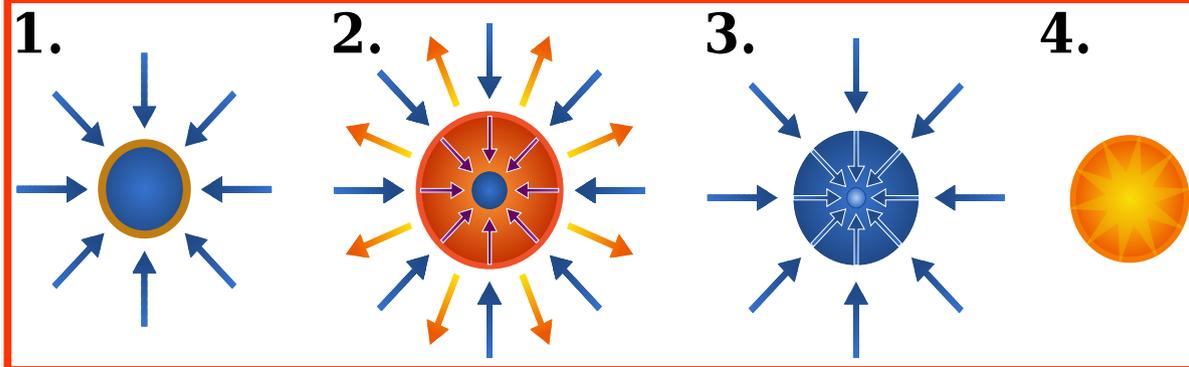
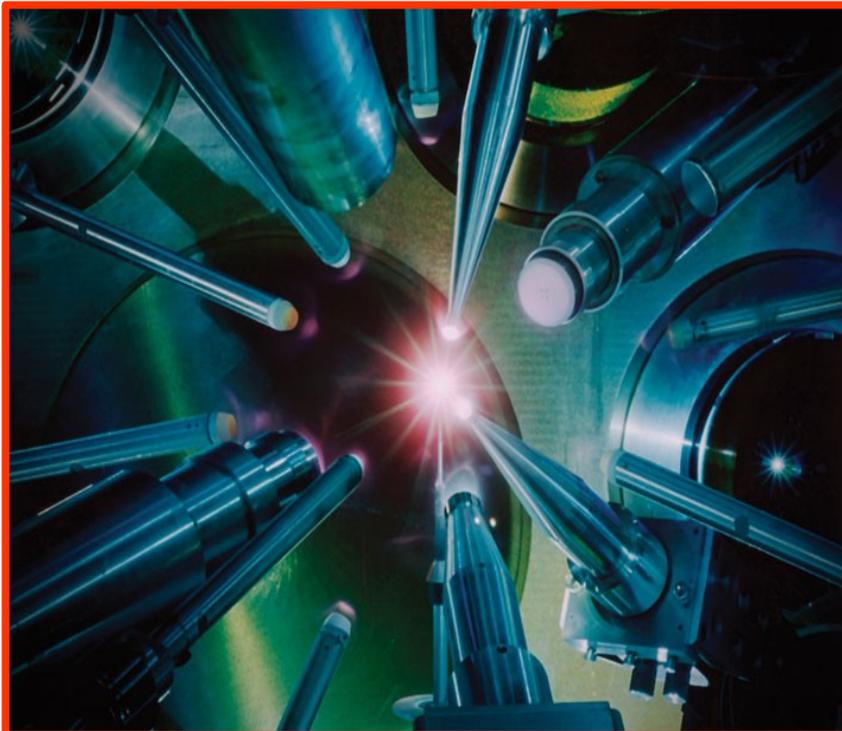
# Fusione da Confinamento Inerziale

Esiste un secondo approccio per generare confinamento di nuclei atomici (Deuterio e Trizio) in modo da far loro superare la barriera coulombiana e fondere: il **Confinamento Inerziale**.

Il principio di funzionamento e' molto semplice, sebbene presenti dal punto di vista della realizzazione pratica diverse sfide sul piano tecnologico e scientifico.

La **fusione inerziale** utilizza un metodo di **riscaldamento rapido** di una **pastiglia di D-T** allo stato solido raffreddata ad una temperatura di pochi °K) e sottoposta alla **radiazione di impulsi laser** molto intensi e molto brevi in una camera a vuoto sferica.

Gli impulsi laser di altissima potenza generano nella materia solida un' **onda d' urto** che la comprime a **densità** molto superiori a quella dello stato solido e la riscalda a **temperature termonucleari**.



1. La pastiglia di combustibile viene **irraggiata** con potenti fasci di laser, il piu' possibile in modo omogeneo
2. L'**evaporazione** della parte superficiale della pastiglia crea un'onda di **compressione** della parte centrale (principio di conservazione della quantita' di moto)
3. La **compressione** della **parte centrale** della pastiglia raggiunge **temperature e pressioni adatte alla fusione** (T~decine/centinaia di milioni di gradi e pressioni~10 miliardi di volte quella atmosferica)
4. Si innescano i **processi di fusione termonucleare**

# Fusione Inerziale: cenni storici

La storia della fusione inerziale e' sfortunatamente legata a quella dello sviluppo di armi di distruzione di massa. Oggi fortunatamente gli sforzi in questo senso sono indirizzati a scopi civili per la produzione di energia pulita.

**1942** – nascono le prime idee legate all'utilizzo di una bomba a fissione per indurre la fusione dell'idrogeno e produrre una bomba nucleare a fusione.

**1950** Teller e Ulam sviluppano la bomba-H, una bomba a due stadi di cui il secondo viene innescato tramite irraggiamento da raggi X.

**1951** Primo test di irraggiamento di un **pellet di Deuterio-Trizio** di 1 cm (Greenhouse George Cylinder)

**1952-54** Le prime bombe a idrogeno USA vengono testate: Mike (deuterio liquido - 1952) e Bravo (LiD allo stato solido – 1954, atollo di Bikini)

**Anni '50** Oleg Lavrentiev propone la bomba H in Unione Sovietica, dando inizio ai tentativi di confinamento elettrostatico. Da questi studi Sakharov e Tamm daranno inizio al capitolo della fusione per confinamento magnetico e ai Tokamak.

**1953-1955** nel periodo in cui Kurchatov e' a capo del programma di armamento sovietico vengono fatte esplodere le prime bombe. La prima bomba all'idrogeno sovietica esplode nel Novembre del 1955.

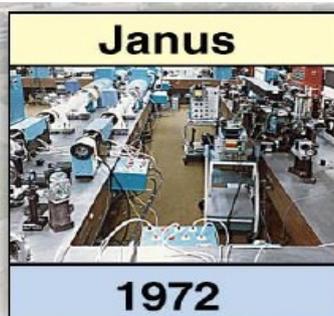
**Anni '60:** lo sviluppo dei **LASER** permette lo sviluppo della tecnologia per **irraggiare ripetutamente micro-pastiglie** di combustibile. Sia in USA sia in URSS la ricerca si concentra sull'utilizzo dei laser per la fusione inerziale.

**Fine anni '60:** si ritiene che per raggiungere la soglia di Break-Even basti un laser da 1 Kjoule e micro-bersagli di combustibile

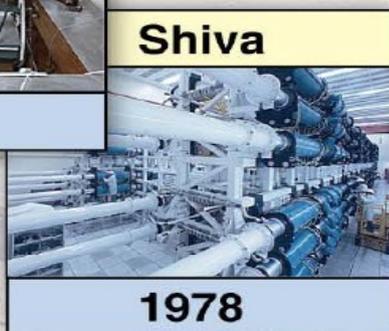
**Anni '70-'80:** diversi esperimenti, tra cui molti eseguiti ai laboratori **Lawrence Livermore (LLNL, US)**, rivelano invece la presenza di **forti instabilita'** del materiale combustibile durante il riscaldamento, provocate dalla **disuniformita' dell' irraggiamento**: cominciano studi importanti per aumentare l'uniformita' della radiazione sulla superficie del micro-bersaglio e si comprende l'importanza di salire ad energie dei laser superiori (**MJoule**)

# L'evoluzione dell' irraggiamento LASER: il National Ignition Facility (NIF)

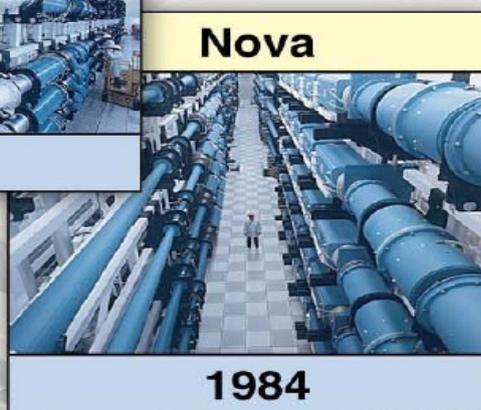
Agli LLNL la ricerca sui laser per la fusione riesce ad aumentare l'energia rilasciata di un fattore  $10^6$  (un milione di volte) in 40 anni. Anche la lunghezza d'onda del laser passa da infrarossa a ultravioletta. Nel 2009 diventa operativo il laser del NIF, in grado di superare di 60 volte le performances dei migliori laser che lo hanno preceduto.



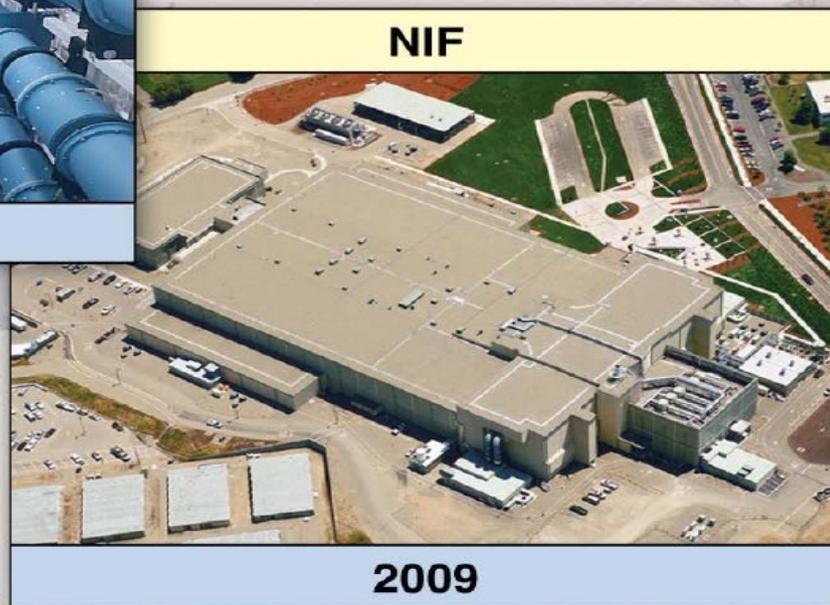
100 J  
1.05  $\mu\text{m}$



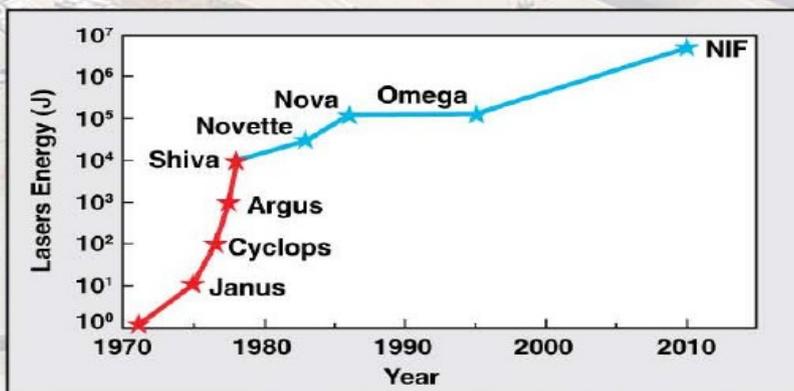
10 kJ  
1.05  $\mu\text{m}$



30 kJ  
351 nm



1.8 MJ  
351 nm



# IL NIF: qualche numero

Il NIF utilizza **192 laser**, sincronizzati mediante l'uso dello stesso oscillatore. Un complesso sistema di **amplificatori** rende possibile quindi l'**amplificazione** del debole impulso laser iniziale di un fattore  $10^{15}$  (1 milione di miliardi di volte), dal valore iniziale di  $10^{-9}$  J al valore finale di circa 4 MJ. L'**impulso di luce** viaggia nella catena di amplificazione per 1.5 Km prima di raggiungere il bersaglio di combustibile nucleare, impiegando circa **5  $\mu$ s**, al centro della camera di combustione.

Per ottenere queste caratteristiche sono state sviluppate diverse nuove tecnologie, tra cui la **plasma electrode Pockels cell (PEPC)**, una serie di cavita' ottiche in grado di intrappolare la luce del laser e rifletterla diverse volte prima di permetterle di continuare la sua strada verso il bersaglio; senza questa tecnologia il laser avrebbe avuto dimensioni di 300 metri superiori a quelle attuali.

Le **caratteristiche del fascio laser** al bersaglio sono estreme:

- Durata dell' impulso  
 **$50 \cdot 10^{-12}$  secondi (50 picosecondi)**
- Energia rilasciata ad ogni impulso  
 **$\sim 4$  MJ**
- Potenza sul bersaglio,  $P = \text{Energia} / \text{Tempo} =$   
 **$8 \cdot 10^{16}$  W (10 milioni di centrali nucleari)**

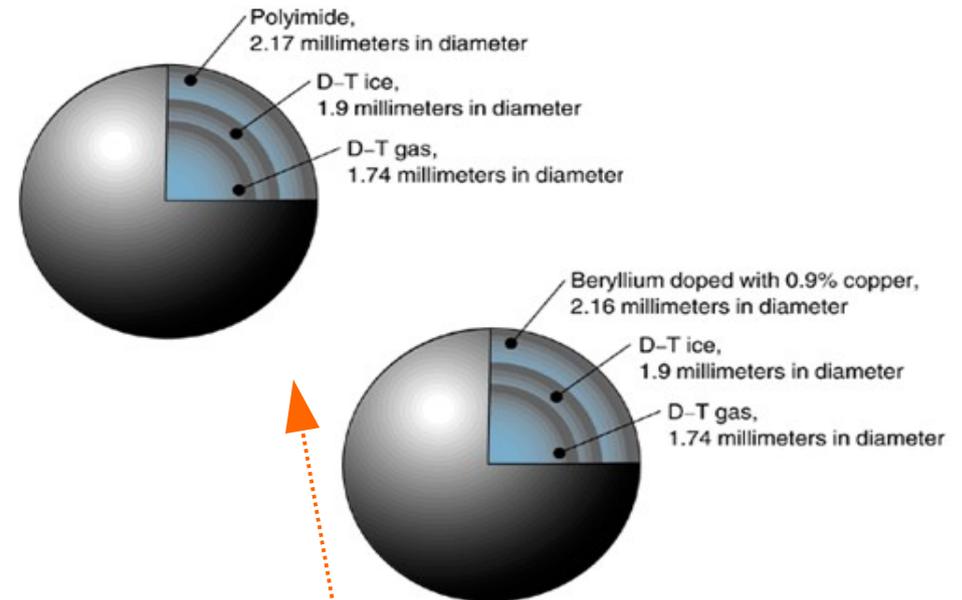
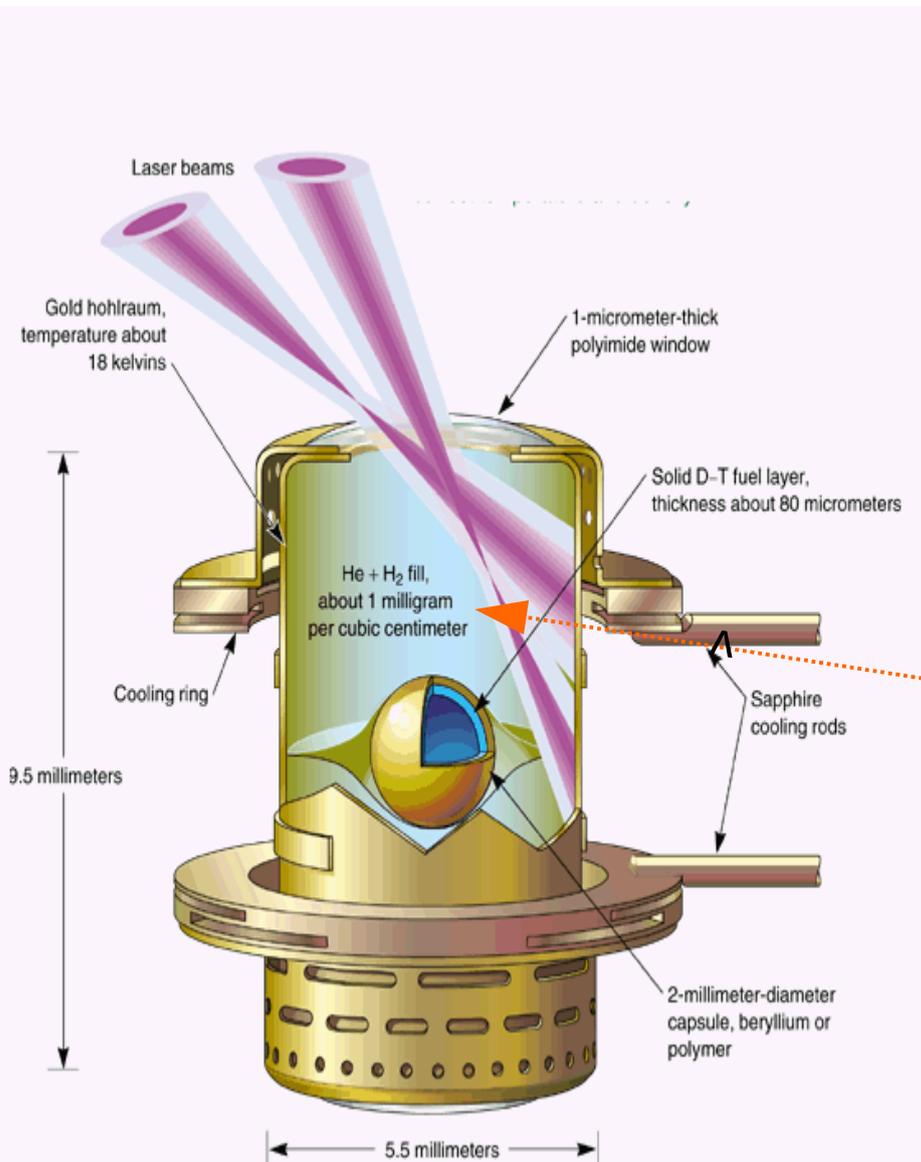


I Laser del NIF



La camera del bersaglio

# Il bersaglio di combustibile: come fare una stella!

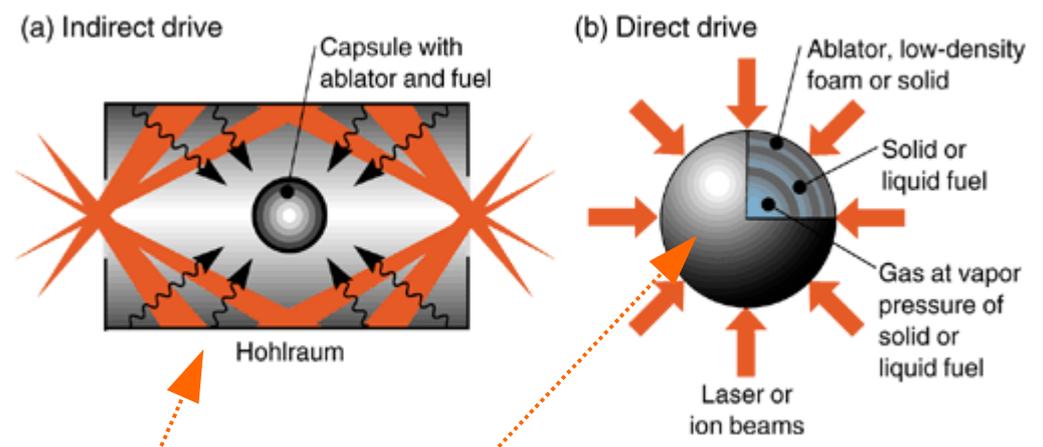
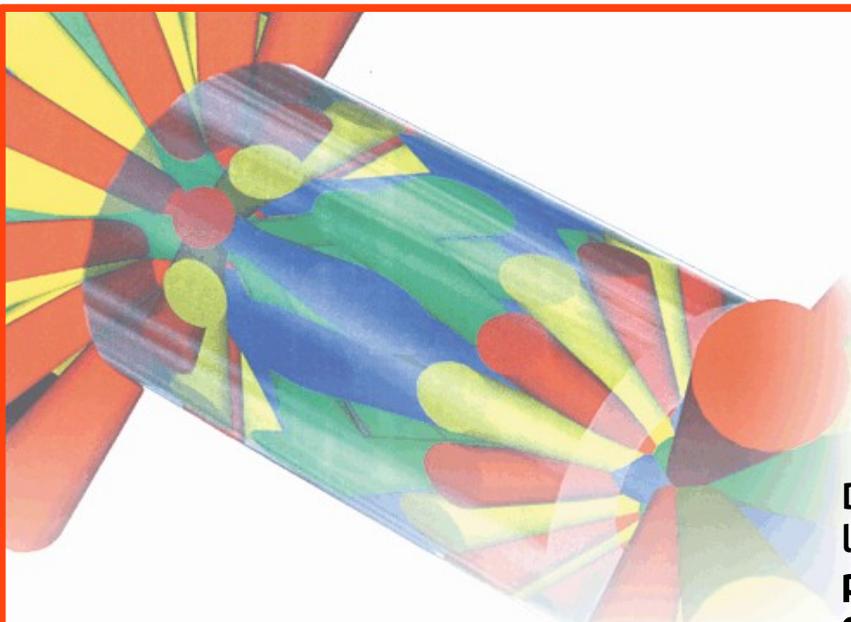


L'hohlraum e' un cilindro di pochi millimetri, mantenuto a temperatura prossima allo zero assoluto, che contiene il bersaglio di combustibile da fusione.

Ha il compito di convertire la radiazione laser entrante (in violetto nella figura) da ultravioletto in raggi X e irradiare la superficie della pasticca di combustibile.

Il combustibile (ghiaccio e gas di Deuterio e Trizio) e' isolato all'interno di una sferetta di circa 2mm di diametro, ricoperta da Berillio o polimide, con tracce di rame. L'evaporazione di questo strato esterno produce l'implosione del contenuto in D e T, portandolo a FUSIONE.

# Irraggiamento diretto ed indiretto: l'instabilita' dell'implosione

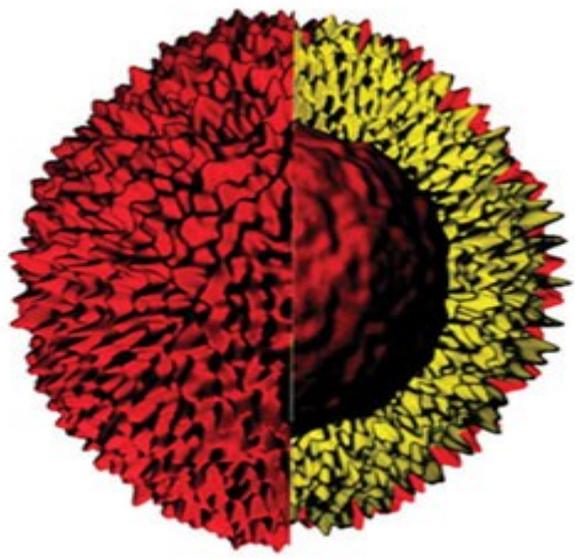


Durante l'irraggiamento, l'evaporazione dello strato superficiale e la pressione sugli strati di combustibile sottostanti non sono processi omogenei. Le disomogeneita' nell'implosione diminuiscono l'efficienza del processo, e parte dell'energia dei laser non lavora ai fini dell'avviamento della fusione di D e T. Per questo motivo si studiano le migliori configurazioni di irraggiamento atte a migliorare l'omogeneita' dell'implosione.

Esistono 2 possibili configurazioni:

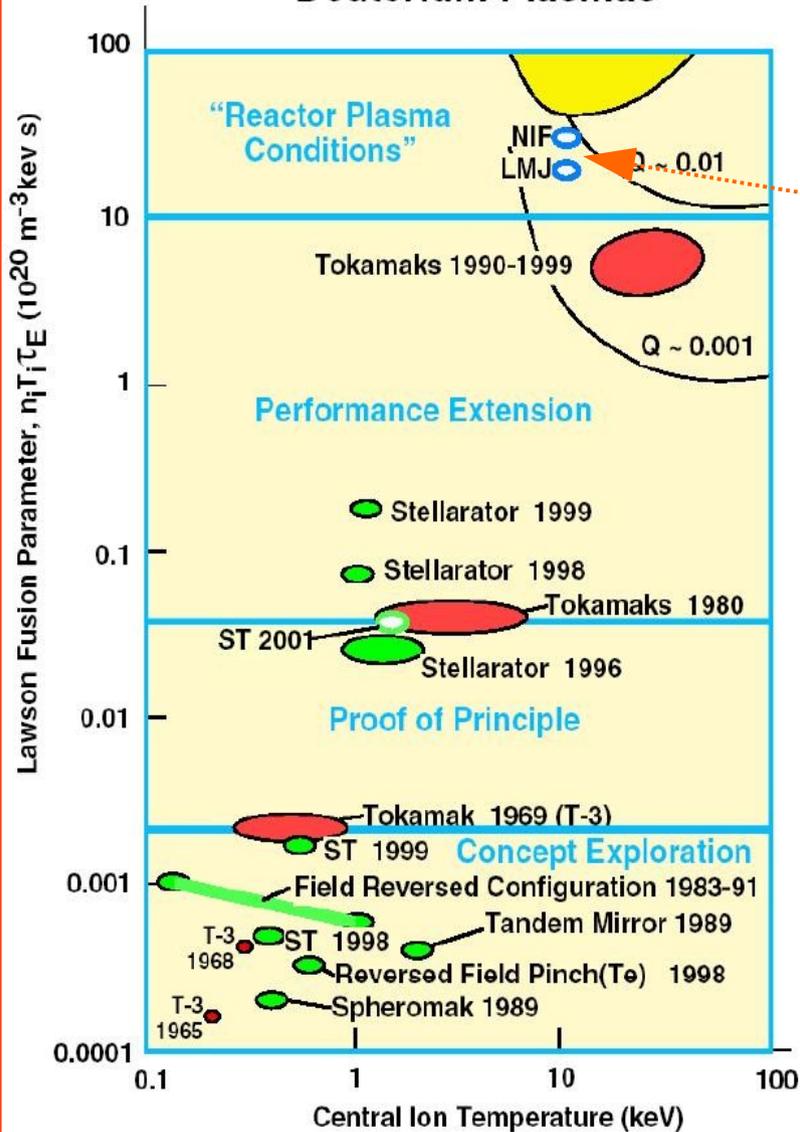
- **Diretta:** i laser impattano direttamente sulla superficie della sfera
- **Indiretta:** I laser entrano in un hohlraum cilindrico dai poli. L'hohlraum converte in raggi X la radiazione ultravioletta del laser e rende piu' omogeneo l'irraggiamento della sfera di combustibile. I laser entrano nell'hohlraum in due gruppi: il primo (giallo e arancio) irradia i poli della sfera, mentre il secondo (blu e verde) irraggia l'equatore.

Il NIF puo' lavorare in entrambe le configurazioni.

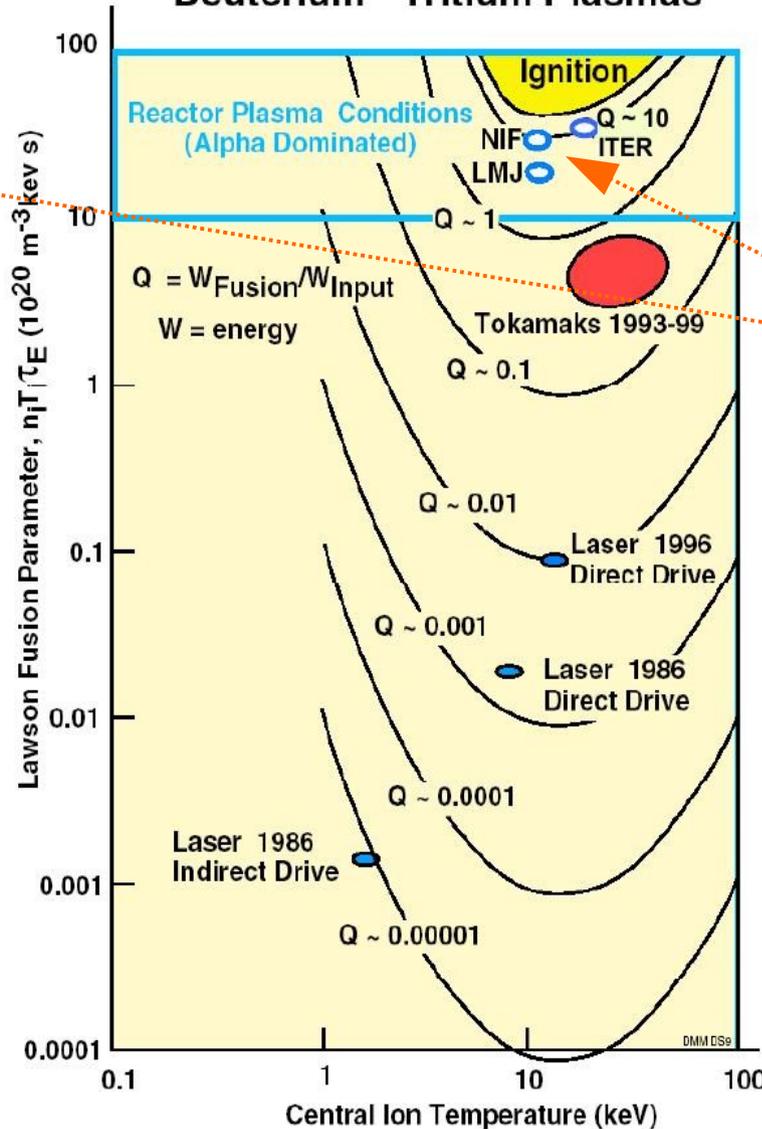


# Fusione Inerziale e Ignizione: dove siamo?

## Deuterium Plasmas



## Deuterium - Tritium Plasmas



La fusione inerziale ha compiuto progressi importanti negli ultimi 40 anni.

Dal punto di vista del potere di confinamento e delle temperature raggiunte durante l'implosione, la fusione inerziale ha già dimostrato di poter raggiungere il Break-Even ed in futuro la regione di ignizione.

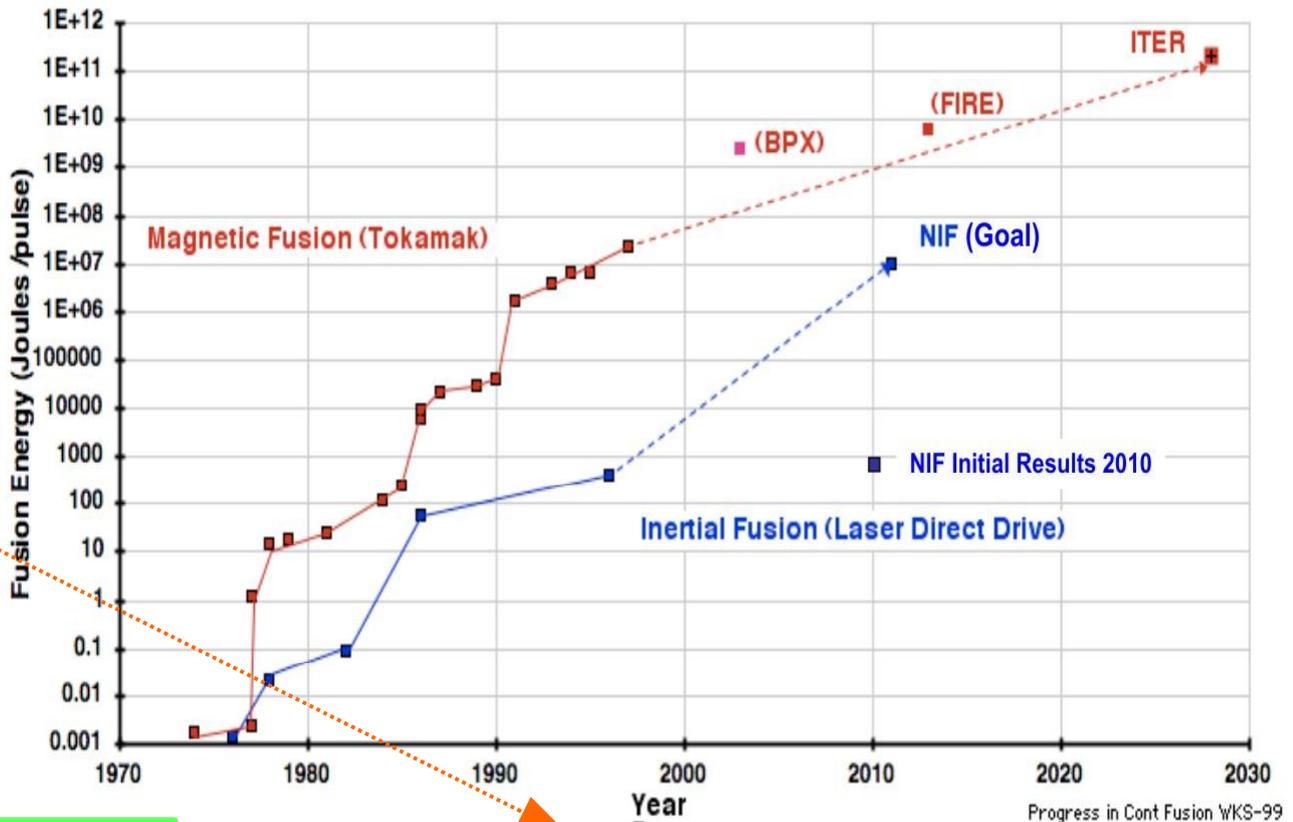
E' stata osservata piu' volte la produzione di neutroni, come firma dell'avvenuto processo di fusione.

# Fusione Inerziale e Energia prodotta: un parametro di confronto

Nonostante i progressi, i processi fusione inerziale sono caratterizzati da valori di produzione di energia per impulso e potenze medie significativamente inferiori rispetto ai sistemi di confinamento magnetico.

In ogni caso le performances del NIF prevedono un incremento importante dell'efficienza nella produzione di energia.

Diversi aspetti tecnologici e scientifici legati al miglioramento dell'efficienza durante l'implosione sono allo studio.

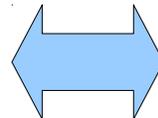


## Fusione da confinamento magnetico

Guadagno, Q	0.3 - 0.65
Energia per impulso	7.5 - 22 MJ
Potenza media (JET)	~ 5,000 W
Potenza media (TFTR)	~ 5,000 W
Potenza media (ITER)	~ 100 MW

## Fusione Inerziale al NIF

Guadagno, Q	~10
Energia per impulso	20 MJ
Potenza media	~70 W



# Fusione Inerziale: il futuro di questo approccio

## L'irraggiamento indiretto al NIF

- → ha raggiunto efficienze di copertura della superficie della pastiglia di combustibile dell' 85%,
- → con produzione di energia ancora non soddisfacenti

## ■ Sono allo studio nuove tecnologie per

- → migliorare l'accoppiamento del laser con il bersaglio
- → migliorare l'omogeneita' di implosione

## ■ Si studiano anche possibilita' di realizzare fusione inerziale da irraggiamento diretto, ma e' necessario risolvere

- → una maggiore tendenza alla dispersione dell'energia
- → raggiungere maggiori velocita' di implosione

## ■ Nuovi processi di fusione inerziale sono allo studio

- Ignizione con fasci di ioni pesanti → si utilizzano acceleratori e nuclei pesanti per comprimere il combustibile, come alternativa all'irraggiamento laser
- Ignizione Veloce → si sfruttano piu' impulsi laser successivi e molto veloci per comprimere e successivamente ignire la fusione. Con questa nuova tecnologia e' gia' stata osservata la produzione di neutroni (prova dell'avvenuta fusione)

La Fusione Inerziale sembra ancora molto lontana dall'obiettivo di diventare un processo utile alla produzione di energia ma sono stati fatti grandi passi avanti in questo campo. Al momento diverse linee di ricerca sono attive nell'ambito al fine di risolvere le problematiche legate ai processi di fusione inerziale.

Non ci e' possibile delineare in modo certo il futuro di questo approccio alla produzione di energia, che rimane in ogni caso un affascinante tentativo di riprodurre qui sulla Terra cio' che avviene da miliardi di anni nelle stelle.

# Bibliografia

## Esperimenti e Istituti di Ricerca

- ITER → <http://www.iter.org/>
- NIF → <https://lasers.llnl.gov/>
- European Fusion Development Agreement (EFDA-JET) → <http://www.efda.org/>
- MIT Plasma Science and Fusion Center → <http://www.psfc.mit.edu/>
- Max Planck Institute for Plasma Physics → <http://www.ipp.mpg.de/ippcms/eng/index.html>
- Centre de Recherches en Physique des Plasmas CRPP → <http://crpp.epfl.ch/>

## Enti:

- International Atomic Energy Agency (IAEA) → <http://www.iaea.org/>
- Fusion Energy Sciences (FES), US Department of Energy → <http://science.energy.gov/>
- European Fusion Network Information → [www.fusion-eur.org](http://www.fusion-eur.org)
- Fusion for Energy → <http://fusionforenergy.europa.eu/aboutfusion/>

## Riviste Scientifiche e Conferenze

- Journal of Fusion Energy → <http://link.springer.com/journal/10894>
- Nuclear Fusion Journal → <http://iopscience.iop.org/0029-5515>
- Plasma Physics and Controlled Fusion → <http://iopscience.iop.org/0741-3335/>
- Fusion Energy Conference (FEC) → <http://www-naweb.iaea.org/napc/physics/FEC/FEC2012/html/fec12.htm>
- Physics of Plasmas → <http://scitation.aip.org/content/aip/journal/pop>

## Testi

John Wesson, "Tokamaks", International Series of Monographs on Physics 149, Oxford Science Publications