

Le prospettive dell'energia da fusione nucleare e il progetto ITER

Francesco Romanelli
ENEA, Frascati

Motivazioni

- Il problema energetico
 - Nel 2050 30TW rispetto ai 13TW attuali
 - Massimo della produzione di petrolio in 5-10 anni
- Il controllo dei cambiamenti climatici
 - Il controllo della CO₂ a 2 volte i livelli pre-industriali richiede 20TW di potenza CO₂-free
- **Può l'energia da fusione giocare un ruolo primario su questa scala dei tempi?**

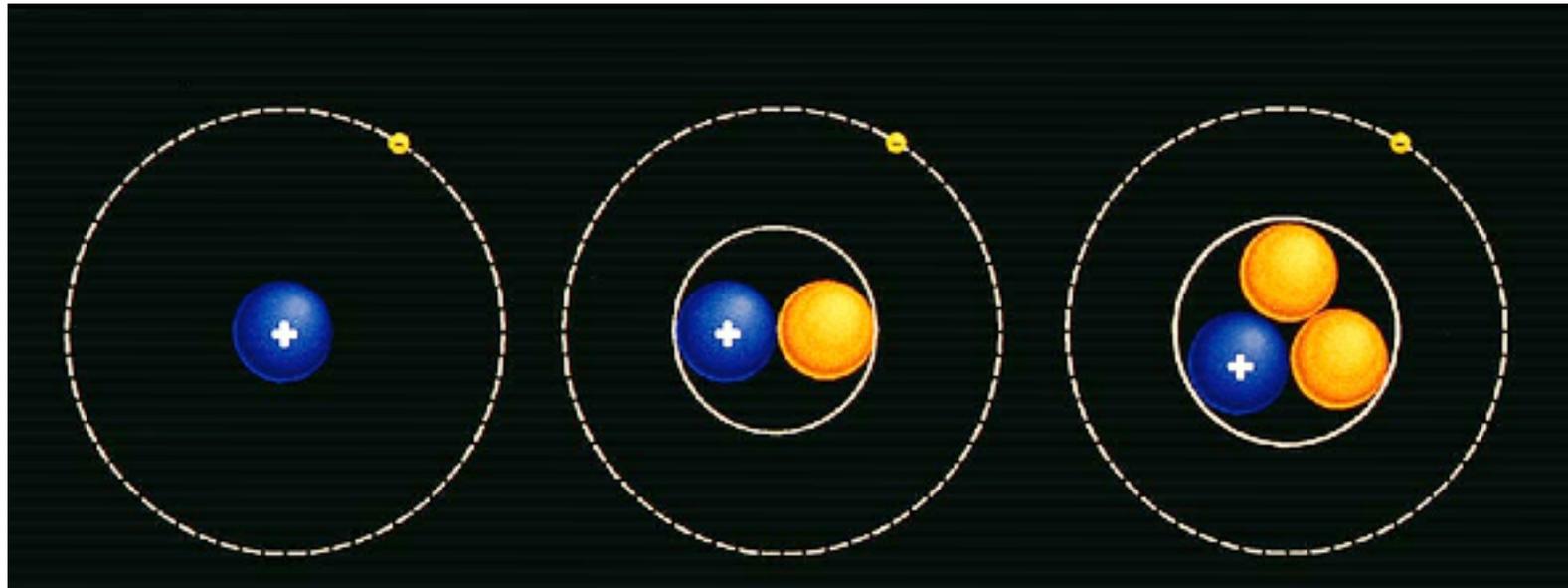
Sommario

- Perché la Fusione è un'opzione interessante.
- Quali condizioni occorre raggiungere per produrre energia.
- Il prossimo passo: ITER.
- La strada verso il reattore.

Perche' la Fusione?

- E' una fonte praticamente illimitata e diffusa.
- Non produce gas serra.
- I prodotti della reazione non sono radioattivi
⇒ ridotto problema delle scorie.
- Il processo e' intrinsecamente sicuro
- Non e' facilmente utilizzabile per proliferazione nucleare.

La fusione è una fonte illimitata e diffusa



Idrogeno (H)

stabile

Deuterio (D)

Stabile

33mg/l acqua

Trizio (T)

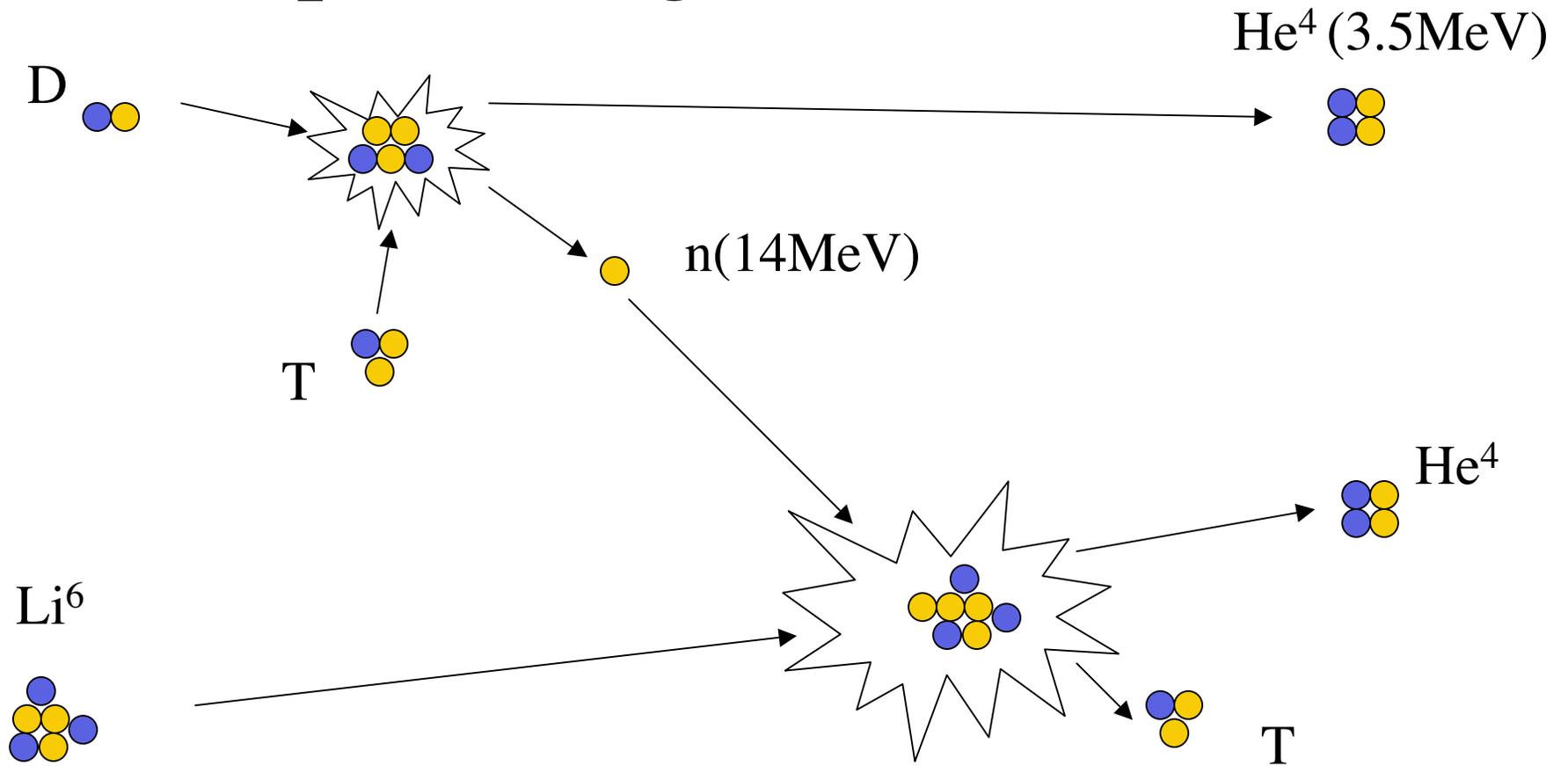
Radioattivo

vita media 12 anni

Risorse per 15 miliardi di anni!

La **Fusione** nucleare non produce gas serra

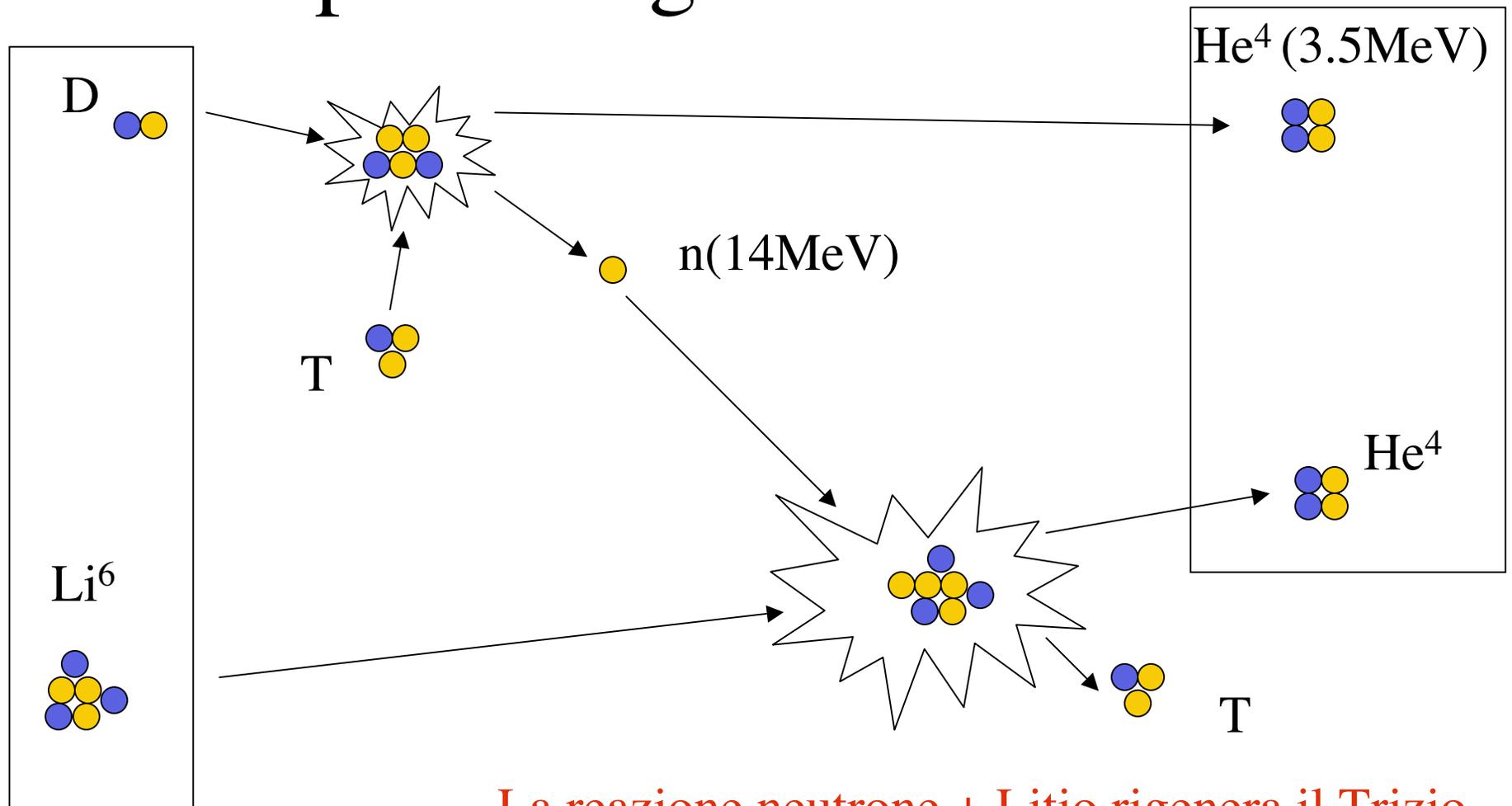
- protone
- neutrone



La reazione neutrone + Litio rigenera il Trizio

La **Fusione** nucleare non produce gas serra

- protone
- neutrone

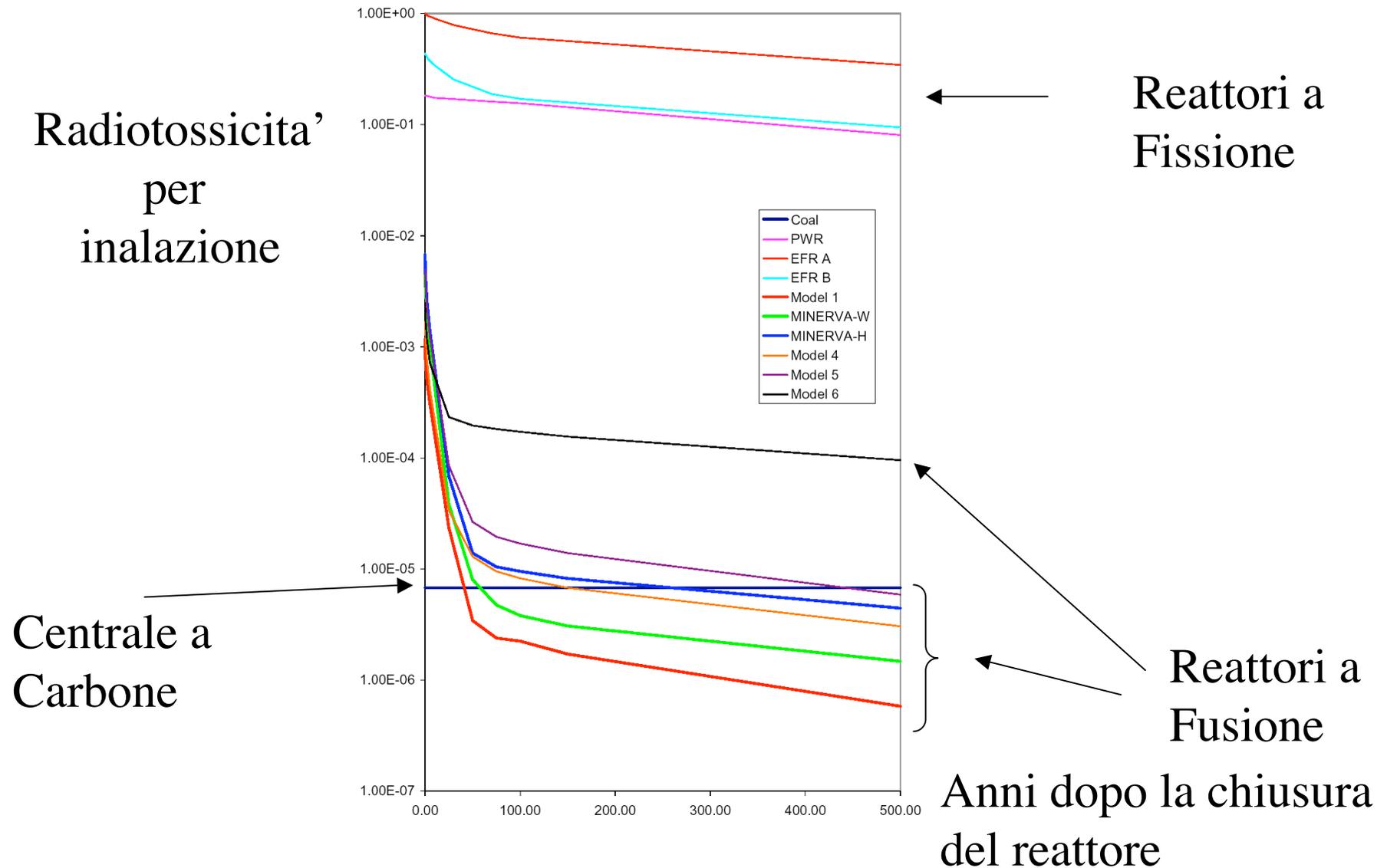


La reazione neutrone + Litio rigenera il Trizio

La Fusione e le scorie

- I prodotti di reazione non sono radioattivi.
- Tuttavia i neutroni prodotti possono rendere radioattiva la camera di reazione.
- Possibili soluzioni:
 - Scelta di materiali a bassa attivazione
 - Reazioni di fusione senza neutroni
 - $D + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + p$
 - più difficili da ottenere della DT

La radioattività nei reattori a Fusione diminuisce rapidamente grazie all'utilizzo di **materiali a bassa attivazione**



La sicurezza

- Reattore a Fissione
 - Una pila: caricata per durare un anno
- Reattore a Fusione
 - Una fornace: senza rifornirla smette di bruciare.

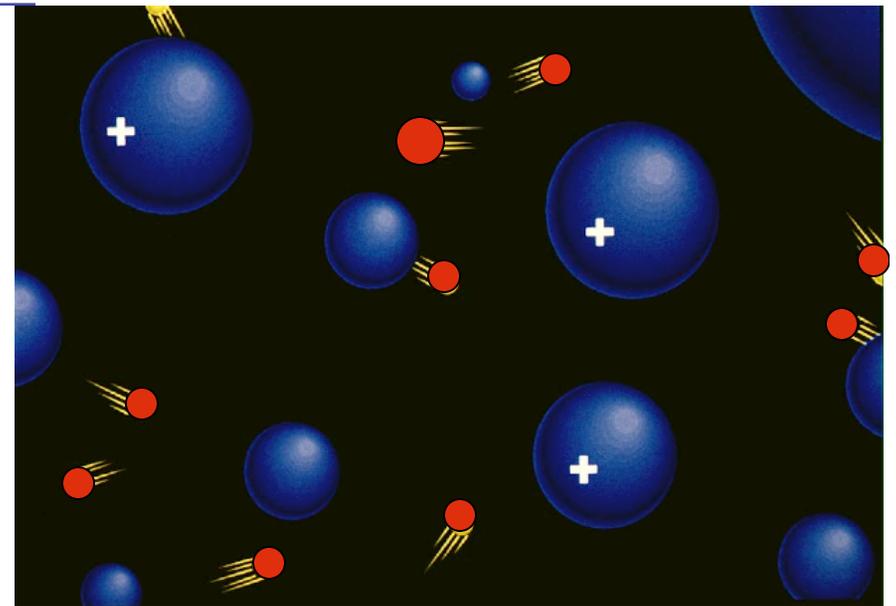
Quali condizioni occorre
raggiungere per produrre
energia?

Alte temperature

servono a vincere la repulsione tra nuclei

Sezione
d'urto

Energia (keV)



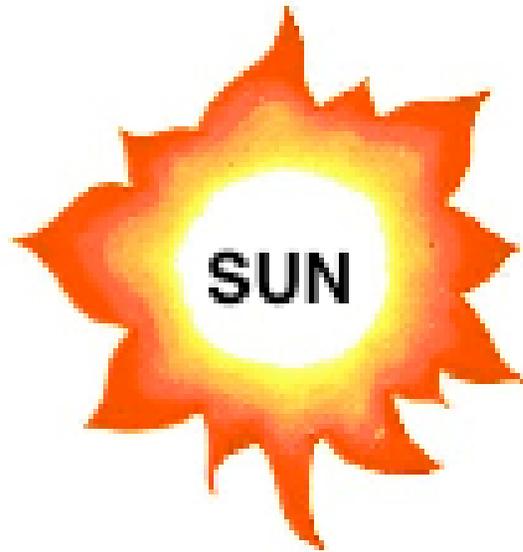
Nucleo del Sole: 10^7K

Reattore: $2 \times 10^8\text{K}$

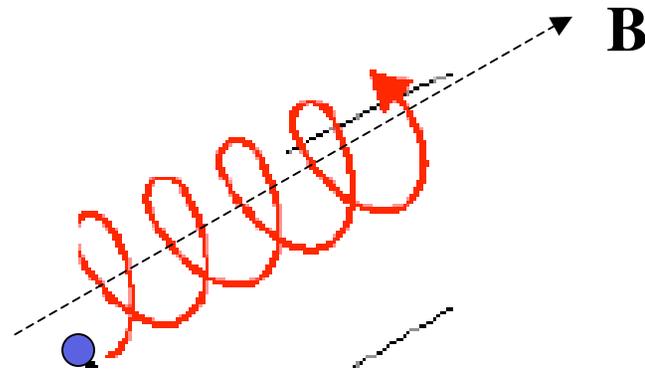
$1\text{eV} \equiv 11600\text{K}$

La materia è allo stato di **plasma**

Come confinare un plasma?



Il confinamento magnetico



Un **campo magnetico** vincola nuclei ed elettroni a compiere orbite a spirale di raggio r_{Larmor} attorno alle linee di forza

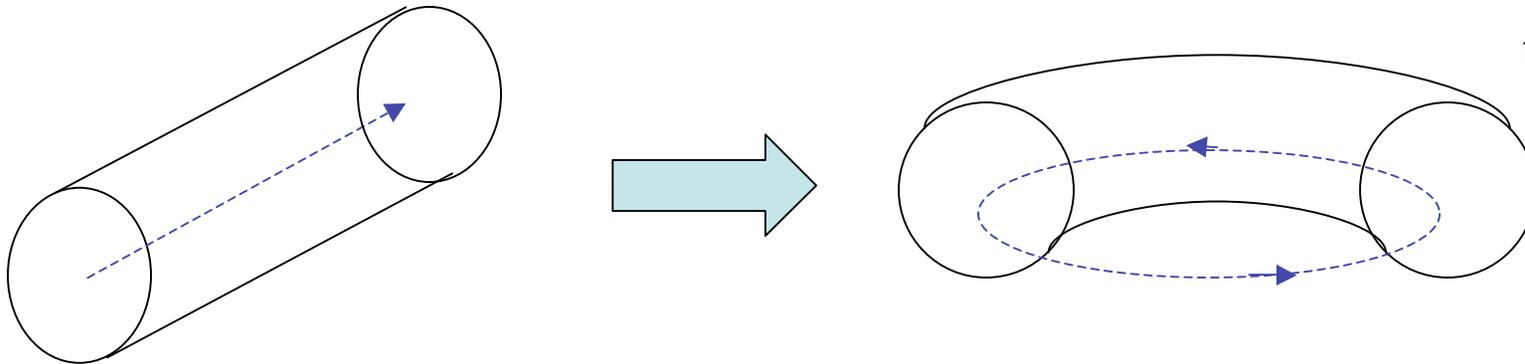
$$r_{\text{Larmor}} = v_{\text{termica}} / (eB/m) \propto T^{1/2} / B$$

Un protone da 1keV, $B=5\text{Tesla} \Rightarrow$

$$r_{\text{Larmor}} = 1\text{mm}$$

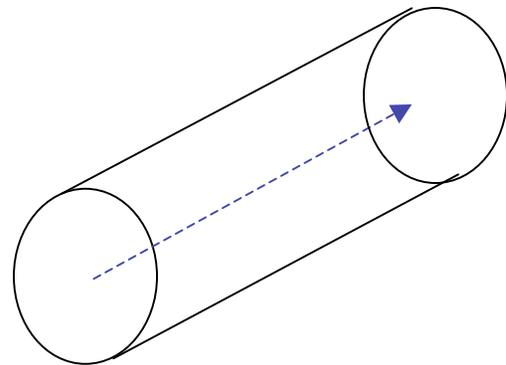
Il confinamento magnetico

Campo
toroidale

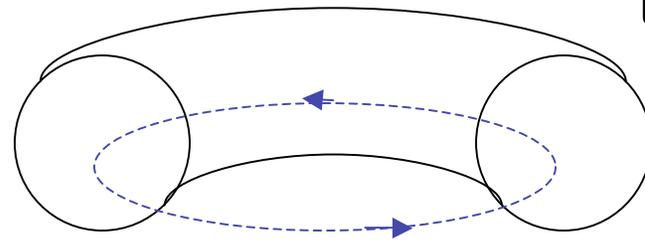
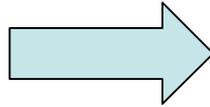


**Come confinare il
plasma lungo B?**

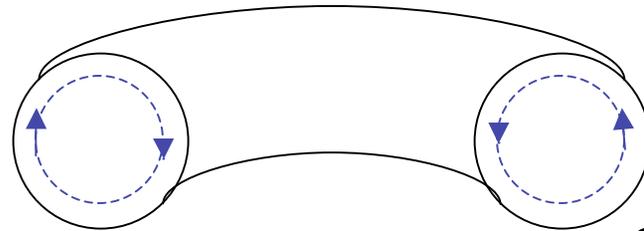
Il confinamento magnetico



Come confinare il plasma lungo B?

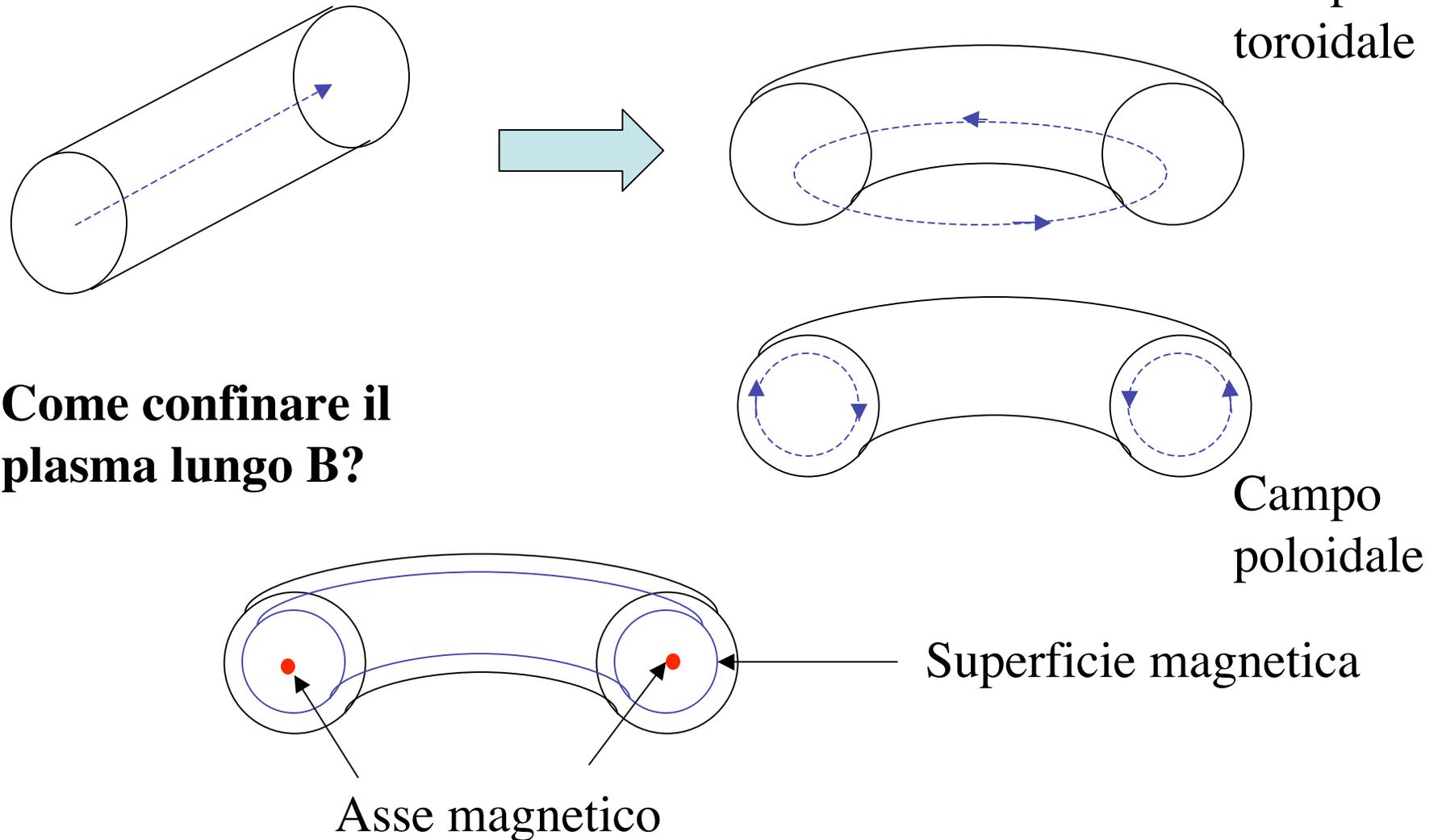


Campo toroidale



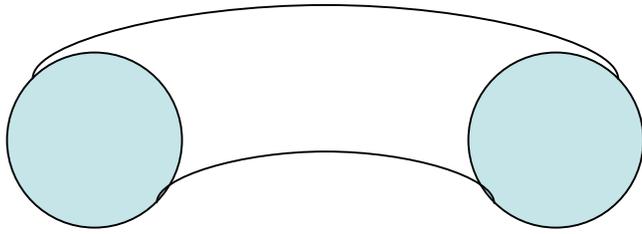
Campo poloidale

Il confinamento magnetico

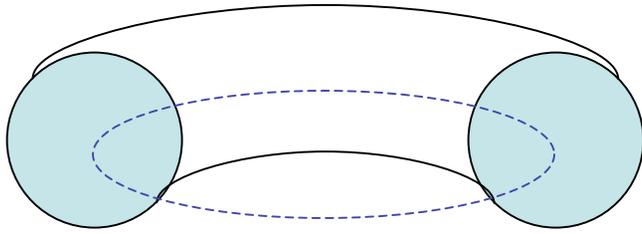


La formazione di un plasma confinato

1. La camera viene riempita di Deuterio

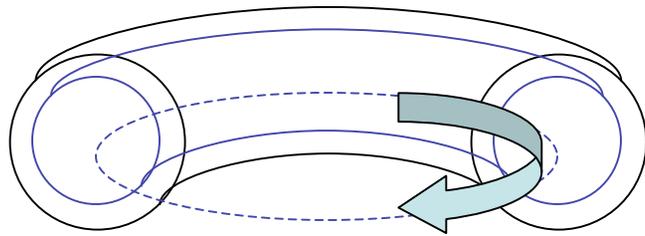


La formazione di un plasma confinato



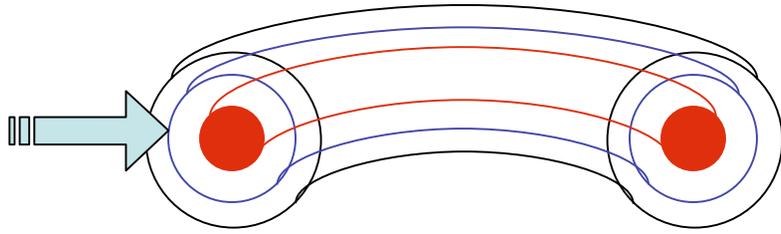
1. La camera viene riempita di Deuterio
2. **Viene prodotto il campo magnetico toroidale.**

La formazione di un plasma confinato



1. La camera viene riempita di Deuterio
2. Viene prodotto il campo magnetico toroidale.
3. **Viene indotta una corrente nel plasma in direzione toroidale che genera un campo magnetico poloidale.**

La formazione di un plasma confinato

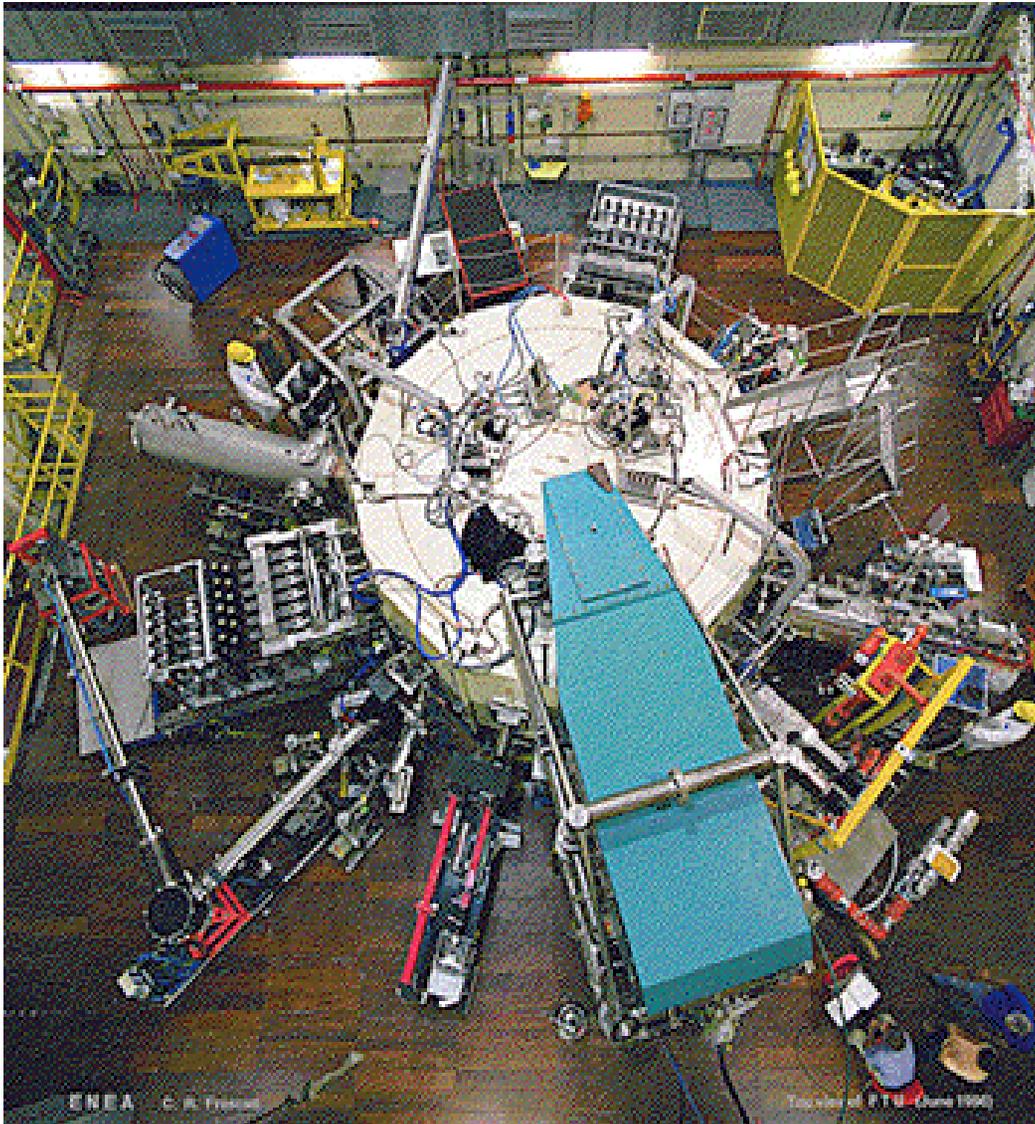


1. La camera viene riempita di Deuterio
2. Viene prodotto il campo magnetico toroidale.
3. Viene indotta una corrente nel plasma in direzione toroidale che genera un campo magnetico poloidale.
4. Il plasma viene riscaldato con onde a radiofrequenza o fasci di atomi ad alta energia.

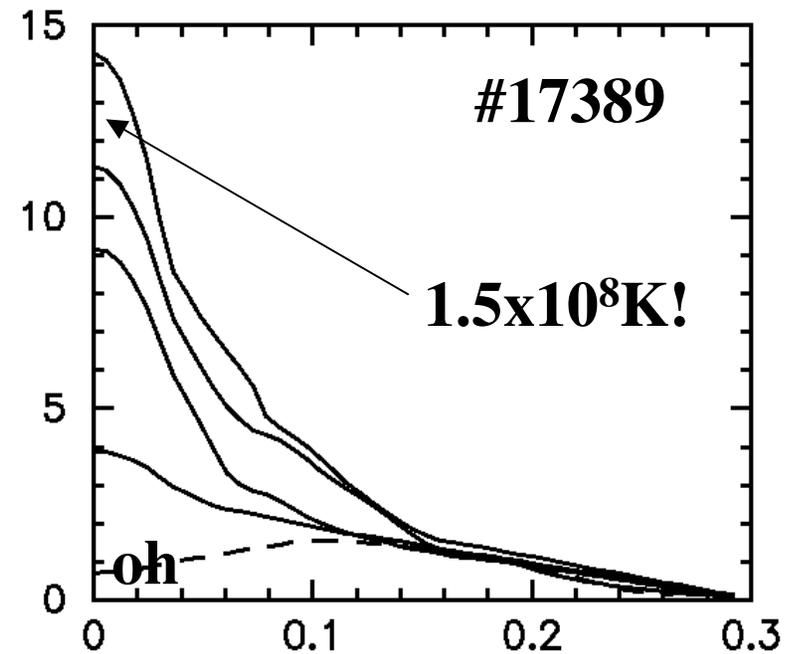
001764

FTU

(Frascati Tokamak Upgrade)



Temperatura(keV)



Distanza dall'asse
magnetico (m)

Quali condizioni occorre
raggiungere per avere un guadagno
netto di energia?

- Potenza prodotta nelle reazioni di fusione
> Perdite (radiazione + conduzione)



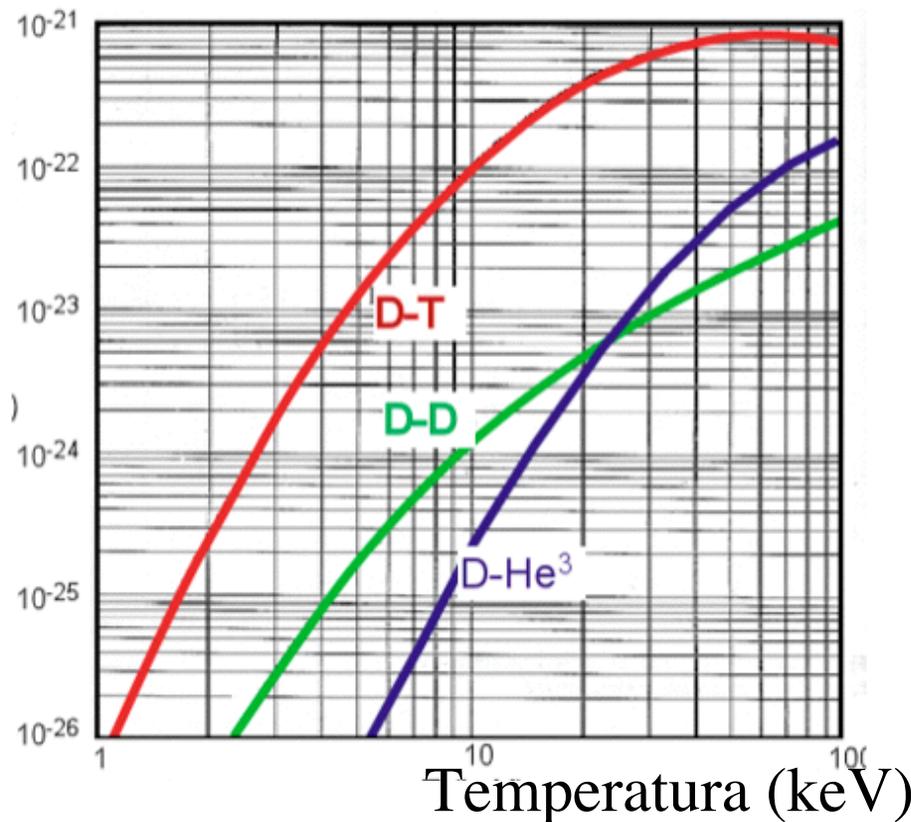
ITER

$n \equiv$ densità
di particelle

Potenza di fusione

- $P_{\text{fusione}} = n_D n_T \langle \sigma v \rangle E_{\text{reazione}} \times \text{Volume}$

$\langle \sigma v \rangle$
 $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$



$$n^2 \langle \sigma v \rangle \approx n^2 T^2$$

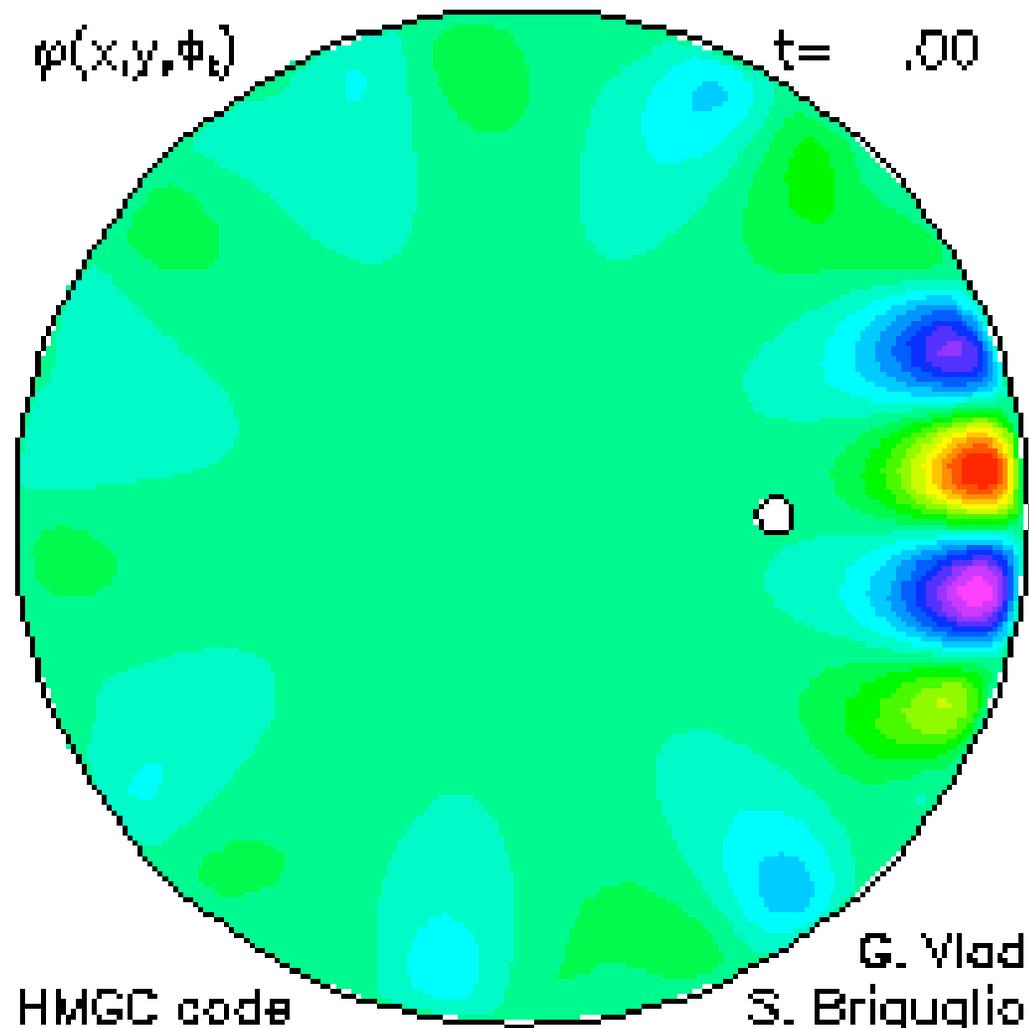
$$= p^2 \approx \beta^2 B^4$$

↑

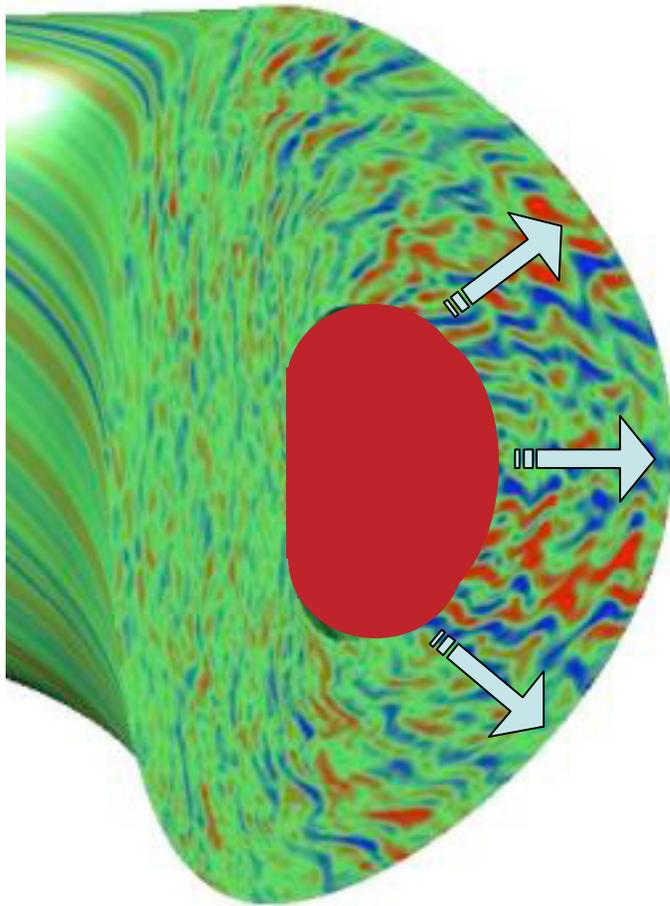
$$\beta \equiv p / (B^2 / 2\mu_0)$$

vincolato dalla
stabilità MHD
del plasma

Perdite per conduzione del calore



Perdite per conduzione del calore



- $P_{\text{conduzione}} = W/\tau_E$
- $W = (3/2) nT \times \text{Volume}$
- $\tau_E \equiv$ tempo di confinamento dell'energia

Il tempo di confinamento dell'energia

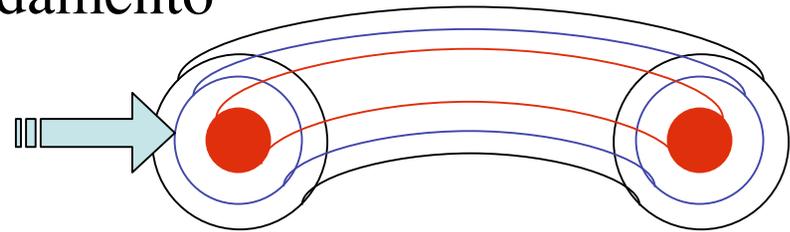


Il tempo necessario per
raffreddare il sistema dopo
aver spento le fonti di
calore

Il tempo di confinamento dell'energia

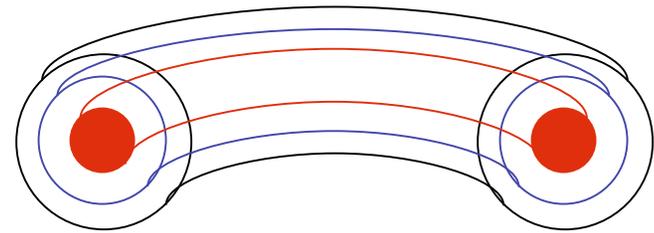


riscaldamento



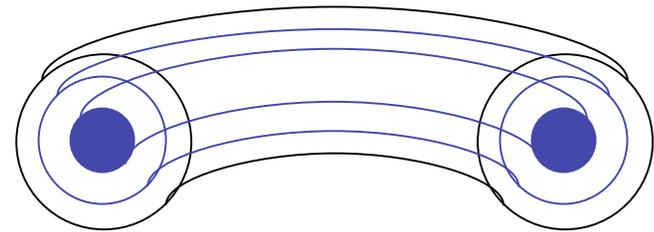
Il tempo necessario per
raffreddare il sistema dopo
aver spento le fonti di
calore

Il tempo di confinamento dell'energia



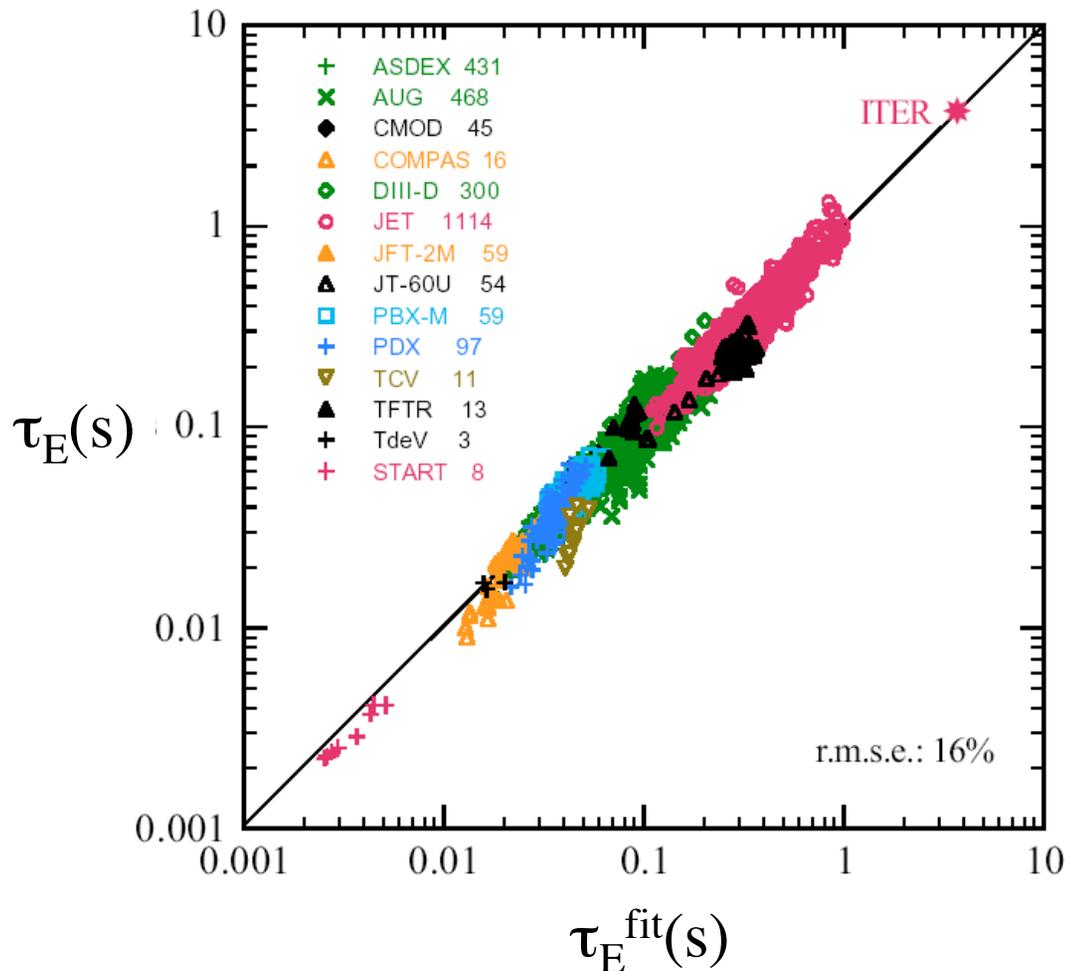
Il tempo necessario per
raffreddare il sistema dopo
aver spento le fonti di
calore

Il tempo di confinamento dell'energia



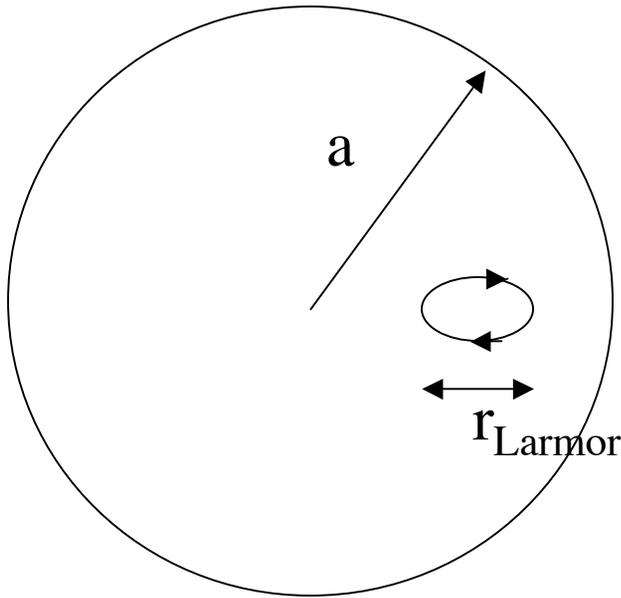
Il tempo necessario per
raffreddare il sistema dopo
aver spento le fonti di
calore

L'estrapolazione a ITER



- Il risultato di un lavoro di selezione dei dati di tutti gli esperimenti.
- L'estrapolazione e' molto minore alla estensione dei dati.
- Il tempo di confinamento aumenta all'aumentare delle dimensioni (e del campo magnetico).

τ_E aumenta con dimensioni e campo magnetico



- Coefficiente di diffusione

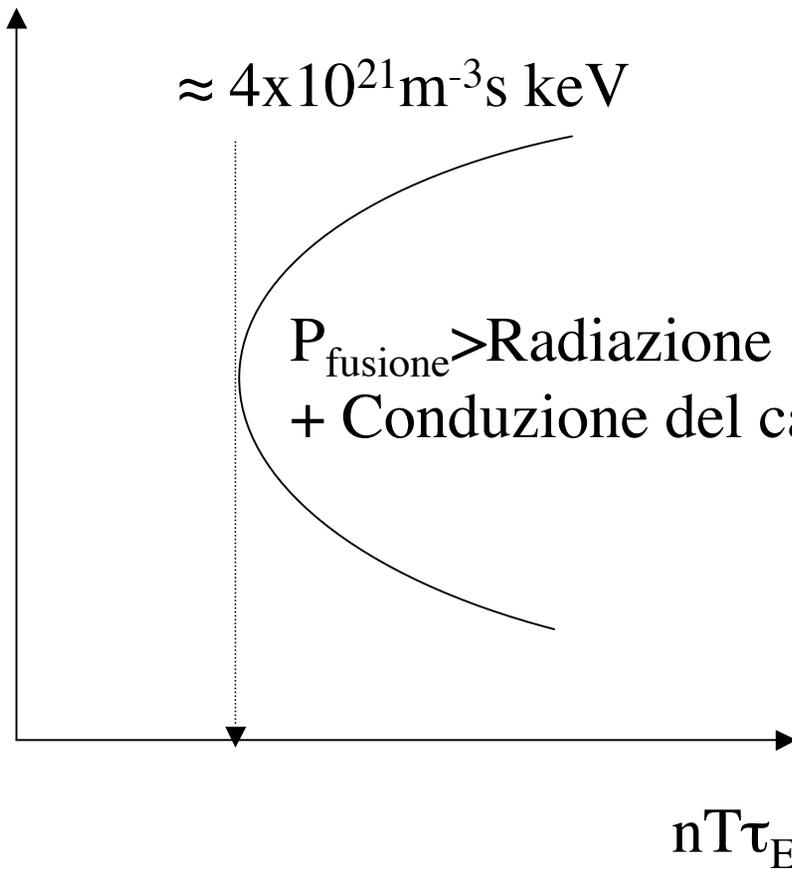
$$D \approx r_{\text{Larmor}}^2 (v_t/a)$$

- Tempo di confinamento

$$\tau_E \approx a^2/D \approx (a/r_{\text{Larmor}})^2 (a/v_t) \\ \propto a^3 B^2$$

Il criterio di Lawson

Temperatura

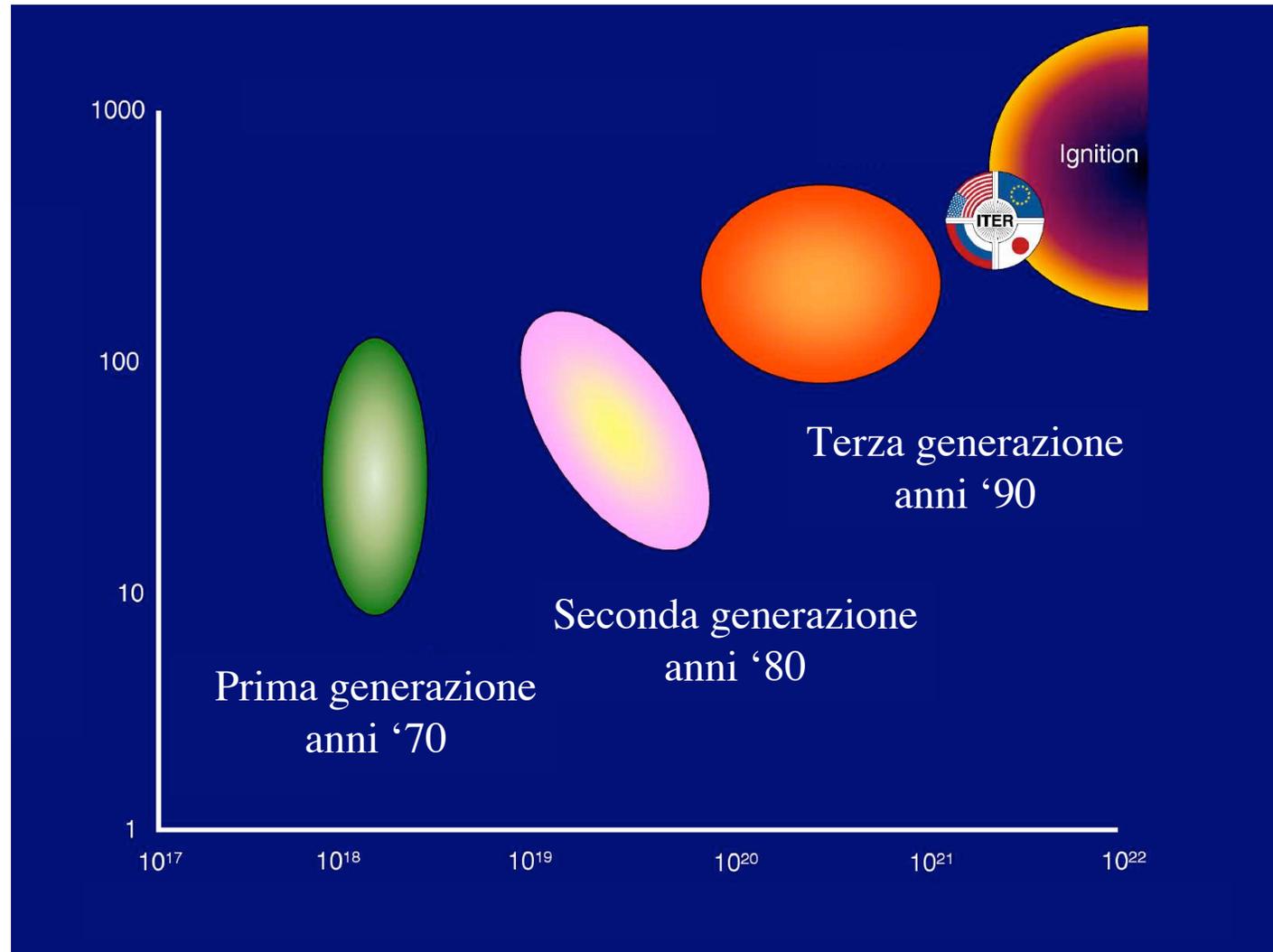


- Per avere un guadagno netto di energia occorre

$$nT\tau_E > 4 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$$

La Fusione e' giunta in condizioni vicine all'**autosostenimento** della reazione

Temperatura



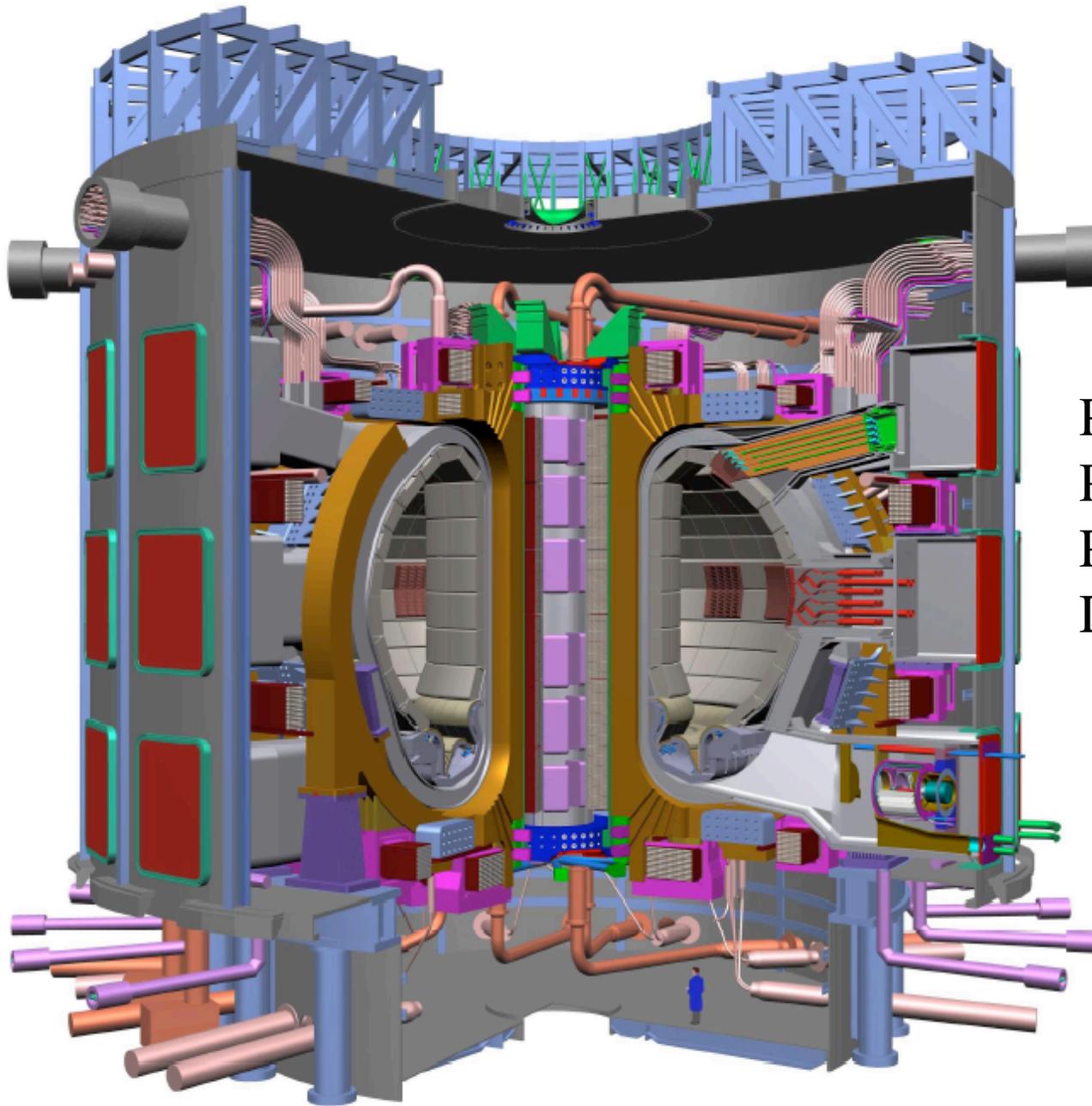
Tempo di confinamento × temperatura × densita'

Riassumendo

- Negli esperimenti esistenti si riescono a raggiungere i valori di densità e temperatura desiderati.
- Per arrivare a condizioni di guadagno di energia occorre soddisfare il **criterio di Lawson** per il prodotto $nT\tau_E$.
- Il confinamento migliora all'aumentare del campo magnetico e delle dimensioni.

ITER

- Dimostrazione dei regimi di funzionamento del reattore a Fusione.
- Amplificazione di energia di un fattore 10 per durate di 5 minuti e di un fattore 5 in stato stazionario (500MW di potenza di fusione).
- Test integrato di tutte le soluzioni tecnologiche rilevanti per la costruzione di un reattore a Fusione.

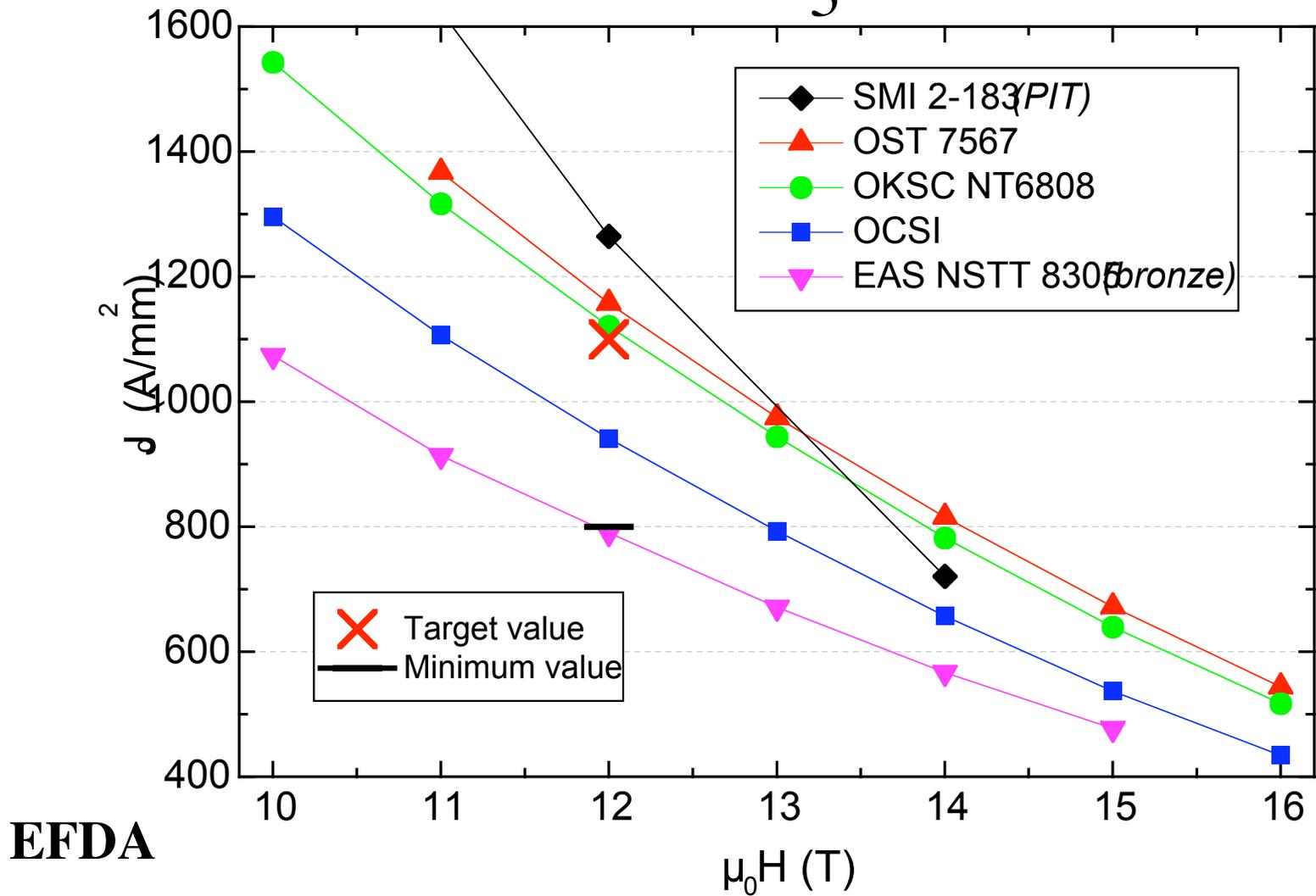


$P_{\text{fusione}} = 500\text{MW}$
 $P_{\text{alfa}} = 100\text{MW}$
 $P_{\text{ausiliaria}} = 50\text{MW}$
Durata 300-3600s

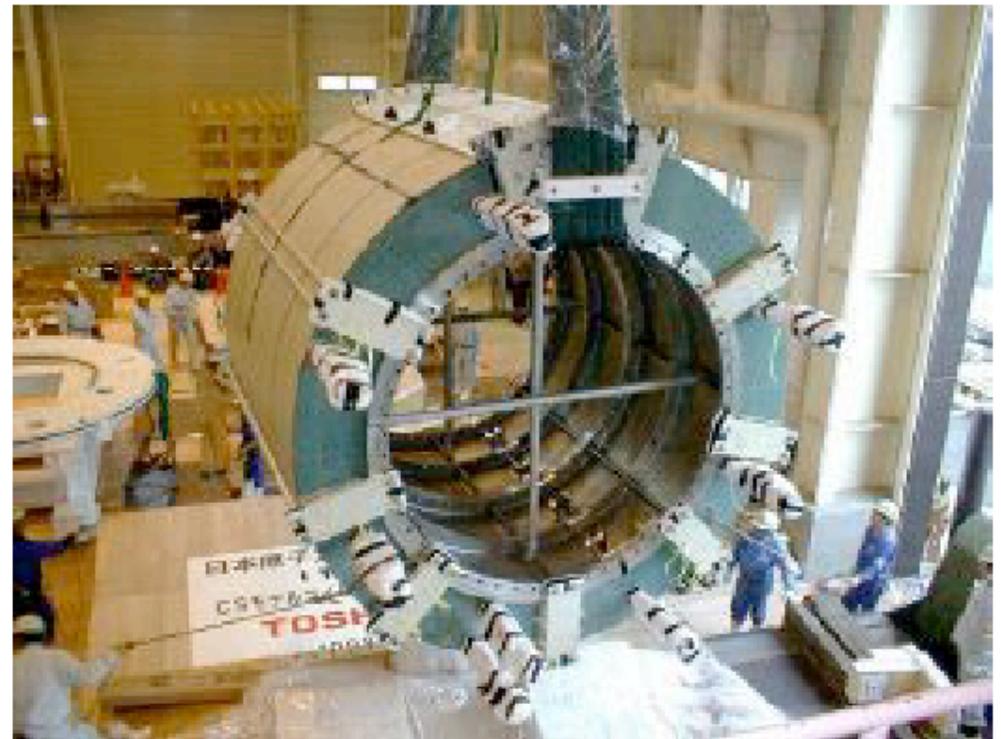
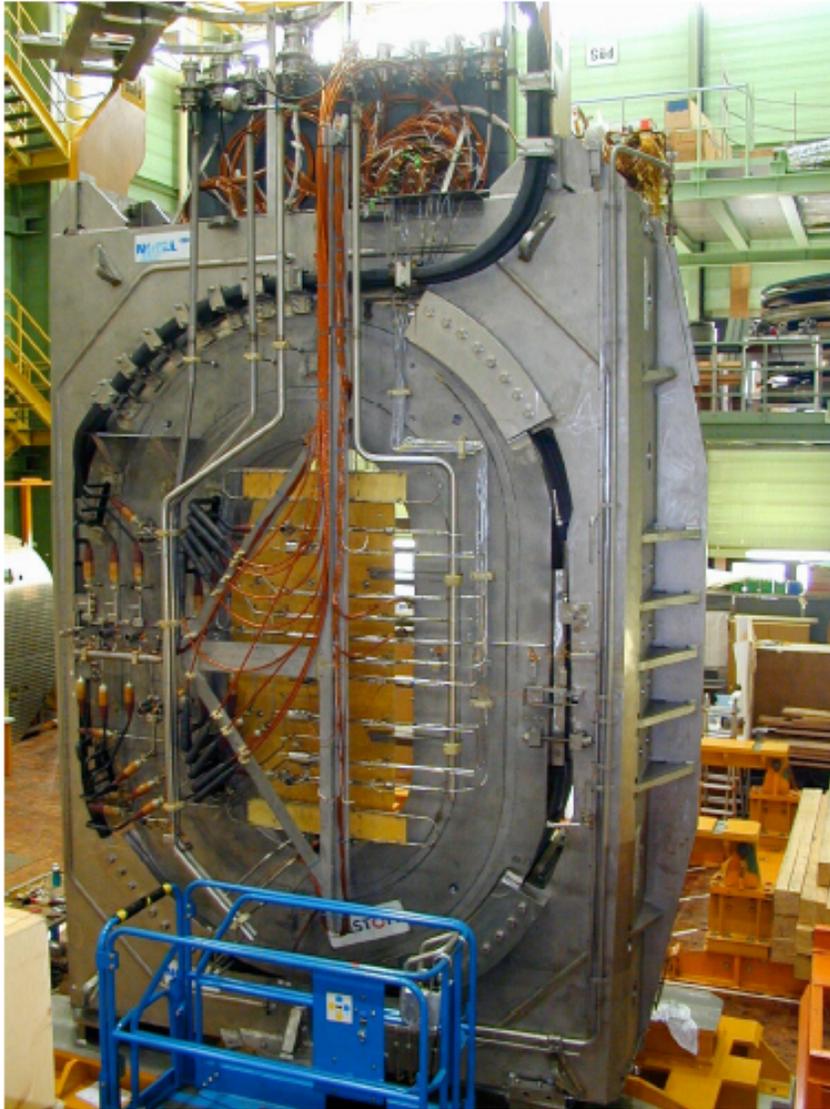
Sistema magnetico

- Magnete toroidale e solenoide centrale
Nb₃Sn
 - Strand superconduttore avanzato
 - Sei industrie europee qualificate
- Poloidali NbTi

Advanced Nb₃Sn strand



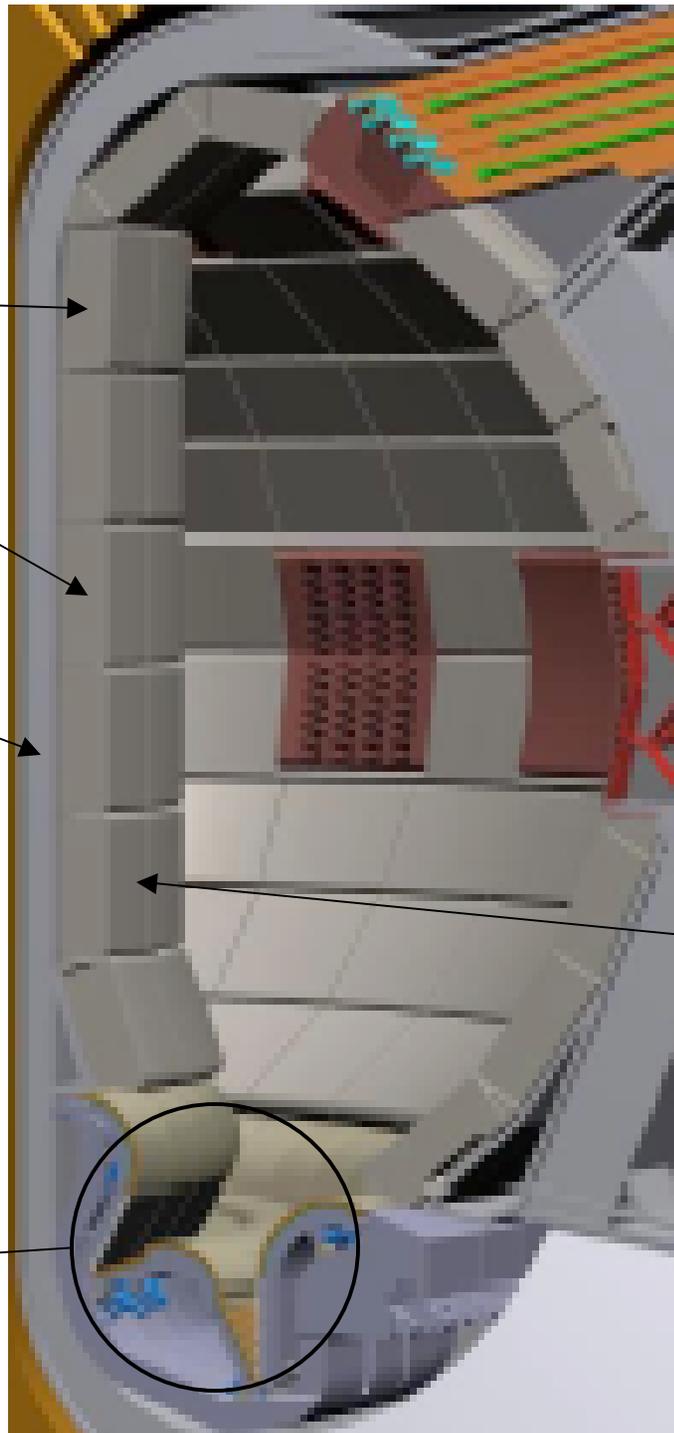
Prototipi delle bobine del magnete e del solenoide centrale



Schermo:
assorbimento
dei neutroni

Camera da vuoto

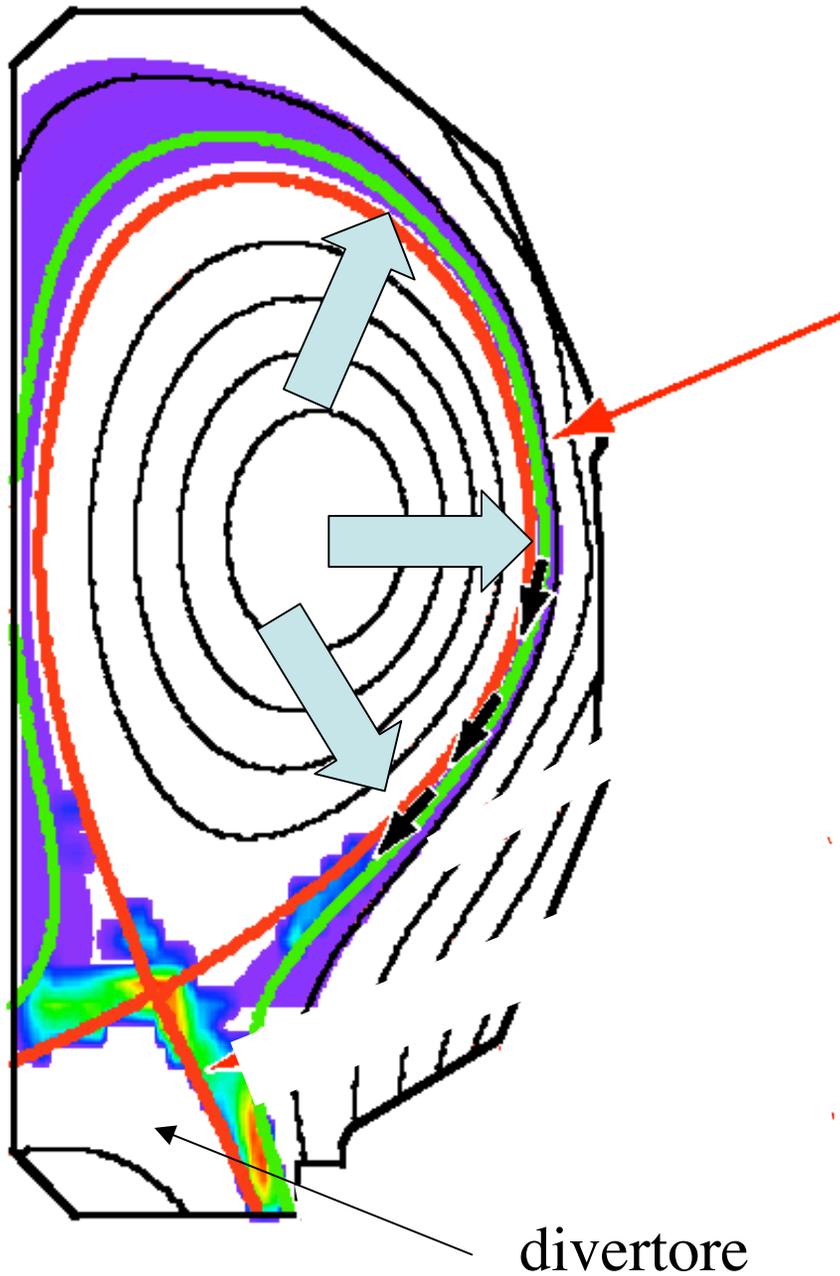
Divertore:
C e W



Prima parete Be

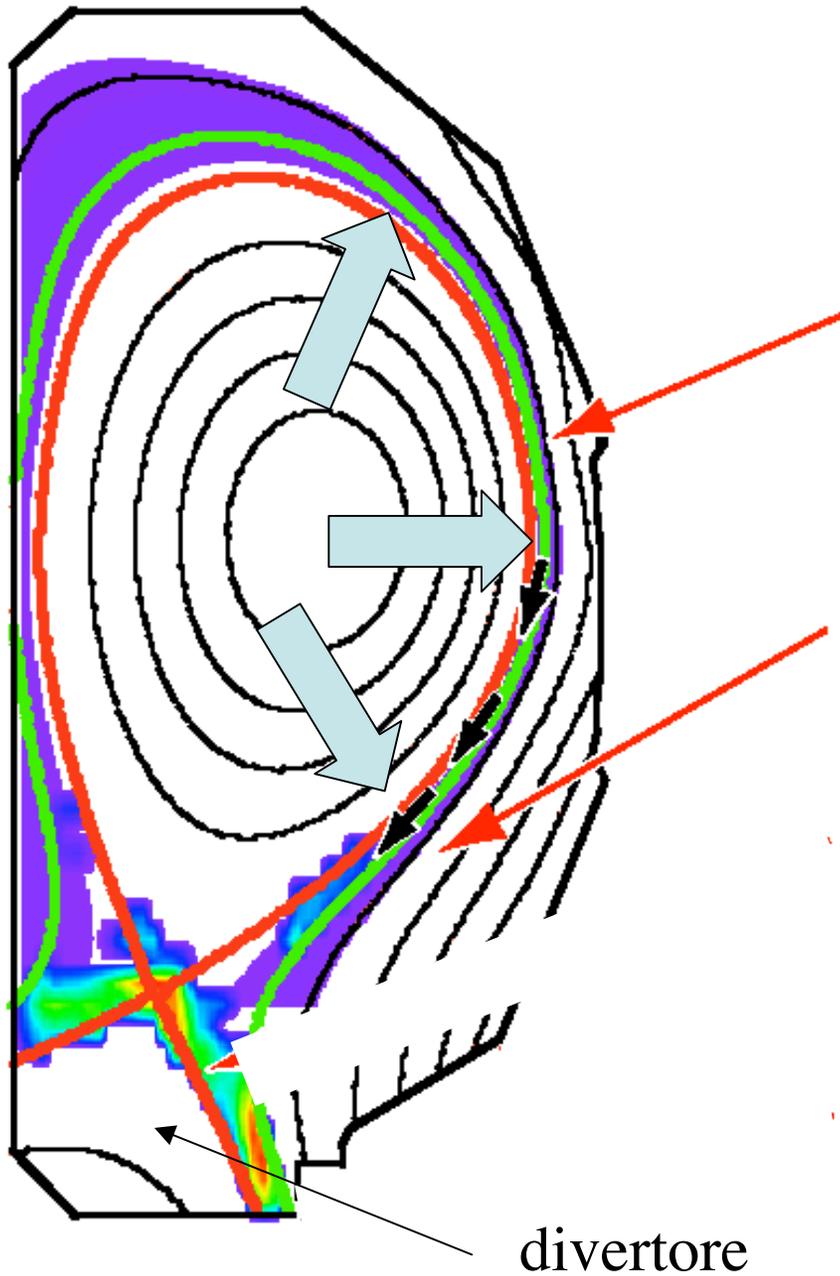
Divertore

- Il calore prodotto nel plasma e perso per conduzione deve essere smaltito senza produzione di impurezze.
- Le ceneri di elio devono essere asportate per evitare lo spegnimento della reazione.



Il calore e le ceneri che escono dall'interno della colonna di plasma fluiscono verso il divertore

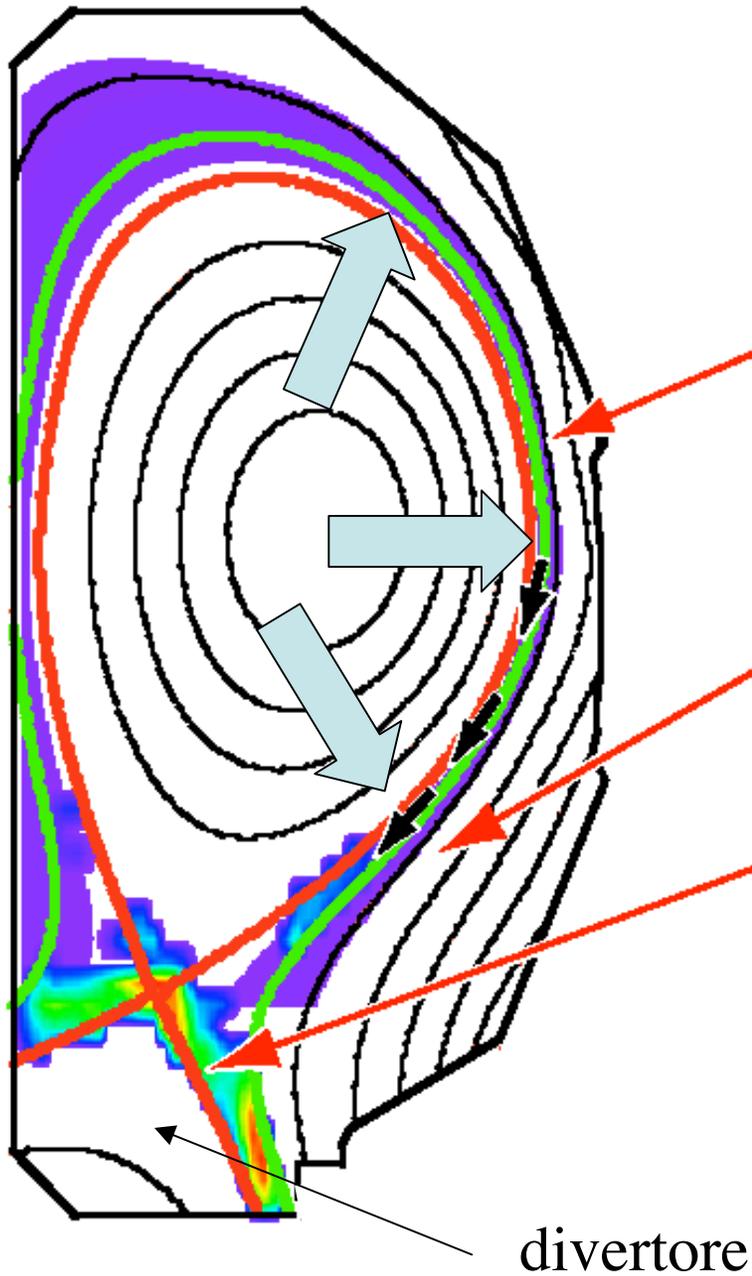
divertore



Il calore e le ceneri che escono dall'interno della colonna di plasma fluiscono verso il divertore

Parte del calore viene convertito in Radiazione che si deposita sulla parete

divertore

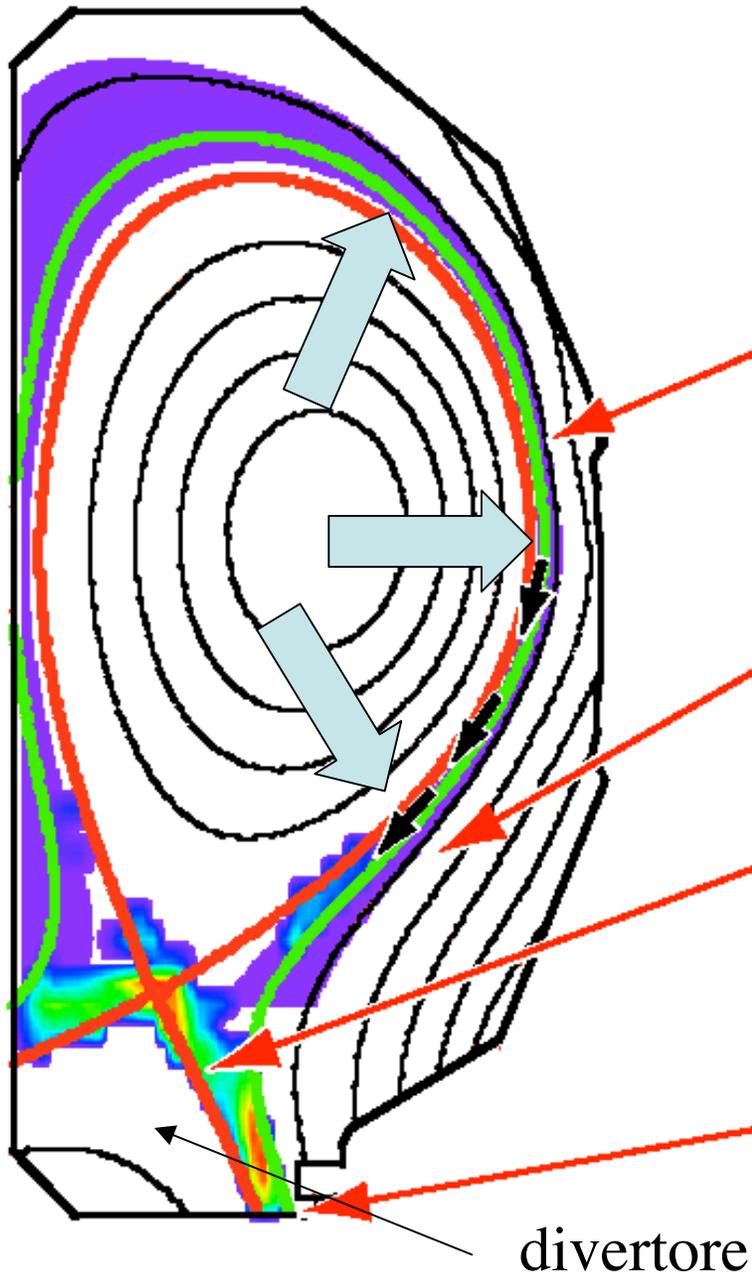


Il calore e le ceneri che escono dall'interno della colonna di plasma fluiscono verso il divertore

Parte del calore viene convertito in Radiazione che si deposita sulla parete

Il flusso di particelle verso il divertore tiene confinate nel divertore le impurezze estratte dalle piastre

divertore



Il calore e le ceneri che escono dall'interno della colonna di plasma fluiscono verso il divertore

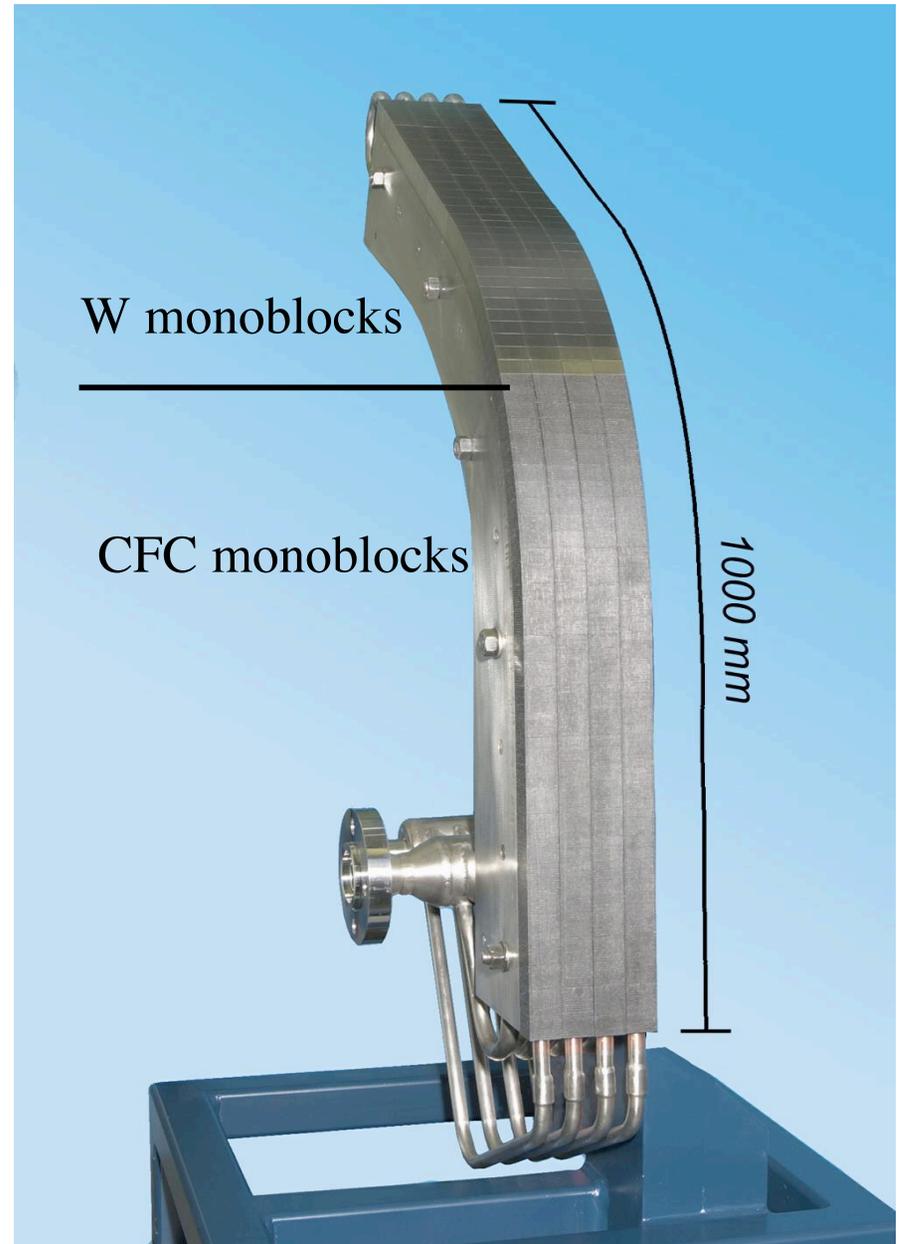
Parte del calore viene convertito in Radiazione che si deposita sulla parete

Il flusso di particelle verso il divertore tiene confinate nel divertore le impurezze estratte dalle piastre

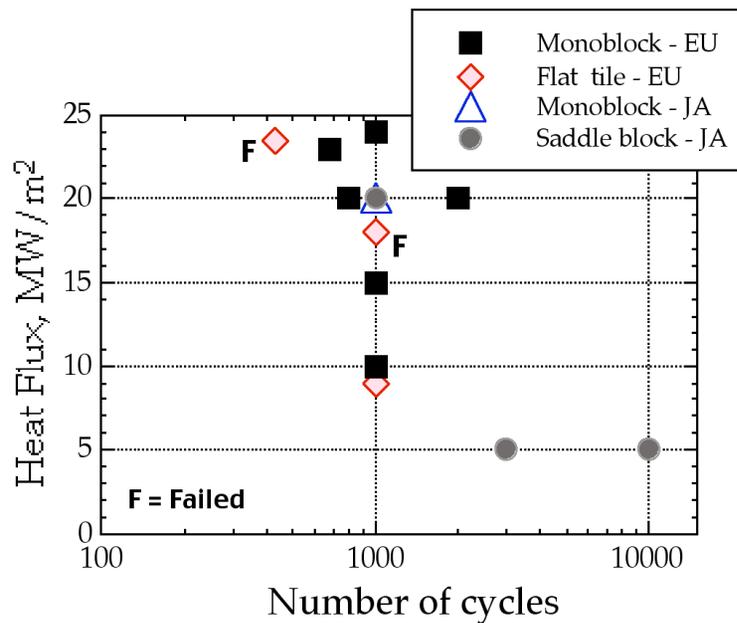
I processi di ricombinazione consentono di ridurre il carico termico sulle piastre del divertore

divertore

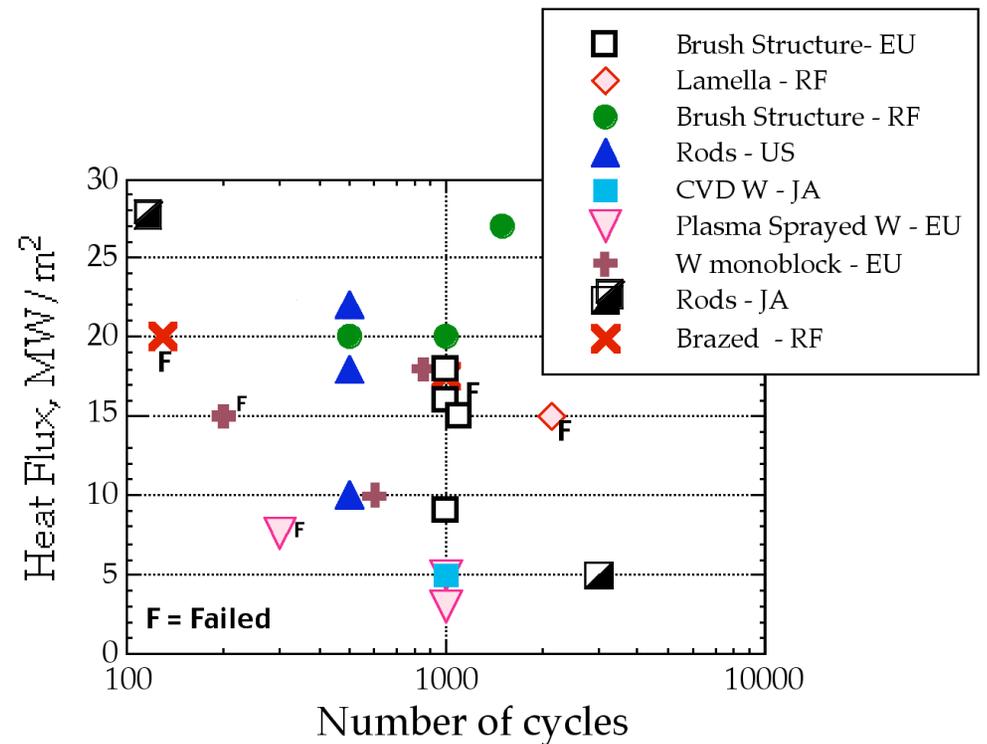
- W monoblocks per la parte superiore del divertore (baffle):
- CFC monoblock per le componenti ad alto flusso termico



Test dei componenti del divertore



CFC/Cu



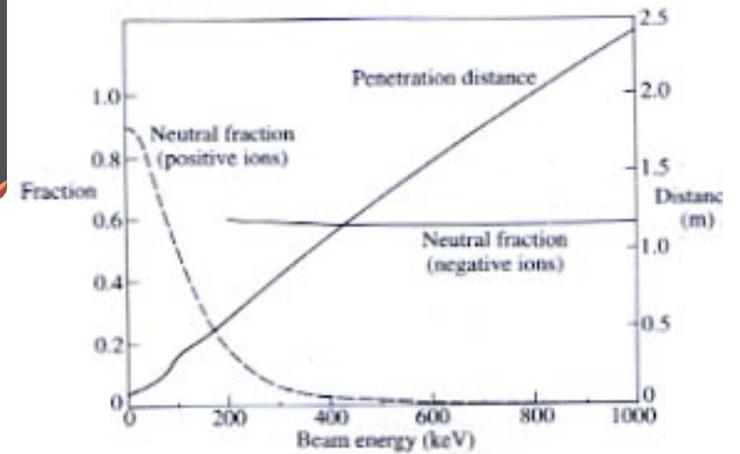
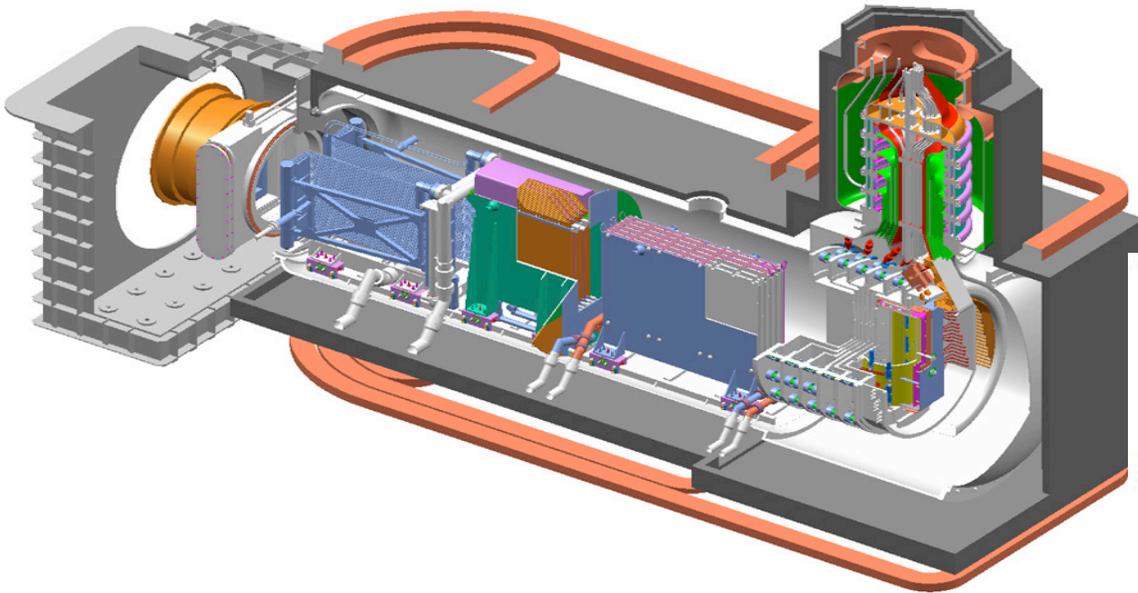
W/Cu

Prototipo del sistema di smontaggio della cassetta del divertore



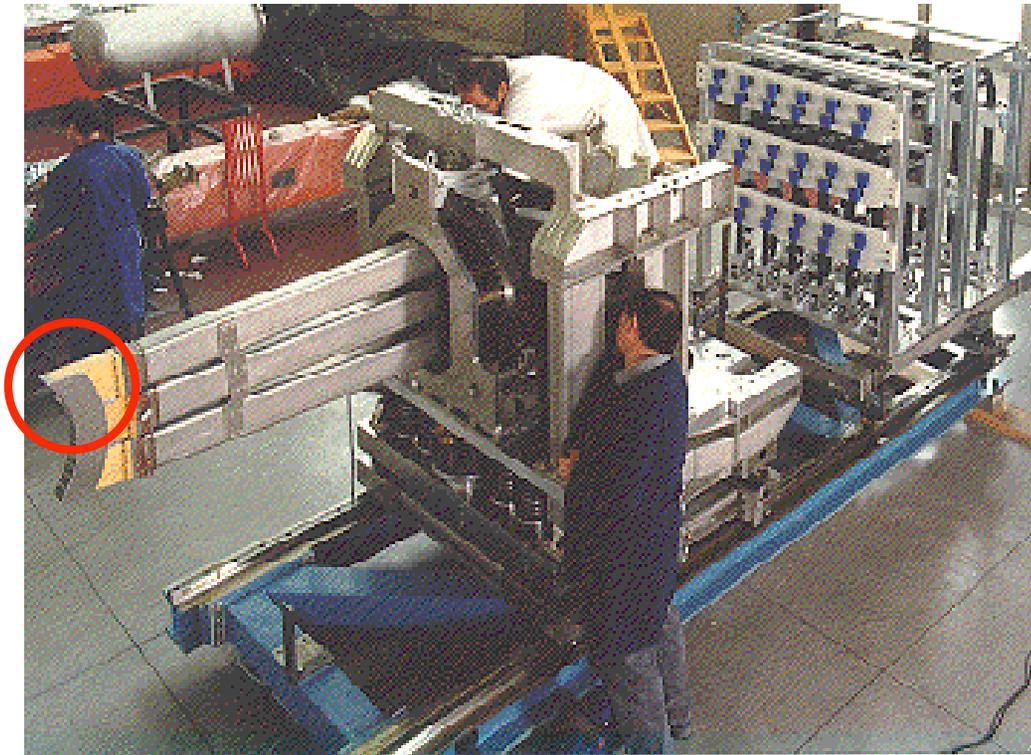
Sistemi ausiliari

Iniezione di atomi neutri

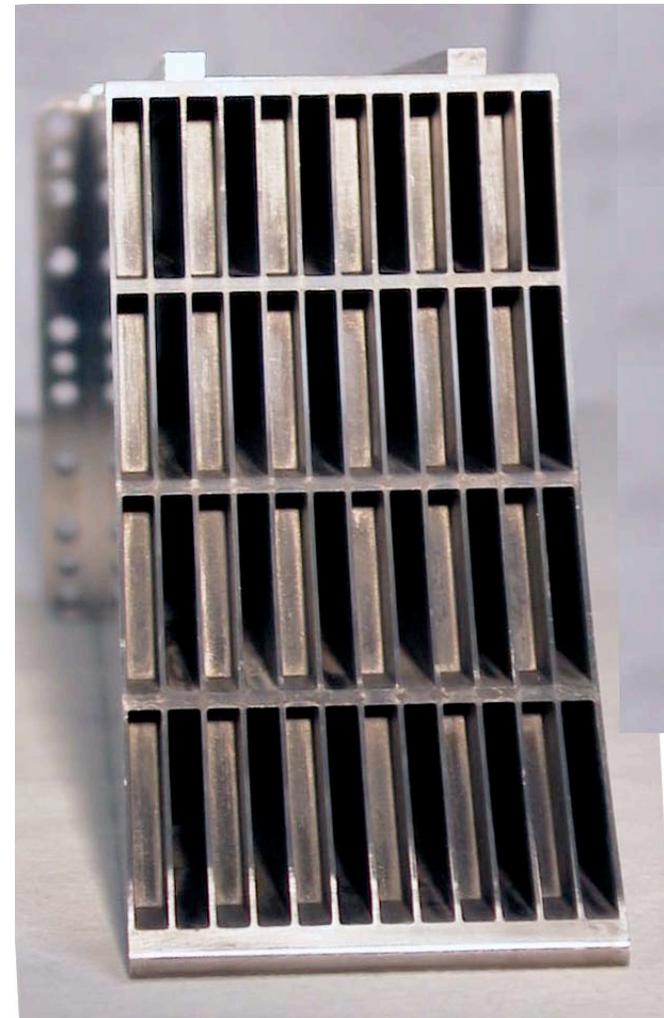


- Fascio 1MeV, 40A, 3600s, D-
- Sorgente 200A/m² (filamento o radiofrequenza)

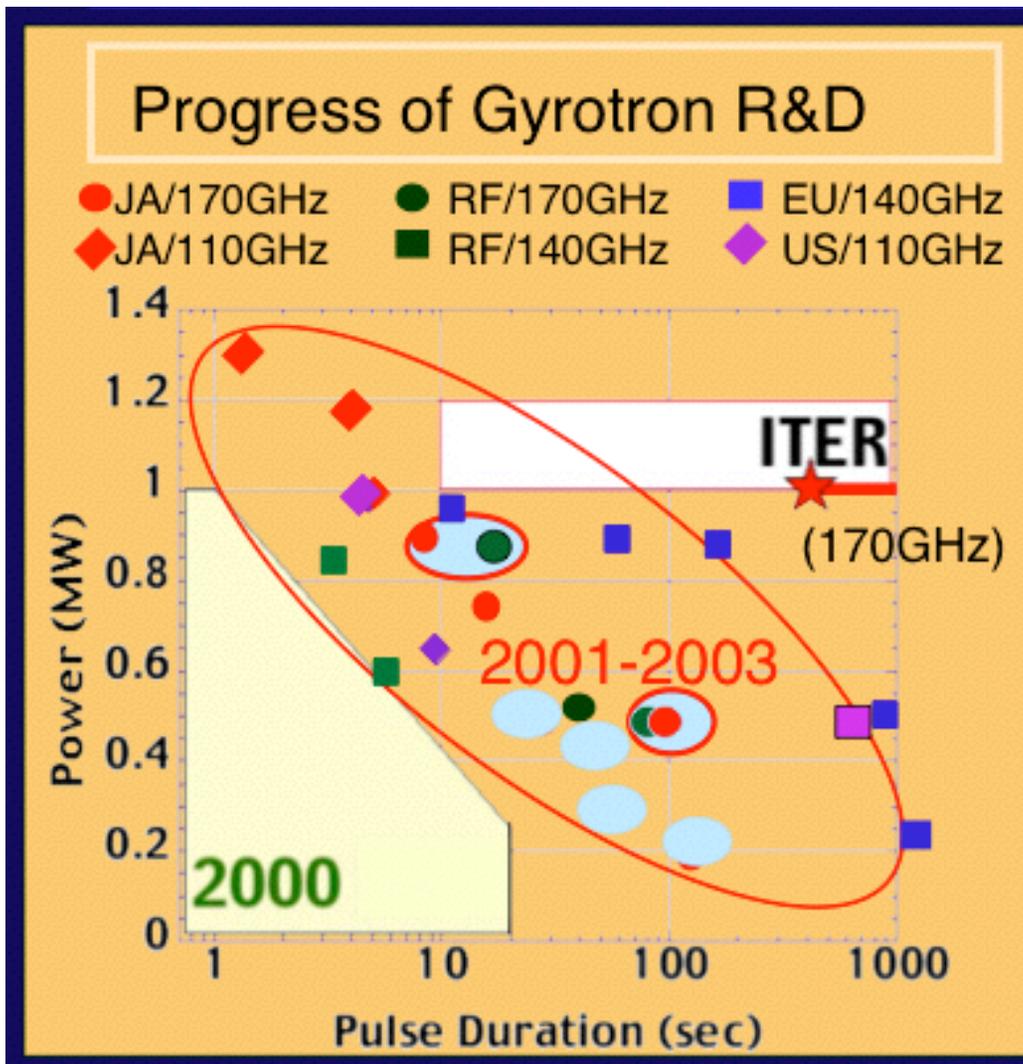
Progettazione, realizzazione e test di antenne a radiofrequenza



Antenna per onde alla frequenza ibrida
Inferiore
Modulo dell'antenna di ITER



Sviluppo di sorgenti RF



Japan

170GHz
110GHz



Russia

170GHz
140GHz



EU

140GHz



USA

110GHz
140GHz

Test of 170 GHz/1 MW in CW operation (> 400 sec) is in progress.

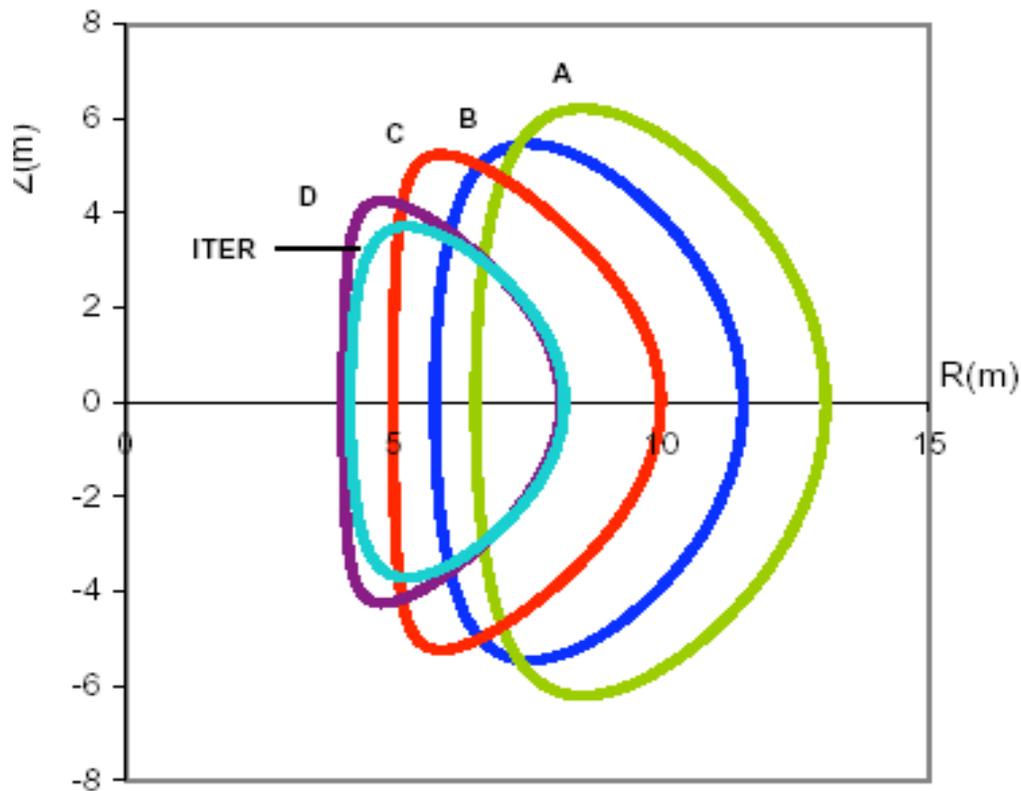
Punti critici

- Instabilità collettive guidate dalle alfa
 - Marginali nel regime di operazione di riferimento ma potenzialmente rilevanti in altri regimi di operazione
- Compatibilità dei materiali di prima parete
 - ritenzione di T da parte delle componenti in C?
- Test dei moduli di mantello triziogeno

La strada verso il reattore

- Nel caso di successo di ITER, cosa serve per costruire il reattore?
- Principali differenze tra ITER e reattore
 - Fluenza neutronica (150dpa sul reattore 3dpa su ITER)
⇒ abbiamo i materiali strutturali per ITER ma dobbiamo qualificare quelli per il reattore
 - Mantello triziogeno (solo test su ITER) ⇒ dimostrazione dell'autosufficienza del reattore

Il reattore a fusione



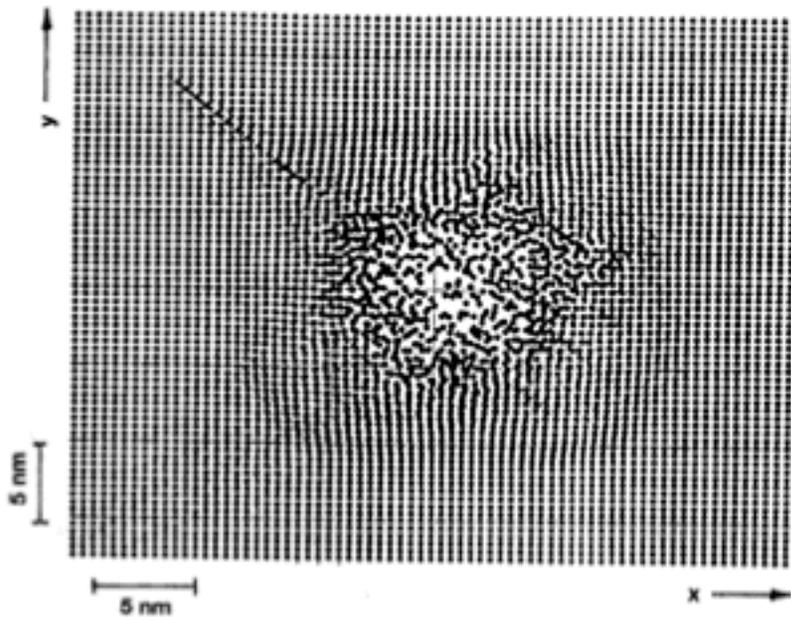
Quattro modelli (A→D)

- Crescente complessità
- Soluzioni tecnologiche più avanzate
- Dimensioni minori e costo dell'elettricità più basso

Materiali strutturali per elevate fluenze neutroniche

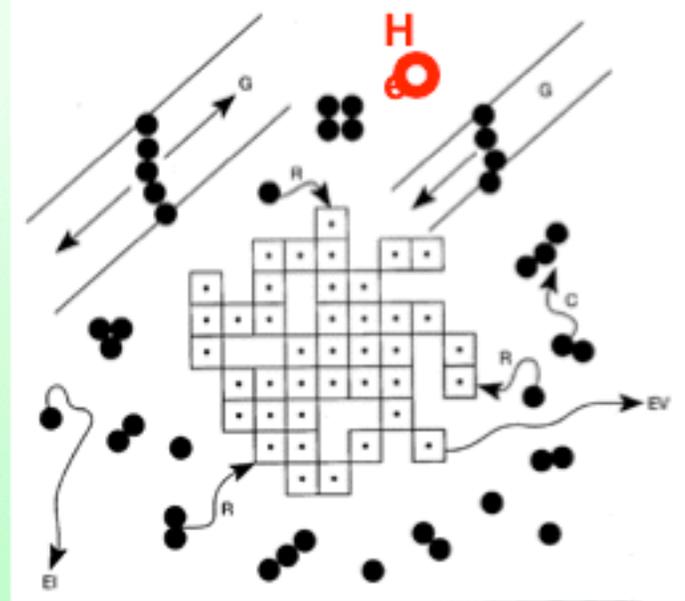
Irradiation damage: 2 elementary reactions

Atomic displacements („dpa“)



MD simulation of a displacement cascade produced by a 10 keV primary knock-on atom in an fcc lattice (Ghaly and Averback)

Nuclear reactions (e.g. He)

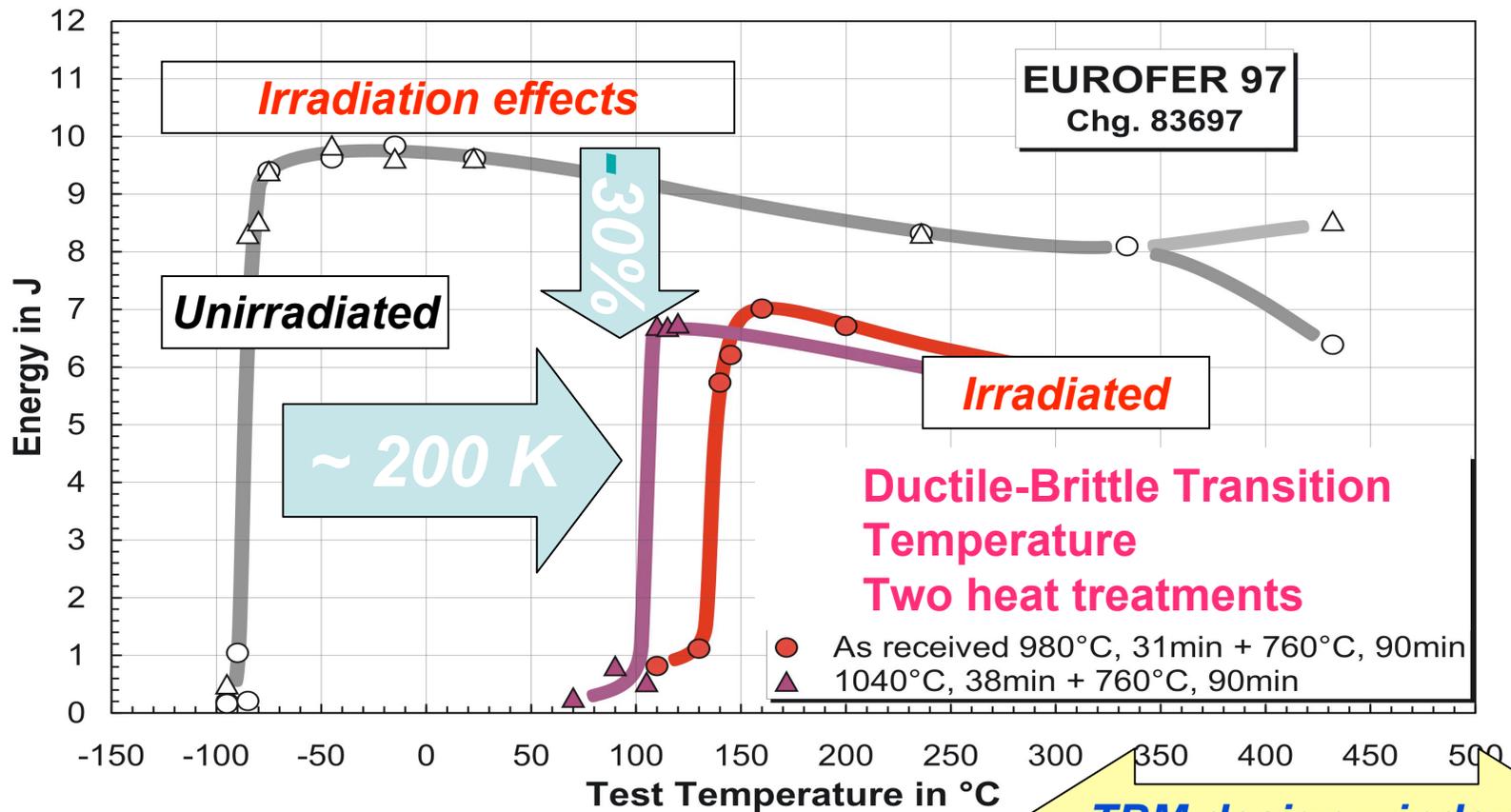


Defect arrangement in a displacement cascade (schematic)

He effects: no adequate simulation in existing irradiation facilities

Transizione duttile-fragile

32 dpa, 332°C, ARBOR 1 irradiation (C. Petersen, FZK)



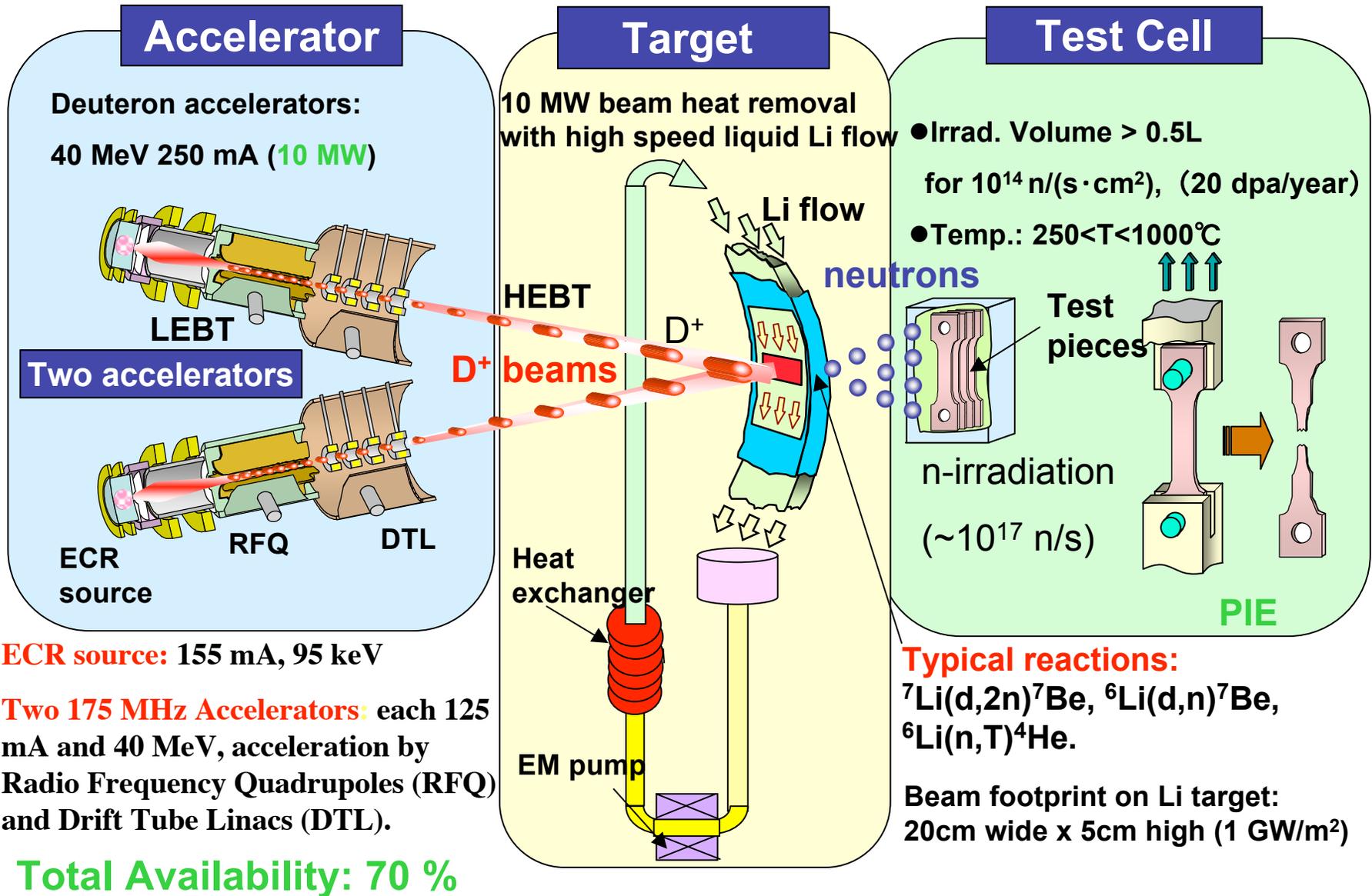
TBM design window

Operational window

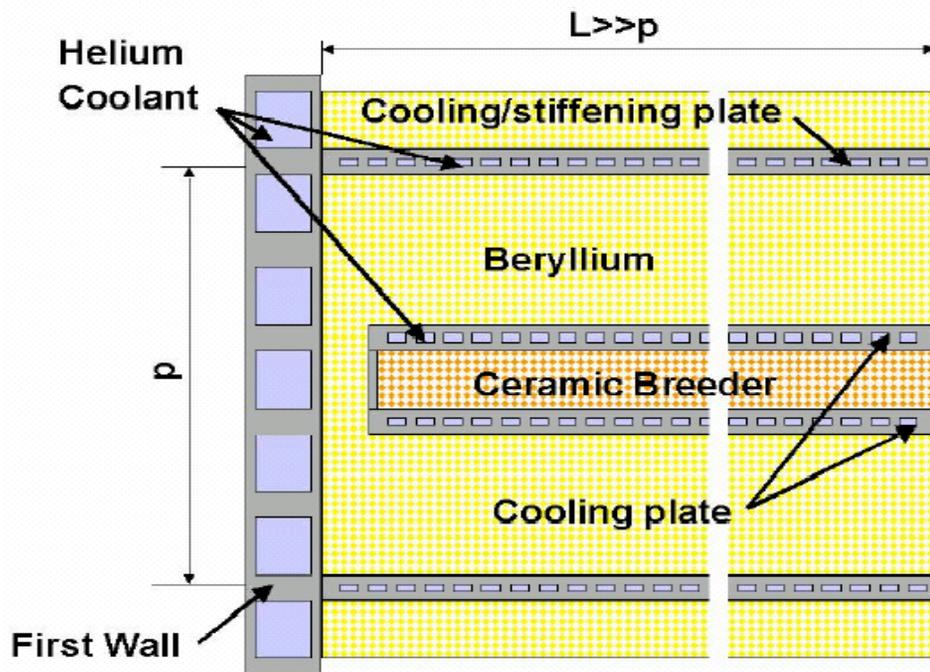
IFMIF

- Qualificare i materiali per DEMO
- Validazione dei dati generati dagli spettri dei reattori a fissione
- Caratteristiche
 - $2\text{MW}/\text{m}^2$ in un volume di 0.5l
 - Spettro simile al reattore a fusione
 - 150dpa in alcuni anni

IFMIF

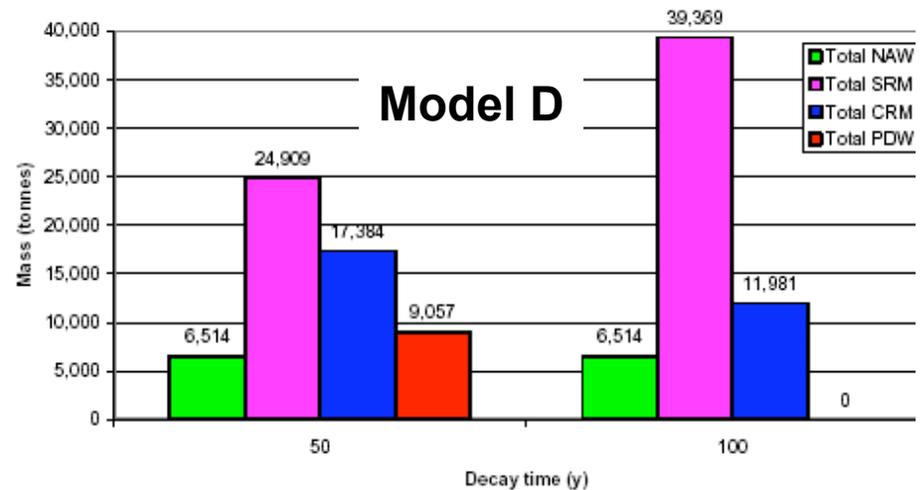
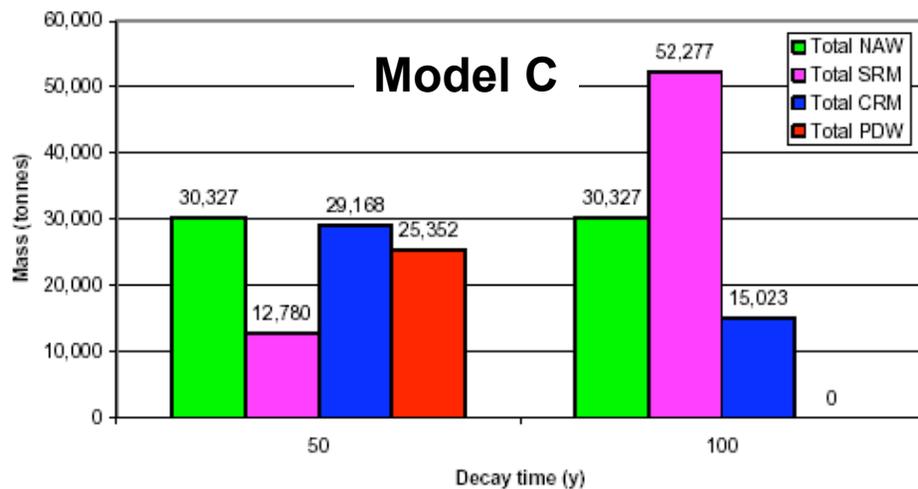
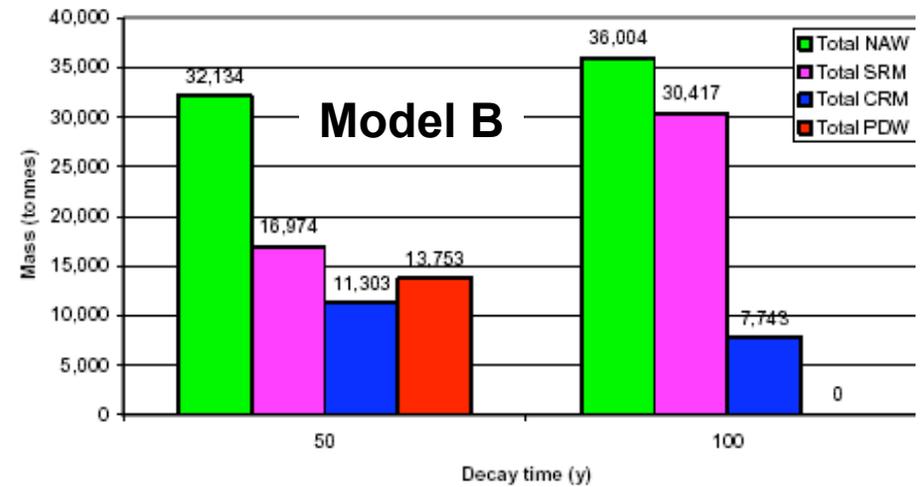
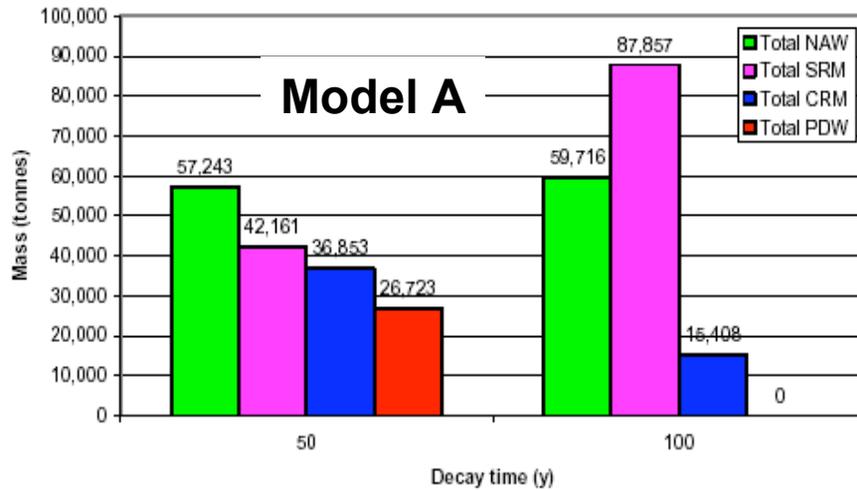


Il mantello triziogeno



- Tritium Breeding Ratio >1
- Breeder: $\text{Li}_{17}\text{Pb}_{83}$ (liquido), Li_4SiO_4 (solido)
- Moltiplicatore Pb o Be
- Refrigerante: H_2O , He, autorefrigerato
- Materiale strutturale: acciai ferritici-martensitici ($T < 550^\circ\text{C}$), ODS ($T < 650^\circ\text{C}$), SiC/SiC ($T < 1000^\circ\text{C}$)

Scorie dopo 50 e 100 anni



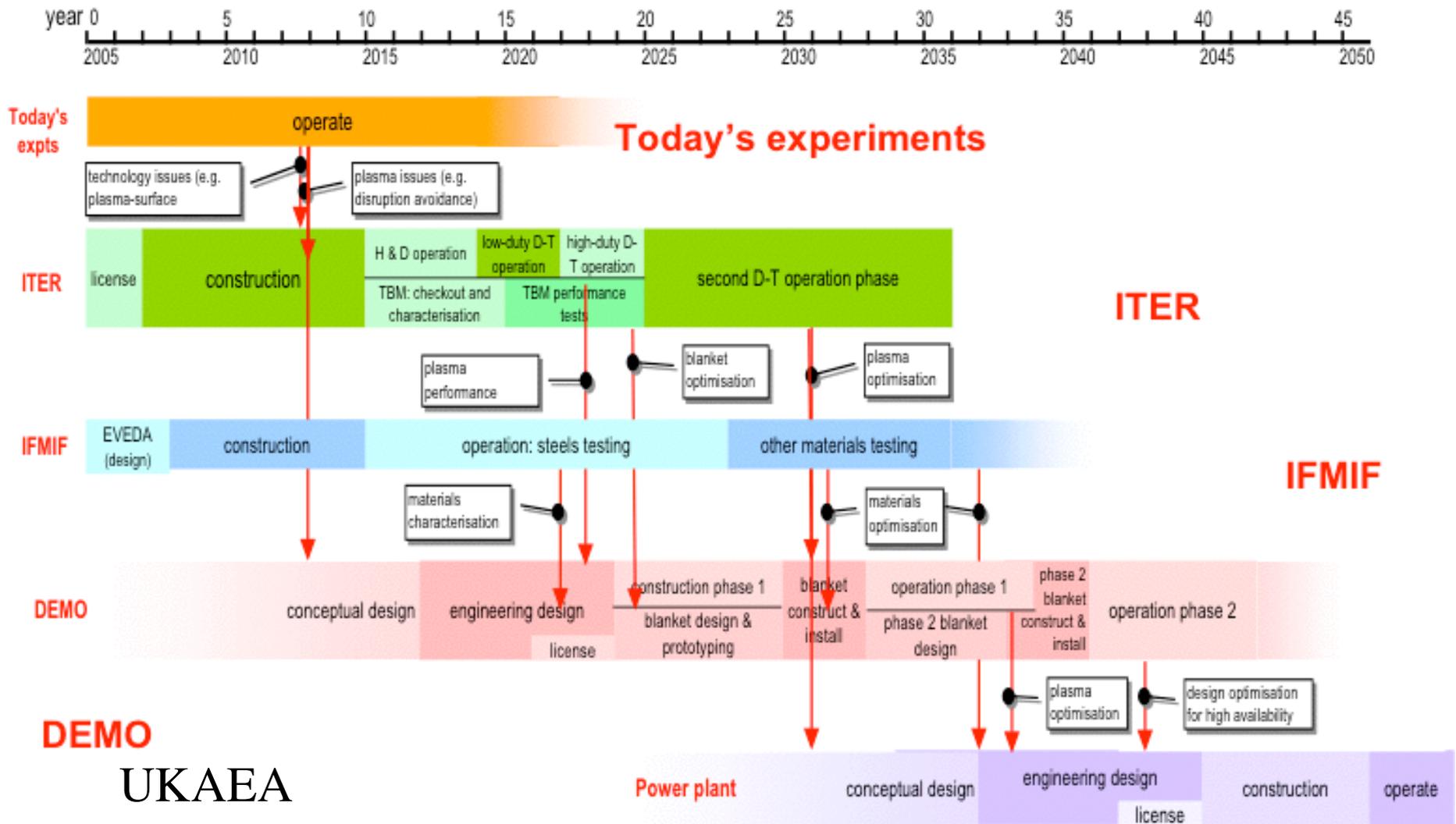
ITER: a che punto siamo?



ITER: a che punto siamo?

- Fine 2003: selezione del sito proposto dall'Europa (Cadarache, Francia)
- 2004: Due siti candidati a ospitare ITER:
 - Cadarache (Europa, Russia, Cina)
 - Rokkasho (Giappone, USA, Korea)
- Consiglio dei Ministri UE Novembre 2004.
- Giugno 2005: accordo di Mosca
- Dicembre 2005: nomina del Direttore (K. Ikeda)
- Aprile 2006: nomina Vicedirettore (N. Holtkamp)

Fast Track to Fusion Energy



Conclusioni

- L'energia da fusione è illimitata, sicura e a basso impatto ambientale.
- I tempi sono maturi per la realizzazione di un reattore sperimentale.
- L'Italia è in buona posizione per partecipare in maniera proficua.
- **La fusione non è un'impresa per i soli fusionisti: serve la collaborazione di vari settori di ricerca.**