

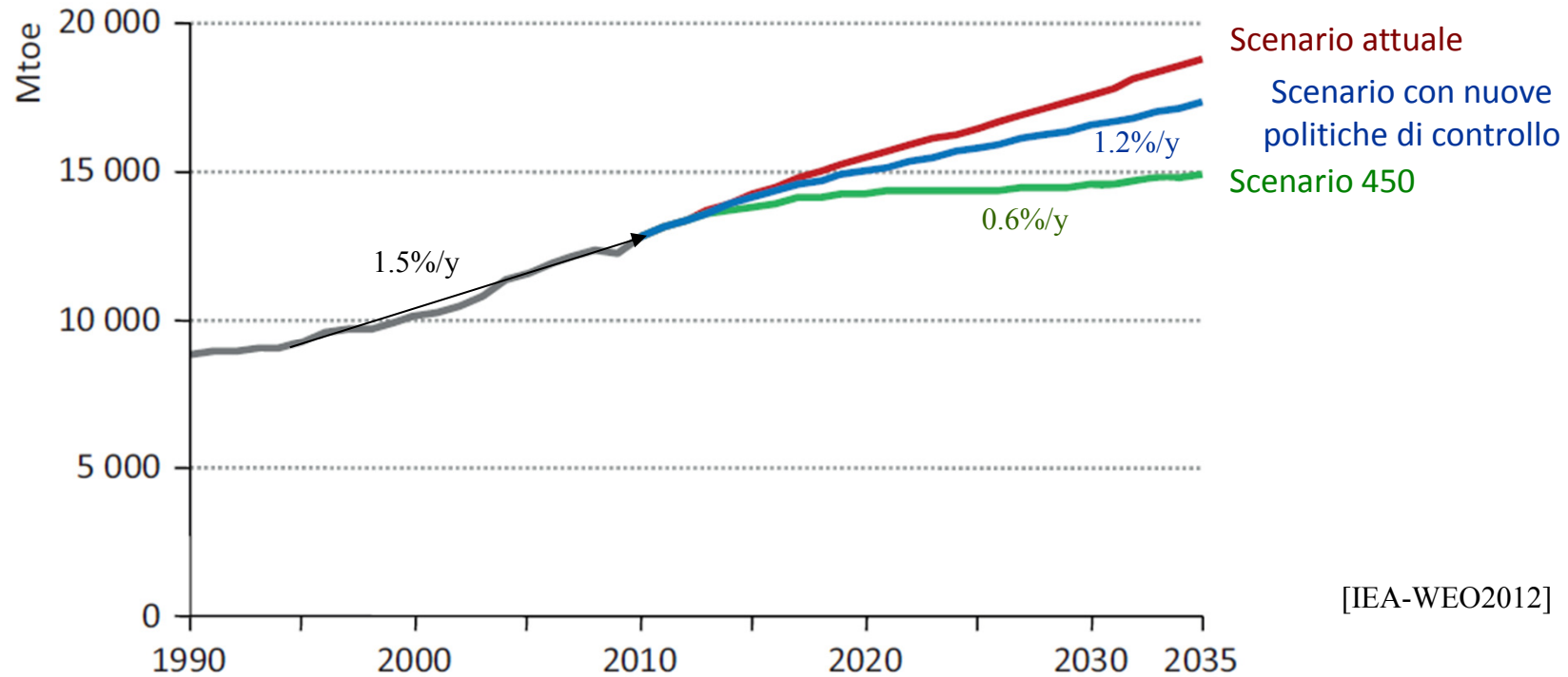
# La fusione nucleare come fonte energetica: stato della ricerca

**- Udine, 27 novembre 2015 -**

- Fulvio Auriemma
- Consorzio RFX -ENEA Association, Corso Stati Uniti 4, Padova,  
I-35127
- [www.igi.cnr.it](http://www.igi.cnr.it)
- 049-8295000

- + Perchè studiare la fusione?
- + Come avviene il processo di fusione tra nuclei?
- + E' possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?
- + Qual è lo stato attuale della ricerca fusionistica nel mondo?
- + Il passo successivo: ITER
  - Il contributo padovano
- + Conclusioni e domande...

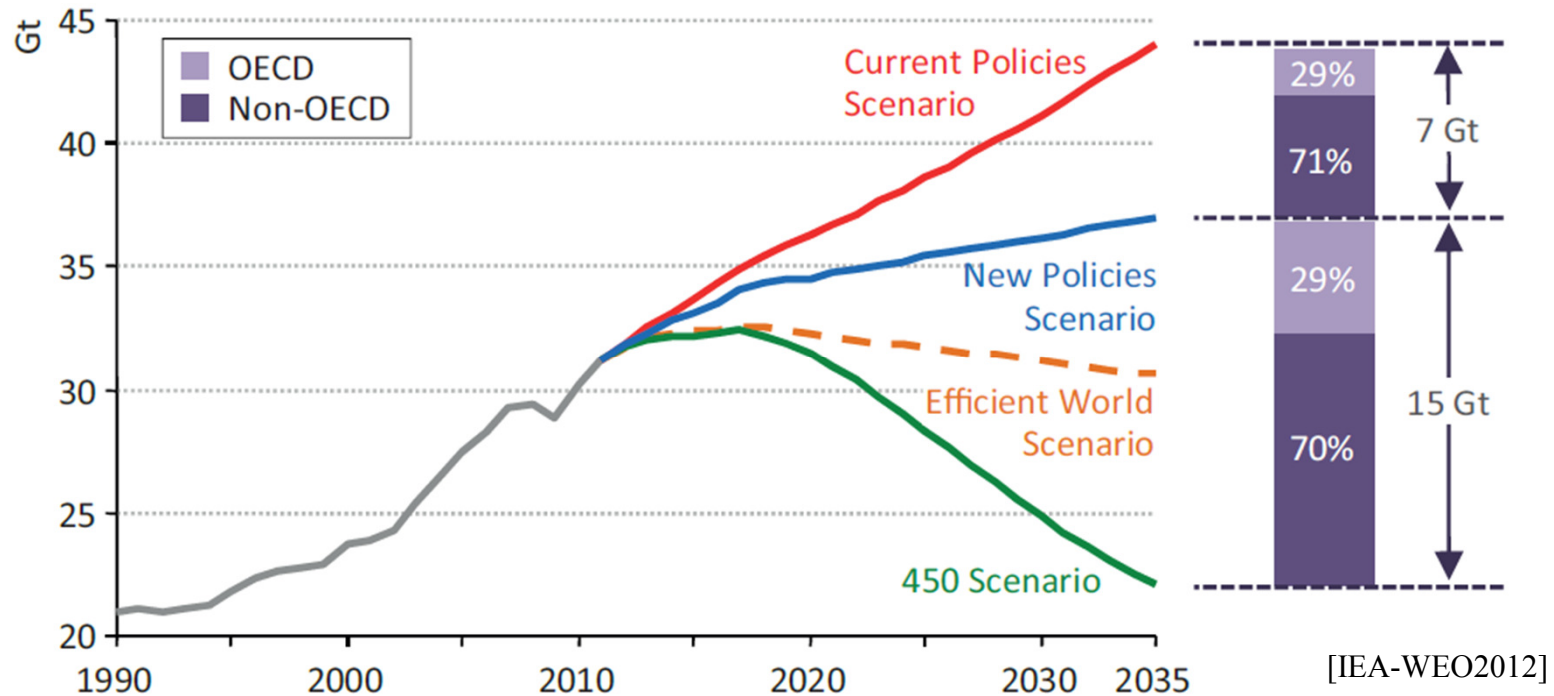
# Consumo di energia primaria al mondo



## Consumo di energia nel mondo - 3 scenari ipotizzati

tutti e 3 concordano che la pressione demografica e la necessità di miglioramento dell' "indice di sviluppo umano" dei paesi sottosviluppati richiederà un incremento della domanda di energia primaria

# CO<sub>2</sub> immessa in atmosfera

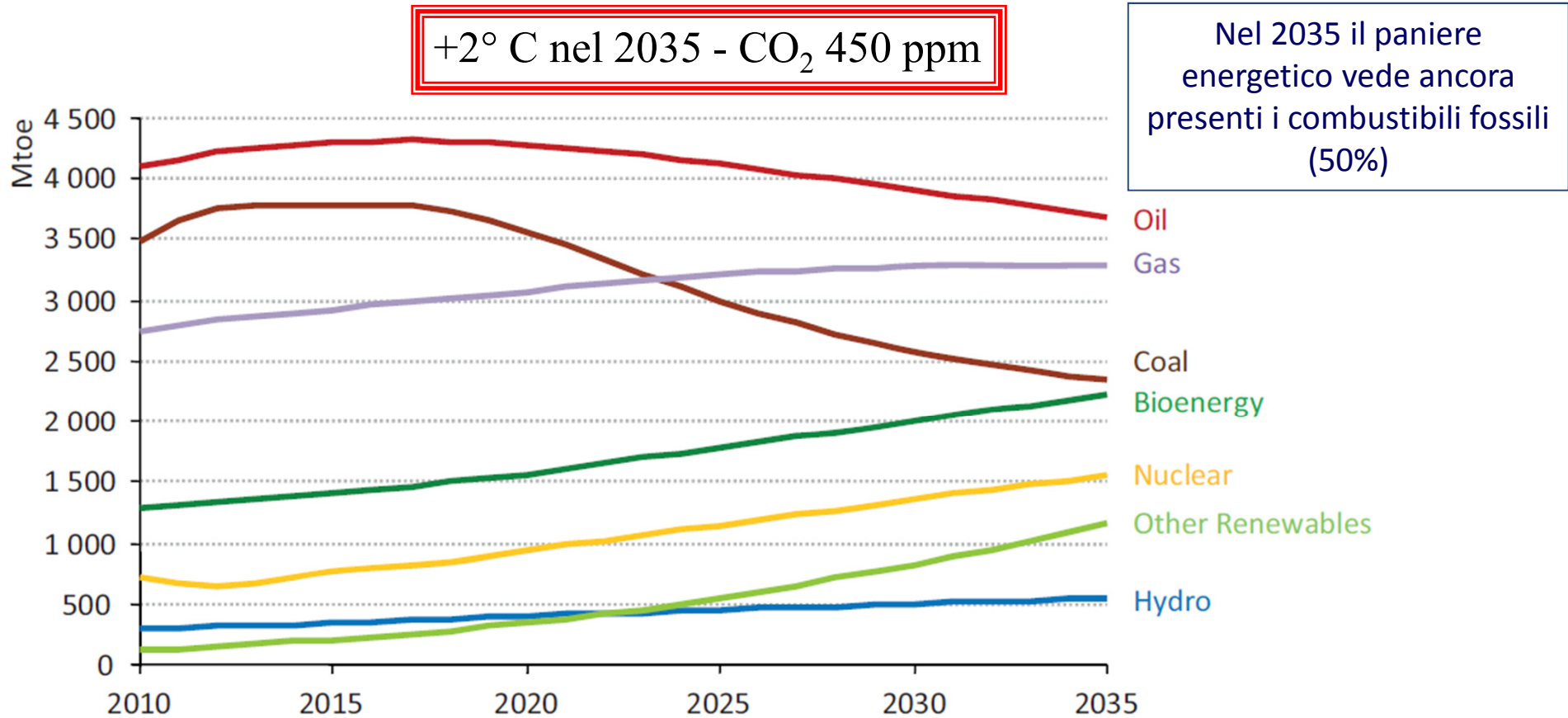


- **Crescente consumo di energia da combustibili fossili: Paesi in via di sviluppo ed in quelli in transizione**
- **Impatto ambientale (inquinamento) per minor costo degli impianti di conversione e per carenza di tecnologia e di regolamentazione.**
- **Crescita delle emissioni di CO<sub>2</sub> più rapida della domanda di energia.**



# Scenario energetico per il futuro

Scenario in accordo con *Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)* 2010:



**Necessità di differenziare più possibile le diverse fonti, con contributo di 30% di fonti low-carbon:  
non possiamo trascurare nessuna alternativa!**

# Bastano le fonti energetiche attuali?

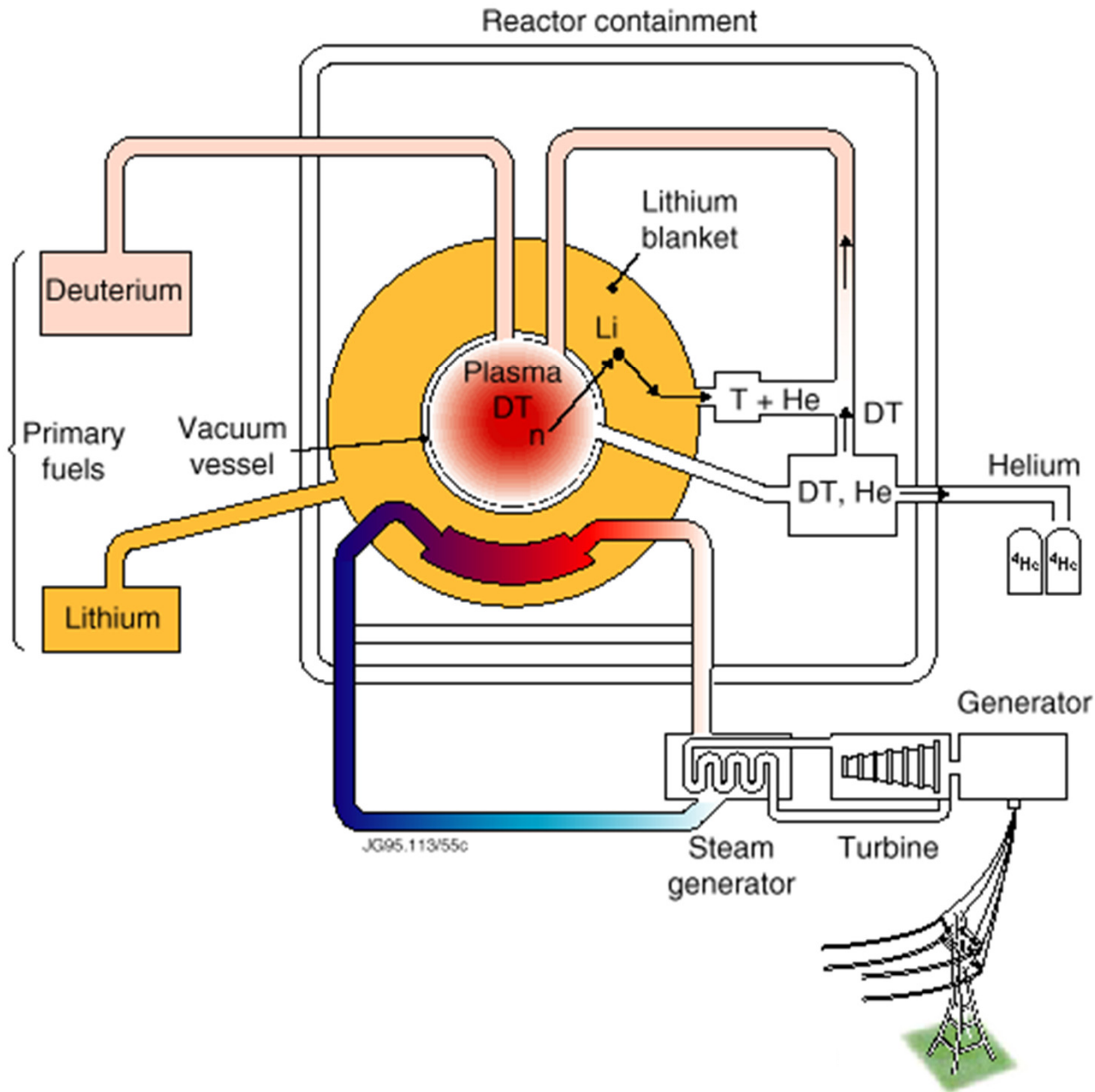
**RIFERIMENTO:** una centrale convenzionale da 1 GW richiede in un anno 1,400,000 tonnellate di *petrolio* (100 super-petroliere)

## Per una ipotetica centrale da 1 GW da fonti carbon free:

- **Bioalcol** → 6200 km<sup>2</sup> di campi di barbabietola (*~Friuli V.G.*)
  - **Biogas** → 20 milioni di maiali
  - **Eolico** → una superficie di 486 km<sup>2</sup> (*~Milano X 3*)
  - **Solare** → 50 km<sup>2</sup> alle medie latitudini (*~1/2 Padova*)
- 
- **Fissione nucleare** → 35 tonnellate all'anno di uranio
  - **Fusione nucleare** → 300kg all'anno per una centrale da 1 GW - NB: 1 Kg di combustibile da fusione equivale a 10.000 tonnellate di carbone

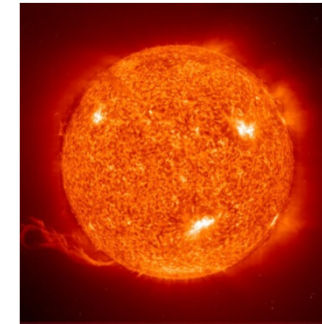
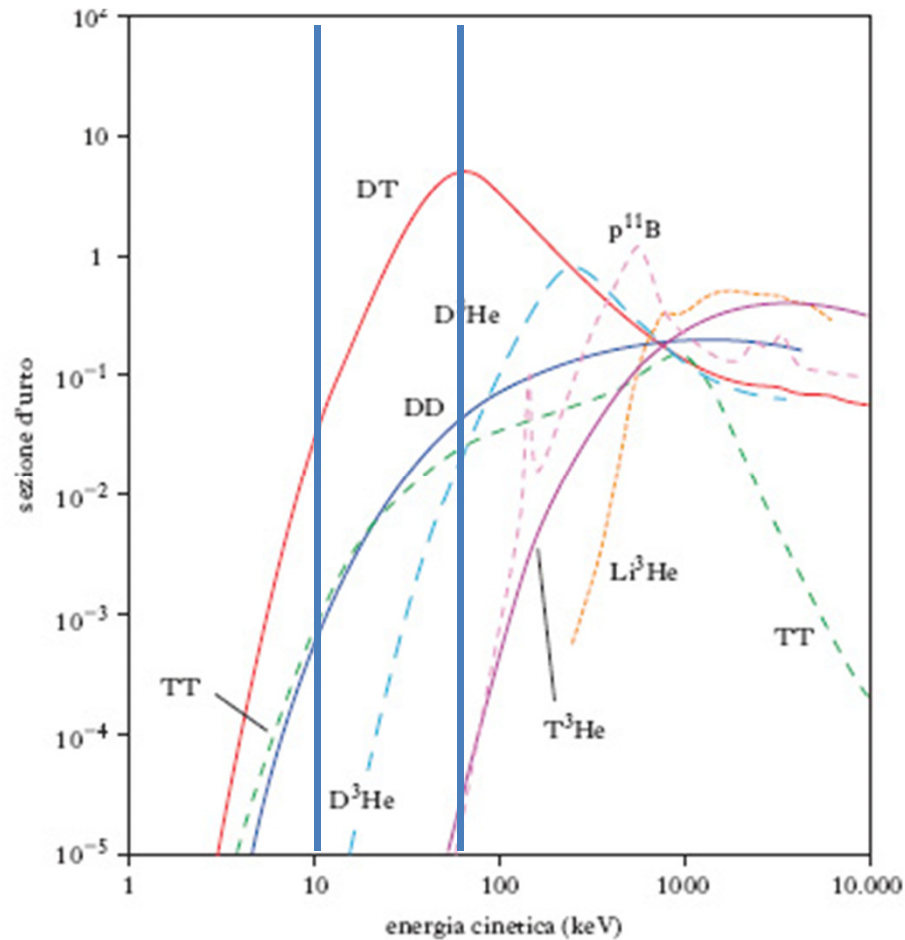
(fonte: <http://scitech.web.cern.ch/scitech/Schools/EFDA.pdf>)

# Come funzionerà una centrale a fusione?

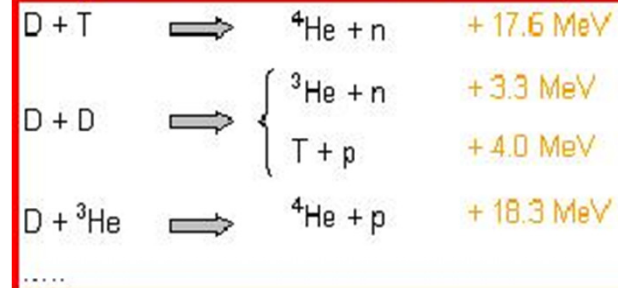


# Reazioni di fusione sfruttabili sulla terra

- Nelle stelle i nuclei di atomi leggeri fondono insieme, formando elementi più pesanti e liberando una grande quantità di energia.

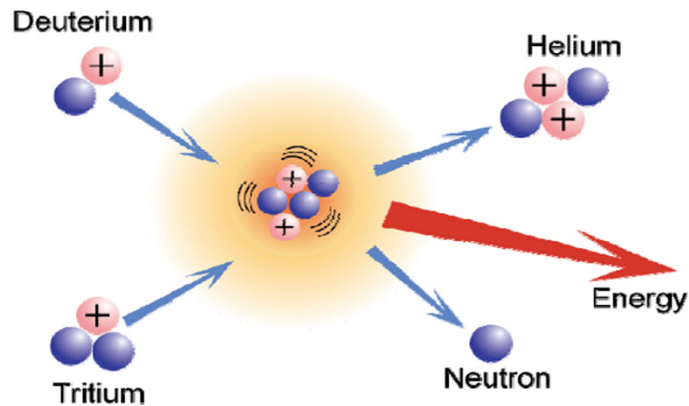


### Alcune reazioni di fusione



1 eV  $\cong$  11600 K  $\rightarrow$  10 keV  $\cong$  100 x 10<sup>6</sup> K

# Come avviene la fusione?



**RISORSE PER 20  
MILIONI DI ANNI**

## Deuterio

Oceani  
 (33 g in 1m<sup>3</sup>  
 risorse stimate 10<sup>13</sup> t)



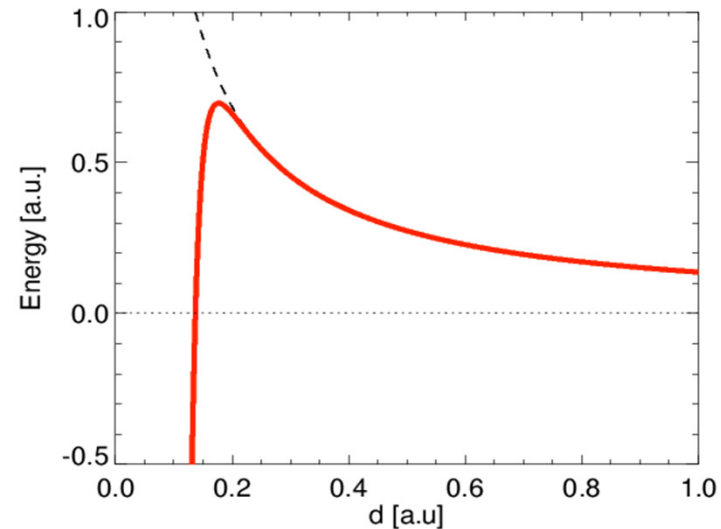
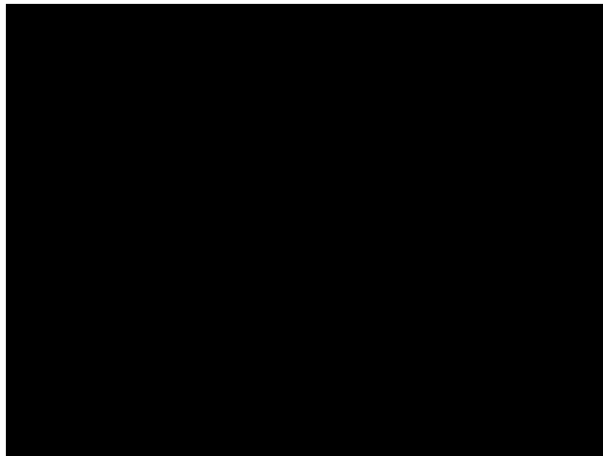
## Trizio ← Litio

- nell'acqua del mare (~0,2 g/m<sup>3</sup>  
risorse stimate ~10<sup>11</sup> t)
- nella crosta terrestre  
risorse stimate ~12 Mt;



## Come avviene la fusione?

- I nuclei carichi positivamente si respingono; aumentando la loro **energia cinetica** (ovvero la loro temperatura) essi possono avvicinarsi, superando la barriera coulombiana e quindi fondersi, grazie alle forze nucleari.



### Temperature:

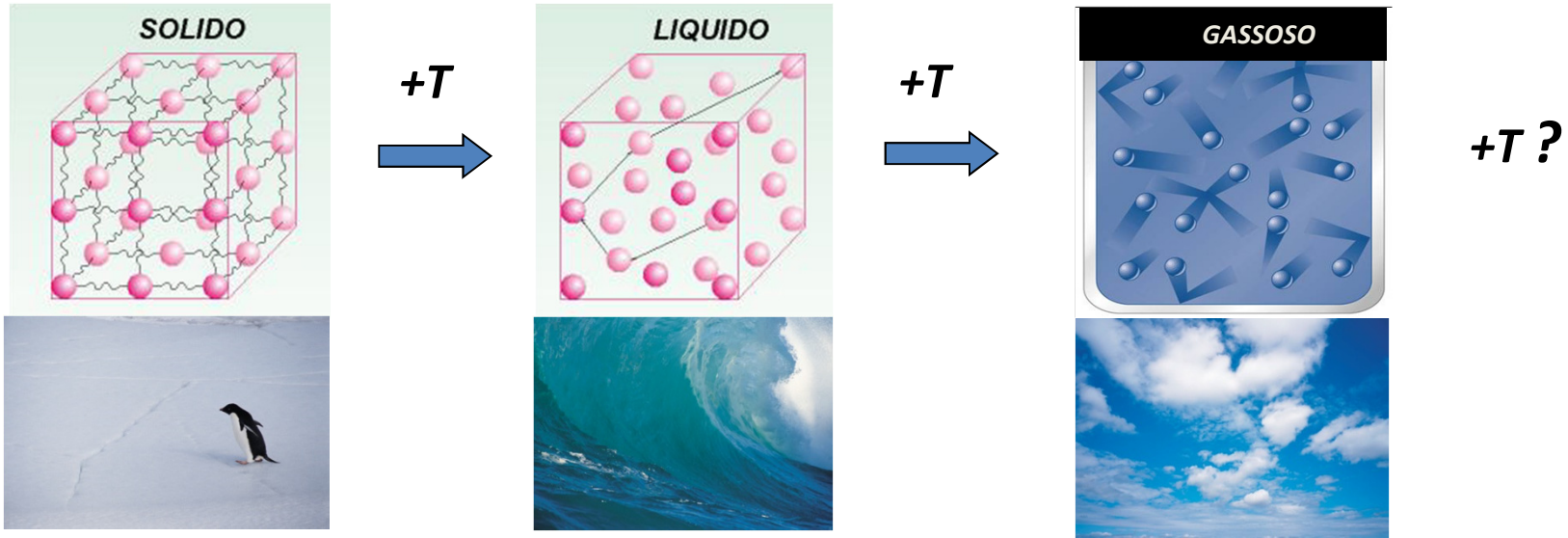
SOLE – 15 milioni di gradi

REATTORE – 150 milioni di gradi

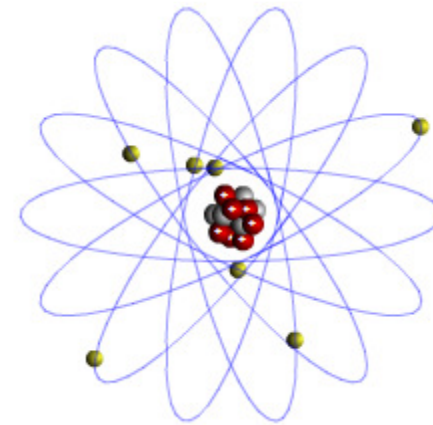
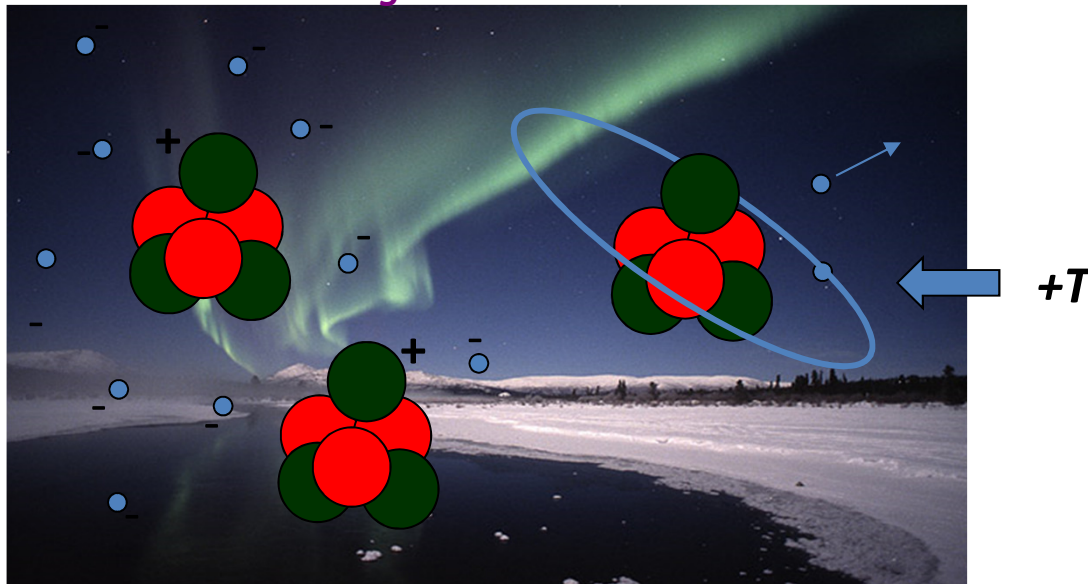
A tali temperature la materia si trova nello stato di PLASMA



# Plasma: il quarto stato della materia



*PLASMA: un gas altamente ionizzato*



# Fusione in laboratorio: confinamento

Il plasma caldo non deve toccare le pareti del reattore

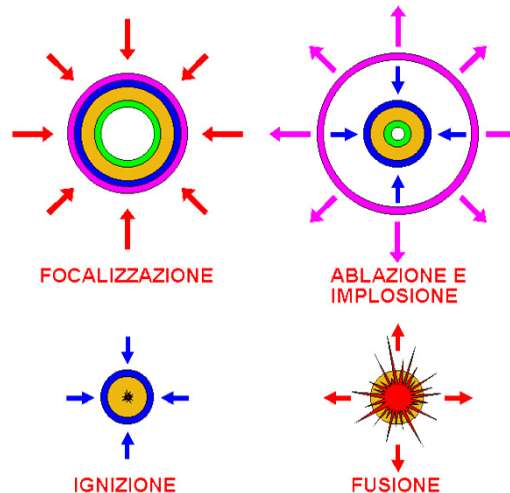
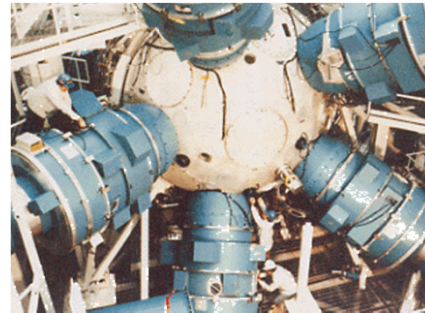
## Confinamento gravitazionale:

- compressione gravitazionale
- Ignizione: fusione nucleare
- Equilibrio:  $p_k = p_g$



## Confinamento inerziale:

- compressione adiabatica
- Ignizione
- $p_k \gg p_i$





# Fusione in laboratorio: confinamento

Il plasma caldo non deve toccare le pareti del reattore

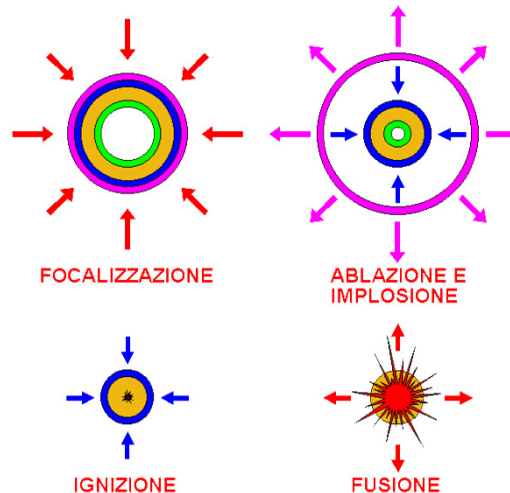
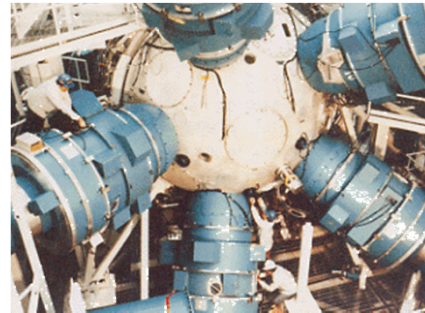
## Confinamento gravitazionale:

- compressione gravitazionale
- Ignizione: fusione nucleare
- Equilibrio:  $p_k = p_g$



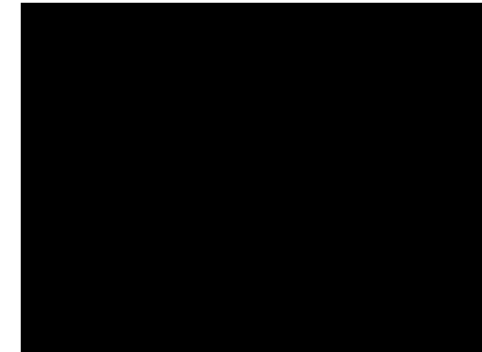
## Confinamento inerziale:

- compressione adiabatica
- Ignizione
- $p_k \gg p_i$



## Confinamento magnetico:

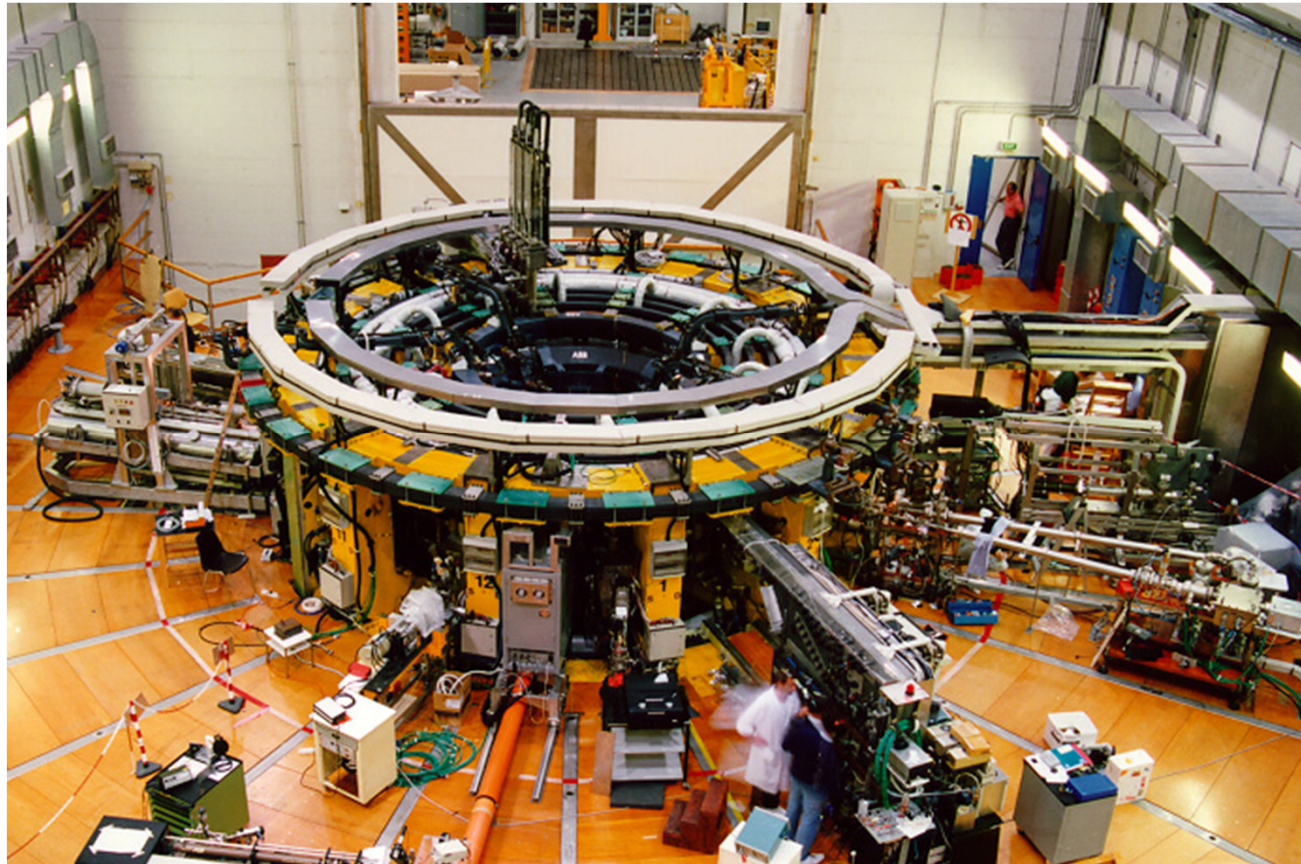
- Forza di Lorentz:  $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$
- Riscaldamento attivo
- $p_k \ll p_M$



# Confinamento magnetico

Il vero contenitore è il **campo magnetico**

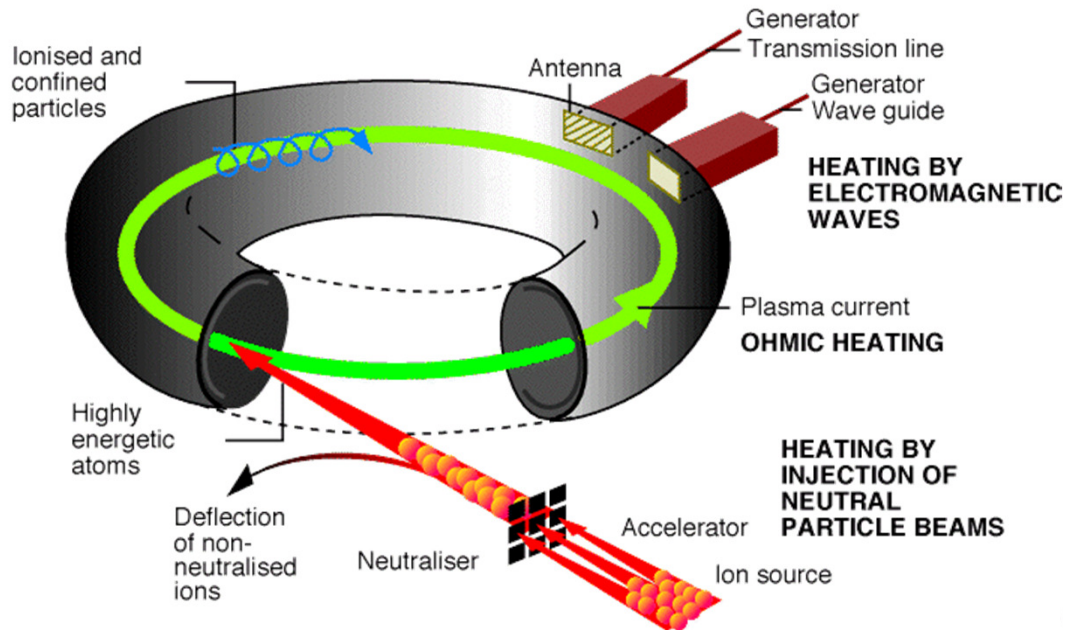
Linee di campo di forma opportuna:  
**CIAMBELLA o TORO**



Ma come riscaldare il plasma a temperature termonucleari?



# Fusione in laboratorio: riscaldamento



Riscaldamento ohmico:  
 elevati correnti (MA) circolanti  
 nel plasma scaldano per  
 effetto Joule



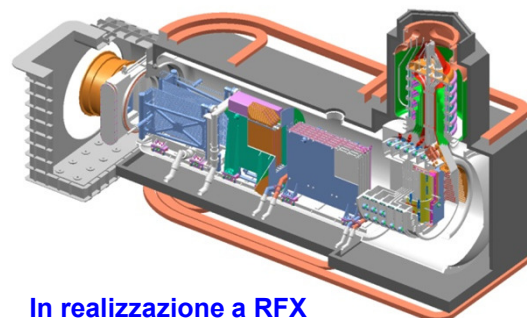
$$P = RI^2$$

$$\eta = 1e^{-8} \Omega m$$

$$@1keV$$

$$I \sim 10 MA$$

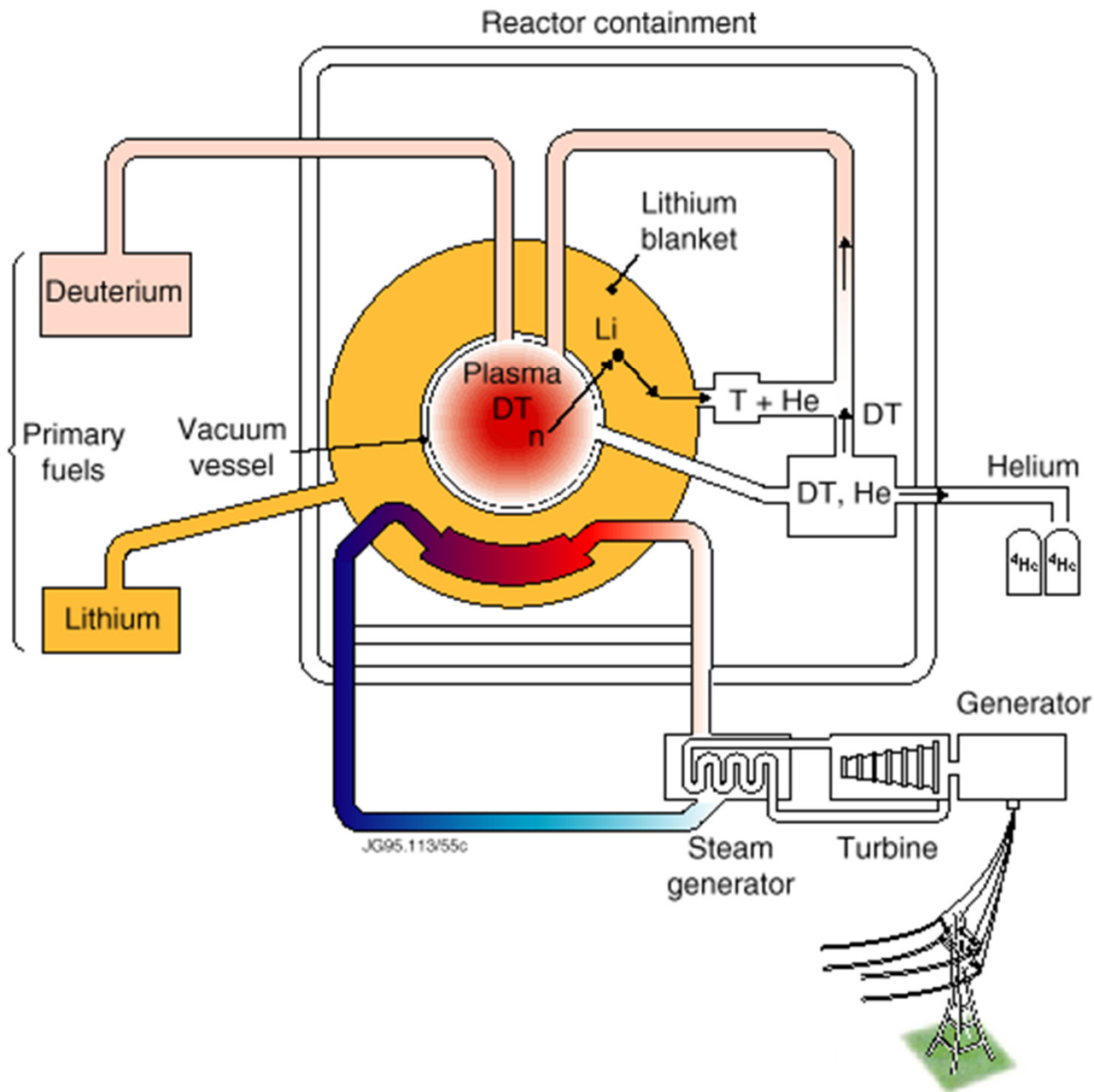
Iniezioni di particelle veloci: cessione  
 di energia al plasma per collisioni



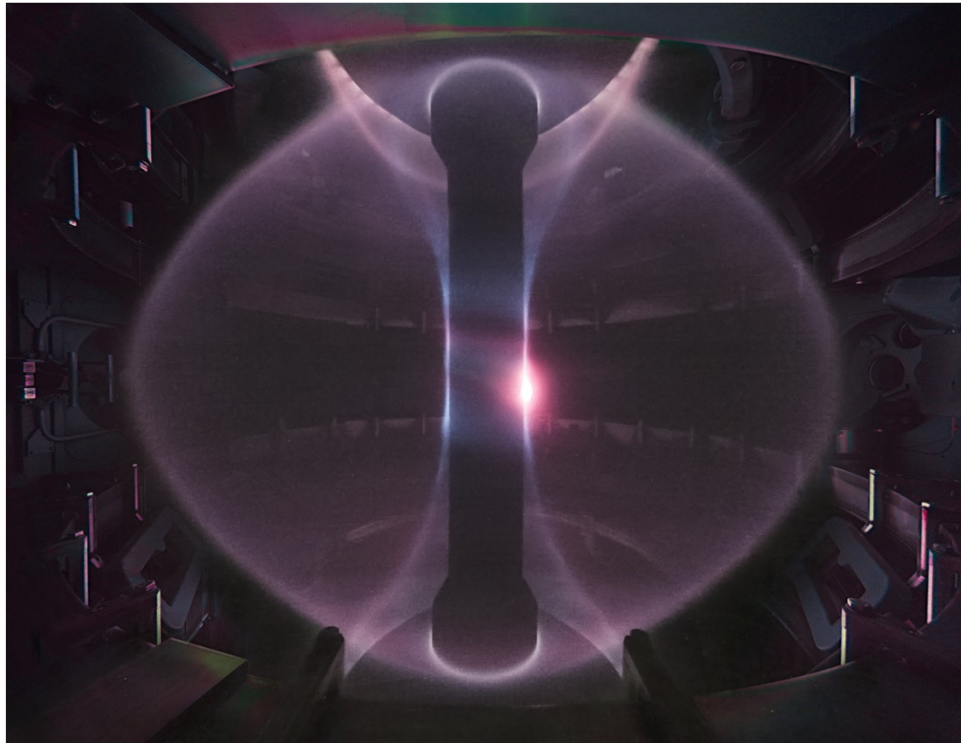
$$\Omega_{i/e} = \frac{qB}{m_{i/e}}$$

D/T:  $\sim 50 MHz$   
 e<sup>-</sup>:  $\sim 100 GHz$

# Come funzionerà una centrale a fusione?



# Fusione: approccio multidisciplinare



## Scienze dei materiali:

- Flussi potenza (10-20 MW/m<sup>2</sup>)
- Flusso neutronico
- Limitato inquinamento del plasma

## Fisica:

- Instabilità MHD e elettrostatiche
- Interazione plasma – parete
- Funzionamento continuo
- Burning plasma

## Ingegneria:

- Tecnologia dei superconduttori
- Sistemi di potenza ausiliaria
- Movimentazione remota robotizzata

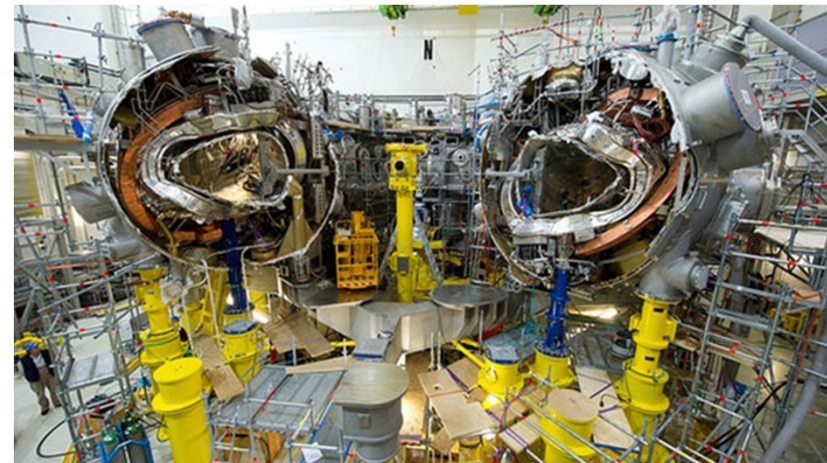
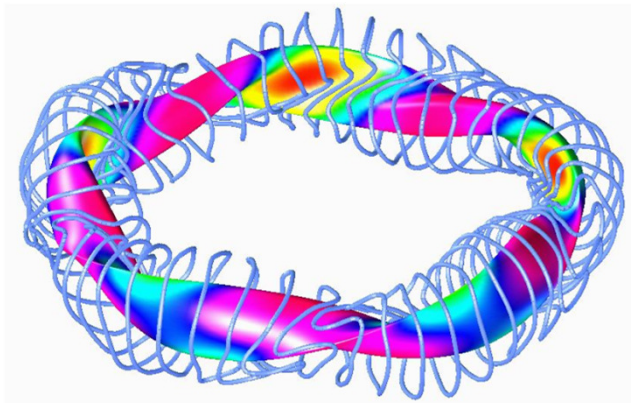




# Strategia Europea: roadmap

7 + 1 missioni per arrivare al 2050 con energia elettrica in rete:

1. Studio dei regimi operativi di plasma reattoriale in configurazione Tokamak
2. Estrazione della potenza: concetto di divertore
3. Materiali in grado di sostenere il **flusso neutronico** a 14.1 MeV
4. Produzione del **Tritio** (in una centrale circa 0.5 kg al giorno)
5. Procedure di **sicurezza** per l'uso di una centrale
6. Progetto integrato di **DEMO**: centrale prototipo con produzione di energia elettrica
7. Studio per ridurre il **costo** del kWh e ricerca socio-economica
8. Linea alternativa: lo **stellarator**



# Tokamak

Camera di scarica toroidale in cui gli avvolgimenti magnetici generano il campo magnetico di confinamento del plasma che è percorso da elevate correnti

## Parametri di JET:

$$R = 2.96 \text{ m}$$

$$a = 1 \text{ m}$$

$$I_p = 4.5 \text{ MA}$$

$$B_t = 3.5 \text{ T}$$

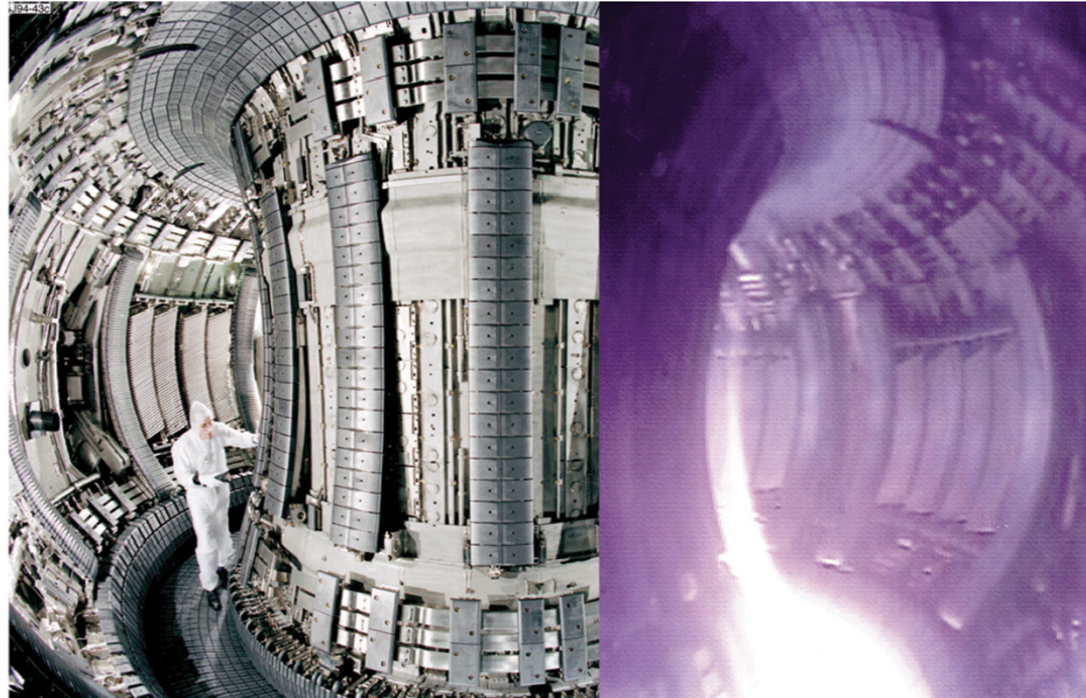
$$P_{\text{aux}} = 38 \text{ MW}$$

$$V_{\text{pl}} = 100 \text{ m}^3$$

$$T_e; T_i = 5 \text{ keV}$$

$$n_e = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$\text{durata} = 10 \text{ s}$$



JET 1997: esperimenti DT ottenendo  
**16 MW** di potenza di fusione (0.7 s)

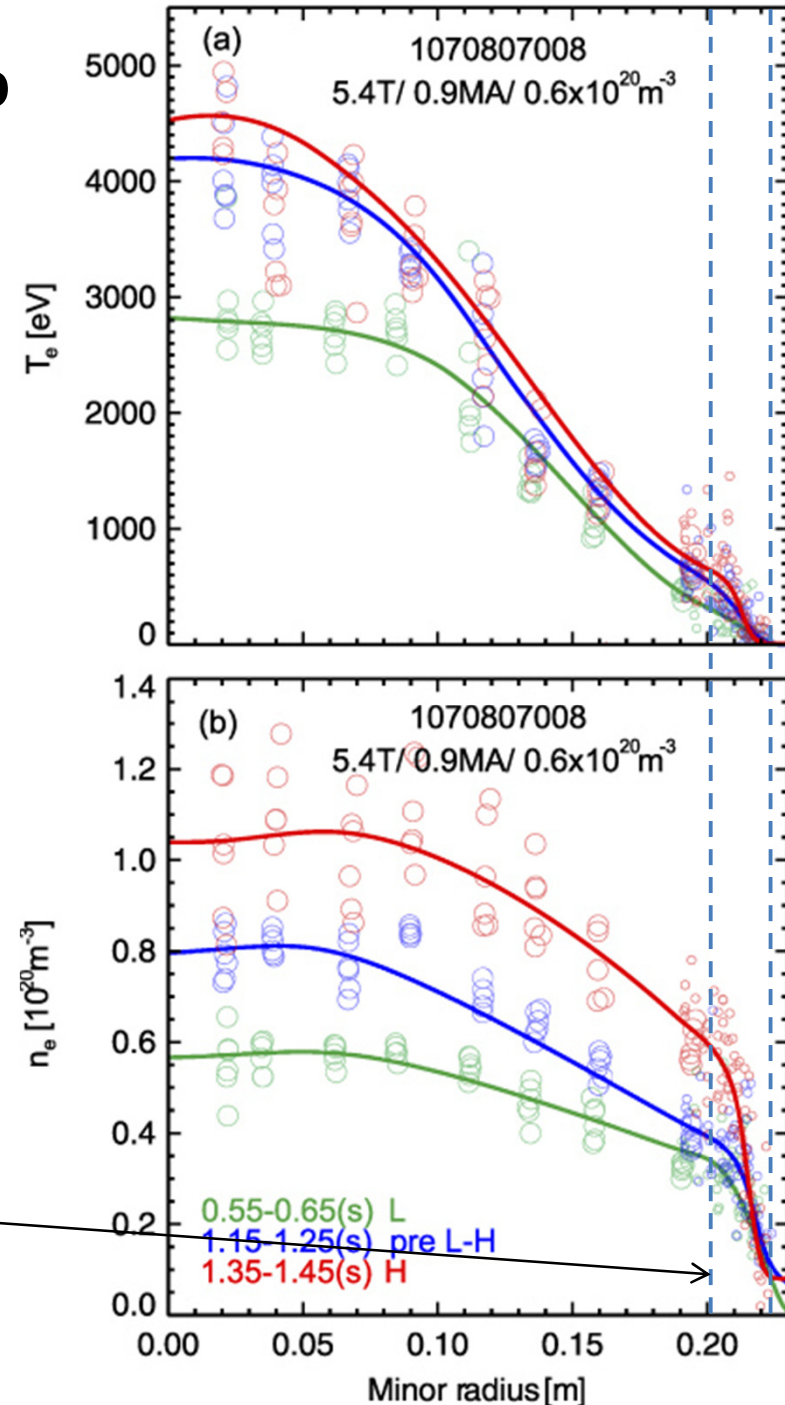
$$Q = 0.6, Q_p = 0.94$$

Dimostrando la possibilità di ottenere energia da fusione sulla Terra

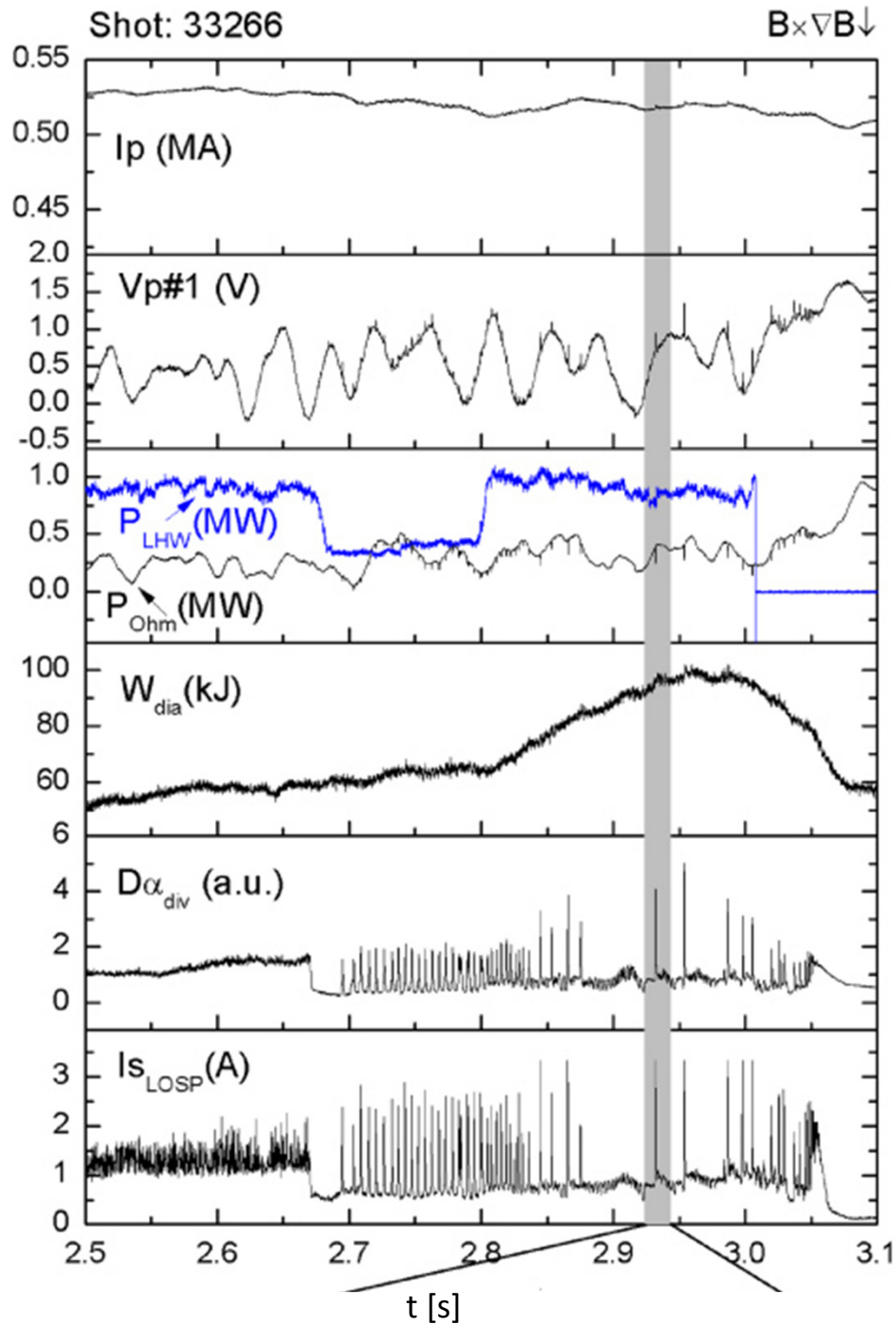
Nuovi esperimenti DT saranno condotti nel 2018:  
obiettivo 25 MW per 5s

## 2 regimi principali

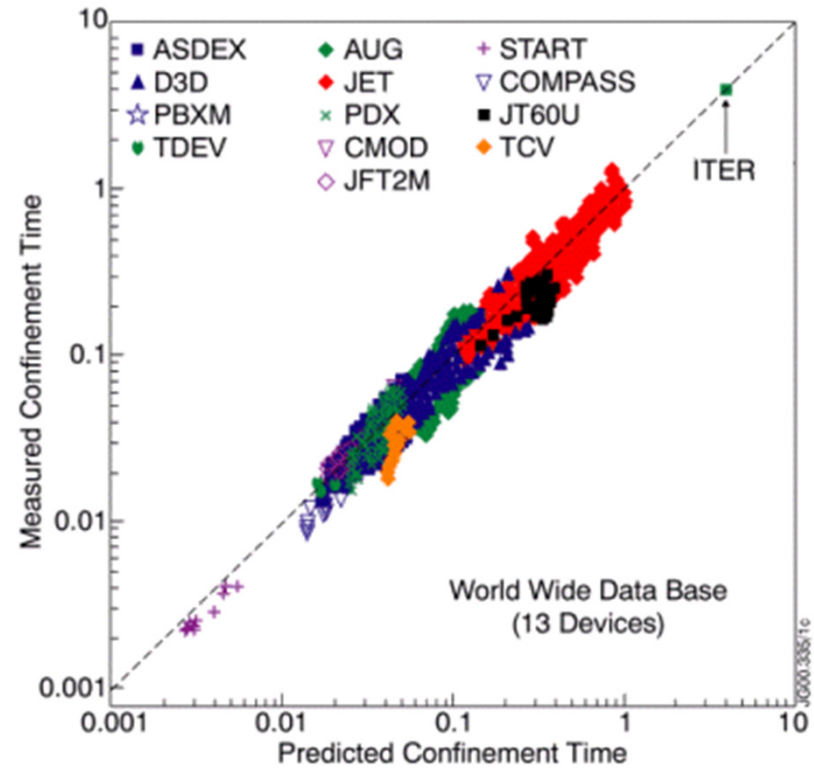
- modo L:** plasma con limiter; (relativamente) basso confinamento; trasporto di particelle ed energia dal centro al bordo
  
- modo H:** plasma con **divertore**, elevata potenza ausiliaria, alto confinamento ( $> \times 2$ ), trasporto di energia e particelle limitato, con la conseguente formazione di un pedestal







## Dal modo L al modo H

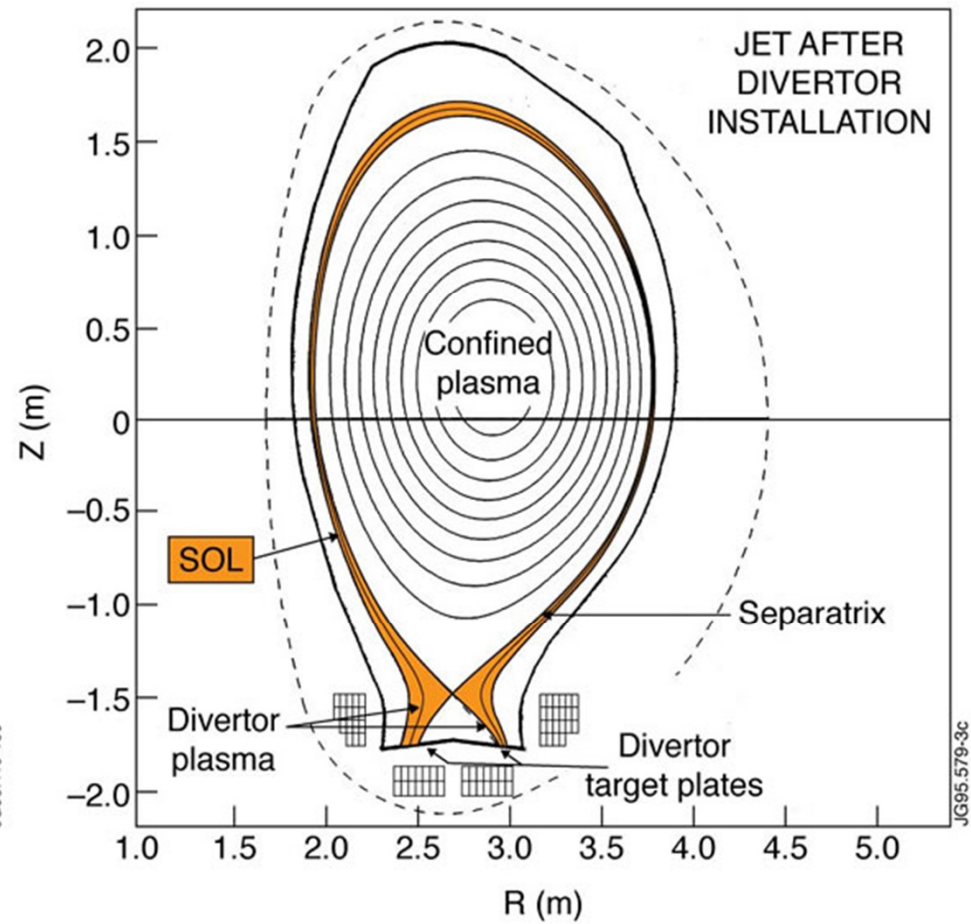
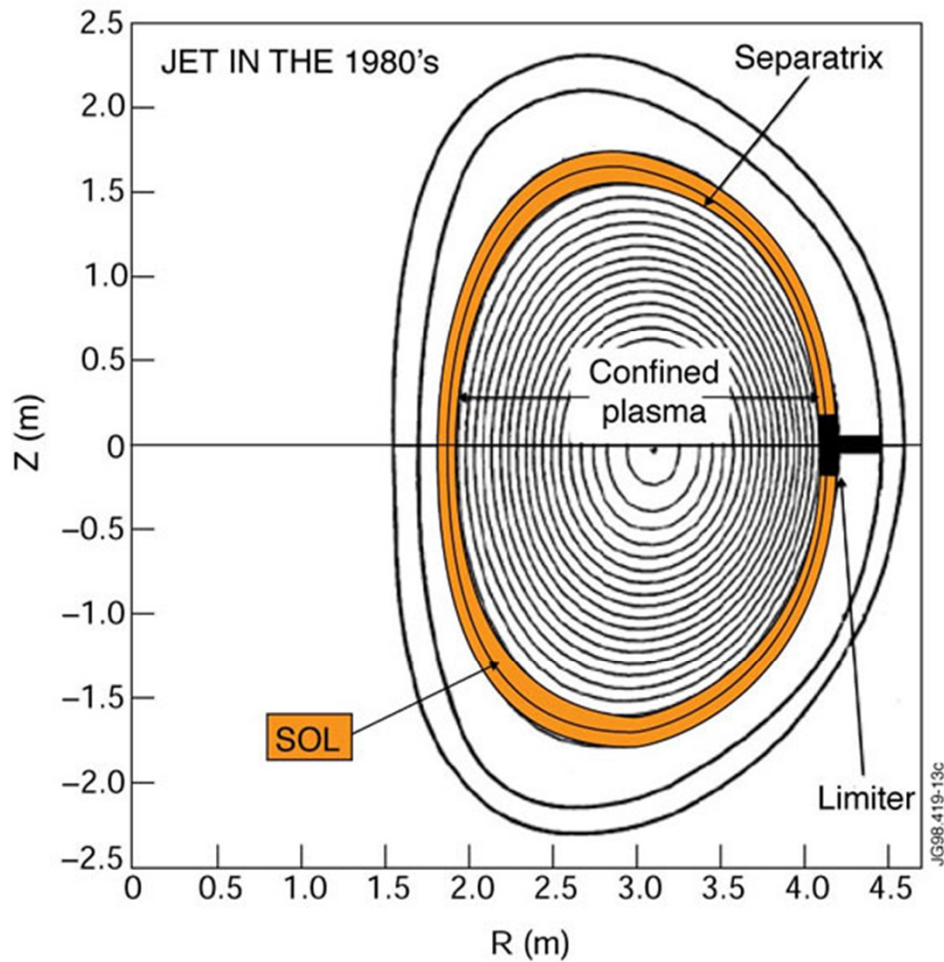


$$\tau_E = C I^{\alpha_I} B^{\alpha_B} \bar{n}^{\alpha_n} P^{\alpha_P} R^{\alpha_R} \kappa^{\alpha_\kappa} \epsilon^{\alpha_\epsilon} S_{cr}^{\alpha_S} M^{\alpha_M}$$

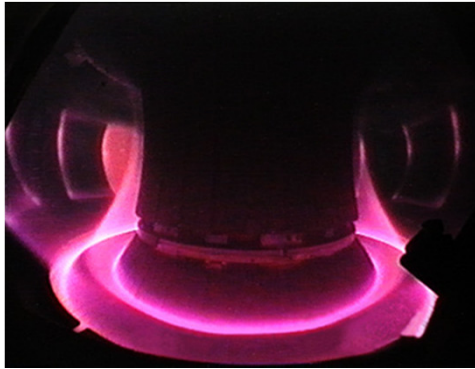
$$\alpha_I \sim 1 \quad \alpha_B \sim 0.15 \quad \alpha_R \sim 2$$

# Il divertore

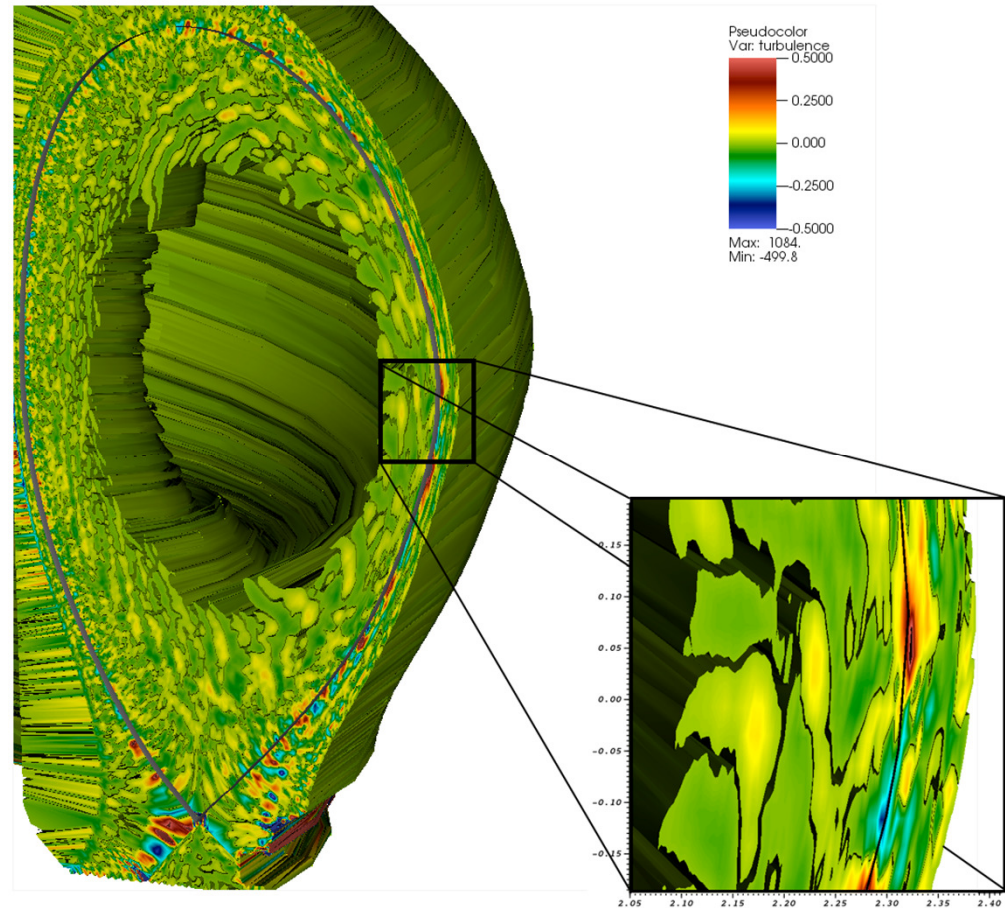
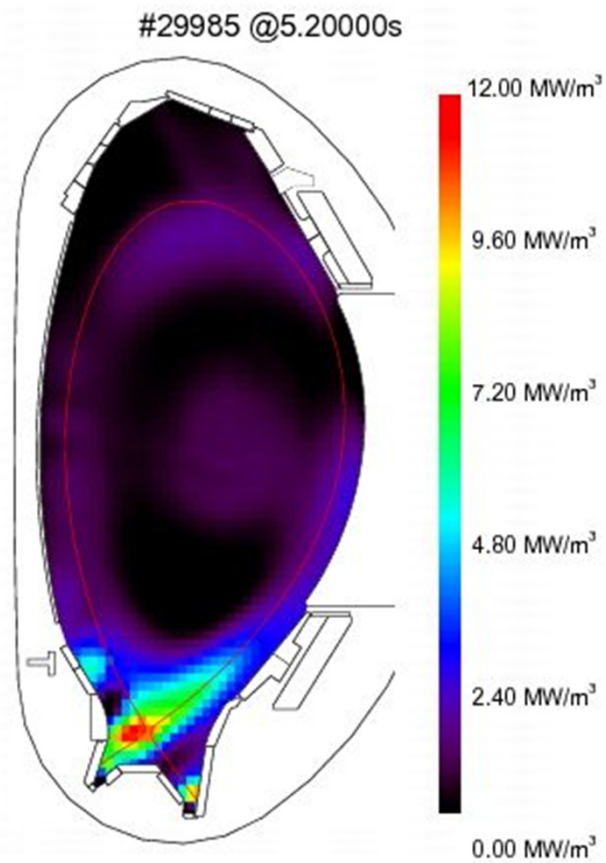
Permette il disaccoppiamento del plasma dalla parete con «frantumazione» delle strutture coerenti che sono alla base del trasporto di energia e particelle: formazione del PEDESTAL



# Il divertore



Concentra l'interazione plasma-parete sulle piastre del divertore ( $\Gamma > 10 \text{ MW/m}^2$ ), preservando il resto della parete (antenne, porte per NBI, finestre, bobine, ecc...)

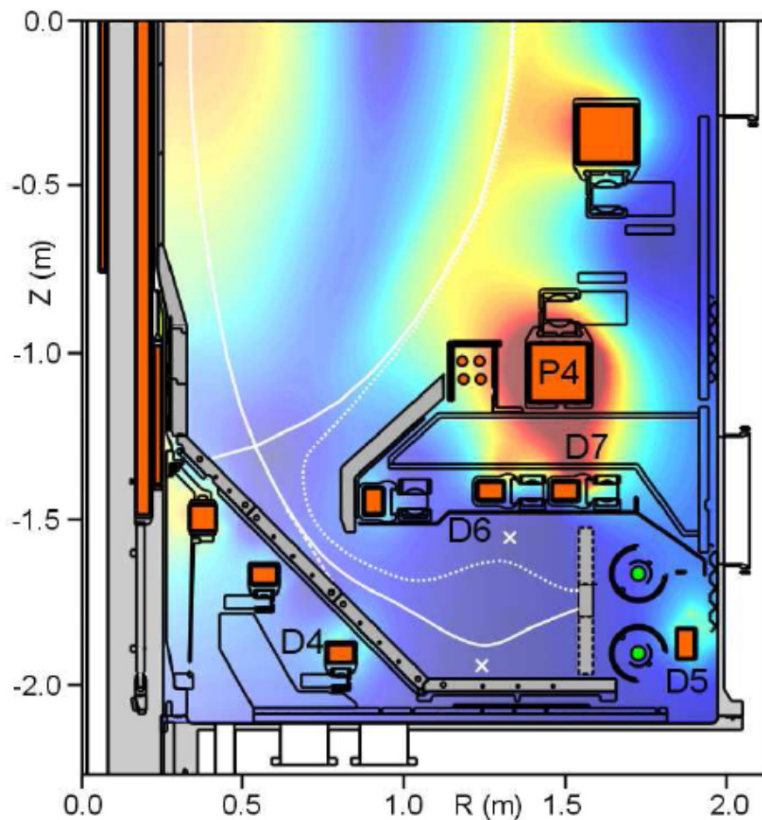




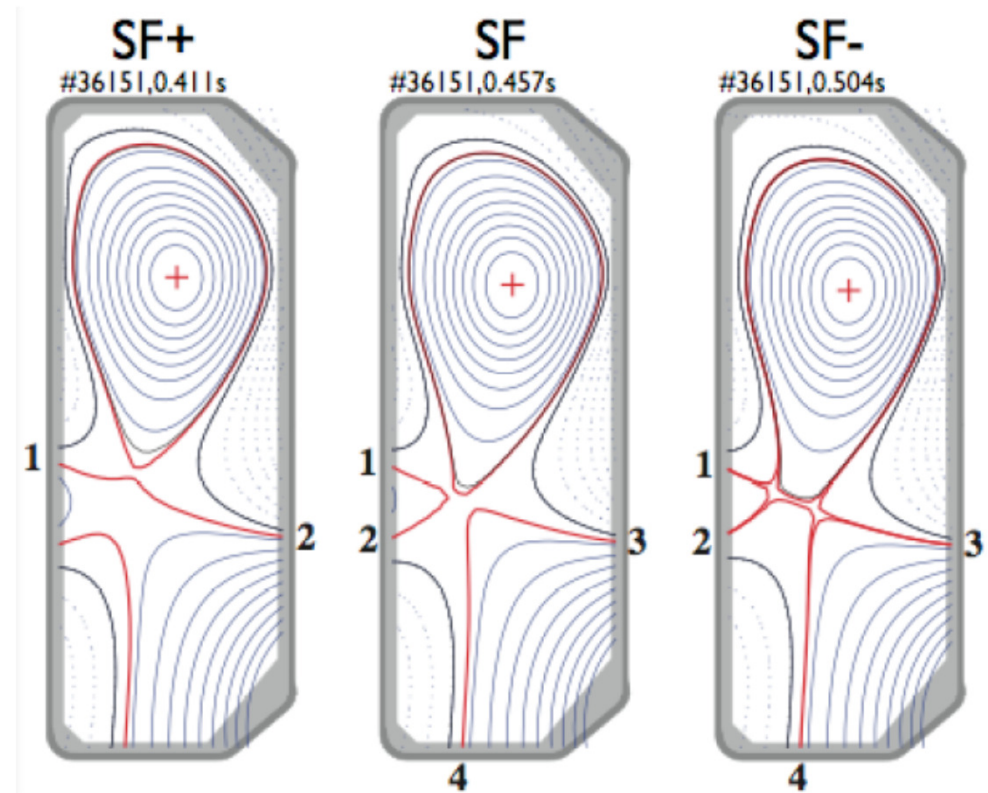
# Il divertore: soluzioni alternative

20 MW/m<sup>2</sup> sono (oltre) al limite tecnologico per i materiali raffreddati attivamente (Tungsteno con acqua pressurizzata o Elio): soluzioni alternative sono allo studio per aumentare la superficie totale del divertore

Configurazione super X (MAST-U)



Configurazione snowflake (TCV)

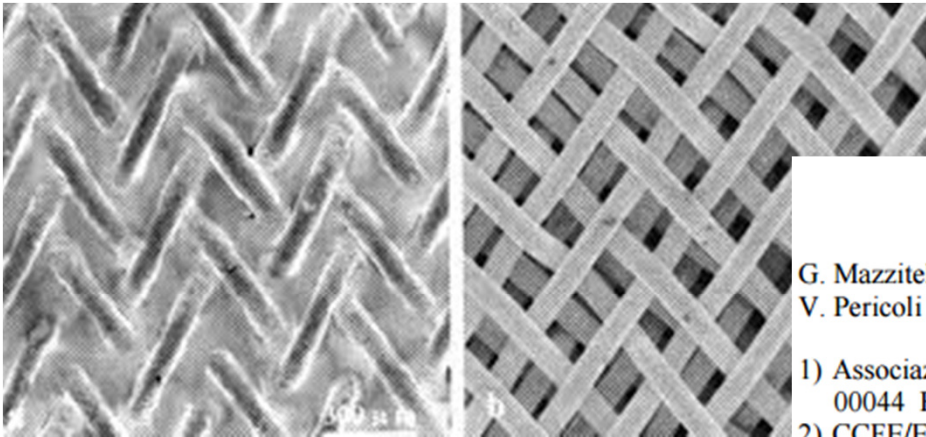


# Il divertore: soluzioni avveniristiche

In aggiunta alle geometrie alternative, sono allo studio anche concetti differenti, come l'utilizzo di **metalli liquidi**.

I **metalli liquidi** hanno un'elevata capacità di gathering delle particelle e, non offrendo una superficie solida al plasma, si autoriparano in caso di danni localizzati.

Il flussaggio di metallo liquido permette di asportare grandi quantità di calore per **convezione**



## FTU results with the liquid lithium limiter

G. Mazzitelli<sup>1</sup>, M. L. Apicella<sup>1</sup>, D. Frigione<sup>1</sup>, G. Maddaluno<sup>1</sup>, M. Marinucci<sup>1</sup>, C. Mazzotta<sup>1</sup>, V. Pericoli Ridolfini<sup>1</sup>, M. Romanelli<sup>2</sup>, G. Szepesi<sup>3</sup>, O. Tudisco<sup>1</sup> and FTU team

- 1) Associazione EURATOM-ENEA sulla Fusione, Centro Ricerche di Frascati, C.P. 65 00044 Frascati, Rome, Italy
- 2) CCFE/Euratom Association, Culham Science Center, OX143DB, UK
- 3) CFSA University of Warwick, CV47AL, UK

e-mail contact of main author: [mazzitelli@frascati.enea.it](mailto:mazzitelli@frascati.enea.it)



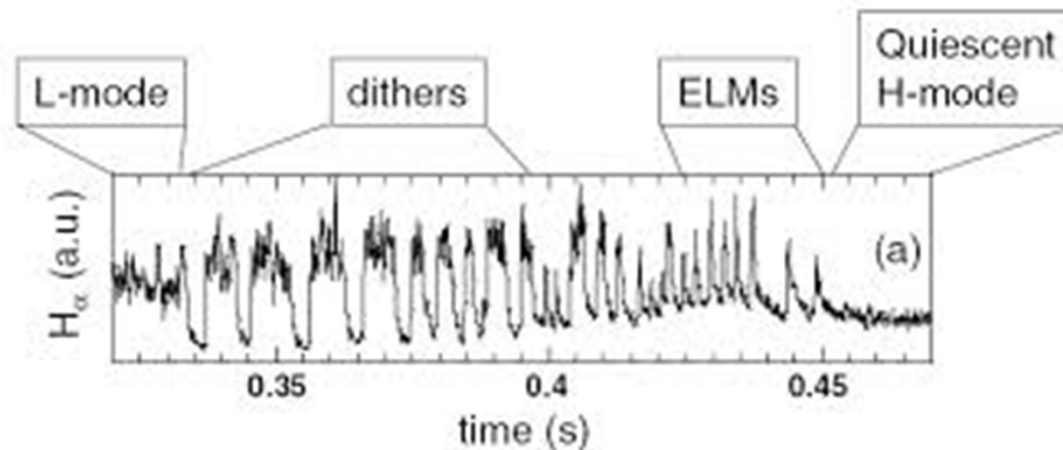
**Abstract.** Since the end of 2005 most of plasma wall interaction experiments on FTU have been focused on the possible use of liquid lithium as plasma facing material. Liquid lithium limiter is an active method to deposit, during the plasma discharge, a lithium film on the walls with prolonged beneficial effects. Reliable operation with very clean plasmas, very low wall particle recycling, spontaneous peaking of the density profile for line averaged density values  $\bar{n}_e > 1.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  have been obtained. These results have allowed to extend the density limit at the highest value so far obtained ( $\bar{n}_e = 4.0 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$  at  $I_p = 0.7 \text{ MA}$  and  $B_T = 7.1 \text{ T}$ ,  $q_a = 5.0$ , by gas puffing only) and to increase the energy confinement time by almost 50% with respect to the average value of 50 ms of the old ohmic FTU database. An accurate analysis of these plasmas has been carried out by means of a gyrokinetic code to establish the role of collisionality and of the density gradients on the observed phenomenology.

# Modo H: «zoologia»-1

**Type I ELMy H-mode:** è il modo H più studiato, con la miglior performance, è limitato da eventi localizzati al bordo (Edge Localized Modes - ELMs). Il principale problema è che la potenza rilasciata durante un ELM è troppo elevata per il divertore.

**Type II ELMy H-mode:** ad alta densità gli ELM di tipo I vengono gradualmente rimpiazzati da ELM più frequenti e meno energetici (più tollerabili per il divertore e la parete). Ad oggi questo regime si è ottenuto solo con alta densità e bassa temperatura, **va testato in macchine di maggiori dimensioni (ITER)**

**Type III ELMy H-mode:** iniettando gas nel bordo del plasma si supera il limite di stabilità: rapidi, poco energetici ELM si manifestano. Il confinamento globale è intermedio tra il modo L e il Type I ELMy H-mode



## Modo H: «zoologia»-2

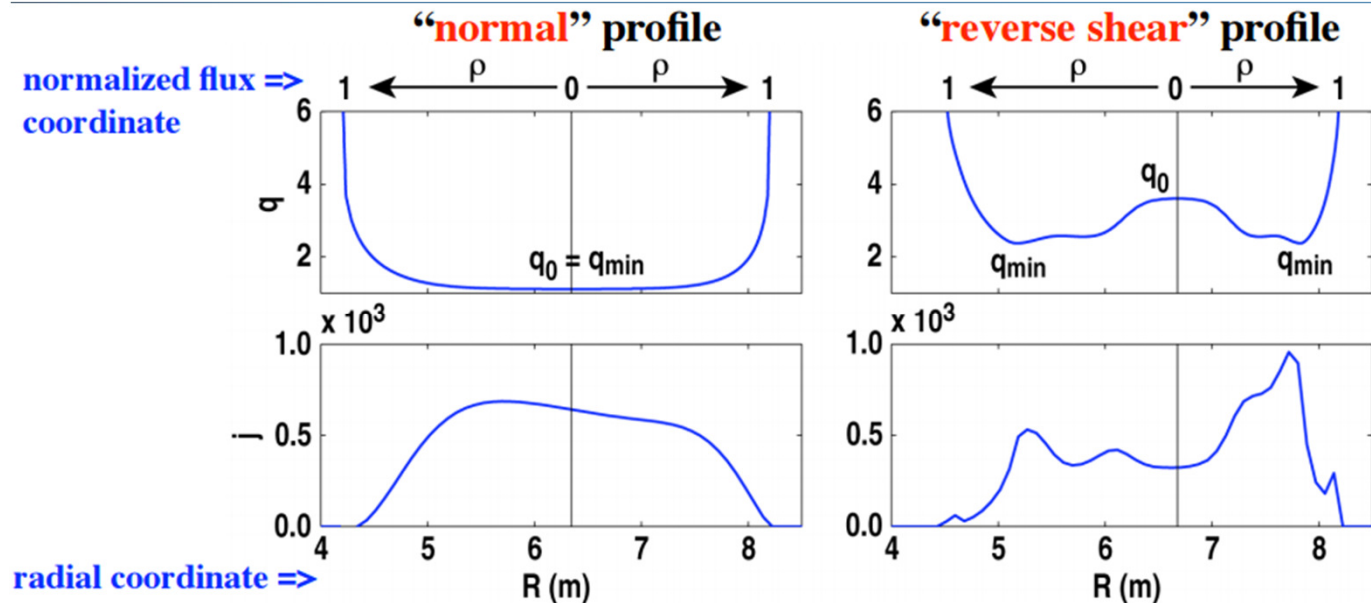
**QH mode:** alta temperatura e rotazione indotta dall'esterno (NBI o RMP) porta il plasma in uno modo H quiescente. La sperimentazione in condizioni reattoriali non è eseguibile sulle attuali macchine: **in attesa di ITER.**

**AT modes:** Advanced Tokamak regime: modo H ottenuto in maniera non induttiva: corrente sostenuta con potenza ausiliaria e corrente autogenerata sbilanciando le funzioni di distribuzione delle varie specie.

**Hybrid modes:** modo ibrido a metà tra un ELMy H mode e un AT mode, con frazioni della corrente non induttiva dell'ordine del 50-80%

$$q = \frac{rB_t}{RB_p}$$

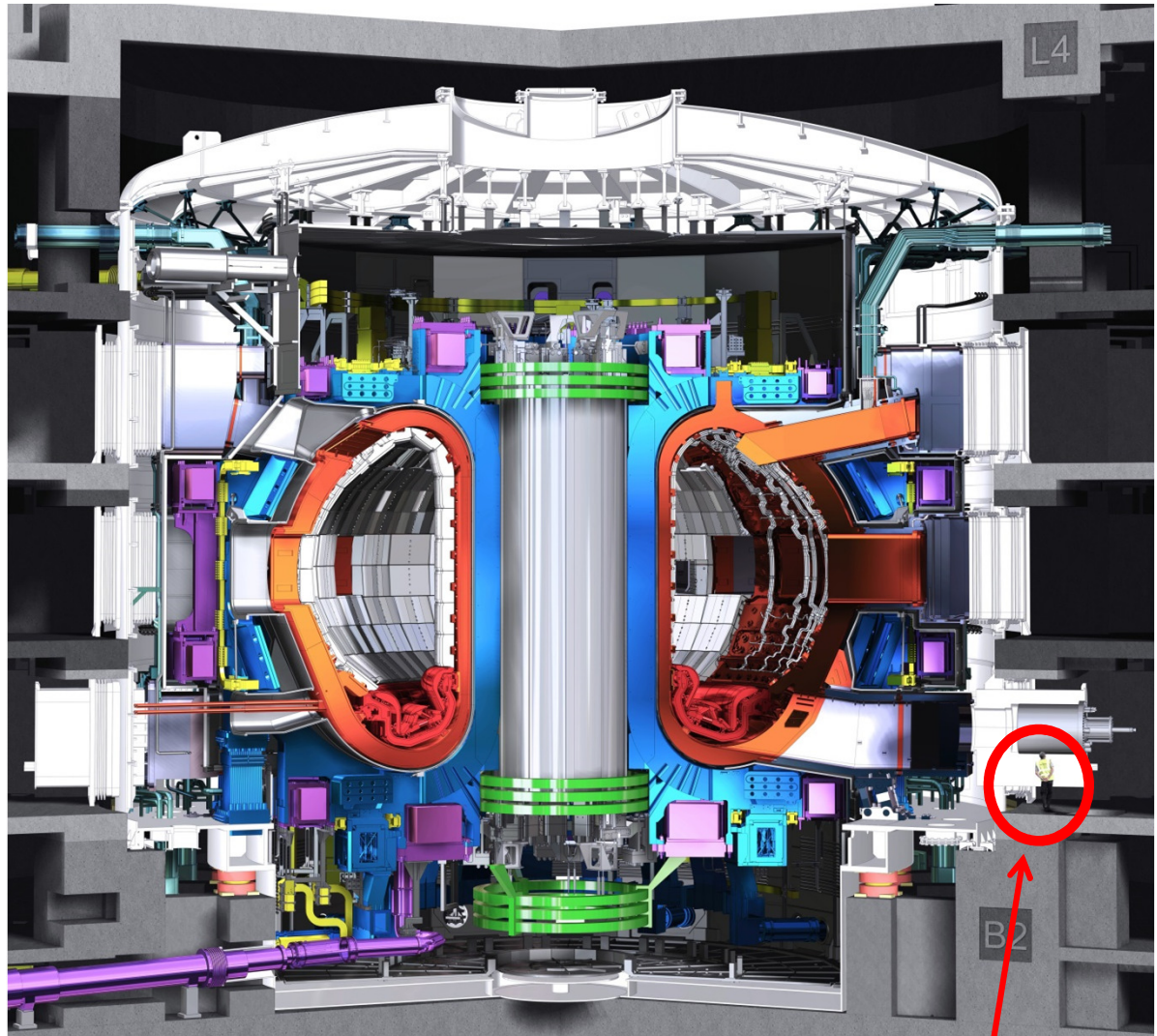
$$B_p = \frac{\mu_0 I_p}{2\pi a}$$





## Il futuro: ITER

- ITER rappresenta il passaggio fra gli studi attuali di fisica dei plasmi e la futura centrale di potenza a fusione
- Collaborazione internazionale di 7 partner: EU, Cina, India, Sud Korea, Giappone, USA e Russia
- L'accordo sul sito di ITER è stato raggiunto nel **giugno 2005**
- **Ottobre 2007**: il progetto è stato finanziato e si è posata la prima pietra
- In costruzione a Cadarache, nel sud della Francia
- Costo circa 10+10 miliardi €
- [www.iter.org](http://www.iter.org)



***Dimensione di una persona in ITER***



## Numeri principali di ITER

### Parametri di ITER:

$$R = 6.2 \text{ m}$$

$$a = 2 \text{ m}$$

$$I_p = 15 \text{ MA}$$

$$B_t = 5.3 \text{ T}$$

$$P_{\text{aux}} = 100 \text{ MW}$$

$$P_{\text{fus}} = 500 \text{ MW} \quad \left. \vphantom{P_{\text{fus}}} \right\} Q=5$$

$$V_{\text{pl}} = 800 \text{ m}^3$$

$$T_e; T_i = 10 \text{ keV}$$

$$n_e = 2 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$\text{durata} = 400 \text{ s}$$

### Parametri di JET:

$$R = 2.96 \text{ m}$$

$$a = 1 \text{ m}$$

$$I_p = 4.5 \text{ MA}$$

$$B_t = 3.5 \text{ T}$$

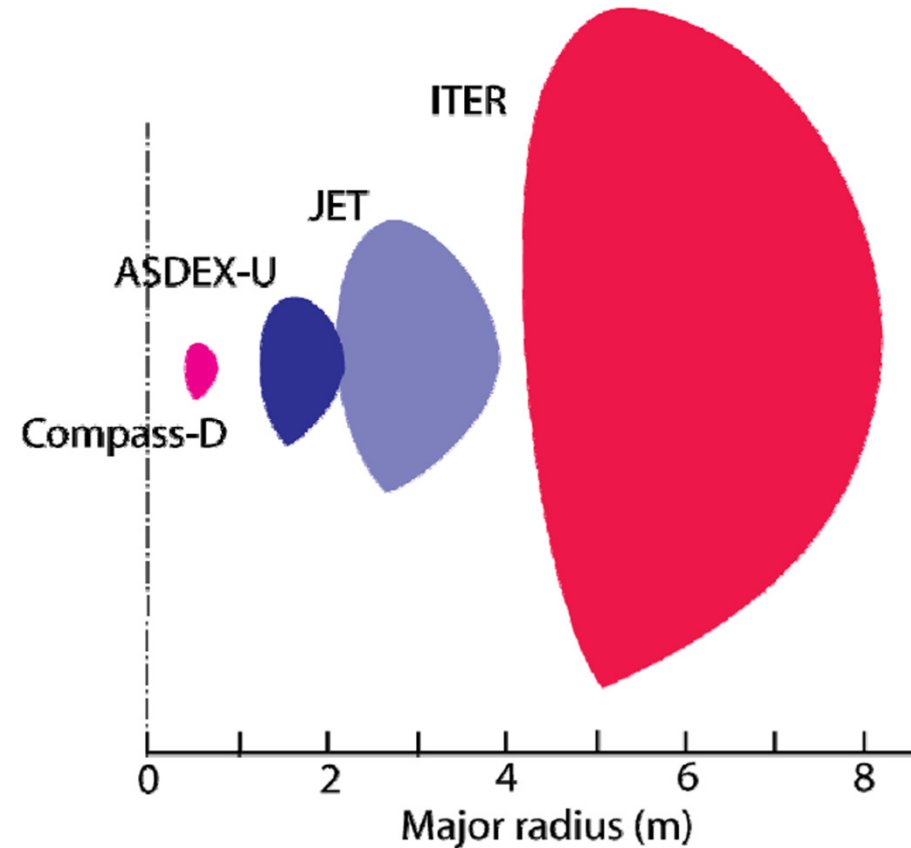
$$P_{\text{aux}} = 38 \text{ MW}$$

$$V_{\text{pl}} = 100 \text{ m}^3$$

$$T_e; T_i = 5 \text{ keV}$$

$$n_e = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$\text{durata} = 10 \text{ s}$$

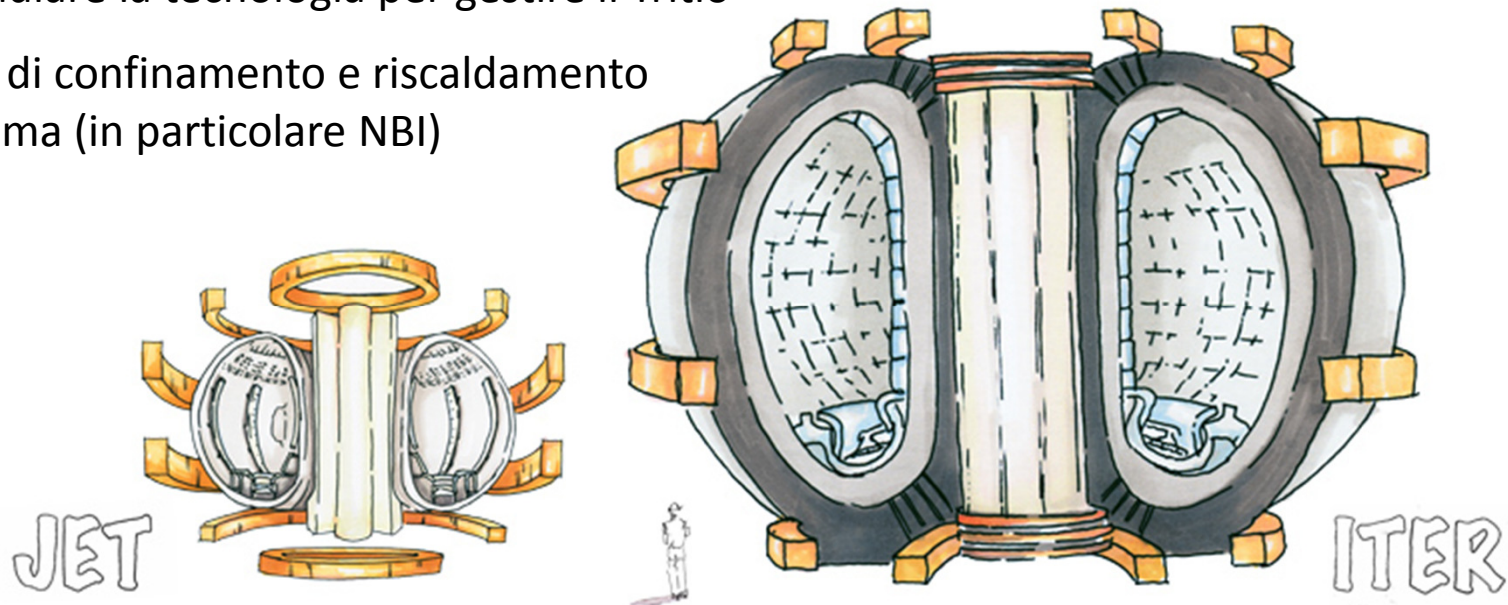


ITER sarà un **tokamak superconduttore** di grandi dimensioni.

Opererà stabilmente in Deuterio-Trizio (dopo una prima fase iniziale di messa a punto in D puro)

## Obiettivi di ITER

- Dimostrare la capacità tecnologica di costruire e gestire un impianto da fusione 10 volte più grande di JET
- Testare gli scenari reattoriali non accessibili con le presenti macchine sperimentali
- Testare materiali di prima parete (W, Be, metalli liquidi)
- Studiare un plasma stazionario con  $Q = 5-10$ :
  - Estrazione della potenza
  - gestione delle particelle  $\alpha$  (instabilità, riscaldamento del plasma, estrazione, ecc.)
- Sviluppare e studiare la tecnologia per gestire il Tritio
- Provare sistemi di confinamento e riscaldamento del plasma (in particolare NBI)



## Conclusioni

- Il panorama energetico mondiale richiede la scoperta e l'utilizzo di **nuove forme di energia**
- La **fusione nucleare** si pone come una futura fonte energetica di primaria importanza, grazie alle sue doti di **sicurezza, ridotto impatto ambientale e larga disponibilità** dei reagenti
- Un passo notevole deve essere fatto tra le attuali macchine da fusione e la centrale a fusione: **ITER si pone come step intermedio** per la soluzione dei problemi ancora aperti
- La ricerca europea è leader mondiale nell'ambito della fusione, ospitando il **progetto ITER**

