



Consiglio Nazionale delle Ricerche



La Fusione Termonucleare Controllata

Maurizio Lontano

Istituto di Fisica del Plasma “P. Caldirola”

Consiglio Nazionale delle Ricerche

Associazione EURATOM-ENEA-CNR

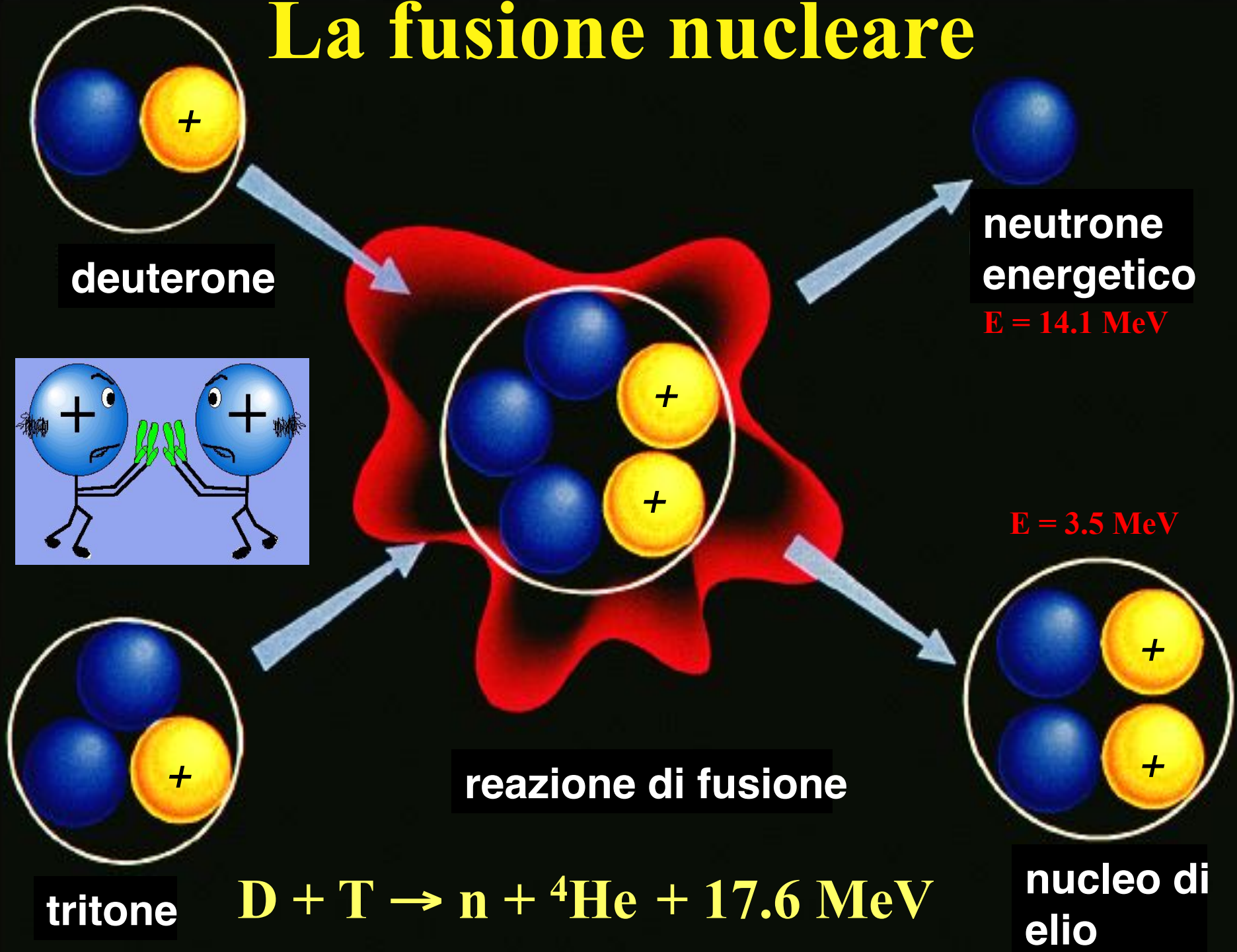
Via R. Cozzi 53, Milano

lontano@ifp.cnr.it

www.ifp.cnr.it

Varenna Fisica Festival, Lecco, 21 Settembre 2011

La fusione nucleare



deuterone

neutrone
energetico

$E = 14.1 \text{ MeV}$

$E = 3.5 \text{ MeV}$

reazione di fusione

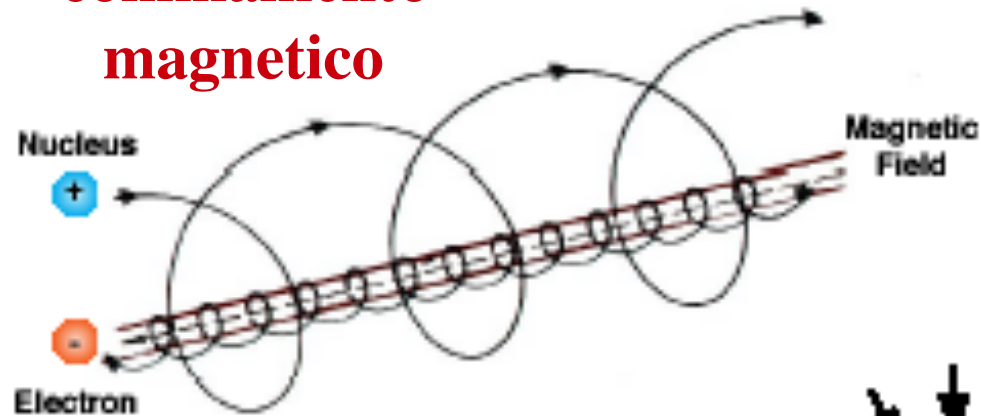
tritone



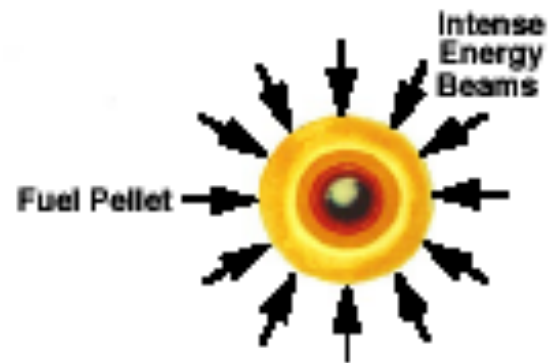
nucleo di
elio

Confinamento di un gas ionizzato (plasma) ad alta temperatura

**confinamento
magnetico**

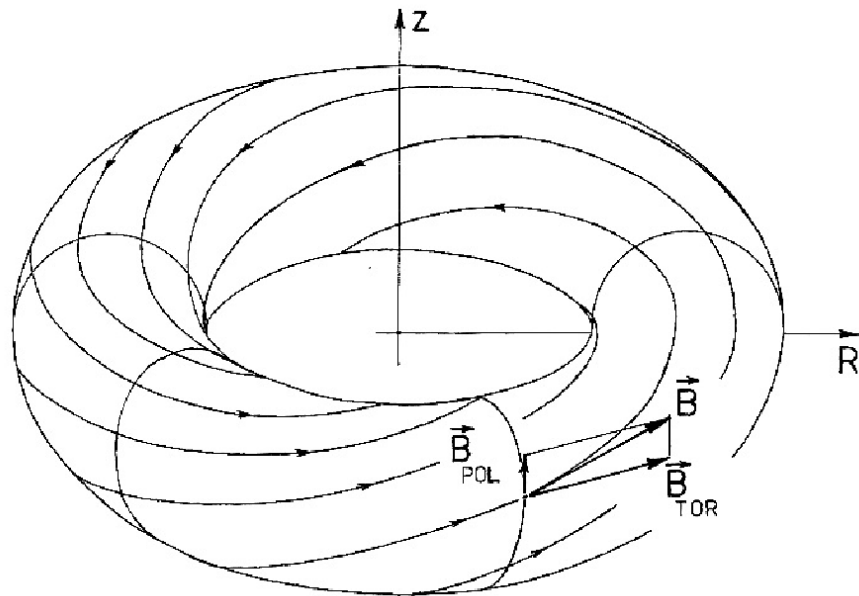


**confinamento
gravitazionale**



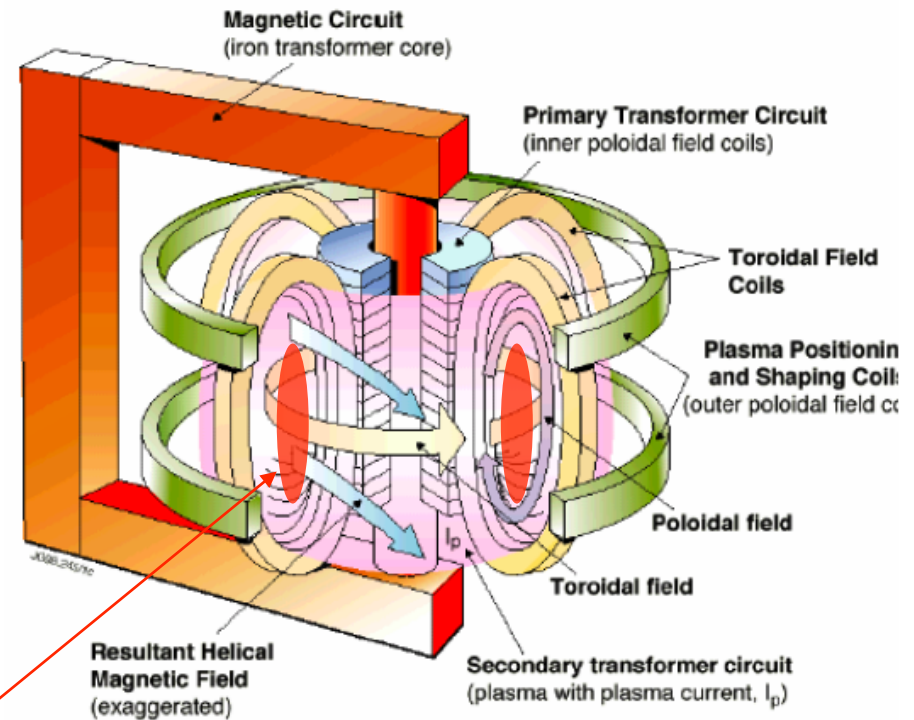
**confinamento
inerziale**

Il “tokamak”

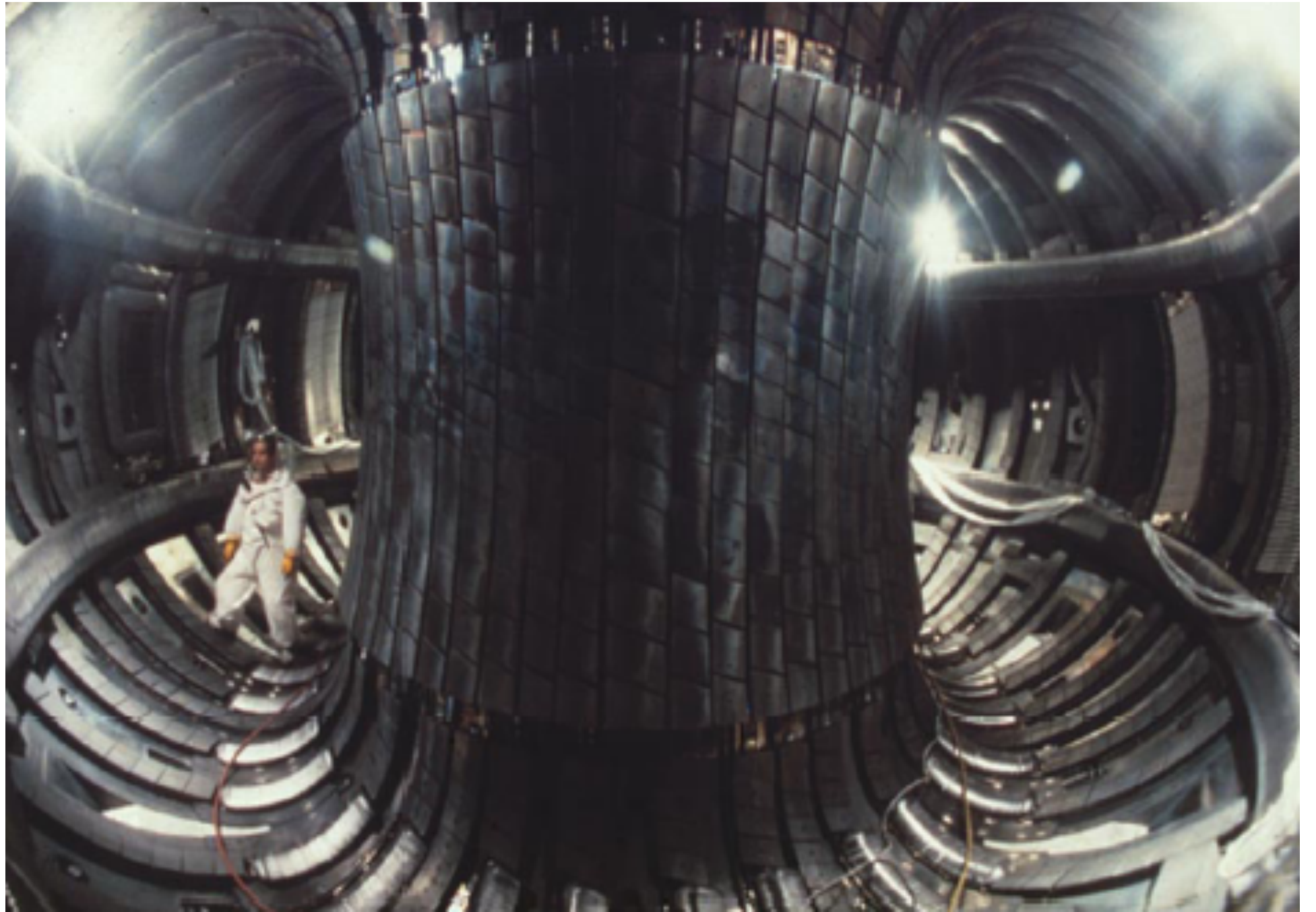


Il tokamak funziona come un grande trasformatore il cui circuito secondario è costituito dall'anello di plasma

il “tokamak” ideato nel 1958 da Artsimovich (URSS)



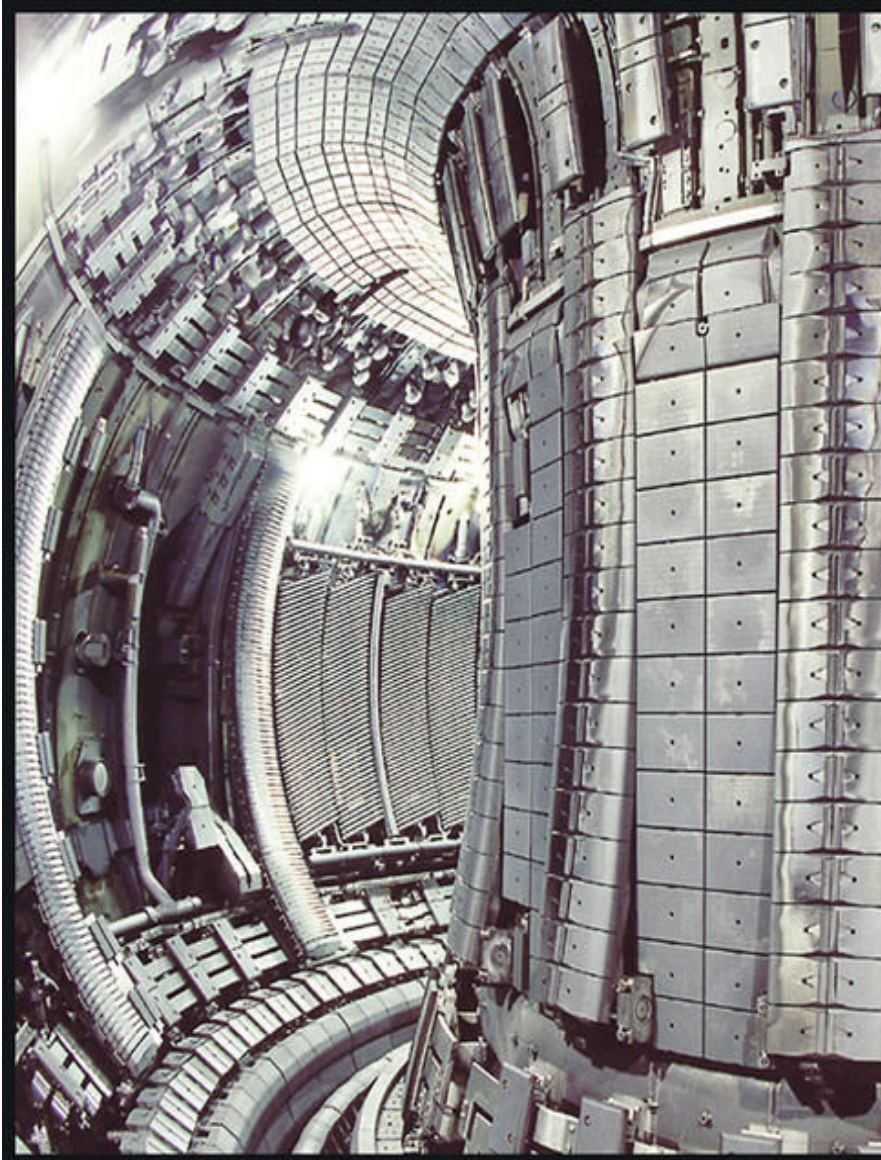
plasma tenue ad alta temperatura



*Il tokamak piu' grande del mondo e' JET
15 m di diametro e 6 m di altezza*



Una scarica tokamak: il JET



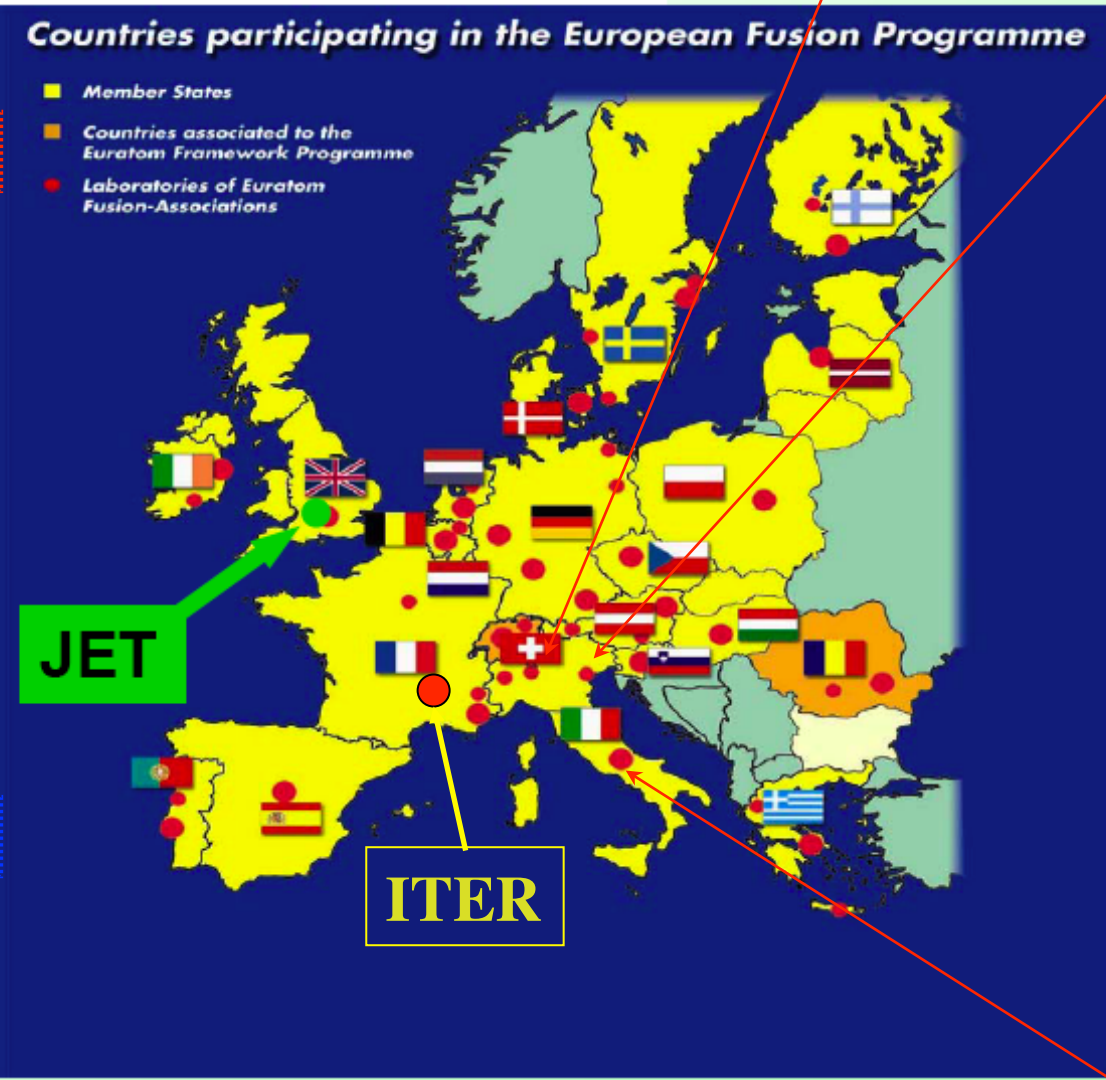
UTC R 23:59:53:02

La fusione in Europa

Milano
IFP-CNR

Padova
RFX

- Euratom - CEA (1958)
France
- Euratom - ENEA (1960)
Italy
- Euratom - IPP (1961)
Germany
- Euratom - FOM (1962)
Netherlands
- Euratom - FZJ (1962)
Germany
- Euratom - Belgian State (1969)
Belgium
- Euratom - RISO (1973)
Denmark
- Euratom - UKAEA (1973)
United Kingdom
- Euratom - VR (1976)
Sweden
- Euratom - Conf. Suisse (1979)
Switzerland
- Euratom - FZK (1982)
Germany
- Euratom-CIEMAT (1986)
Spain



- Euratom - IST (1990)
Portugal
- Euratom - TEKES (1995)
Finland
- Euratom - DCU (1996)
Ireland
- Euratom - ÖAW (1996)
Austria
- Euratom - Hellenic Republic (1999)
Greece
- Euratom - IPP.CR (1999)
Czech Republic
- Euratom - HAS (1999)
Hungary
- Euratom - MEC (1999)
Romania
- Euratom - University of Latvia (2002)
Latvia
- Euratom - IPPLM (2005)
Poland
- Euratom - MHST (2005)
Slovenia

Frascati
ENEA

Condizioni di lavoro di un reattore

- Confinamento del plasma \Rightarrow **Densità n_i**
 $10^{21} \text{ m}^{-3} \approx 10^{-5} \times n_a$ dell'atmosfera
- Riscaldamento \Rightarrow **Temperatura T_i**
 $10 - 20 \text{ keV} \approx 10 \times T$ nell'interno del Sole
- Isolamento termico \Rightarrow **Tempo di confinamento τ_E**
qualche secondo
(durata della “scarica” di plasma \approx da 1000 sec a s.s.)

Parametro fondamentale $n_i \times T_i \times \tau_E$

Il progresso nelle ricerche sulla f.t.c.

prodotto triplo di fusione

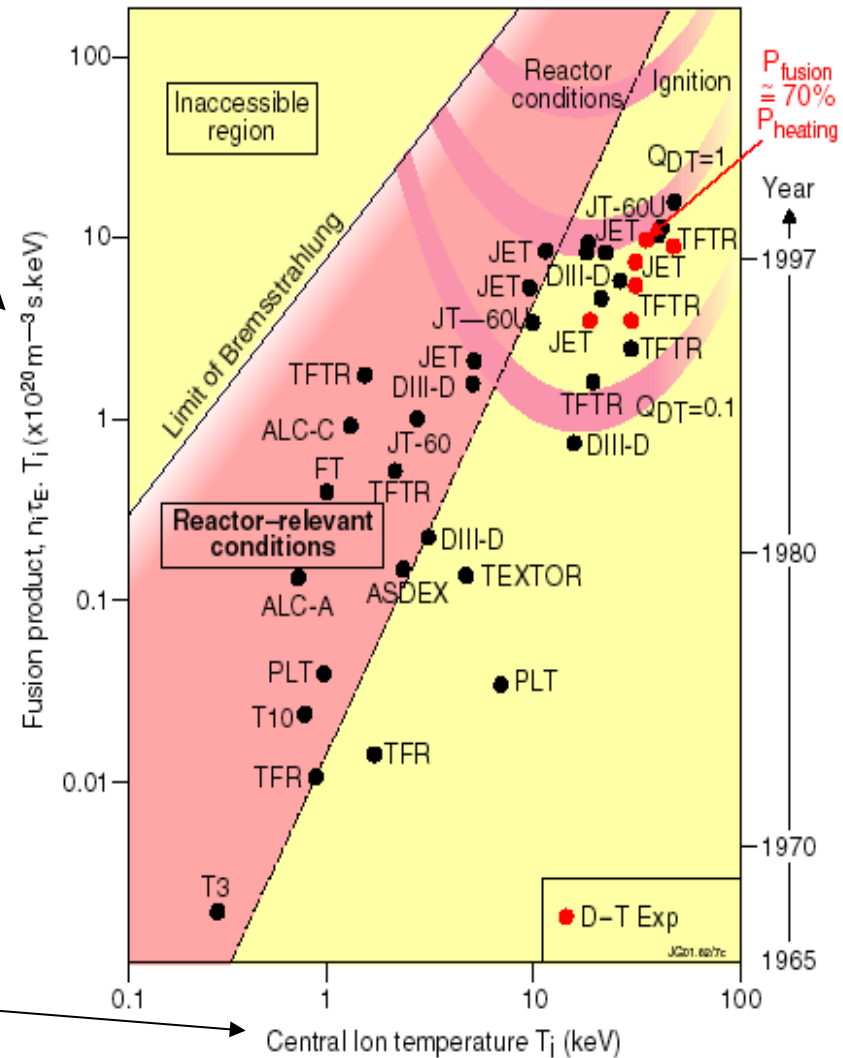
$$n_i \tau_E T_i (\times 10^{20} \text{ m}^{-3} \cdot \text{s} \cdot \text{keV})$$

$$1 \text{ eV} = 11.605 \text{ }^\circ\text{K}$$

$$1 \text{ keV} \cong 11 \text{ milioni } ^\circ\text{K}$$

temperatura degli ioni

$$T_i (\text{keV})$$



Potenza da fusione prodotta

$$Q = 10.7 / 39.5 = \mathbf{0.27} \text{ (TFTR, 1994)}$$

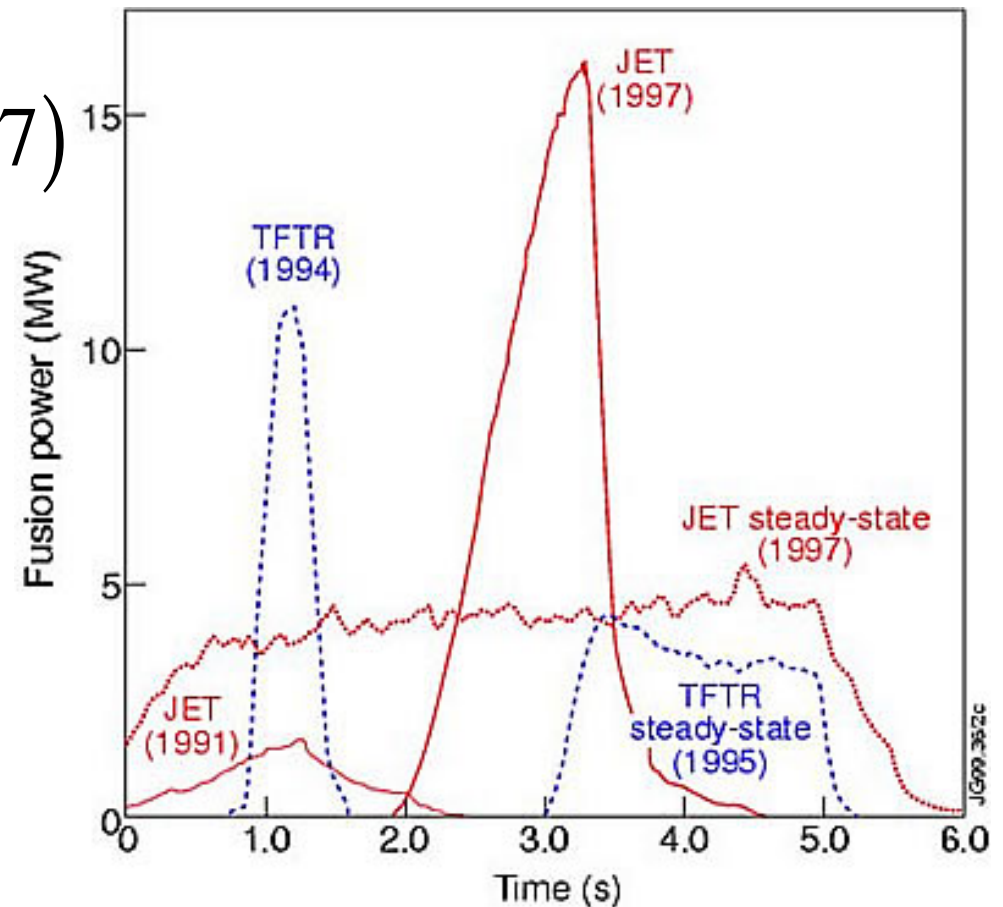
$$Q = P_{\text{fus}} / P_{\text{aux}}$$

$$Q = 16 / 22 = \mathbf{0.7} \text{ (JET, 1997)}$$

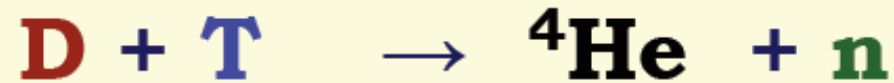
obiettivi futuri

$$Q = \mathbf{5 - 10} \text{ (ITER)}$$

$$Q = \mathbf{50} \text{ (DEMO, reattore)}$$

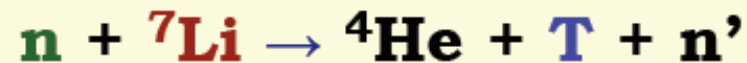
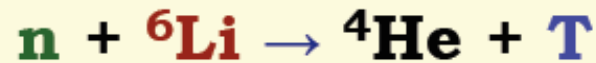


Combustibili

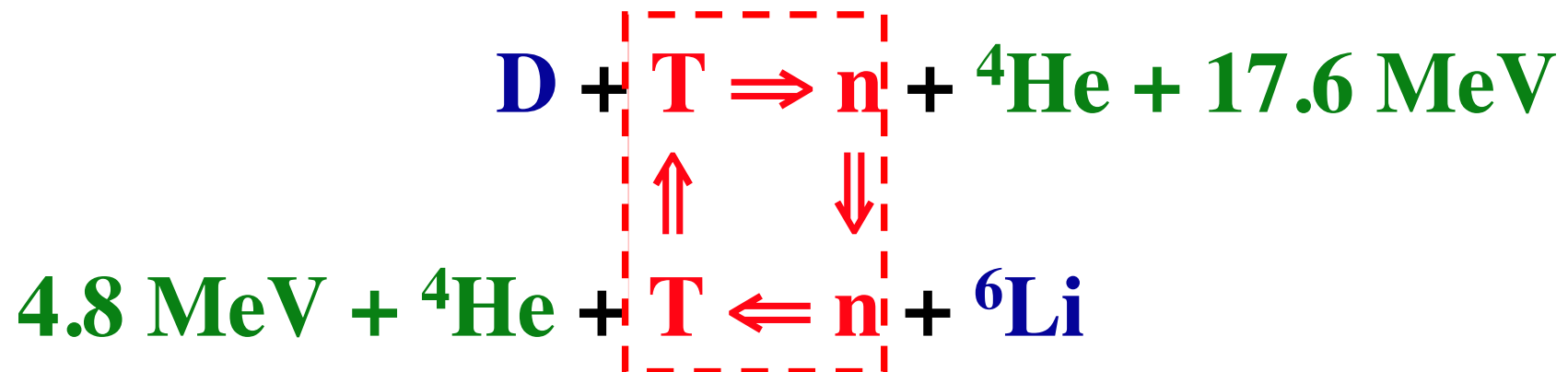


Deuterio : 1 g in 39 litri di acqua

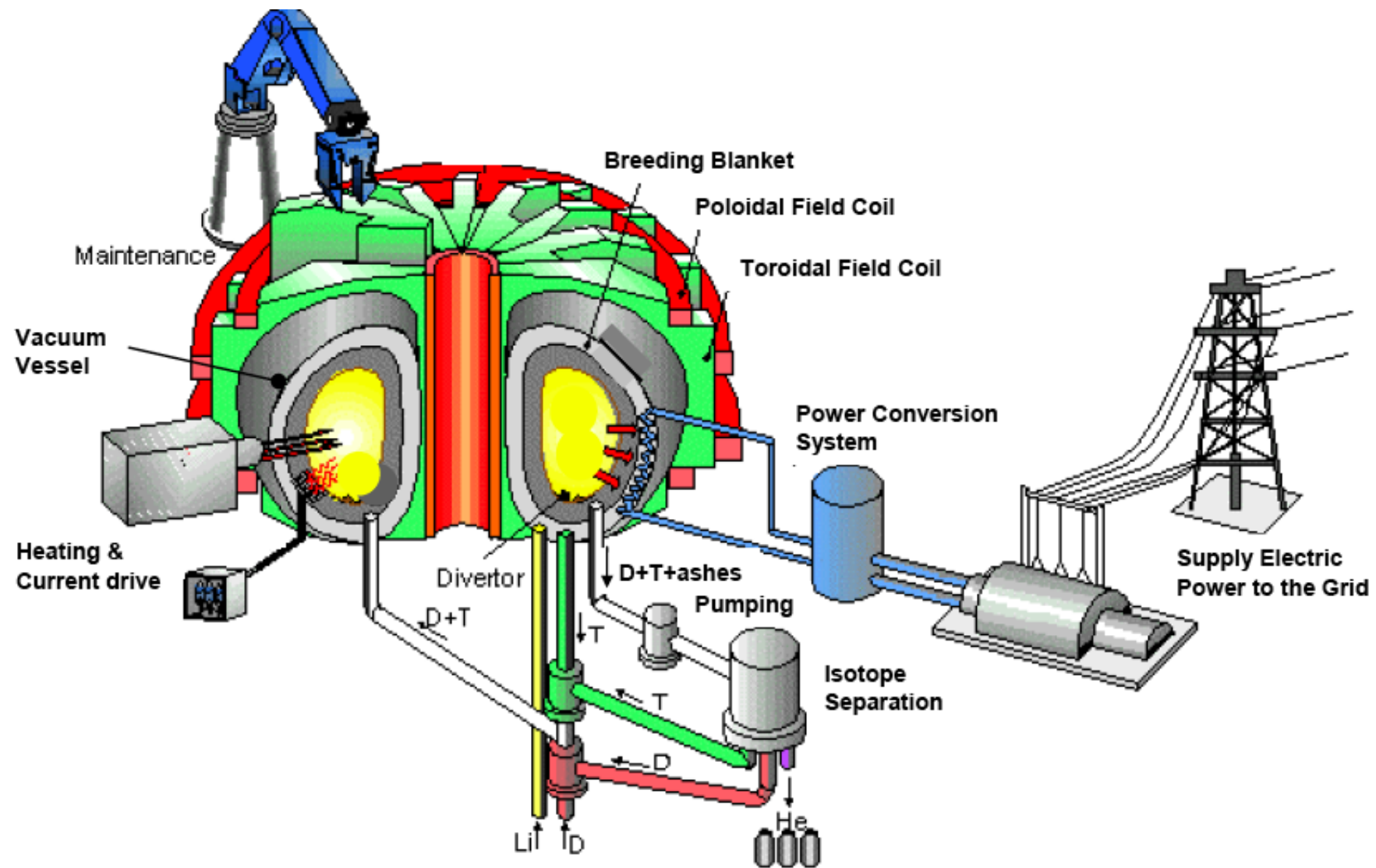
Trizio: isotopo radioattivo a vita breve ($t_{1/2}=12.3$ anni) non presente in natura, può essere prodotto in ciclo chiuso nel reattore



Litio : molto abbondante nelle rocce, oceani, acque minerali

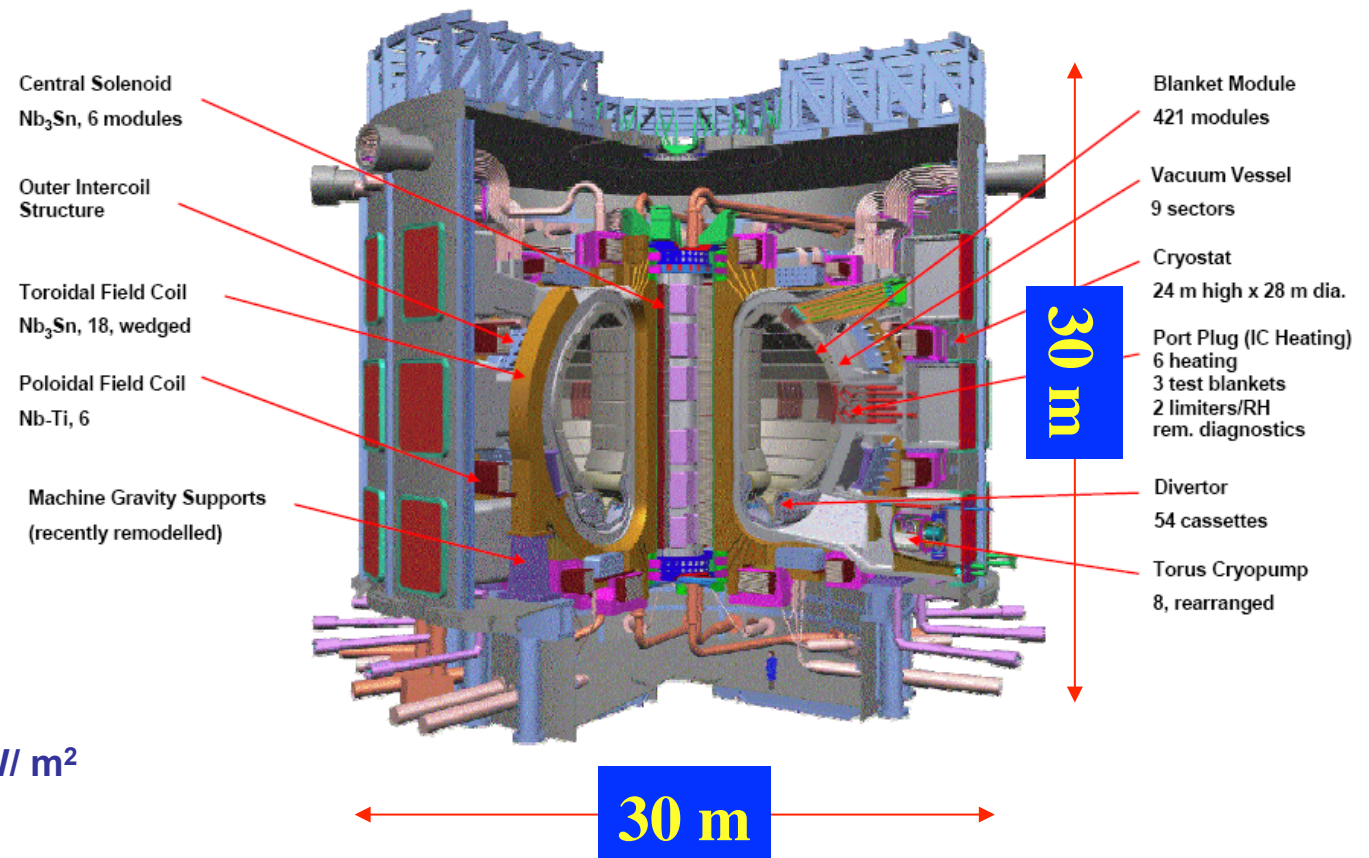


Schema di reattore a fusione



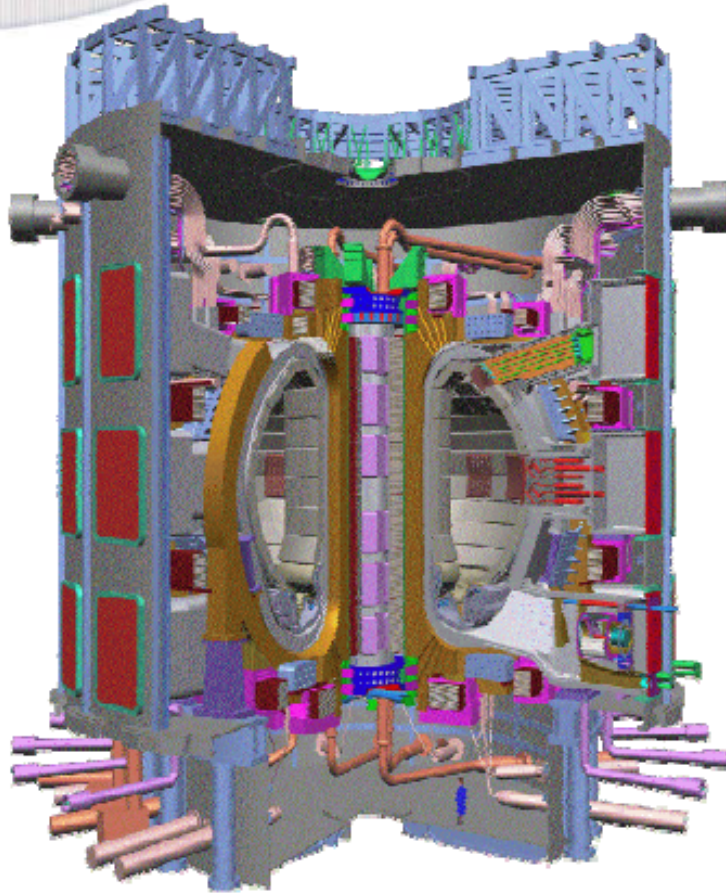
Il futuro: ITER

Raggio maggiore: 6.2 m
Raggio minore: 2.0 m
Volume di plasma: 840 m³
Corrente di plasma: 15 MA
Campo toroidale: 5.3 T (12 T)
Lunghezza di scarica: > 300 s
Potenza da fusione: 500 MW
Energia del plasma: 350 MJ
Carico di n su pareti~: 0.5 MW/ m²
Fluenza di n: 0.3 MW-a/ m²
Potenza di riscaldamento: 70-100 MW
Altezza: ~25 m
Diametro: ~26 m





ITER Tokamak - Mass Comparison



ITER Machine mass:

~23000 t

28 m diameter x 29 m tall

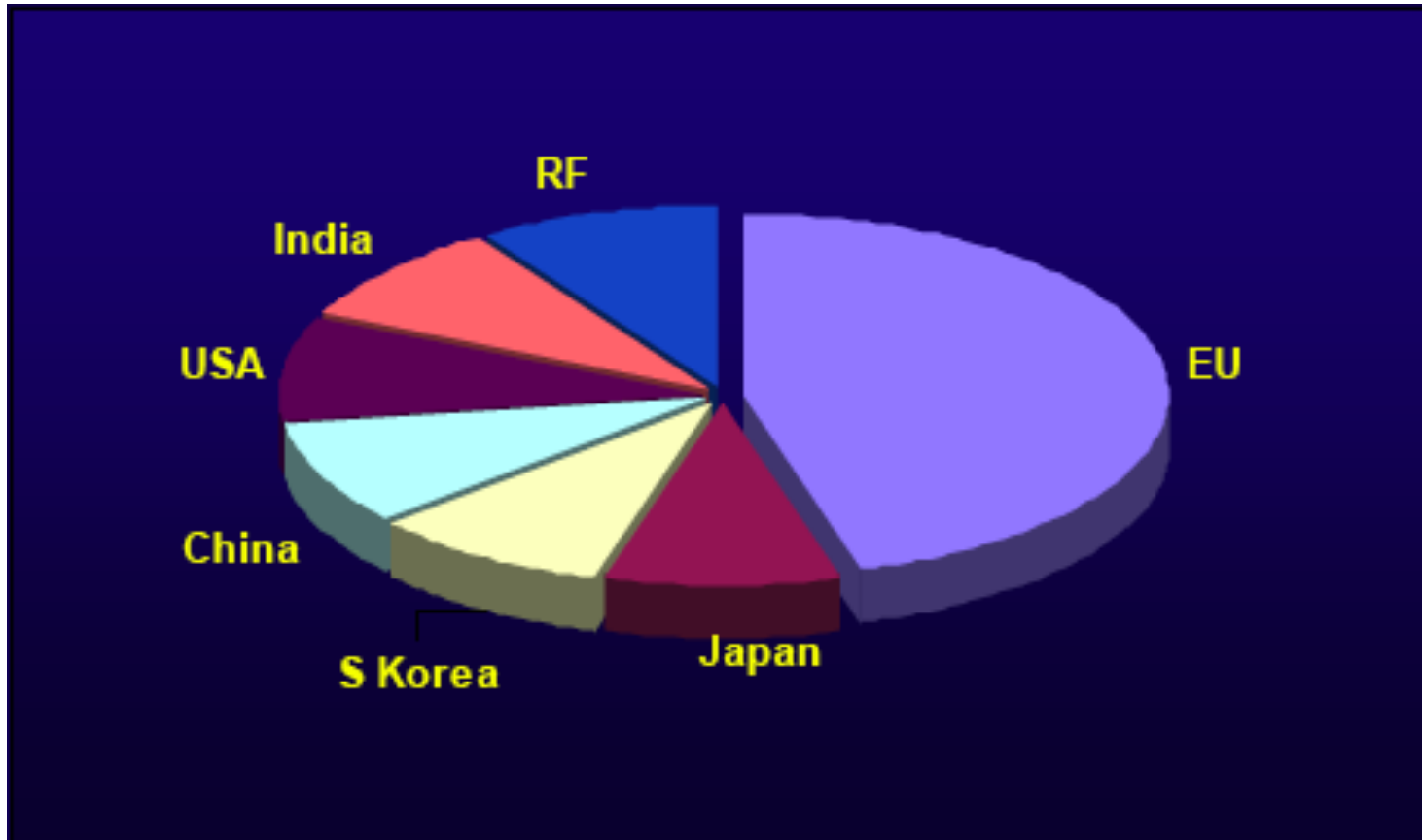


Charles de Gaulle mass:

~38000 t (empty)

856 ft (261 m) long

(Commissioned 2001)



Costo della costruzione: 15 miliardi di €

Contributi "in kind": si finanziano le industrie nazionali

***5/11 a carico del Paese che ospita ITER
(Unione Europea)***

1/11 ciascuno degli altri partner

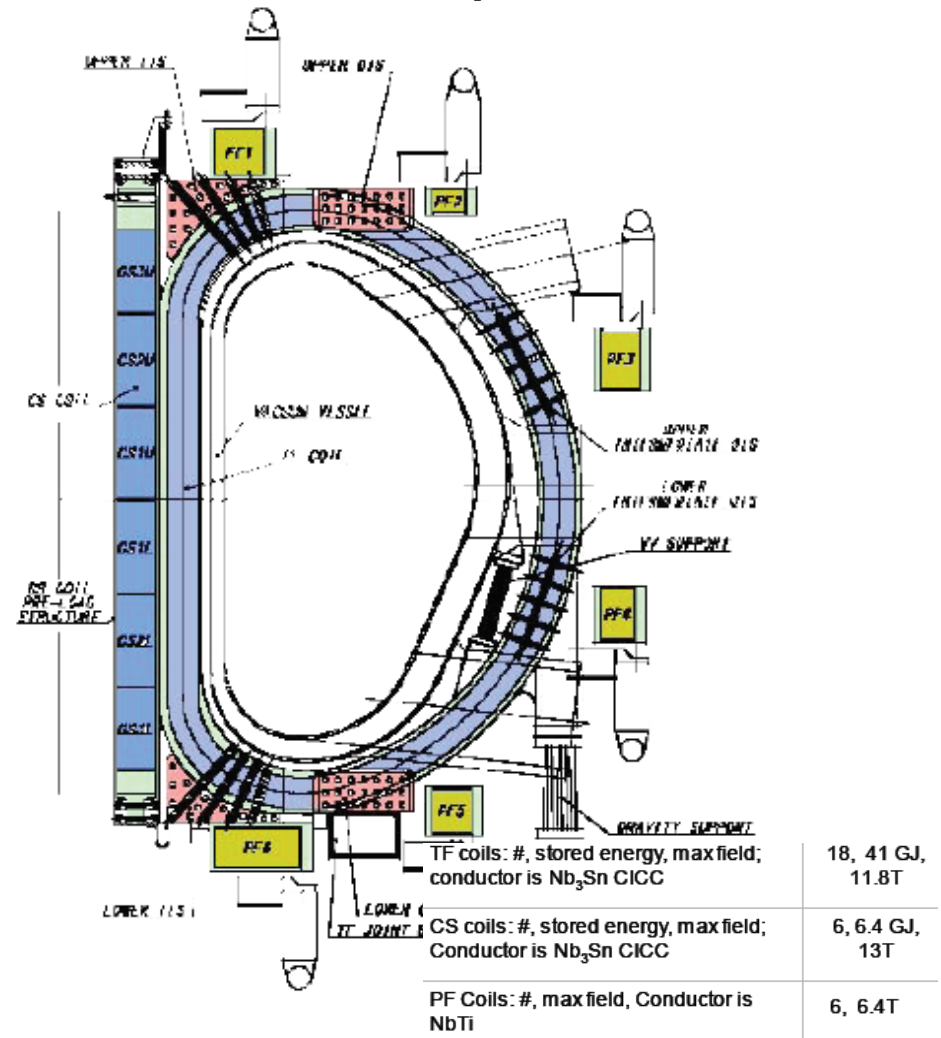
International Thermonuclear Experimental Reactor

- ITER rappresenta il passo intermedio tra i tokamak oggi in funzione (in cui si compiono soprattutto studi di fisica) e gli impianti di potenza di domani.
- È stato progettato per:
 - **confinare un plasma in cui si produrranno ~ 500 MW di potenza da fusione**
 - **dimostrare la fattibilità dell'integrazione tra fisica e tecnologia in un reattore.**
- È un progetto internazionale cui partecipano l'Unione Europea, il Giappone, la Federazione Russa, la Cina, la Corea del Sud, l'India e gli Stati Uniti.
- ITER è in costruzione a Cadarache, in Provenza (Francia)
- Le prime scariche con plasma sono previste nel 2019.


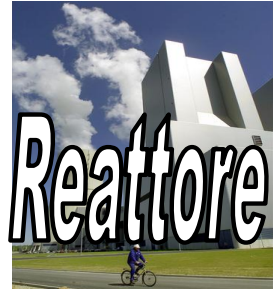
Sfide per l'ingegneria e le tecnologie

ITER fornirà i primi test delle principali tecnologie per la fusione. Tuttavia in ambiente nucleare si prevedono molti sistemi complessi e nuovi problemi.

- **Magneti superconduttori**
 - Unprecedented size of the superconducting magnet and structures
 - High field performance ~ 12T
 - Power plant size and field 40GJ
- **Componenti materiali affacciate al plasma**
 - > 10 MW/m² steady heat flux
 - > 10000 cycles/ severe damage
- **Assistenza robotizzata**
- **Sistemi diagnostici sofisticati**
 - 40 different diagnostic systems
- **Metodi di riscaldamento e generazione di corrente nel plasma**
 - > 50 MW continuous
 - 1 MeV neutral atoms
 - Ion cyclotron, electron cyclotron
- **Sistemi per utilizzare il tritio**
 - Active recycling of tritium
 - Test of lithium blankets



Le prospettive della fusione

	Quando?	Potenza di fusione	Durata dell'impulso	Guadagno Q
 JET	1997	16 MW	10 sec.	0.65
 ITER	2019-2028	500-700 MW	30 min.	~ 10
 Reattore	2040-2050	1.5-2 GW	giorni	~ 50

La sicurezza

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

Radioattività a breve vita

La **radiotossicità** è una misura dell'effetto sull'essere

