

# Lezione Fermi 9

*Luciano Maiani, AA 14-15*

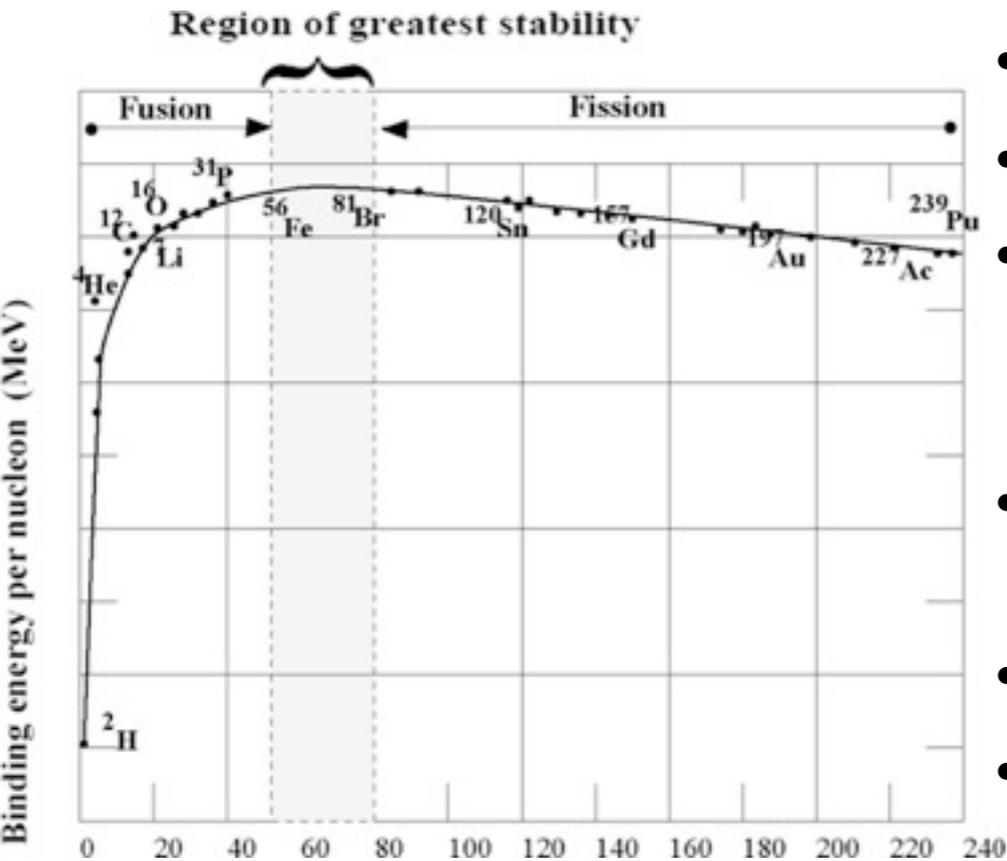
## La Fusione Controllata

## Sommario

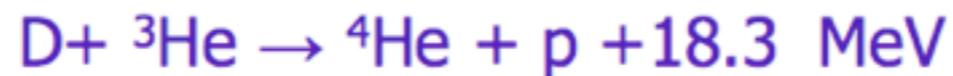
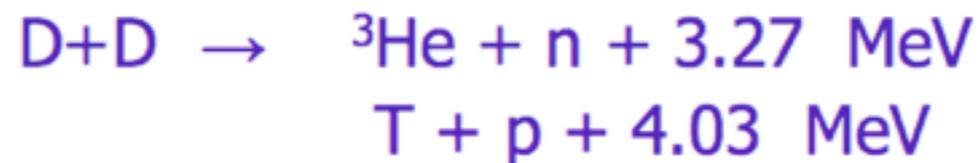
1. Quale fusione?
2. ITER
3. Confinamento magnetico e breeding
4. Roadmap
5. Il contributo dell'Europa

Ringrazio il prof. Giorgio Rostagni, cui devo quasi tutto quello che so sulla fusione controllata

# 1. Quale fusione?



- La fusione dei nuclei leggeri produce energia
- Nelle stelle domina la fusione di H in He (T circa  $10^6$  K)
- pero' in laboratorio non possiamo partire da H
  - $H+H \rightarrow D + e^+ + \nu$ : Interazione Debole (Fermi), la reazione e' troppo poco frequente
- Il Deuterio e' molto abbondante sulla Terra, la fusione  $D + D$  ( $D = {}^2\text{H}$ ) e' piu' favorevole
- la reazione piu' a portata e' la fusione  $D+T$  ( $T = {}^3\text{H}$ )
- Il Trizio e' instabile (vita media circa 12 anni), ci vuole un sistema per riprodurlo (breeding)



- ITER: i neutroni da 17.6 MeV sono assorbiti da un *mantello* che circonda il plasma in cui si raccoglie energia e si rigenera il Trizio dalle reazioni dei neutroni su Berillio
- **Come funziona un reattore a fusione nucleare**, Paola Batistoni, ENEA Dipartimento Fusione, Tecnologie e Presidio Nucleari Centro Ricerche Frascati (Roma) ITALIA

**La fusione** come fonte di energia primaria rappresenta **un'enorme potenzialità ed insieme una impegnativa sfida tecnologica.**

- combustibile praticamente illimitato, diffuso ed economico,
- minima emissione di CO<sub>2</sub> e di altri inquinanti atmosferici,
- sicurezza intrinseca in tutte le fasi operative e di arresto della centrale,
- gestione delle scorie radioattive entro un periodo dell'ordine di una generazione umana.

Le attività sviluppate negli scorsi decenni hanno consentito di comprendere i problemi scientifici del confinamento magnetico e del riscaldamento del plasma.

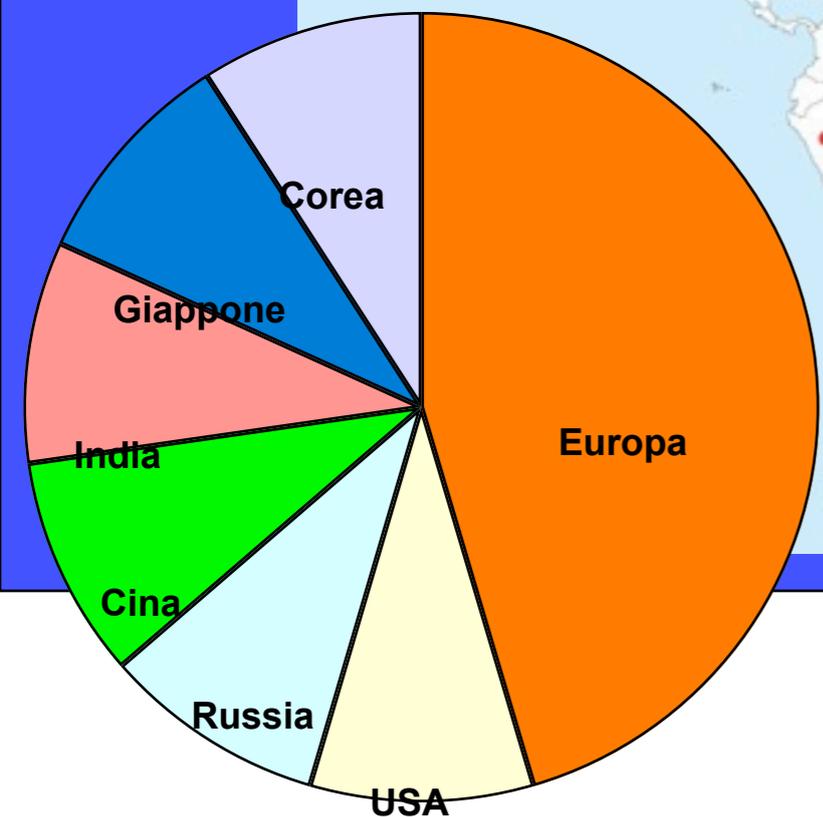
Il progetto ITER permetterà di conseguire la verifica della fattibilità della fusione a livello scientifico e fornire gli elementi per sviluppare entro 30 anni un prototipo di impianto (DEMO) capace di produrre con continuità energia elettrica.

## 2. ITER

- Geneva Superpower Summit in November 1985
- following discussions with President Mitterand of France and Prime Minister Thatcher of the United Kingdom, General Secretary Gorbachev of the former Soviet Union proposed to U.S. President Reagan an international project aimed at developing fusion energy for peaceful purposes.
- The ITER Agreement was officially signed at the Elysée Palace in Paris on 21 November 2006 by Ministers from the seven ITER Members. In a ceremony hosted by French President Jacques Chirac and the President of the European Commission M. José Manuel Durao Barroso, this Agreement established a legal international entity to be responsible for construction, operation, and decommissioning of ITER.



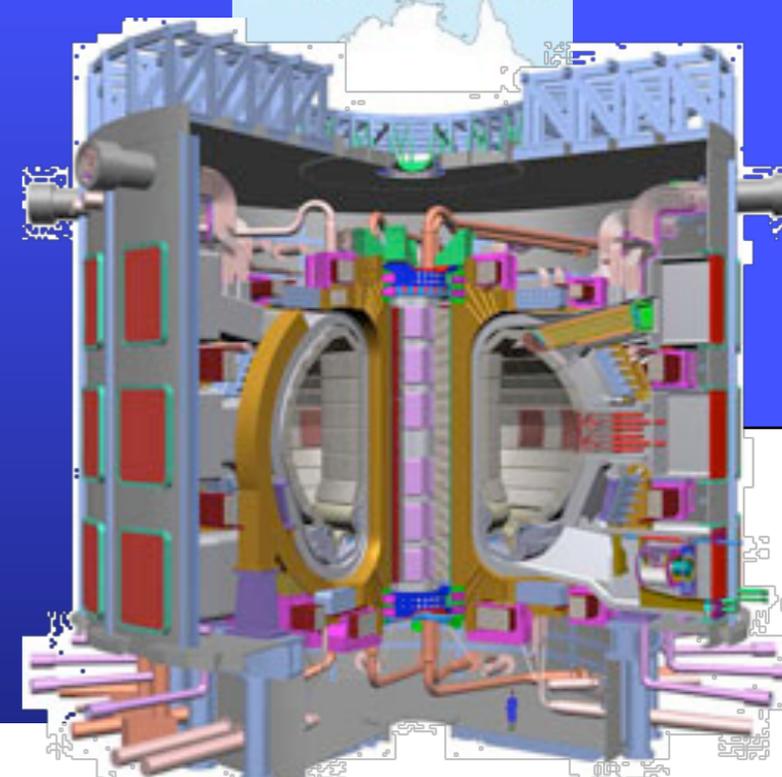
# ITER: collaborazione internazionale e costi di costruzione



**Totale 5.400 Mil €**

- EU 5/11,
- Corea 1/11
- Giappone 1/11
- India 1/11
- Cina 1/11
- Russia 1/11
- USA 1/11

**Riserva 10% del totale**



# Schema di collaborazione europea



**Un unico Programma Europeo** sulla Fusione coordinato dalla Commissione Europea, attraverso 26 contratti di Associazione bilaterali.

La collaborazione europea, tra le Associazioni, è promossa anche attraverso l' "European Fusion Development Agreement" (**EFDA**).

Il contributo Europeo ad ITER è fornito attraverso l' "EU Joint Undertaking for ITER and the Development of Fusion Energy" (**F4E**), con sede a Barcellona (Spagna).

***L' Europa contribuisce ad ITER con forniture ad alta tecnologia (In kind), con l'attività di Broader Approach, per la realizzazione di impianti complementari ad ITER, e con attività di ricerca per DEMO.***

**Euratom**

**Associazione italiana Euratom-ENEA**

**CNR**

**IFP - Milano**

**ENEA**

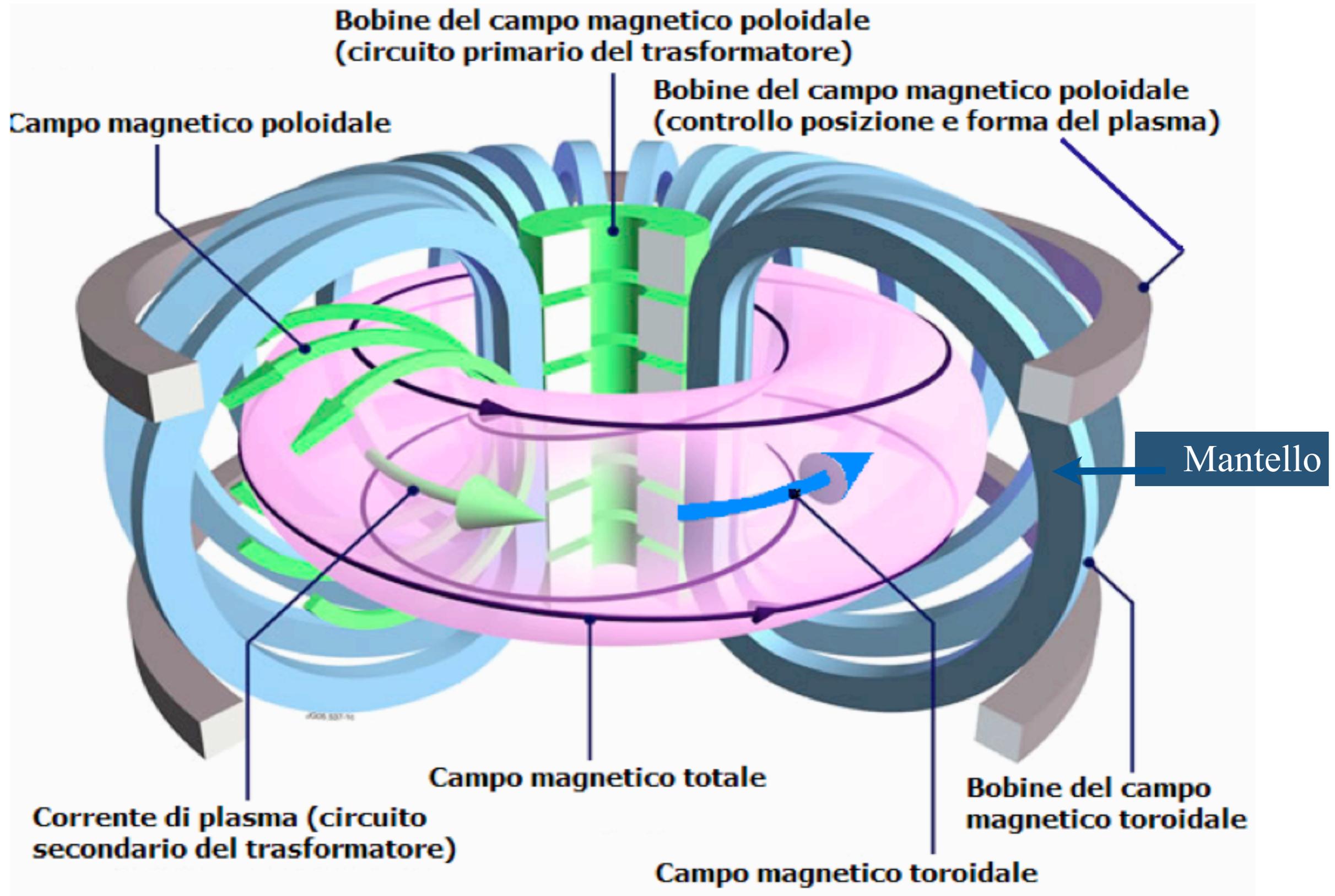
Frascati,  
Brasimone,  
Consorzio Create,  
Università italiane

**Consorzio RFX**

**CNR (IGI - Padova)**  
ENEA  
Università di Padova  
INFN

### 3. Confinamento magnetico: il Tokamak

da: Paola Batistoni



# Breeding

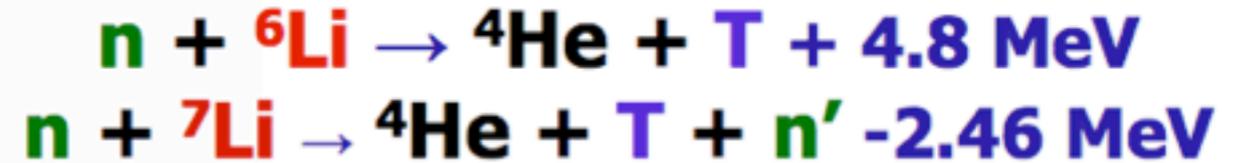
da: Paola  
Batistoni

**Deuterio** : 1 g in  
39 litri di acqua

**Litio** : molto abbondante nelle  
rocce, oceani, acque minerali



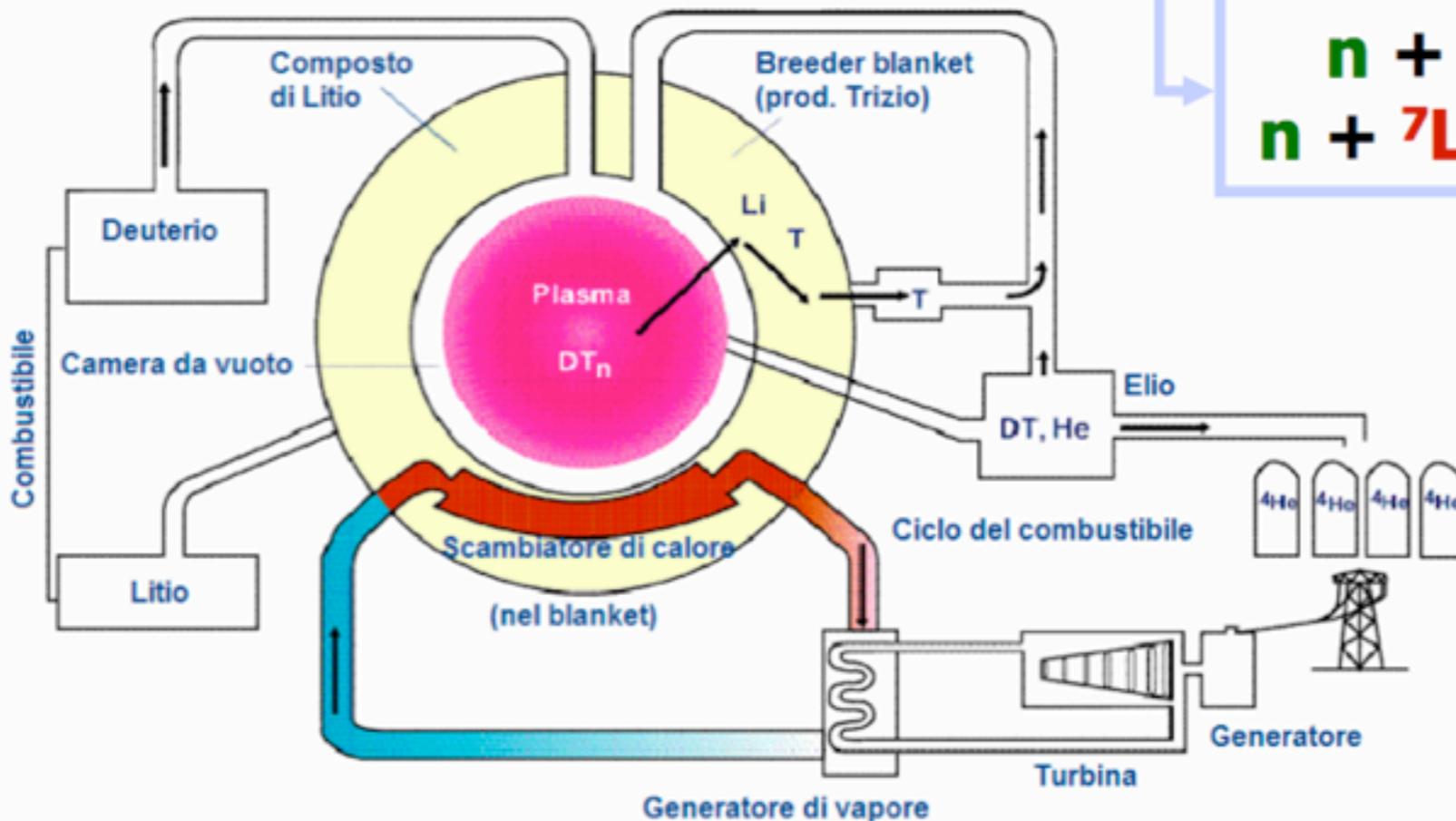
**Trizio**: isotopo a vita breve  
( $t_{1/2} \sim 12$  anni)



**Il combustibile:**  
deuterio, litio

**Prodotto finale: elio**

110 kg di D + 380 kg di Li  
per 1000 MWe • anno



# Glossario

- Plasma: gas costituito da ioni (atomi privati di 1 o più elettroni) e elettroni
- Riscaldamento: energia che si immette nel plasma per favorire il raggiungimento delle condizioni di fusione,  $P_{in}$ =potenza di riscaldamento
- tempo di contenimento,  $\tau_E$ : tempo caratteristico con cui l'energia contenuta viene dissipata (es. dall'irraggiamento degli elettroni)
- $P_{out}$ = potenza in uscita
- Break-even point:  $P_{in}-P_{out}=0$
- Guadagno:  $G=P_{fus}/P_{in}$
- Triplo Prodotto:  $(n \tau_E T)$ . E' il Fattore di merito della reazione di fusione (criterio di Lawson)
- valore di soglia, per entrare nella regione della fusione:  $3 \cdot 10^{21} \text{ keV sec/m}^3$

# Bilancio di potenza nella camera di reazione

da: Paola Batistoni

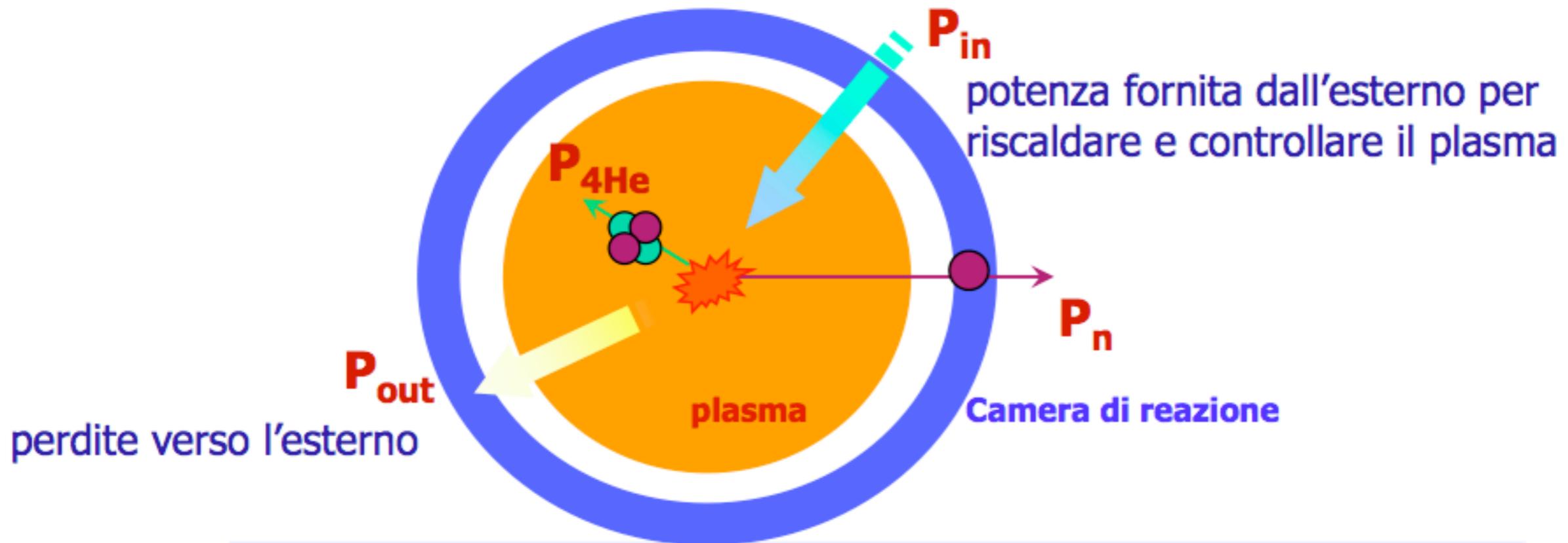


- **$^4\text{He}$  (3.5 MeV)** rimangono confinati nel plasma a cui cedono la loro energia
- **$n$  (14.1 MeV)** escono dalla camera di reazione la loro energia è utilizzata per produrre elettricità

$$P_{\text{fus}} = P_{4\text{He}} + P_n$$

20%  $P_{\text{fus}}$

80%  $P_{\text{fus}}$



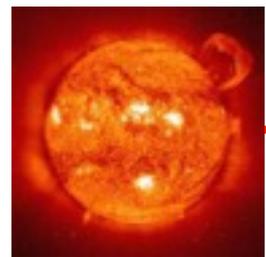
- ☞ Estrarre in modo efficiente l'energia dei neutroni
- ☞ Smaltire (estrarre) la potenza che esce dal plasma
- ☞ Smaltire le ceneri di He

# Prospettive dell'utilizzazione dell'energia da fusione per la produzione di energia elettrica

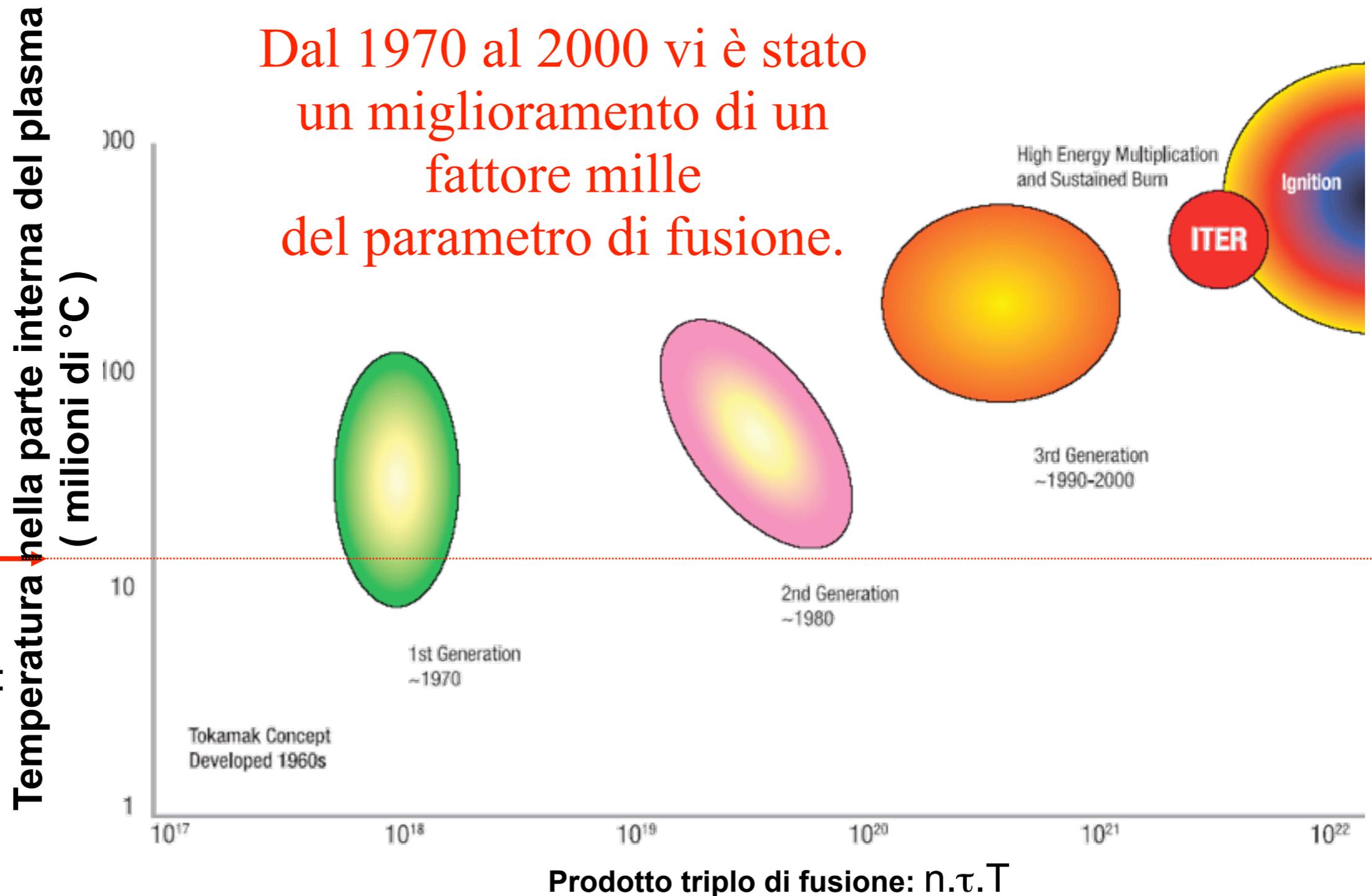
Risultati ottenuti per il prodotto triplo  $n \cdot \tau \cdot T$

(densità del plasma · tempo di confinamento dell'energia · temperatura del plasma)

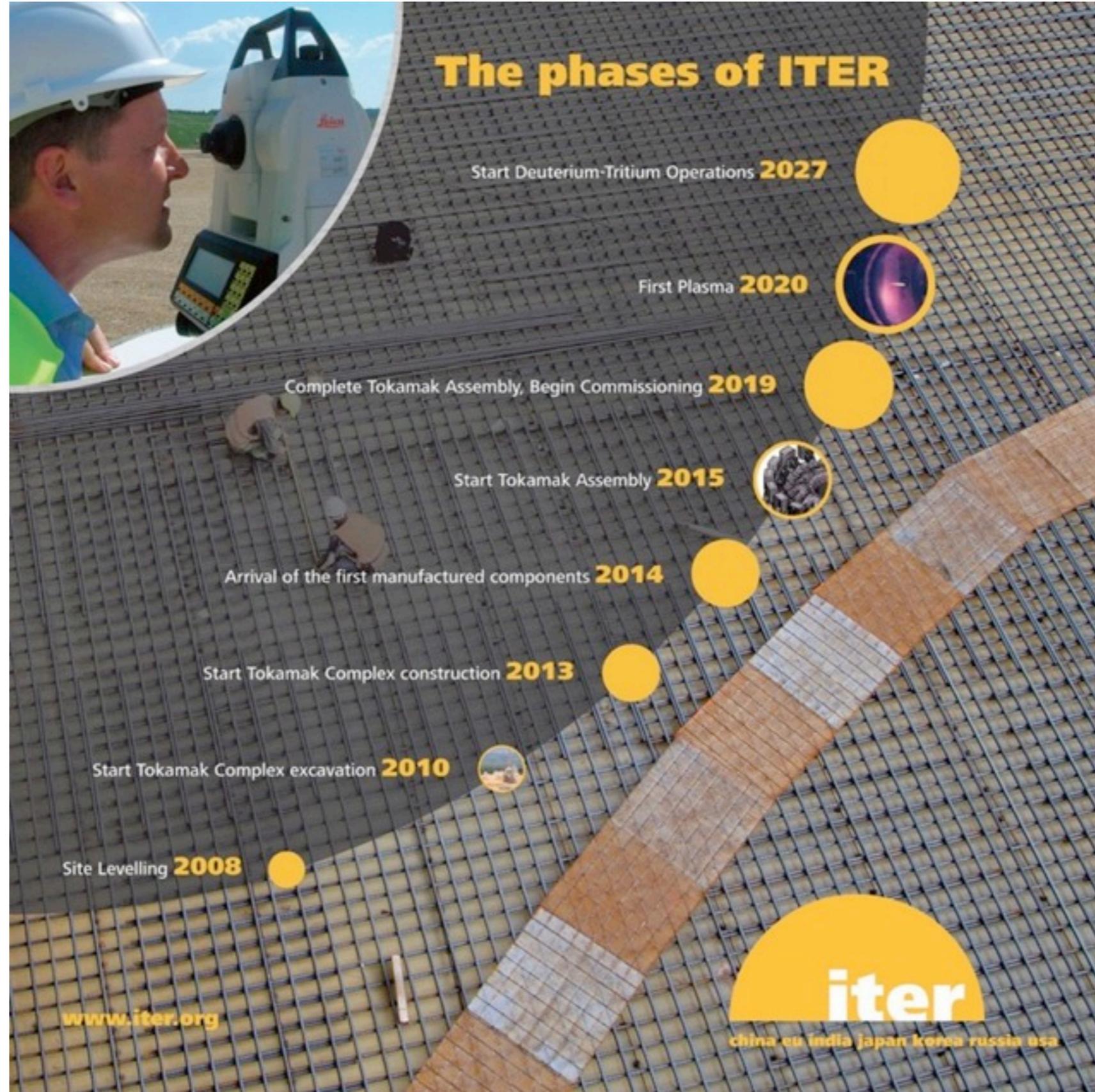
Dal 1970 al 2000 vi è stato un miglioramento di un fattore mille del parametro di fusione.



Centro del Sole:  
15 milioni di °C



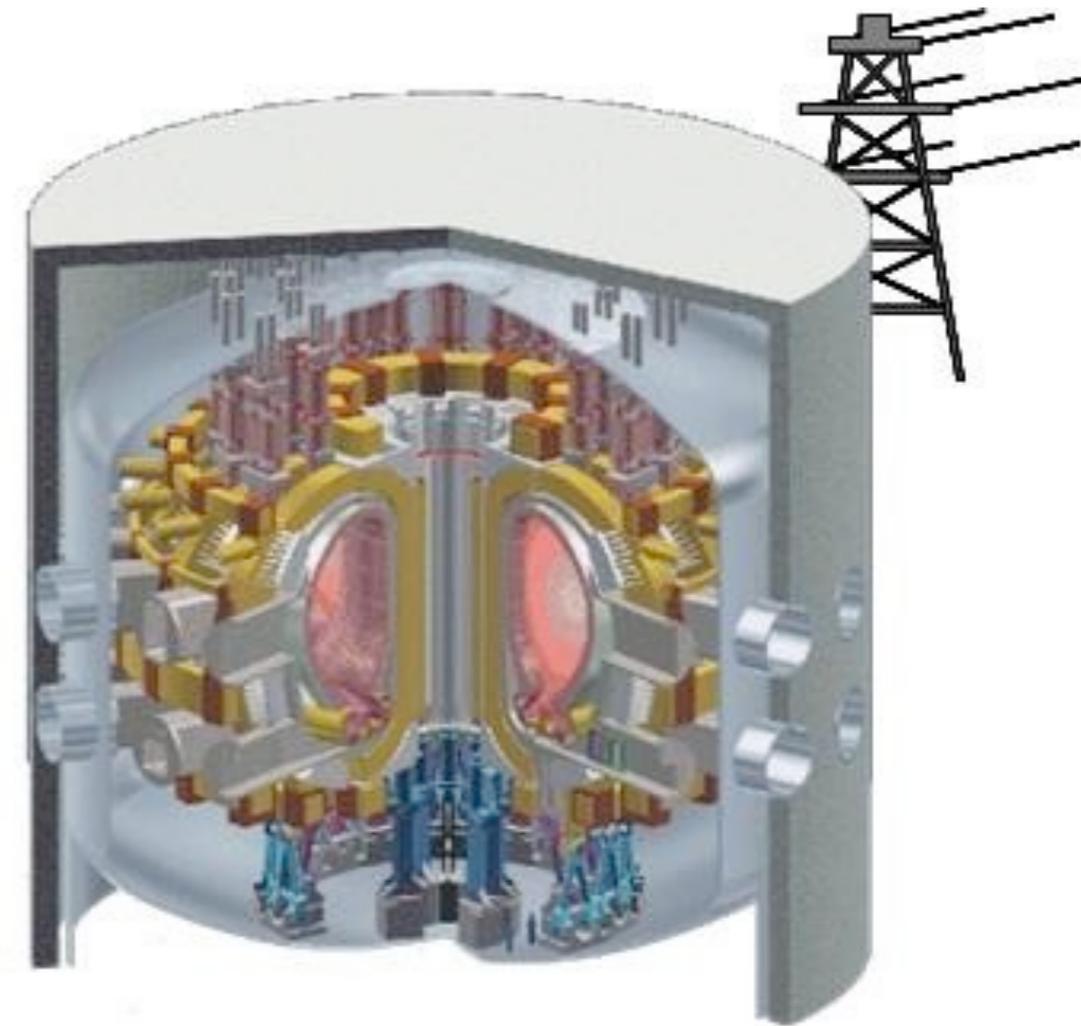
# 4. Roadmap



# On to Demo

ITER is the bridge toward a first plant that will demonstrate the large-scale production of electrical power and tritium fuel self-sufficiency: the Demonstration Power Plant, or DEMO for short, designed to produce 2000-4000MW of power. A conceptual design for such a machine could be complete by 2017.

DEMO will lead fusion into its industrial era, beginning operations in the early 2030s, and putting fusion power into the grid as early as 2040.

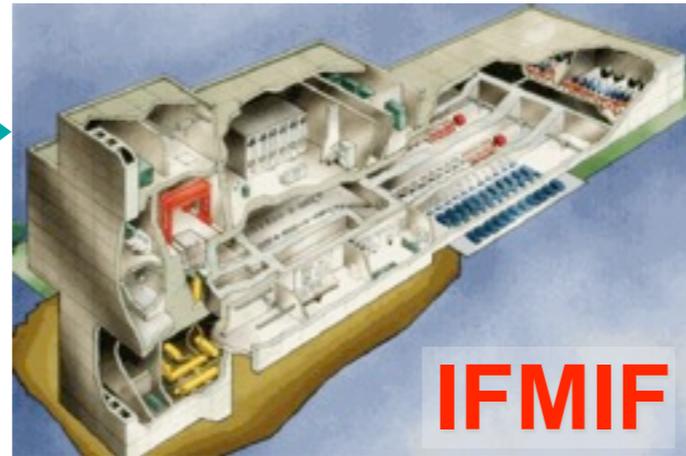


In Japan, the International Fusion Materials Irradiation Facility (IFMIF) program has begun. This installation, part of the "Broader Approach" Agreement, will test and qualify the advanced materials needed for a full-scale fusion plant.

By the last quarter of this century, if ITER and DEMO are successful, our world will enter the Age of Fusion—an age when mankind covers a significant part of its energy needs with an inexhaustible, environmentally benign, and universally available resource.

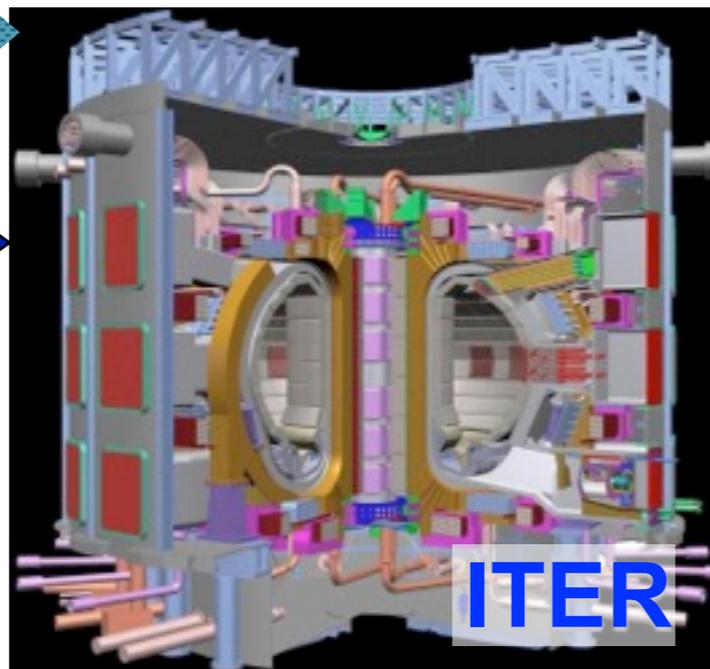
# Il "Broader Approach": un programma internazionale per l'energia da fusione

**Materiali strutturali e moduli mantello**



**Sistema integrato:**

- Magneti superconduttori
- Sistema per trizio
- Comp. nti interno camera
- Manipolazione remota
- Sistema riscaldamento
- Sicurezza
- Moduli prova mantello

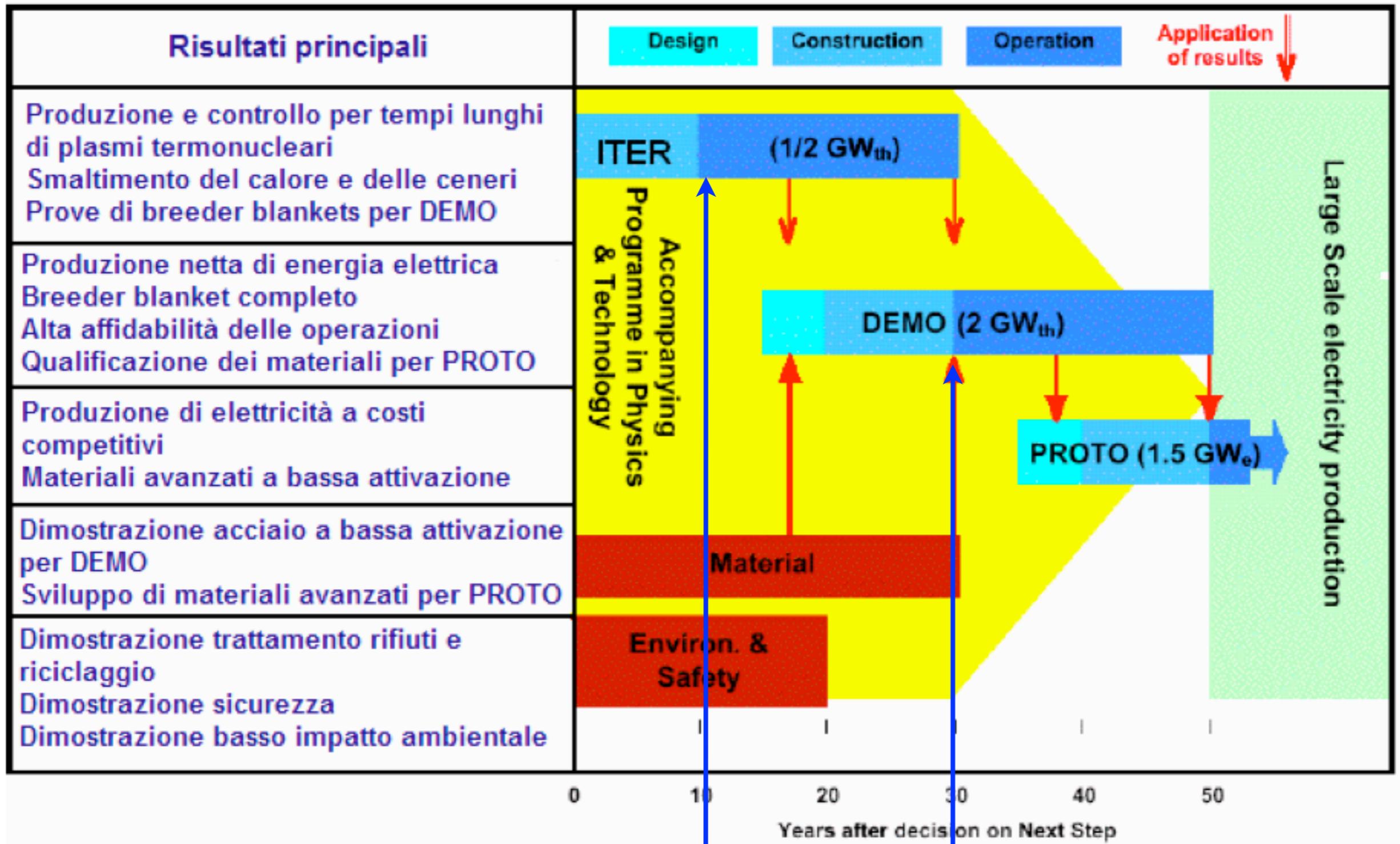


**Impianti per R&S**

- Confinamento
- Controllo impurezze
- Stabilità del plasma
- Fisica per ITER/DEMO

**JET, JT60-SA, FAST  
altre macchine**

# La roadmap della fusione



ITER first plasma 2020

DEMO first plasma 2040

# 5. Il Contributo dell'Europa



F4E is contributing to almost all of the main ITER systems

**Magnets** (10 TF coils and most of the PF coils)

**Ion Cyclotron Heating** (one port plug with ICRH antenna)

**Vacuum Vessel** (7 sectors and blanket coolant manifolds)

**Electron Cyclotron Heating** (Gyrotrons, Four upper port plugs with launchers)

**Blanket** (50% of the FW modules) and **Divertor** (inner vertical target)

**Neutral Beam Heating System and Test Facility** (various systems)

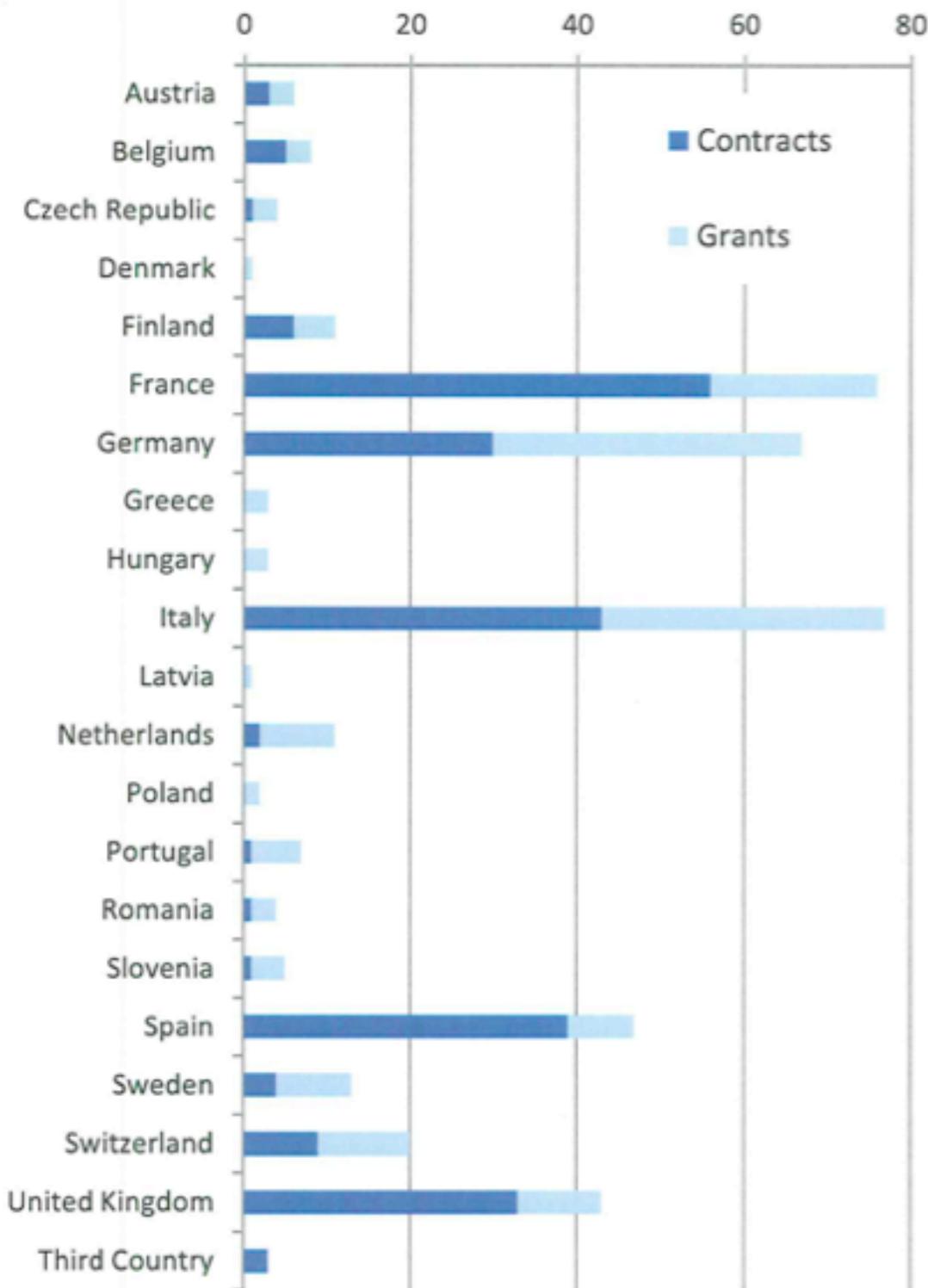
**Remote Handling** (divertor RH, NB RH and various systems)

**Diagnostics** (11 diagnostic-related systems)

**Vacuum Pumping & Fuelling, Tritium Plant and Cryoplant** (various systems)

**Site and Buildings** (all concrete and steel frame buildings)

# Work Contracted around Europe



# EU TF Coils: Radial Plates Series Production (CNIM – SIMIC)



Radial Plates being manufactured at SIMIC  
(Porto Marghera)



Radial Plates being manufactured at CNIM  
(Toulon)

- Each radial plate is 13m long and 9 m wide and has a continuous groove on a spiral trajectory, 700m long, which is machined on both sides
- Achieved Tolerances over the 700m long groove are 70ppm over length and 0.2mm over the trajectory position See P3.071 Poncet et al. at this conference
- 390 segments have been forged (90% of total production) in Germany (Thyssen) and Italy (Acciaierie Vienna)
- Two radial plates have been delivered to the Double Pancakes supplier in La Spezia and the production rate is one every 13 days

# Large Hadron Collider

ITER si salda nel tempo alla realizzazione di un altro grande progetto Europeo, il Large Hadron Collider del CERN (Ginevra)



Il know-how acquisito con LHC ha permesso una partecipazione importante delle imprese italiane in ITER

Anche questo e' trasferimento tecnologico!!



Realizzazione di LHC:  
-Iniziato nel 1997  
-In funzione dal 2011

# 6. Cold fusion?

- 1989. M. Fleischmann e S. Pons annunciano di avere osservato produzione anomala di calore accompagnata da un flusso di neutroni da una cella elettrolitica con elettrodi palladio e acqua deuterata
- contemporaneamente S. Jones et al. riportano l'osservazione di neutroni
- si specula su reazioni di fusione propiziate dall'impacchettamento dell'idrogeno nel reticolo del palladio: e' la fusione fredda (FF).
- il palladio e' noto per la notevole capacita' di assorbire idrogeno in certe localita' della sua cella cristallina (e' considerato come "valigia" per trasportare H)
- reazioni possibili:
  - $D+D \rightarrow {}^3\text{He} + n$  (3.3MeV)
  - $D+D \rightarrow {}^3\text{H} + p$  (4.0 MeV)
  - $p+D \rightarrow {}^3\text{He} + \gamma$  (5.4 MeV)
- o forse:
  - $D+{}^6\text{Li} \rightarrow {}^7\text{Be} + n$  (3.4 MeV)
- la notizia e' accolta con interesse estremo dai fisici, partono esperimenti in tutte le parti del mondo
- Fleischmann fa un seminario al CERN, accolto da Carlo Rubbia, allora DG

# in Italia

- a Frascati, F. Scaramuzzi e il suo gruppo annunciano di vedere i neutroni, ma poi...
- E. Fiorini li cerca al Gran Sasso, così Bertin e Vitale....nessun risultato
- con G. Parisi e L. Pietronero scriviamo un lavoro (presentato in un Workshop ad Erice) in cui analizziamo “quanto” dovessero essere vicini i nuclei di D nel palladio per dare i neutroni nominali di F&P per effetto tunnel; troviamo
  - $R_{F\&P} = 0.015-0.020 \text{ \AA}$
  - sono distanze di due ordini di grandezza più piccole di quelle delle posizioni di equilibrio nel cristallo, suggerendo fenomeni transienti (ma quali?)
  - queste distanze non dovrebbero distorcere le reazioni nucleari
- dove sono Trizio, neutroni, raggi gamma?
- Schwinger e poi Preparata suggeriscono la reazione
  - $D+D \rightarrow {}^4\text{He} + \gamma$ , con il  $\gamma$  assorbito dal reticolo
- la maggior parte dei fisici perde interesse perché manca una qualsiasi riproducibilità dei risultati annunciati dai gruppi di aficionados
- diverse imprese e enti finanziano questi esperimenti, in Italia, in Giappone, negli USA... “a fondo perduto” (costano poco e... hai visto mai?) incluso INFN (anch’io da presidente); questo porta a un regime di segretezza che peggiora la reputazione della FF
- gli ultimi sviluppi vedono un claim italiano (Focardi e Rossi, poi Rossi da solo), che parla di fusione di protoni sul nickel (?????, neanche nelle stelle),
- vendite di un generatore impenetrabile e non descritto scientificamente (INFN, da fuori, non vede raggi gamma)
- la natura nucleare dell’energia “prodotta” è indimostrata, tranne che sulla web.