

Fusione Nucleare: la soluzione al problema energetico?

Paolo Bettini

Dipartimento di Ingegneria Industriale (DII), Università di Padova

Consorzio RFX, Padova, Italy

Padova, 18 marzo 2015

Di cosa parliamo oggi ?

1. Cos'è la fusione?

2. Perché la fusione?

Energia e sviluppo sostenibile: domanda, risorse, economia, ambiente...

3. La fusione: come e quando?

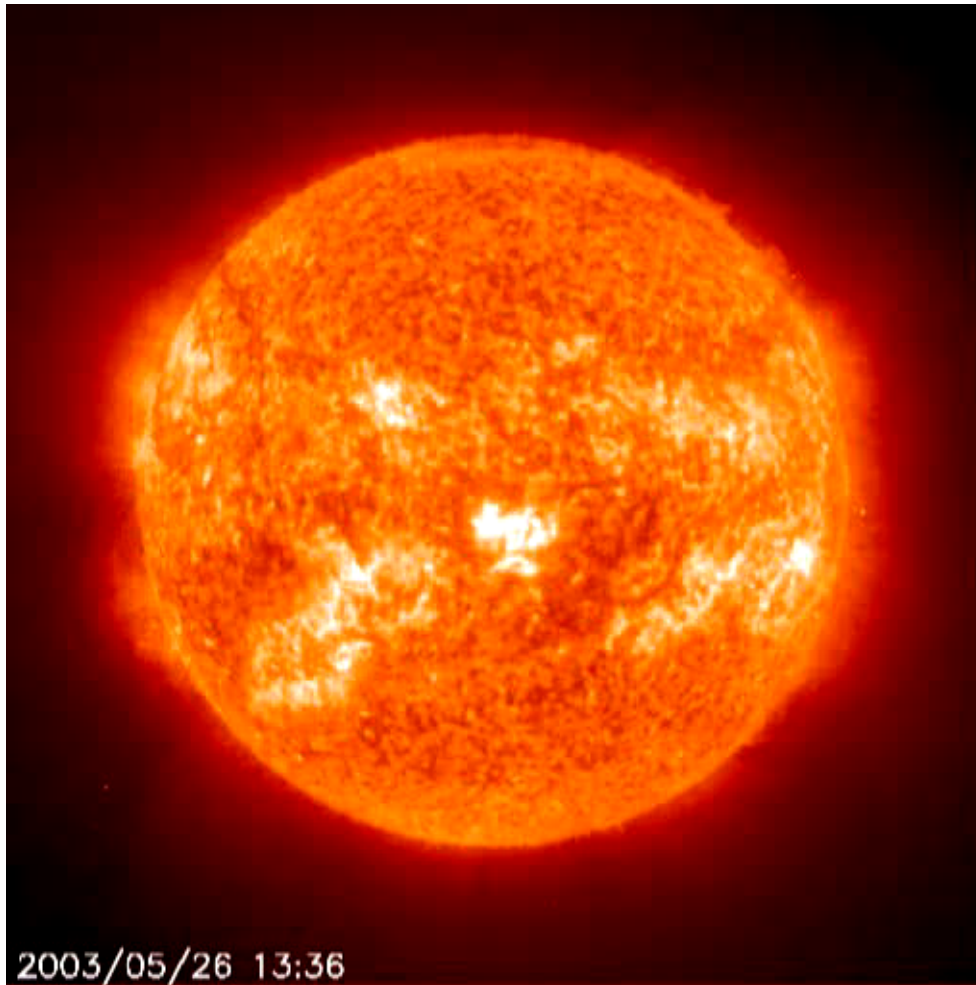
Presente e futuro: i principali esperimenti, ITER e le sfide che ci attendono

4. L'Italia e la fusione

1

Cos'è la fusione ?

La fusione: alla base della vita

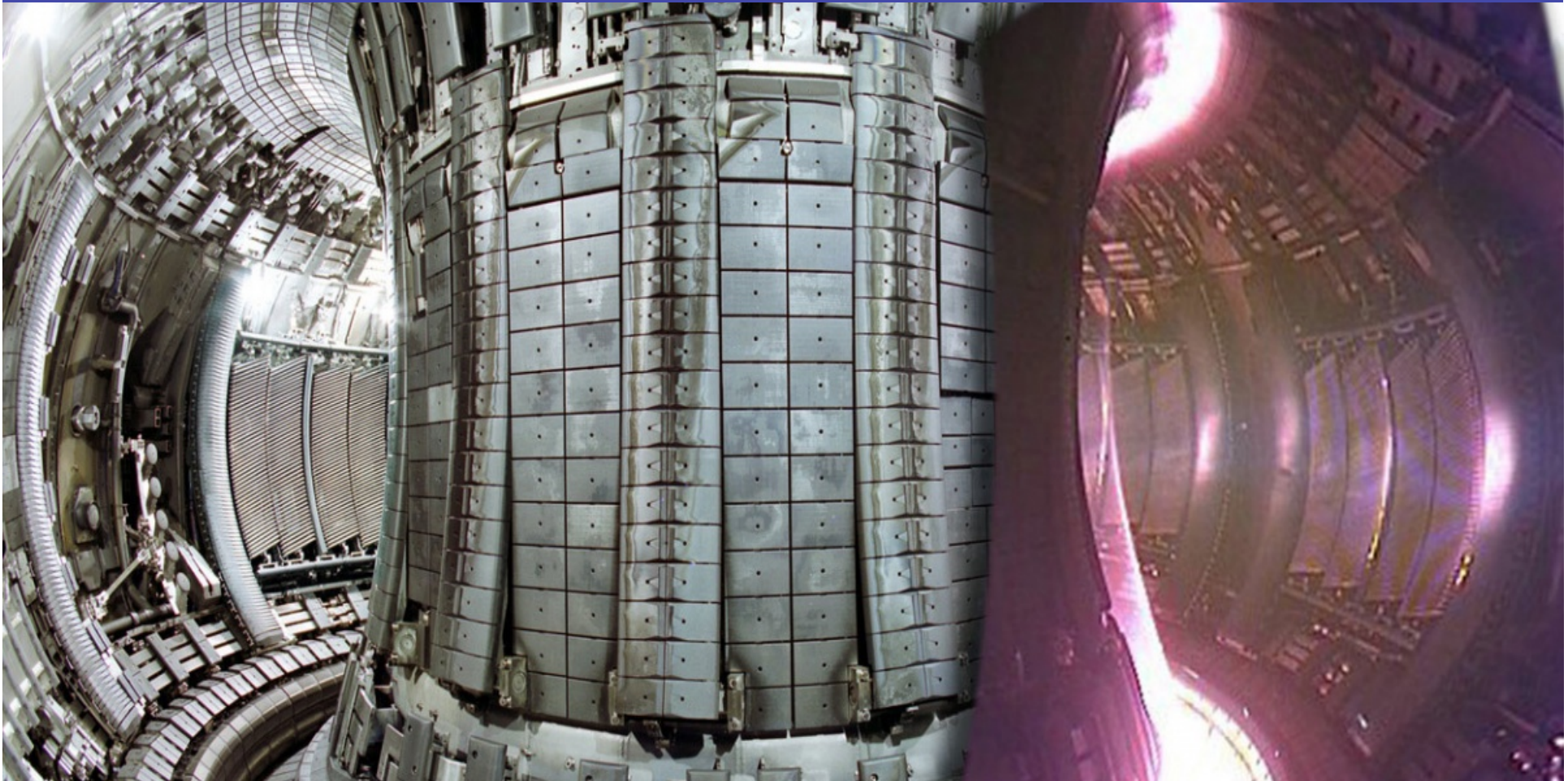


La fusione è il processo che
alimenta il sole, che

“brucia”

**600 milioni di tonnellate di
idrogeno al secondo**

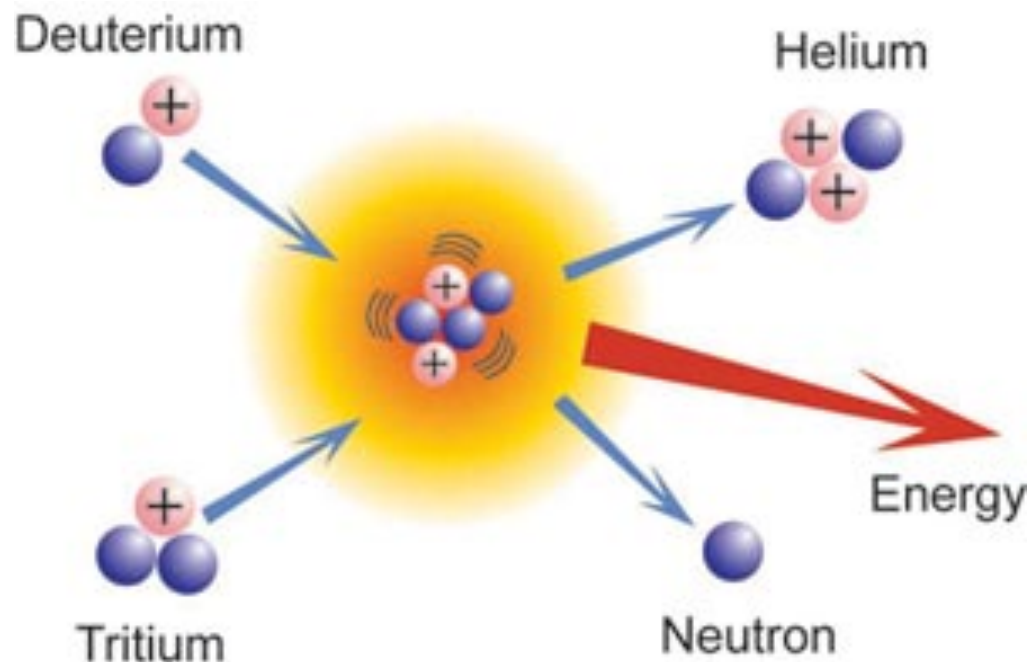
La sfida della fusione: “portare” il sole in laboratorio



In laboratorio il plasma per la fusione deve essere:

- prodotto, riscaldato a 100 milioni di gradi, isolato e confinato

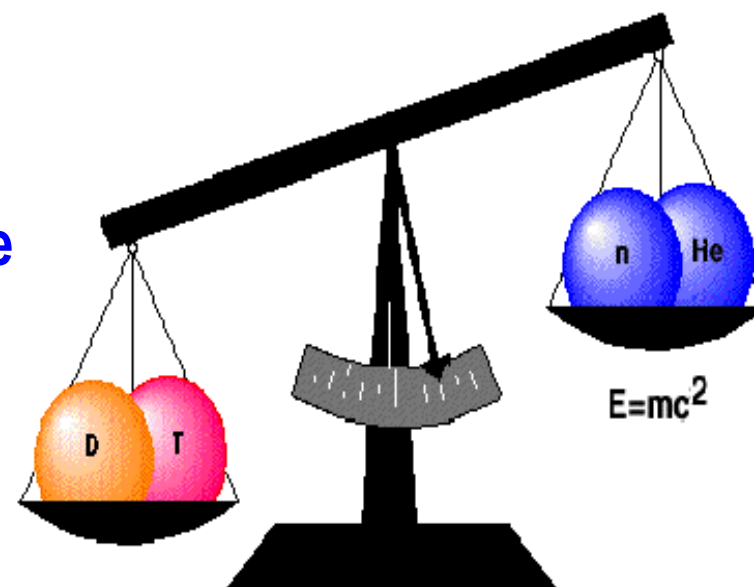
Il principio della fusione di due nuclei leggeri



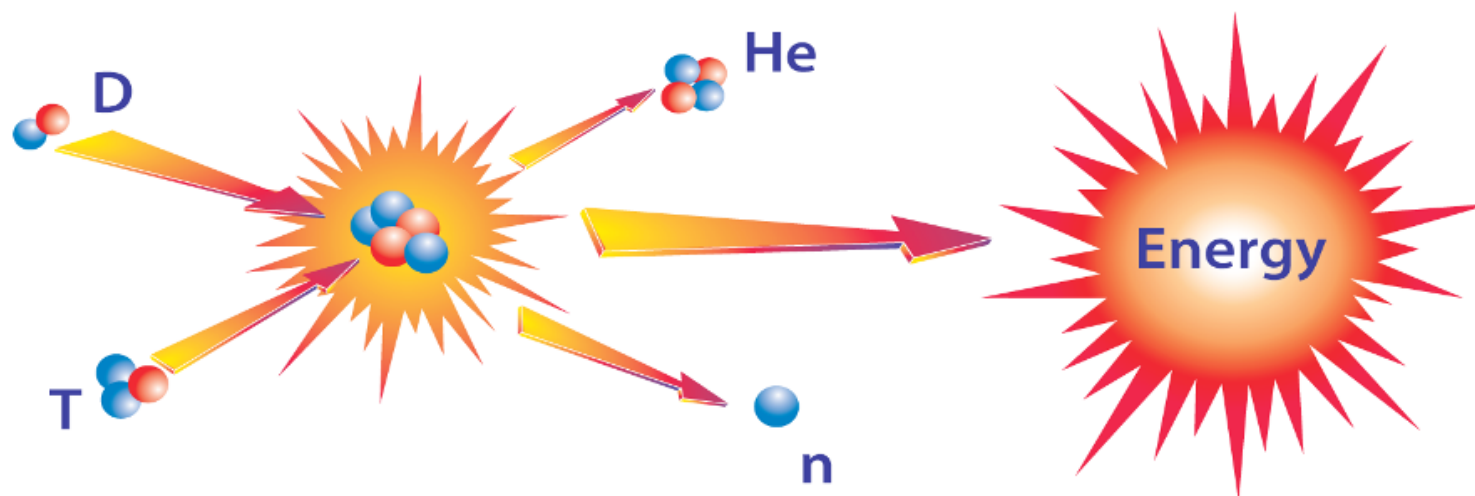
Il prodotto di reazione ha una massa minore dei prodotti di reazione (deficit di massa)

– La massa che manca va in energia:

$$E = mc^2$$



Il principio della fusione di due nuclei leggeri



E' in gioco un' energia enorme!

- **500 kg materia → 45 miliardi di miliardi di Joule***: paragonabile al consumo elettrico globale in un anno...

**1MJ=0,28 kWh*

...ma occorre convertire la materia in energia...

e non è banale farlo in modo controllato

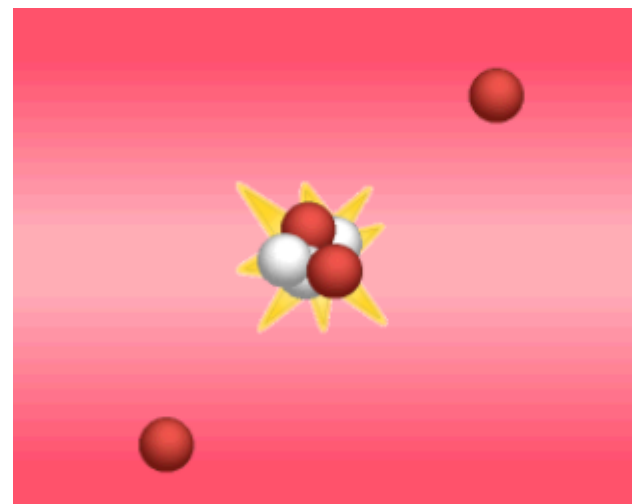
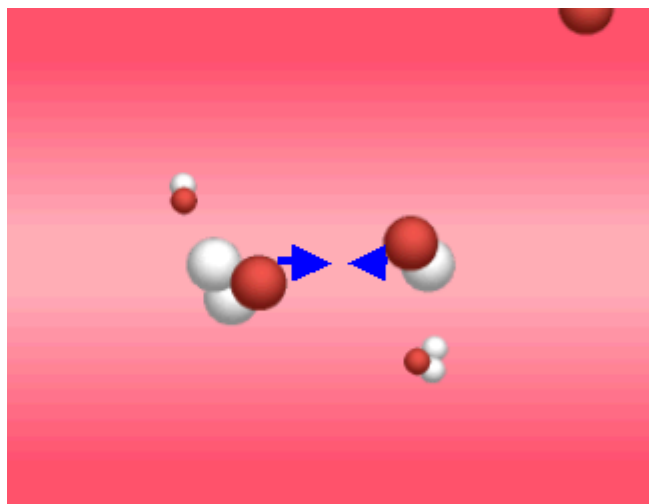
- **DEUTERIO e TRIZIO (LITIO)**

- L'uso dello **0.1%** delle risorse di **DEUTERIO** garantirebbe l'attuale livello di consumo di energia elettrica per circa **200 milioni di anni...**
- L'uso dello **5%** delle risorse di **LITIO** (dal quale si ottiene il Trizio) garantirebbe l'attuale fabbisogno di energia elettrica per circa **2000 anni...**

Perché non è facile realizzare la fusione di nuclei leggeri?



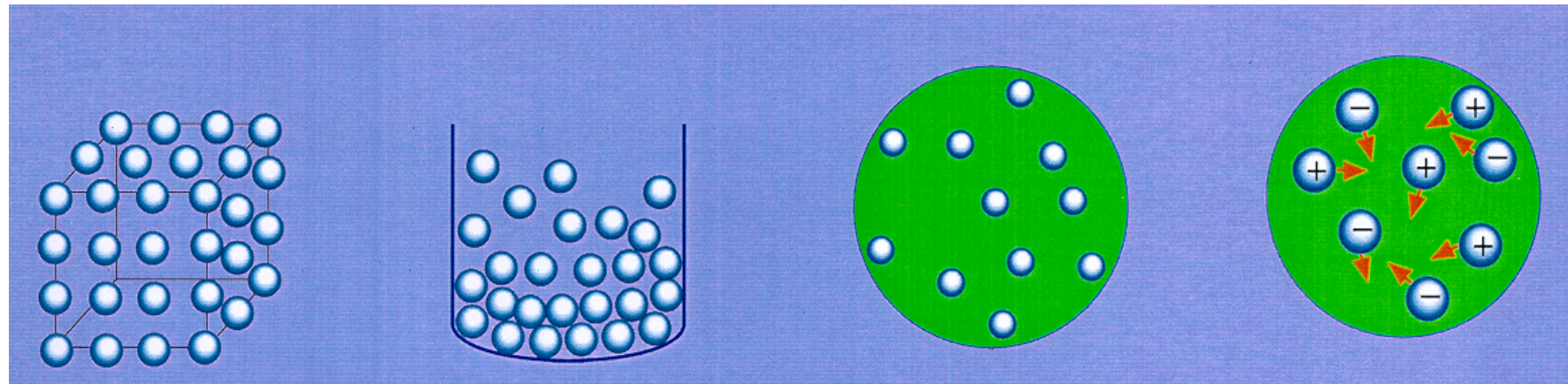
I nuclei carichi positivamente si respingono; aumentando la loro **energia cinetica** (ovvero la temperatura del **plasma**) essi possono avvicinarsi e quindi fondersi.



Solido, liquido, gas, ...e plasma



Plasma: il quarto stato della materia



solido

liquido

gas

PLASMA

temperatura



Nella materia allo stato di plasma i nuclei sono così energetici
da fondere

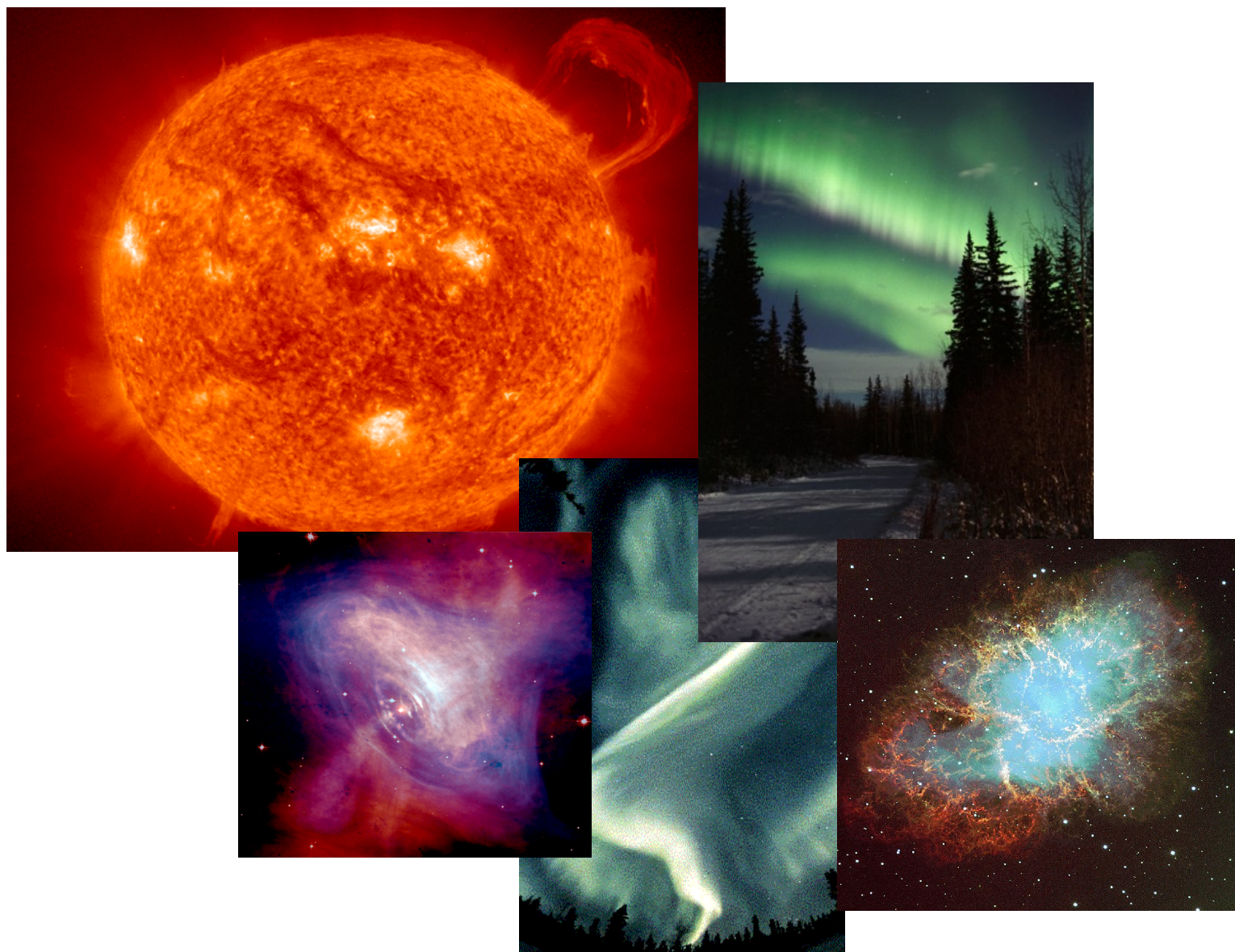
Plasma: il quarto stato della materia



- La difficoltà ad “immaginare” cosa sia un plasma nasce dal fatto che in natura (sulla Terra) il plasma è uno stato molto raro della materia. Alcuni esempi sono le aurore boreali...



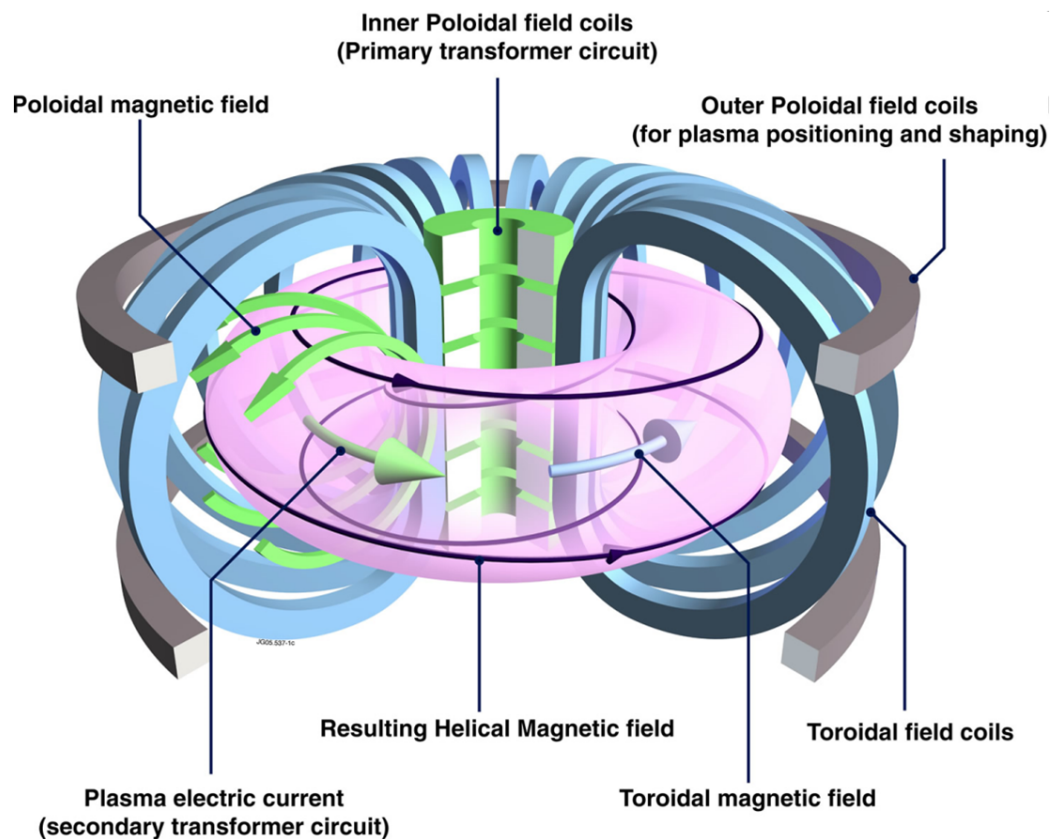
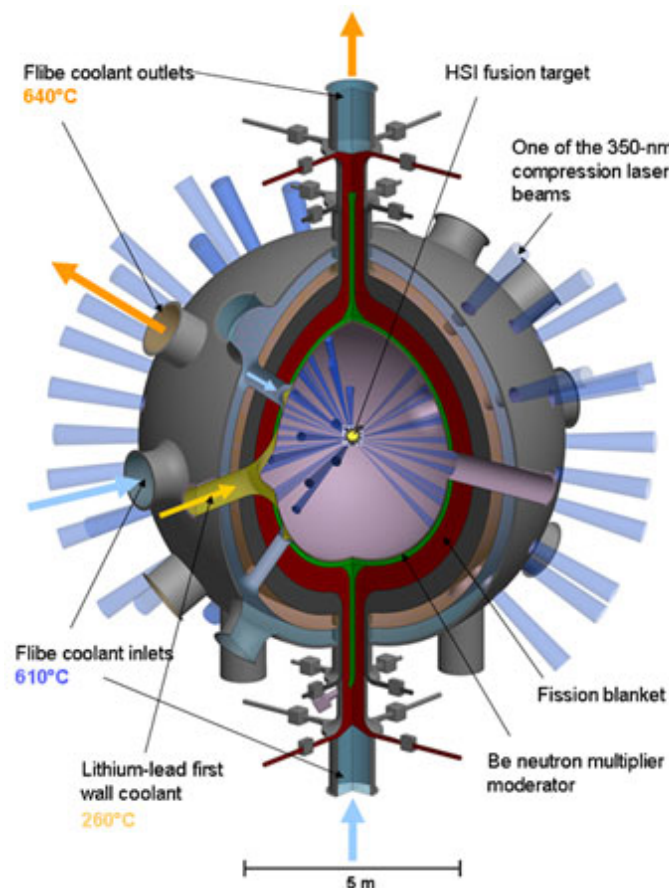
99% della materia nota nell'universo è PLASMA



Come si confina il plasma in un reattore a fusione?



Confinamento inerziale

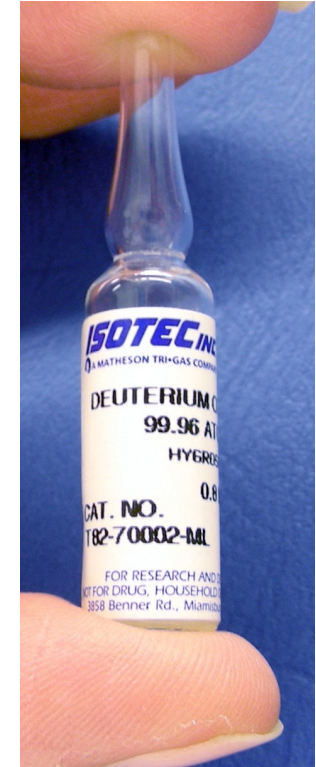


Confinamento magnetico

Reattore a fusione



- **Sicuro:** Ogni malfunzionamento del reattore ne causa l'immediato auto-spegnimento (**sicurezza intrinseca**). Anche in caso di incidente con totale assenza di raffreddamento i processi naturali (convezione, irraggiamento, conduzione) sono sufficienti a garantire il raffreddamento.
- I "combustibili" utilizzati (Deuterio e Litio) non sono radioattivi; c'è un solo combustibile intermedio radioattivo, il Trizio, che però rimane all'interno del reattore
- **Ambientalmente compatibile:** un reattore da **1 GW** richiede **90 kg di Deuterio e 130 kg di Trizio** (=30-70 tonnellate di Litio) all'anno (per confronto, una centrale da 1 GW a **carbone** richiede **1,5 milioni di tonnellate di combustibile**)
- **Non produce gas-serra**
- I neutroni generati dalle reazioni di fusione attivano i materiali a diretto contatto col plasma → non occorre però un deposito permanente, ma un deposito transitorio (max 100 anni)

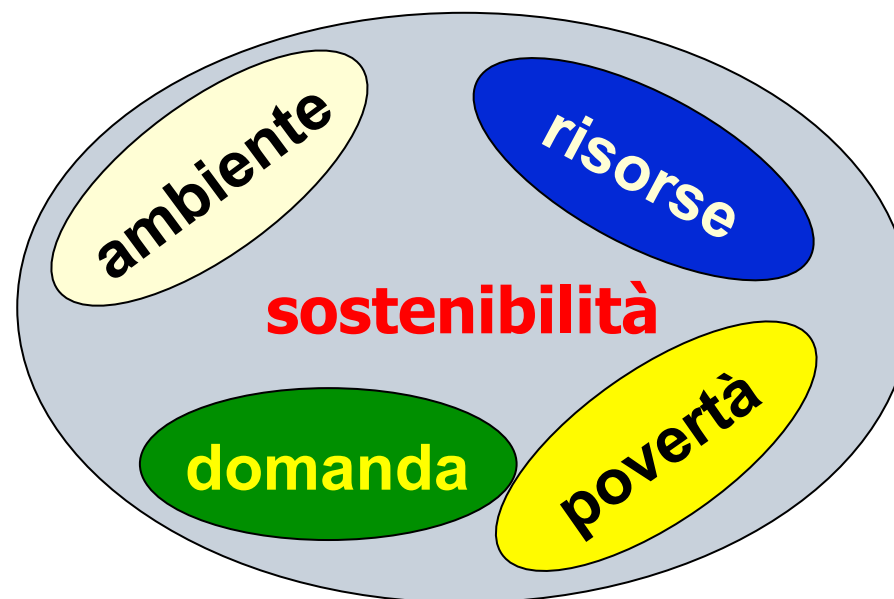


2 Perché la fusione ?

Energia: un'equazione complicata



- Forte pressione sui **consumi** (motivata anche dalla necessità di ridurre la povertà)
- Le **fonti tradizionali** stanno esaurendosi (e/o diventeranno estremamente costose)
- Dobbiamo salvaguardare **l'ambiente** in cui viviamo



Cosa fare per uno sviluppo sostenibile?

Le attuali “opzioni” energetiche

- **Fossil fuels**

- Coal
- Oil
- Natural Gas



- **Nuclear energy**

- Power plants based on nuclear fission



- **«Renewable» energy sources**

- Hydro
- Wind
- Solar



Quali ingredienti nel paniere energetico libero da CO₂?



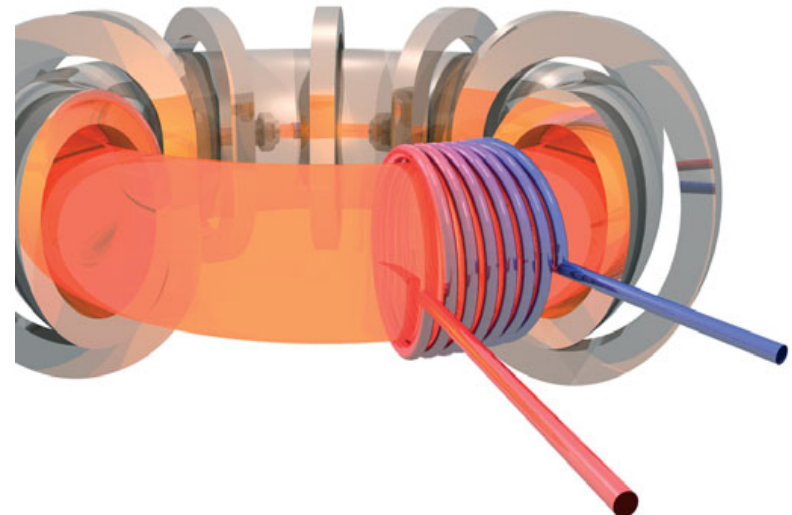
- **Aumento della efficienza energetica**
- **Combustibili fossili (soprattutto carbone) con sequestro della CO₂**
 - OK, ma è una grande sfida, costosa ed esposta a rischi
- **Rinnovabili**
 - Disponibilità, distribuzione sul territorio e quantità
 - Costi
 - Intermittenza: immagazzinamento dell'energia
 - Salvaguardia ed utilizzo dell'ambiente
 - Accettabilità sociale

- **Why fusion as a source of energy?**

- Fusion fuels are available for everybody (energy independence)
- Fusion is a relatively clean source of energy
- Fusion is a safe source of energy

- **Advent of fusion power plants...**

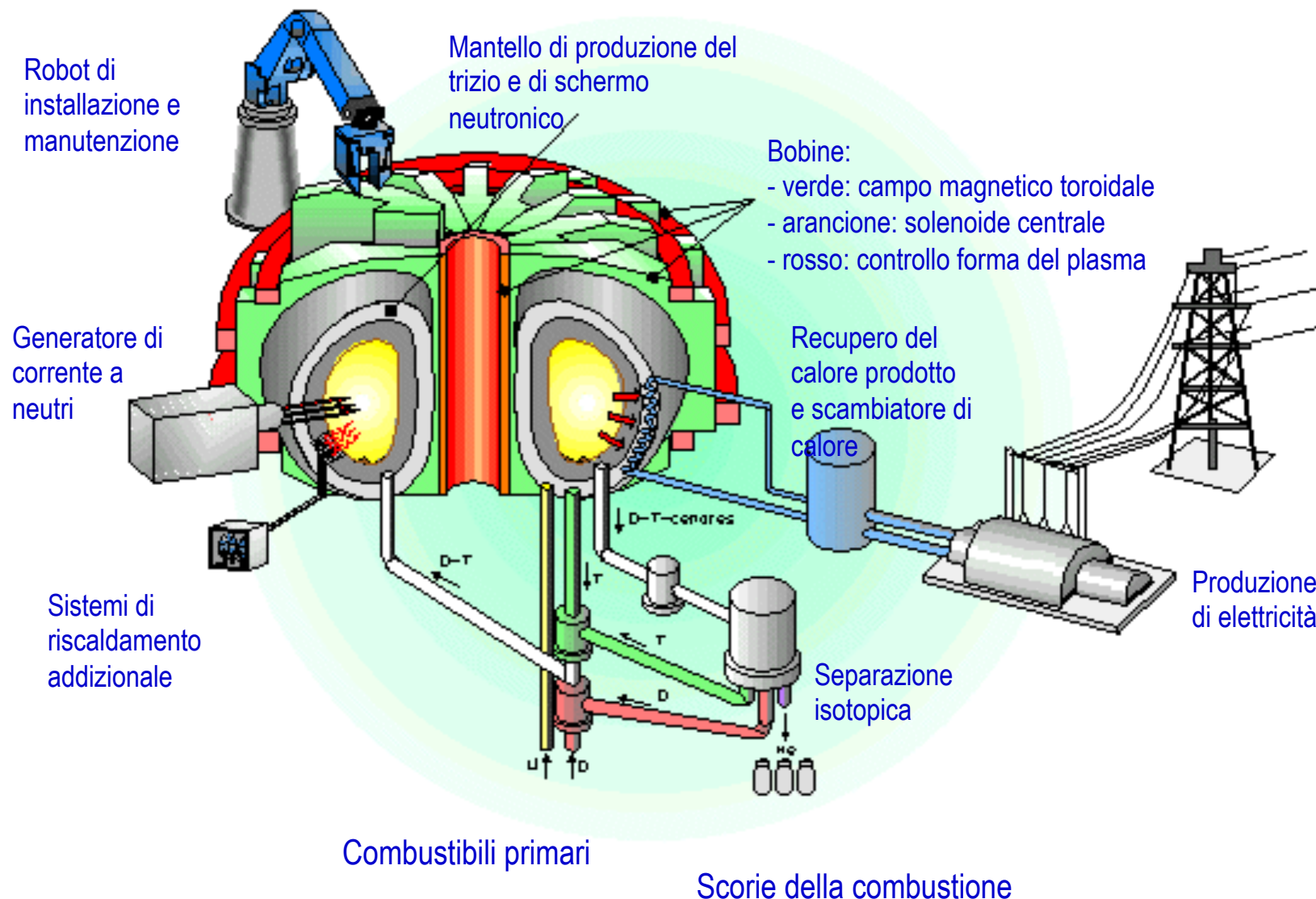
- Scientific feasibility
- Technological quasi-feasibility
- A major economic/political decision



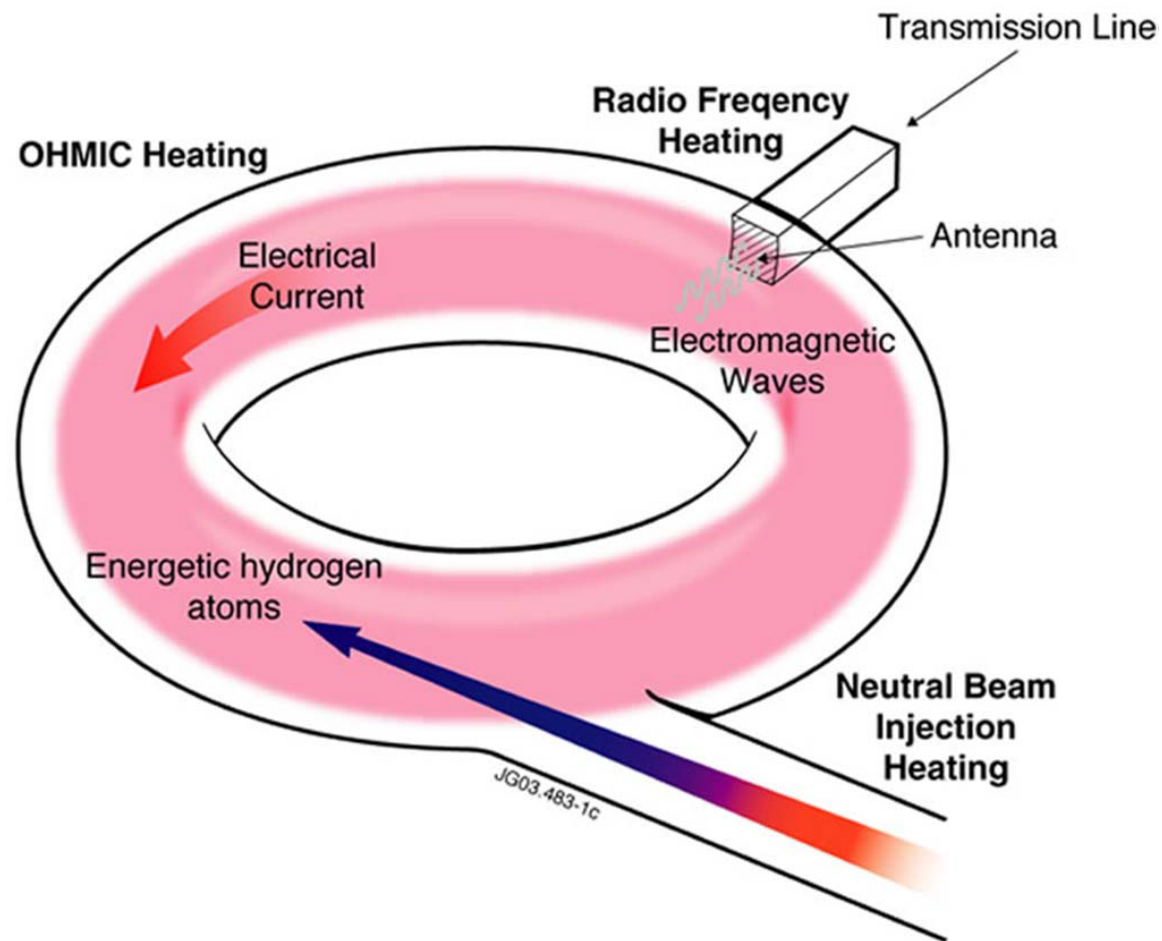
3

**La fusione:
come e quando ?**

Il reattore a fusione



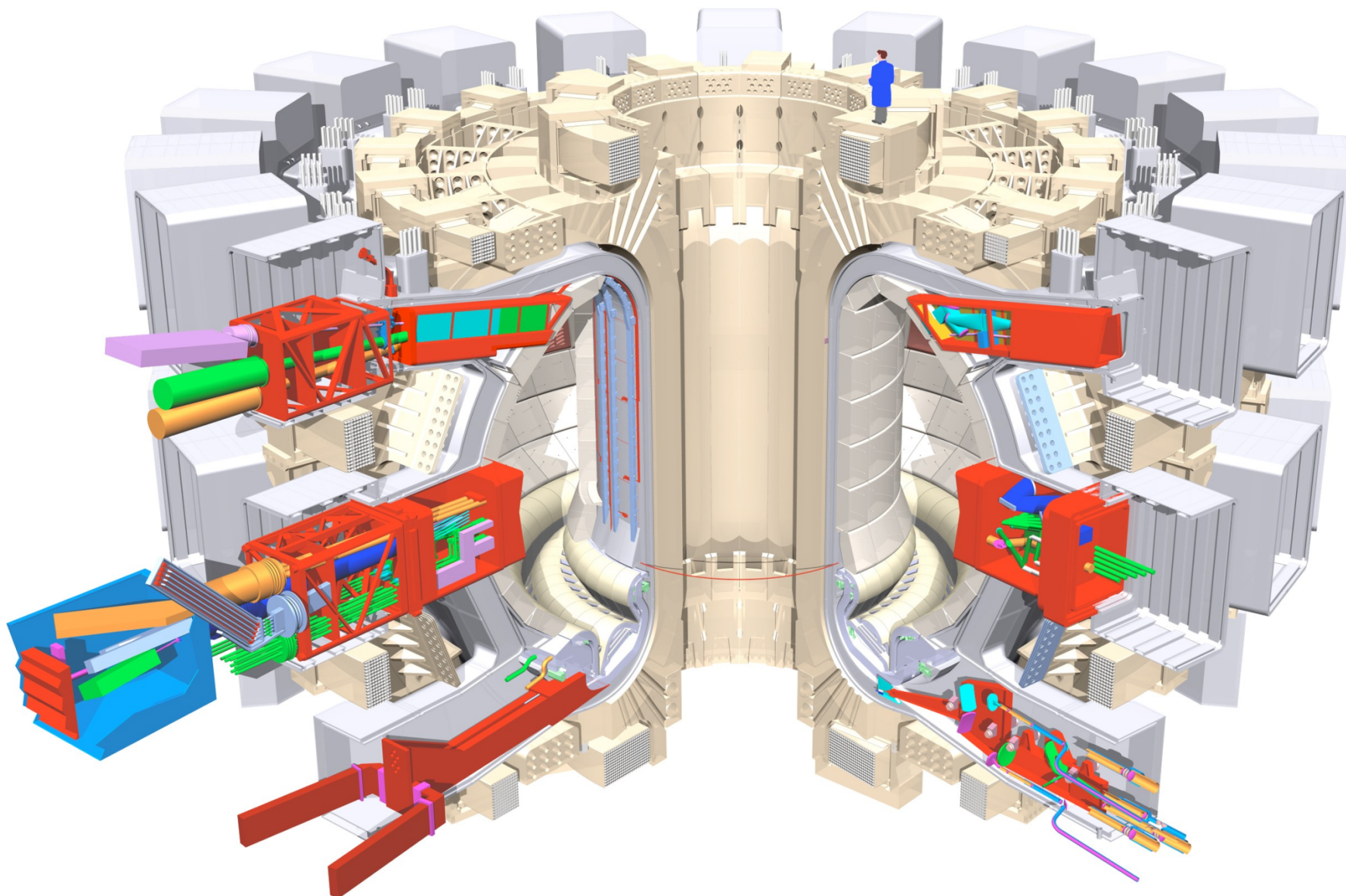
Sistemi di riscaldamento aggiuntivi



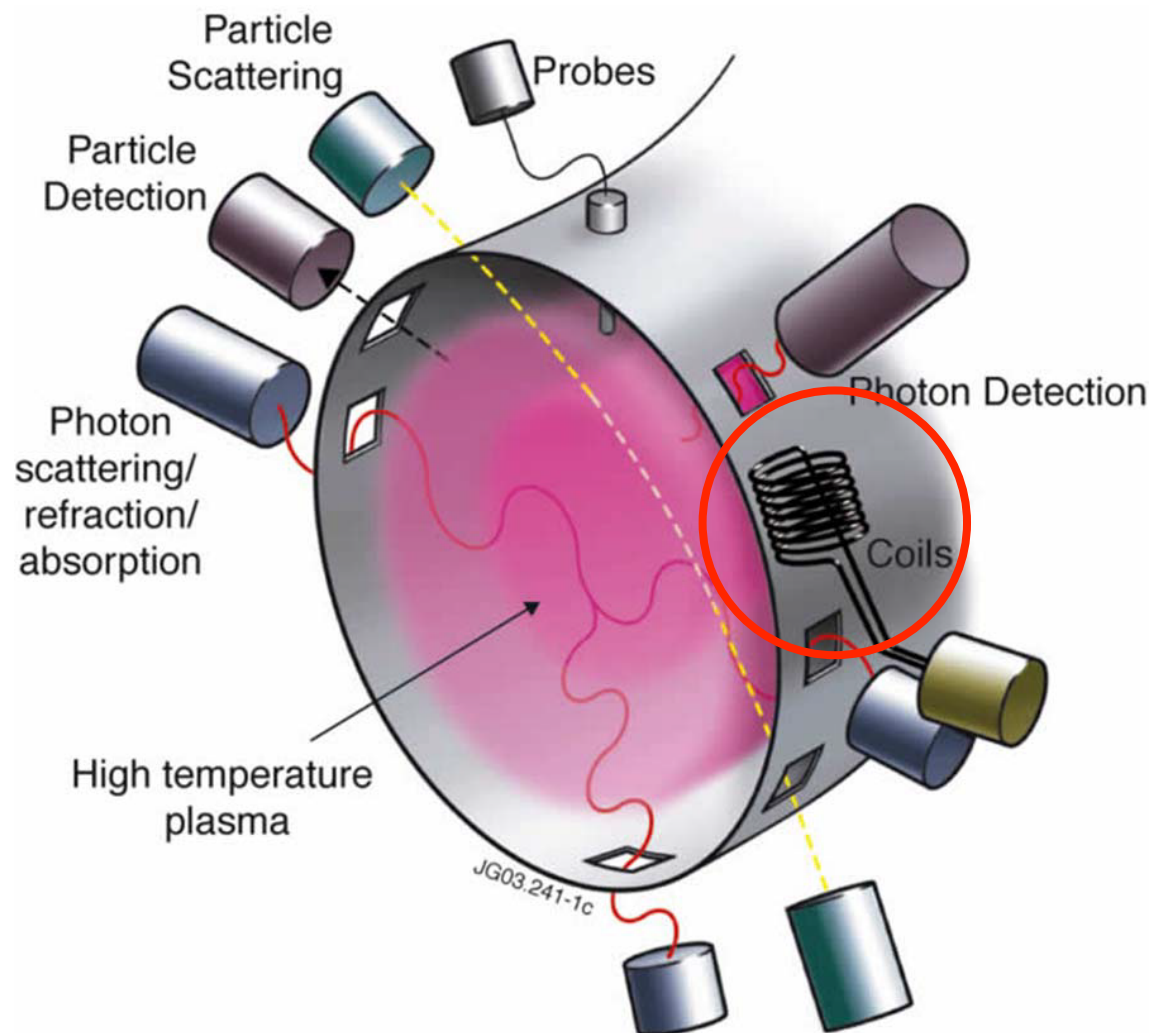
Sistemi di riscaldamento aggiuntivi



CONSORZIO RFX
Ricerca Formazione Innovazione



Diagnostiche



Sistemi di controllo in retroazione (feedback)



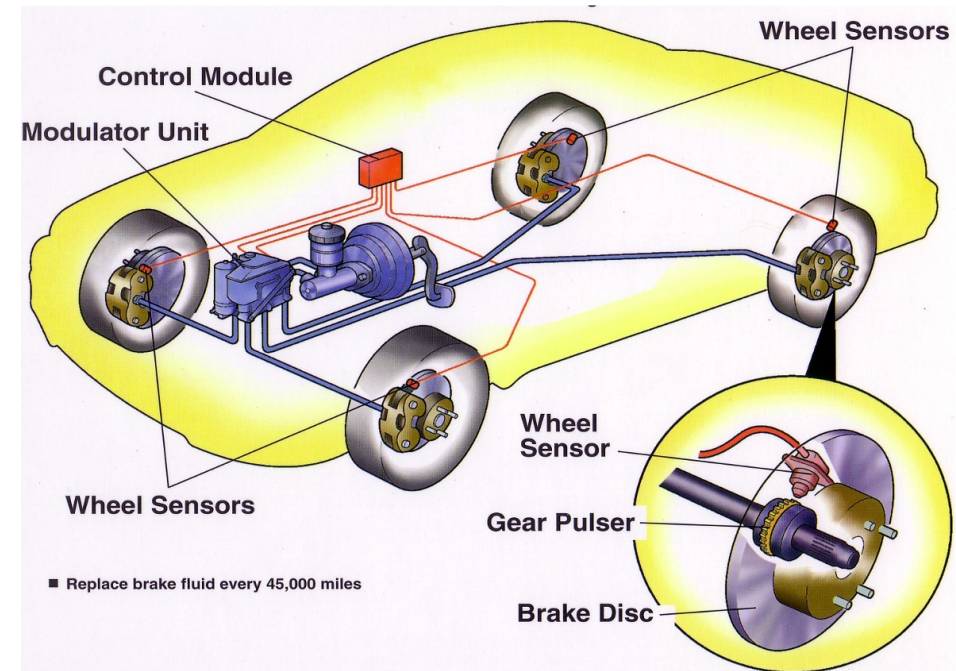
- **Nel controllo in feedback si desidera controllare una grandezza e mantenerla fissa ad un valore desiderato.**
 - Es.: la temperatura della stanza a 22 gradi in una giornata d'estate
- **La grandezza che si vuole controllare viene misurata e paragonata con un valore di riferimento.**
 - Il termostato misura la temperatura della stanza (ad es. 24 gradi, contro i 22 desiderati)
- **La differenza tra il valore misurato e quello desiderato si chiama errore.**
 - $24 - 22 = 2$ gradi. Nella stanza c'è ancora troppo caldo
- **Il controllo in feedback compie delle azioni per minimizzare l'errore.**
 - Aumenta il getto d'aria fredda che esce dal condizionatore

Controlli attivi alla base della moderna tecnologia

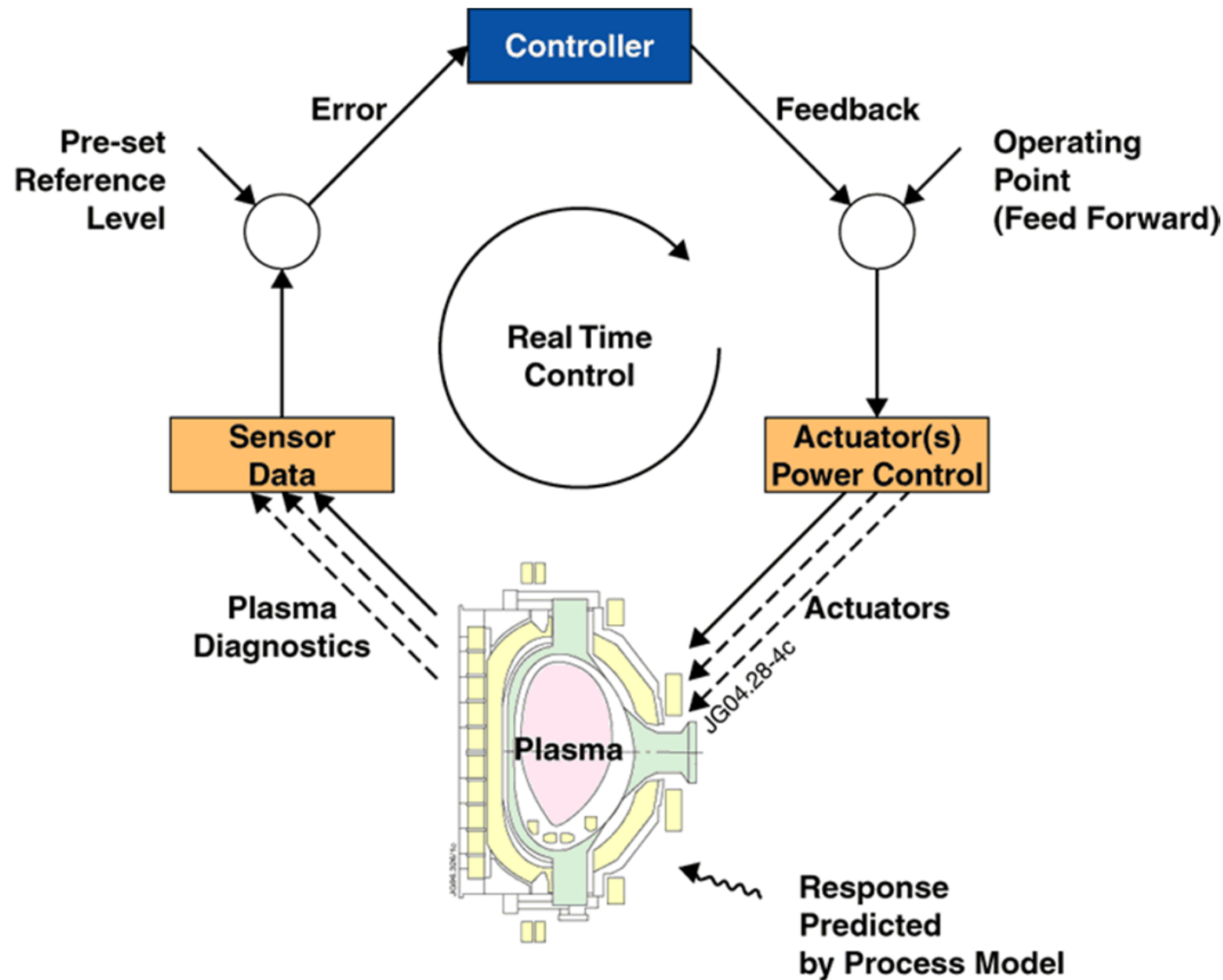


AIRBUS A320: il primo aereo civile con controlli digitali (fly-by-wire)

Controlli attivi alla base della moderna tecnologia



Sistemi di Controllo “Real Time”

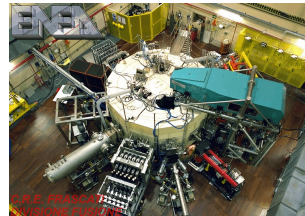
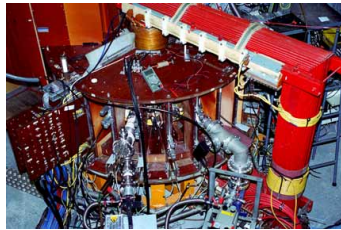


La fusione in Europa: uno sforzo comune, una formula vincente



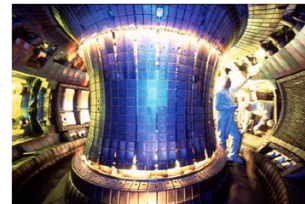
Euratom - CEA (1958) France	<div data-bbox="696 352 1659 411"> <h2>European Fusion Euratom-Associations</h2> </div> <div data-bbox="618 491 992 655"> <p> ■ Member States ■ Countries associated to the Euratom Framework Programme </p> </div> <div data-bbox="611 416 1664 1283"> </div> <div data-bbox="831 1321 1491 1453"> <p> • Joint European Torus (JET) Culham, UK (1978) </p> </div>	Euratom - FZK (1982) Germany
Euratom - ENEA (1960) Italy		Euratom-CIEMAT (1986) Madrid
Euratom - IPP (1961) Germany		Euratom - IST (1990) Portugal
Euratom - FOM (1962) Netherlands		Euratom - TEKES (1995) Finland
Euratom - FZJ (1962) Germany		Euratom - DCU (1996) Ireland
Euratom - Belgian State (1969) Belgium		Euratom - OAW (1996) Austria
Euratom - RISO (1973) Denmark		Hellenic Rep (1999) Greece
Euratom - UKAEA (1973) UK		Euratom - IPP.CR (1999) Czechoslovakia
Euratom - VR (1976) Sweden		Euratom - HAS (1999) Hungary
Euratom - Conf. Suisse (1979) Switzerland		Euratom - MEC (1999) Romania
		Univ of Latvia (2002) Latvia

Gli esperimenti europei

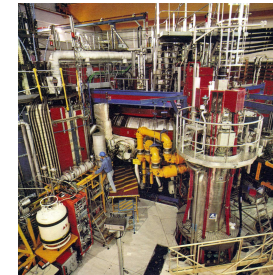


FTU

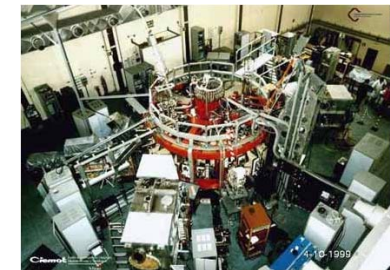
ISTTOK



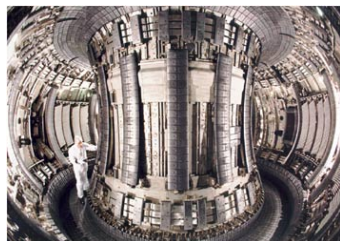
Asdex-UG



TORE SUPRA



TJ-II

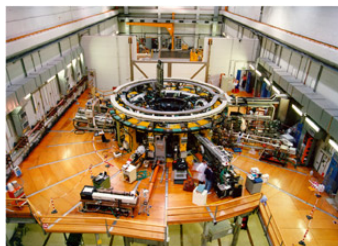


JET

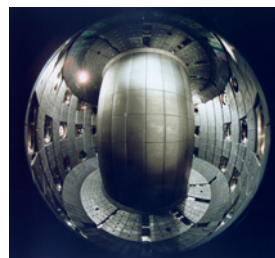


MAST

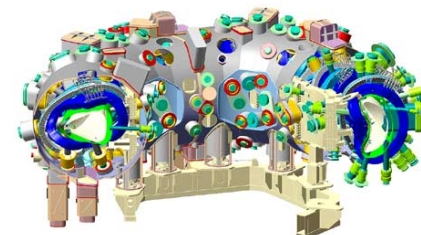
RFX



TCV



Wendelstein 7-X



TEXTOR



JOINT EUROPEAN TORUS (JET)

Il più grande tokamak del mondo.

Situato nei pressi di Oxford, è un esperimento gestito dalla Comunità Europea

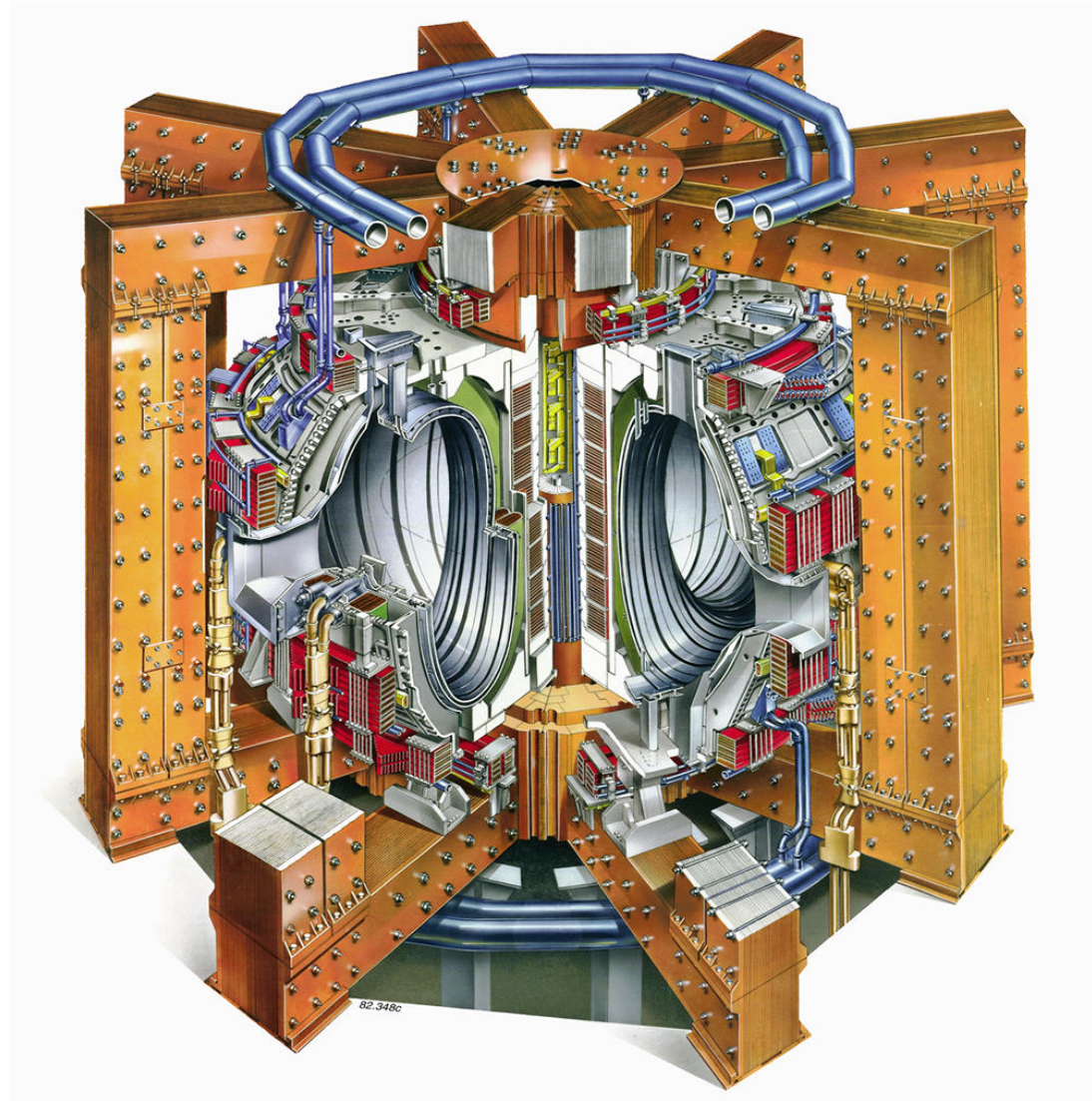
Raggio maggiore: 2.96 m

Raggio minore: 2.10/1.25 m

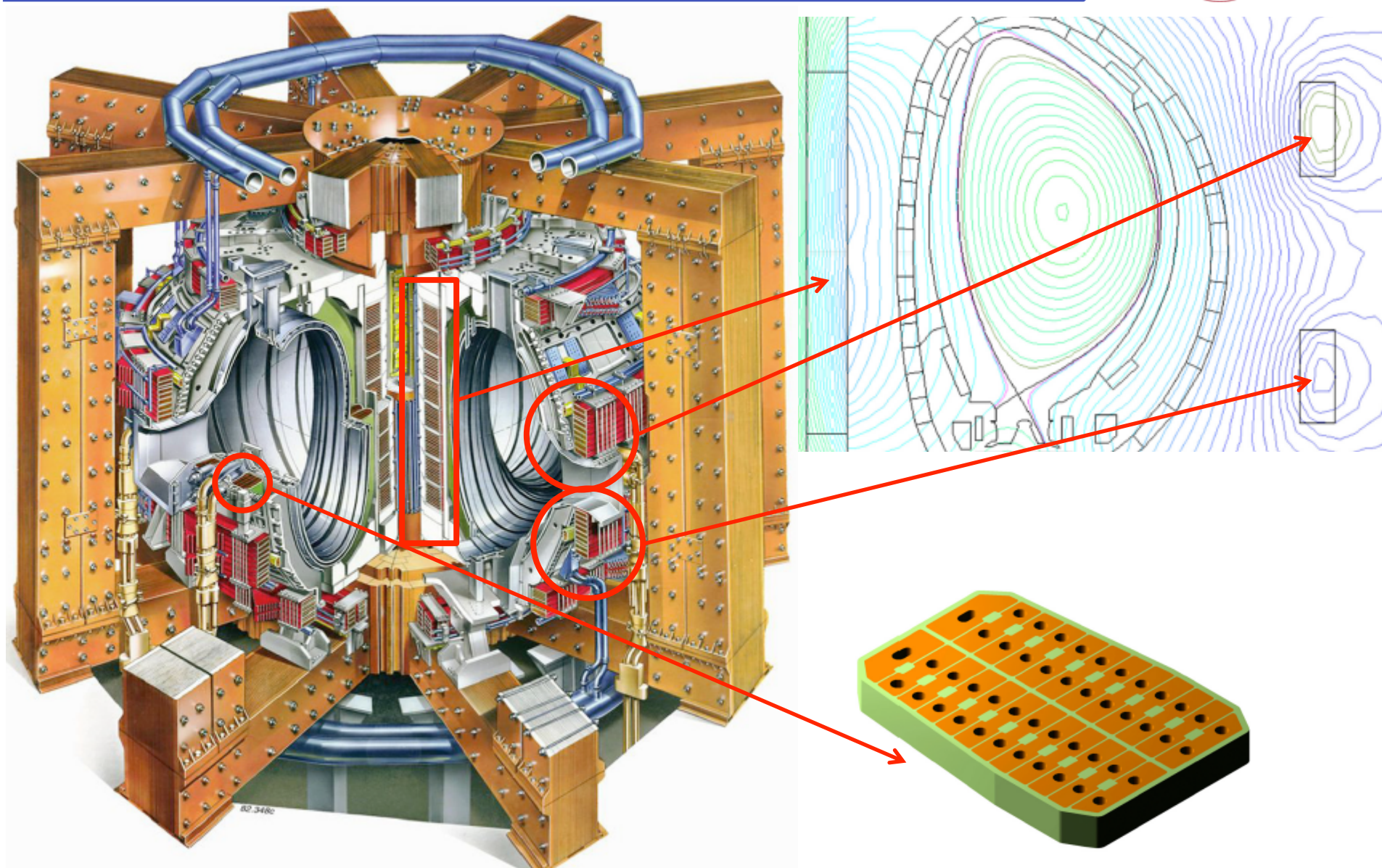
Corrente di plasma: 4.8 MA

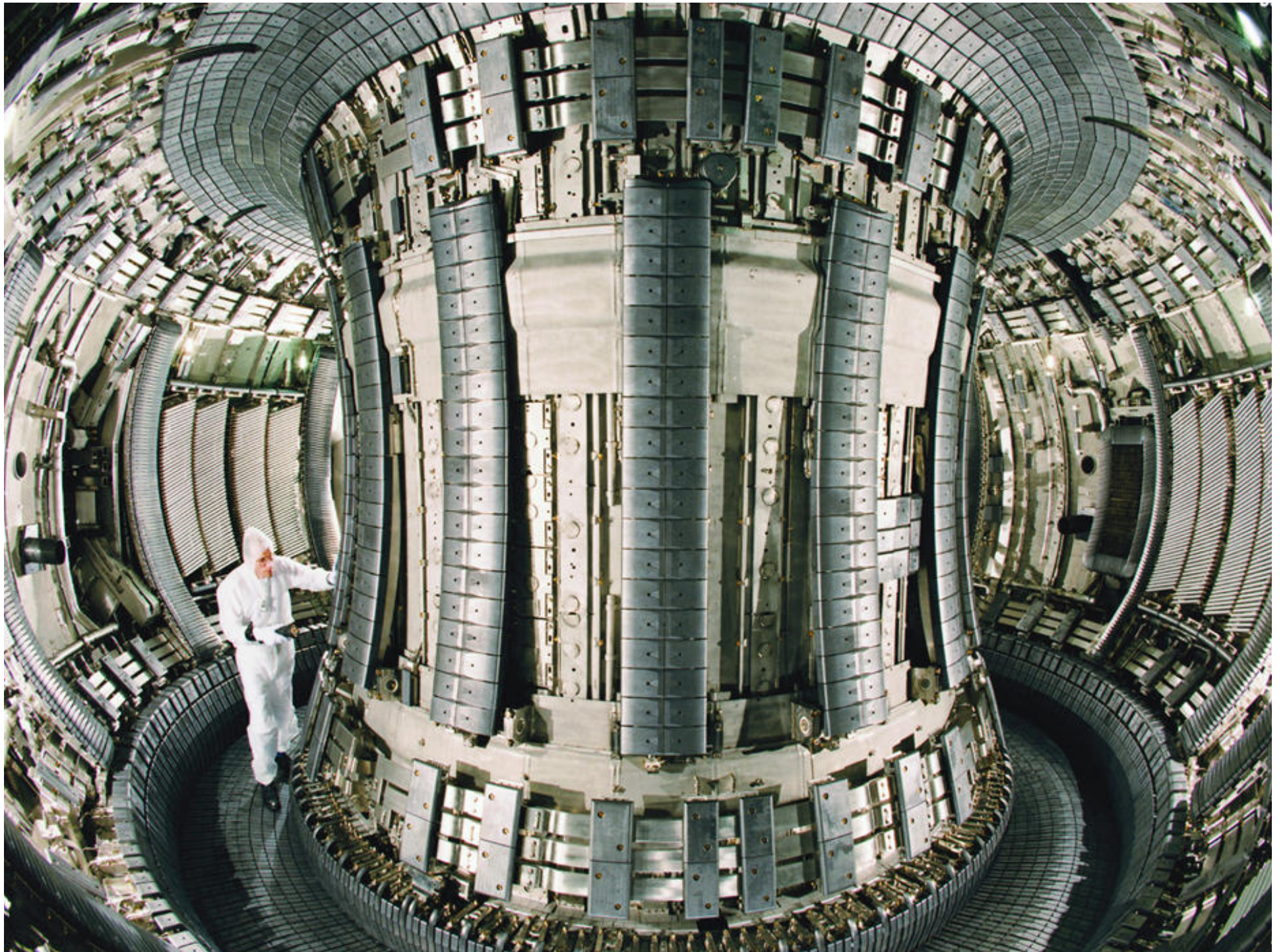
Campo magnetico: 3.45 T

Durata dell'impulso: 20 s



JOINT EUROPEAN TORUS (JET)





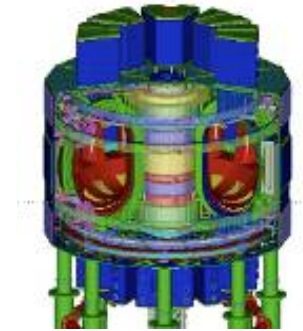
Grande interesse dei paesi dell'estremo oriente, sia per ITER che per esperimenti di accompagnamento, in particolare nella tecnologia dei superconduttori



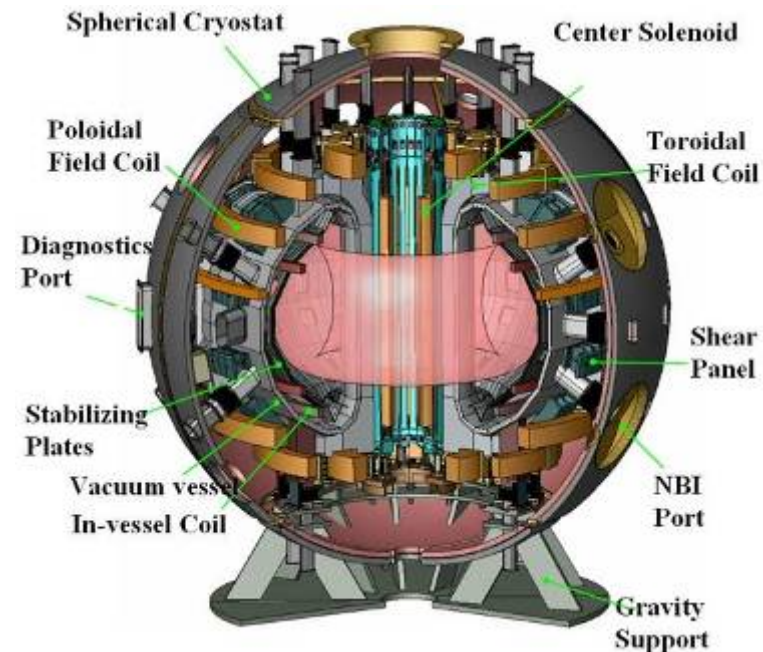
EAST (CINA)



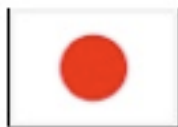
KSTAR (Corea del Sud)



SST-1



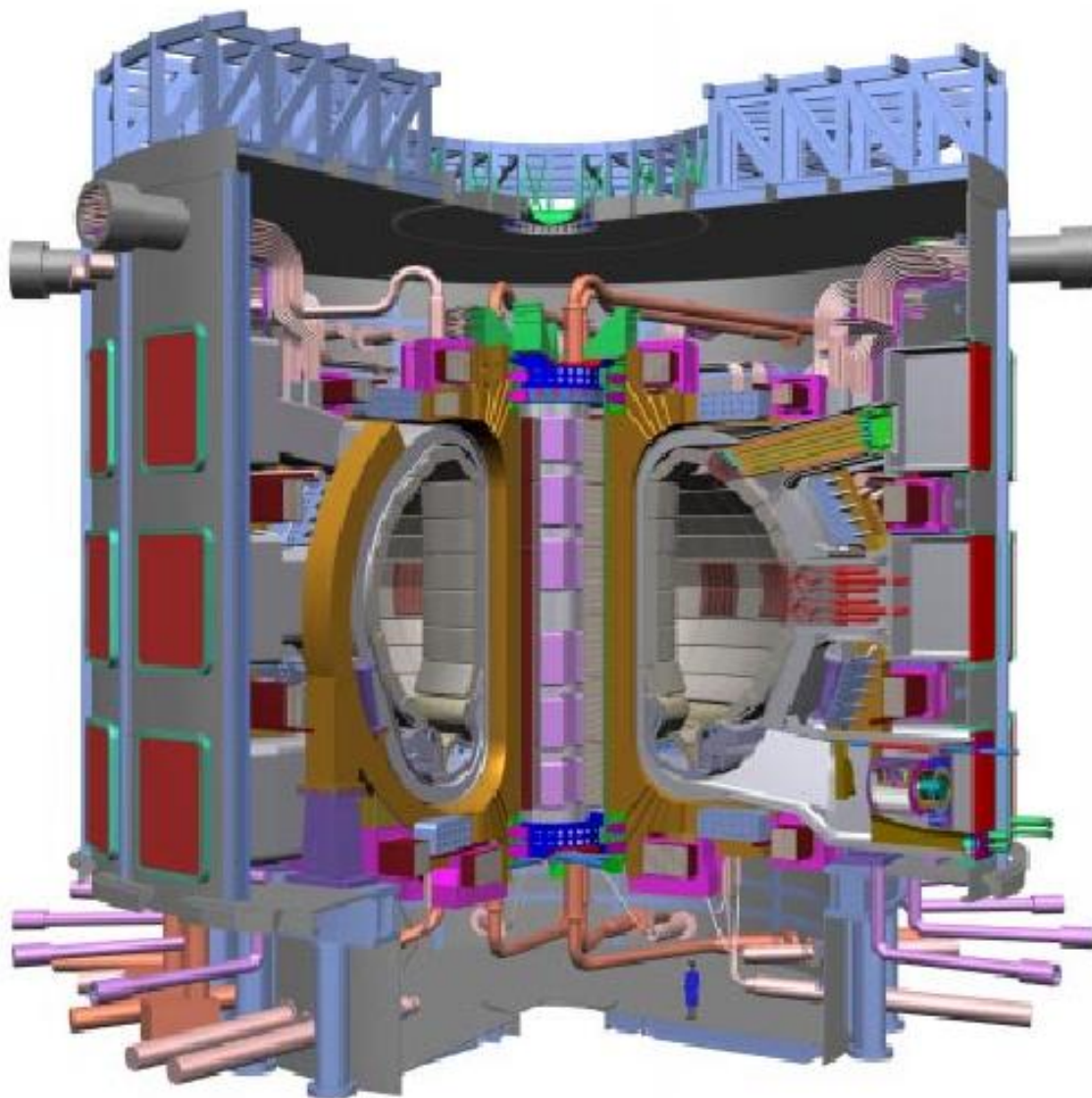
JT-60SA (Giappone e UE)



CONSORZIO RFX
Ricerca Formazione Innovazione

**ITER è un reattore
sperimentale, che verrà
costruito a Cadarache,
nel sud della Francia.**

**La più grande impresa
scientifica collaborativa**

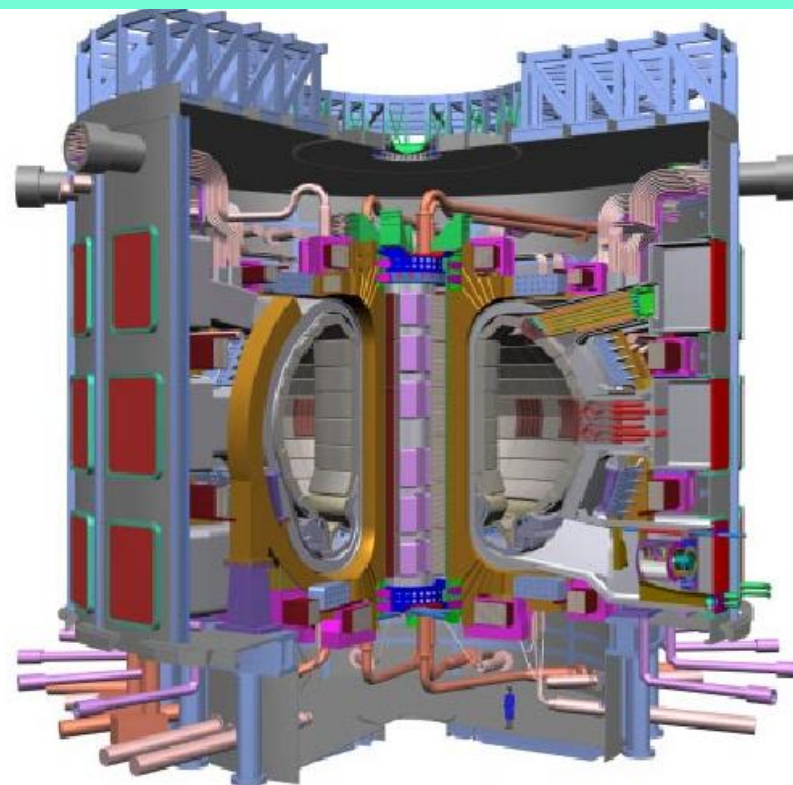




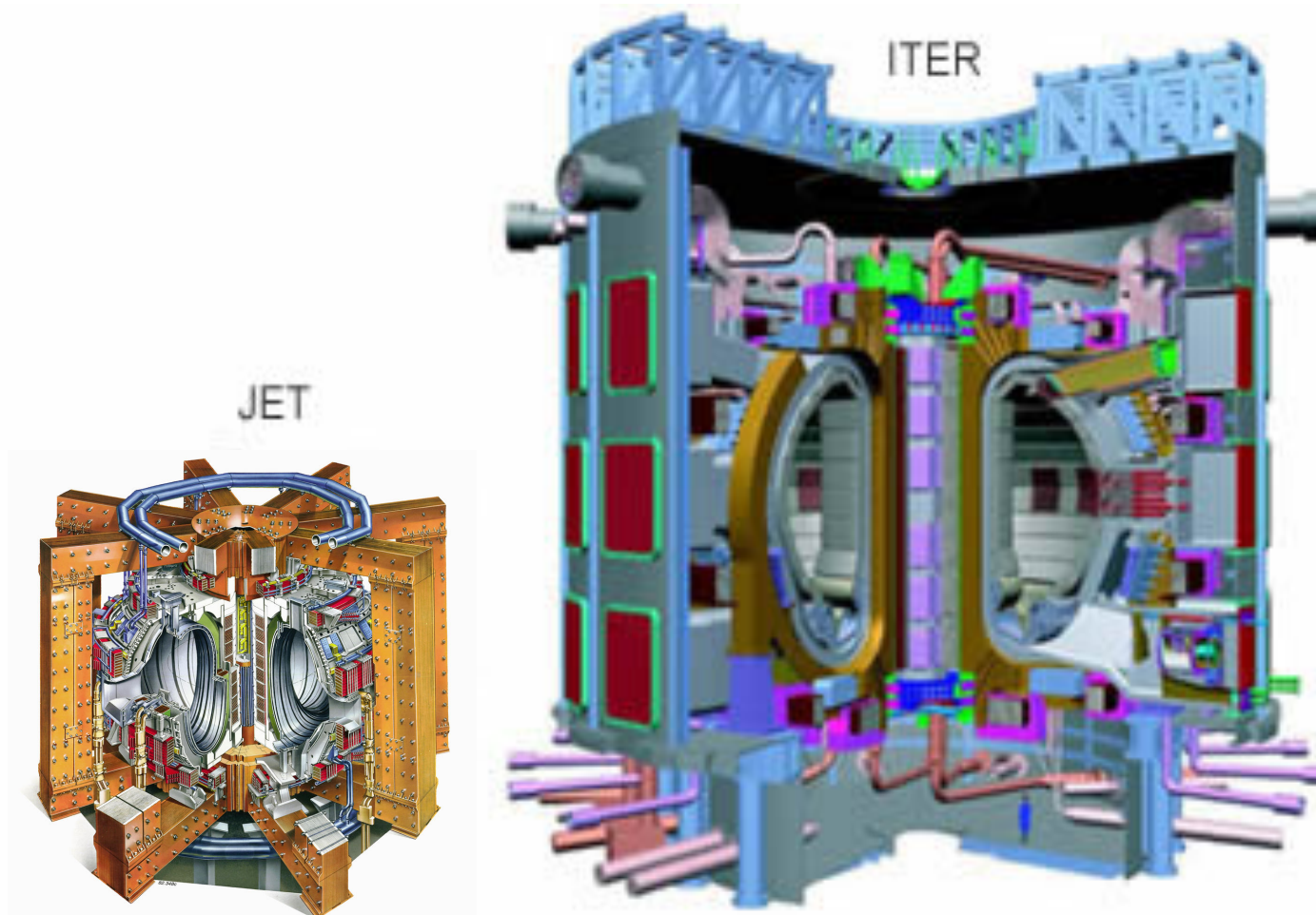
PRINCIPALE OBIETTIVO di ITER: dimostrazione della fattibilità scientifica e tecnica di un sistema di produzione di energia da fusione **con dimensioni comparabili a quelle di una centrale elettrica convenzionale.**

Produrrà più energia di quella che consumerà.

Potenza totale di fusione	500 MW
Durata della scarica	400 s
Raggio maggiore del toro	6,2 m
Raggio minore del toro	2 m
Corrente di plasma nominale	15 MA
Intensità campo toroidale BT	5,3 T
Volume del plasma	837 m ³
Superficie del plasma	678 m ²
Temperatura media	~ 9 keV

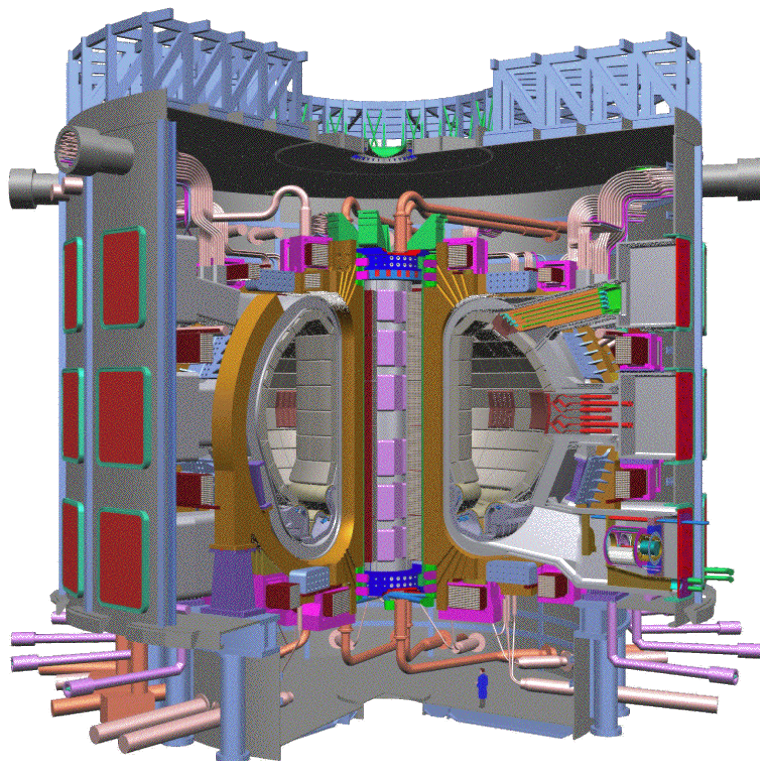


ITER: un passo significativo



ITER esplorerà molte tecnologie importanti per un futuro reattore a fusione

Il “peso” di ITER



ITER

~23000 t

**28 m diametro x 29 m
altezza**

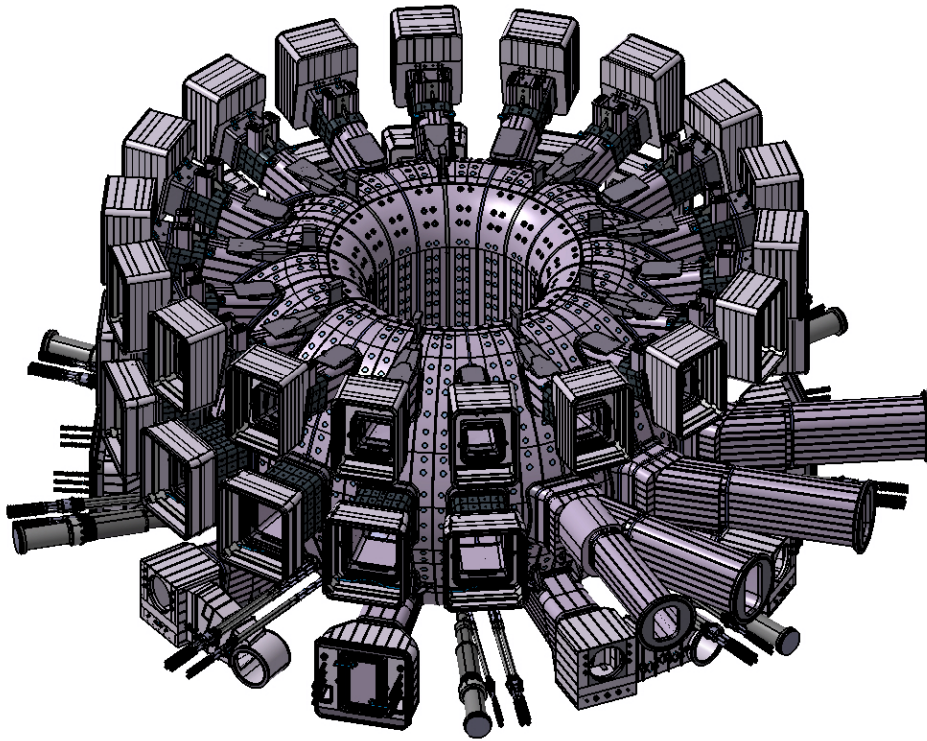


Charles de Gaulle :

~38000 t (vuota)

261 m lunghezza

Il “peso” di ITER - 2

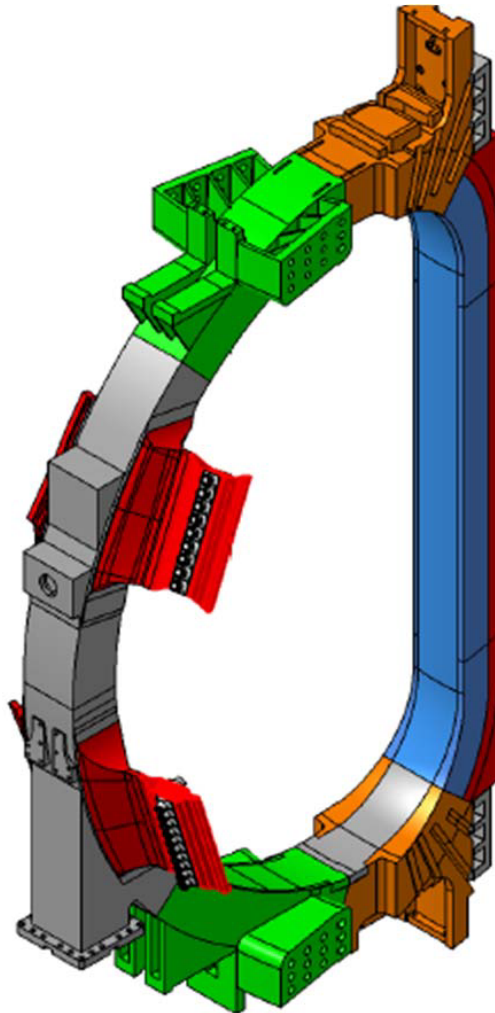


**Camera di scarica e componenti
interni ~8000 t
19.4 m diametro x 11.3 m altezza**



**Torre Eiffel : ~7300 t
324 m altezza
(1889)**

Il “peso” di ITER - 3



Mass of (1) TF Coil: ~360 t
16 m Tall x 9 m Wide



Décollage d'un B747-300 d'Air France
An Air France B747-300 on take-off

Photographe / Photographer : Ph DELAFOSSE Ref : 014146
Tout usage sauf publicitaire / Not for advertising purposes

Boeing 747-300: ~377 t
(Maximum Takeoff Weight)

ITER R&D e lindustria (un'interazione in fortissima crescita)



**CENTRAL
SOLENOID
MODEL COIL**

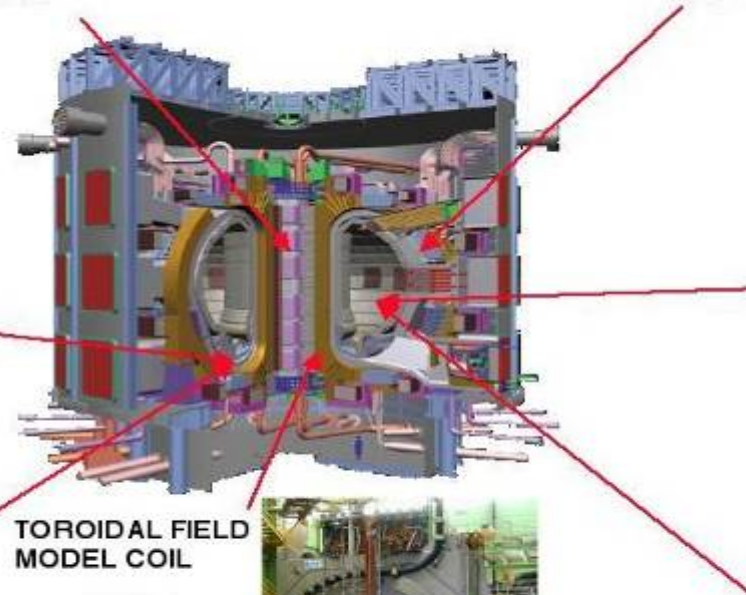
**VACUUM
VESSEL
SECTOR**



**REMOTE MAINTENANCE OF
DIVERTOR CASSETTE**



DIVERTOR CASSETTE



**TOROIDAL FIELD
MODEL COIL**



BLANKET MODULE



**REMOTE MAINTENANCE
OF BLANKET**

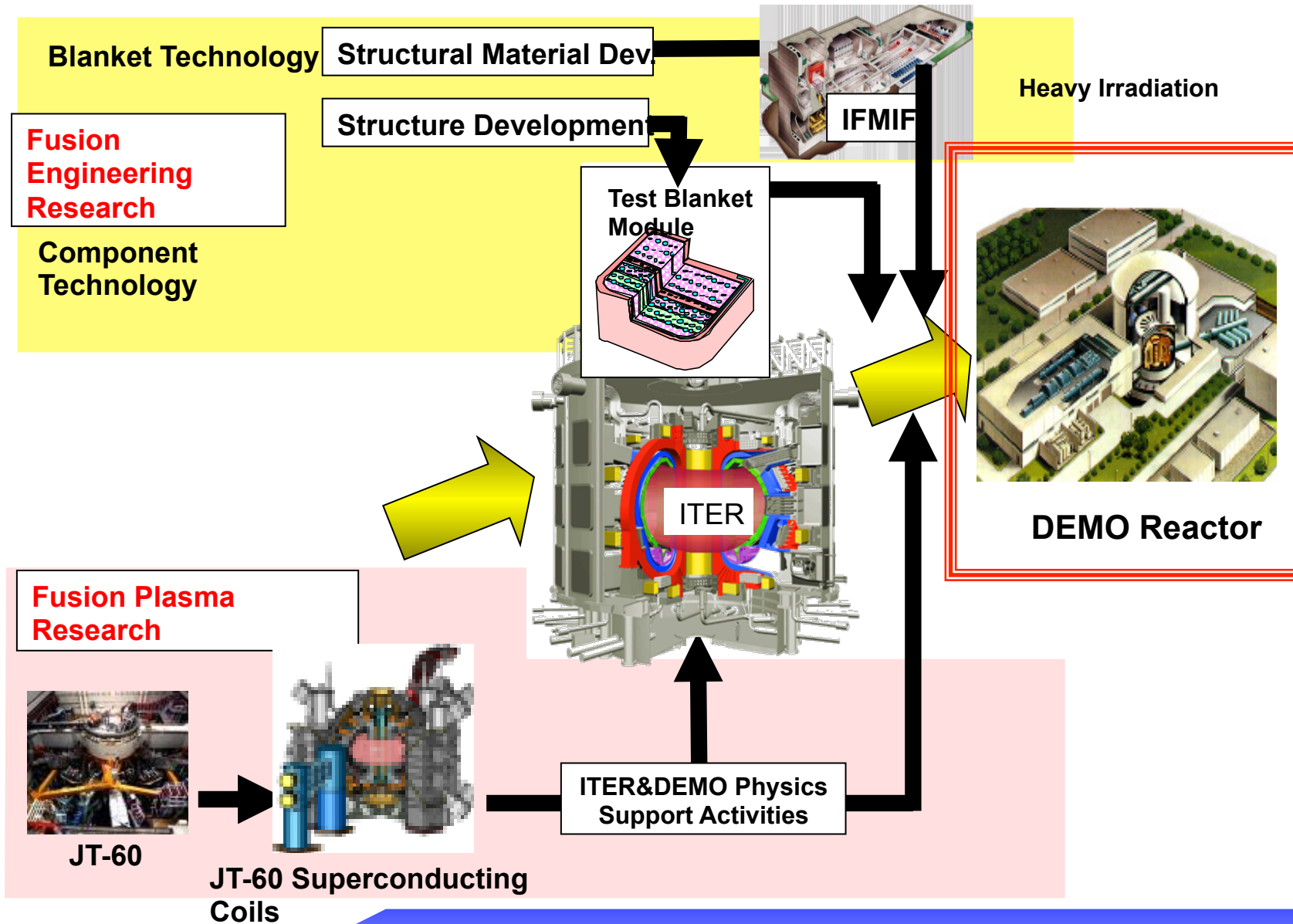


ITER: inizio delle operazioni 2020 (?), per una durata di circa 20 anni



In parallelo alla costruzione di ITER inizia la progettazione di **DEMO**, con l'ambizione di dimostrare dimostrare la piena fattibilità scientifica, tecnologica e commerciale della fusione entro circa 30-40 anni da oggi

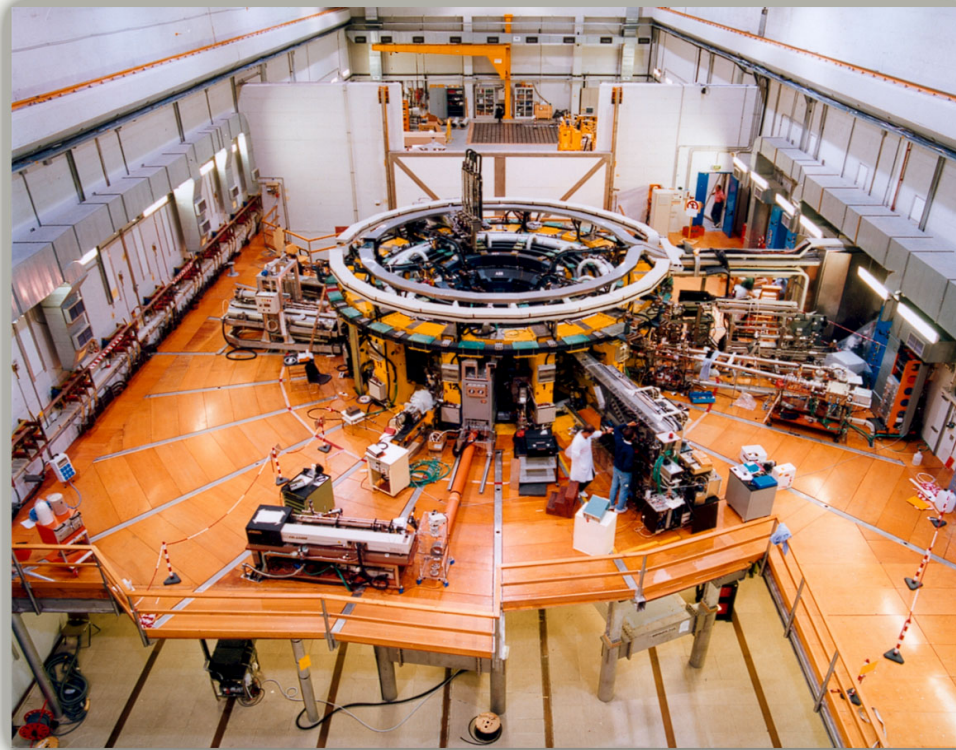
Il presente e la strada verso la fusione: il reattore DEMO



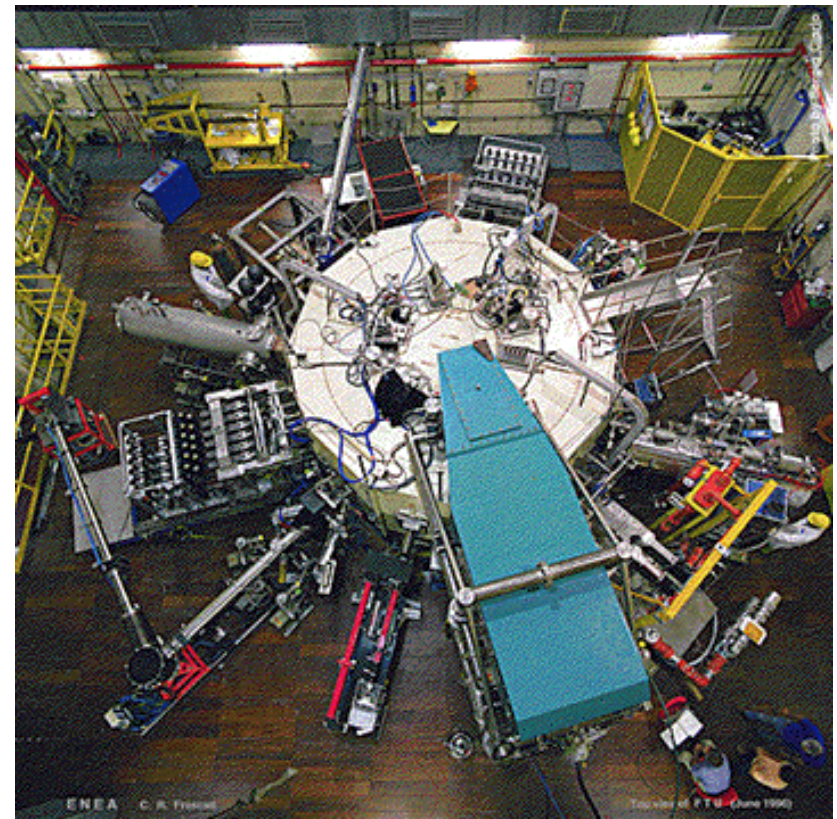
4

La fusione in Italia

La fusione in Italia



RFX
Padova

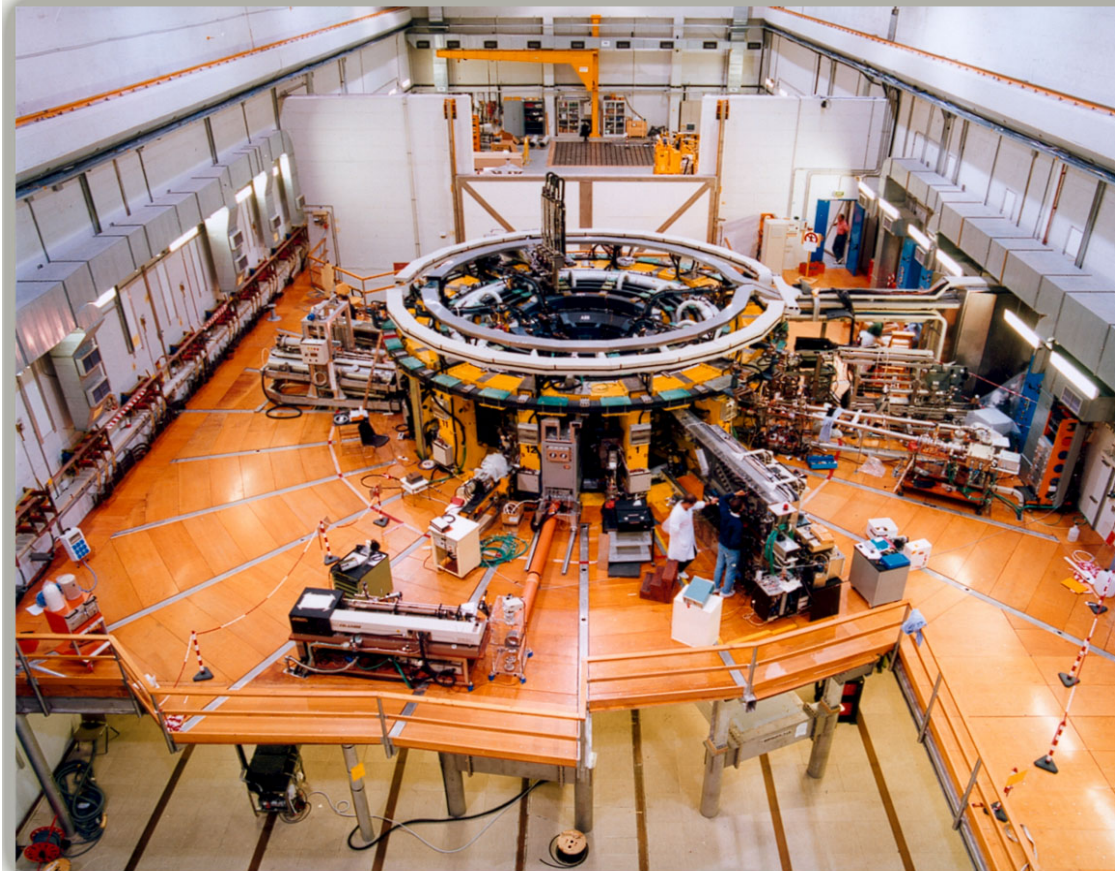


FTU
Frascati



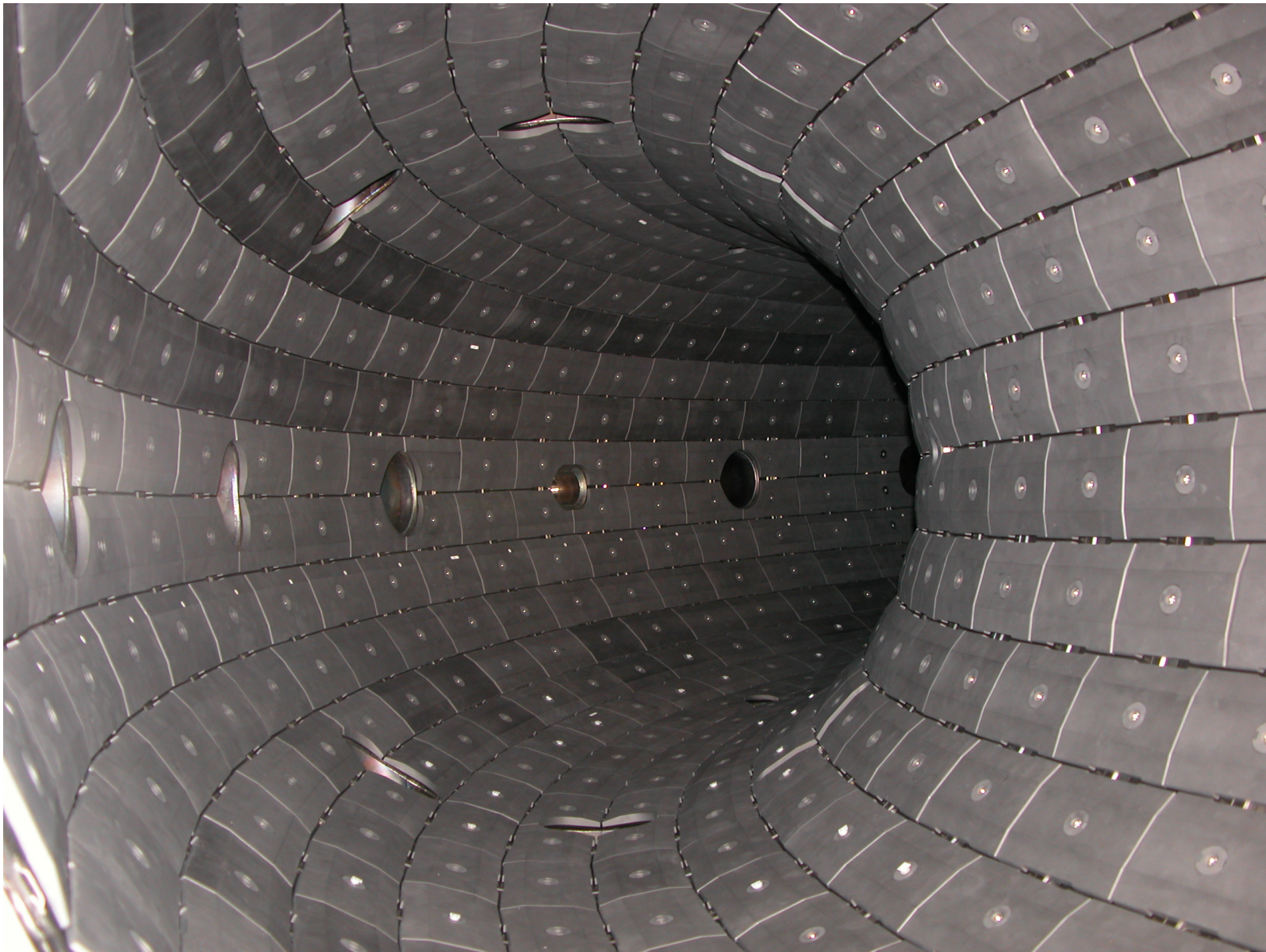
- L'Italia dà un forte contributo ad ITER ed al programma internazionale sulla fusione, con tre laboratori principali a **Padova, Frascati e Milano** ed altri gruppi di ricerca presso varie Università.
- **Intensa e qualificata partecipazione** alle collaborazioni scientifiche e tecnologiche
- **Formazione d'eccellenza** nell'ambito della fusione (il dottorato Europeo sulla fusione (**Fusion Science and Engineering**) è coordinato dall'Università di Padova)

A Padova c'è uno dei più grandi esperimenti al mondo per lo studio della fusione termonucleare



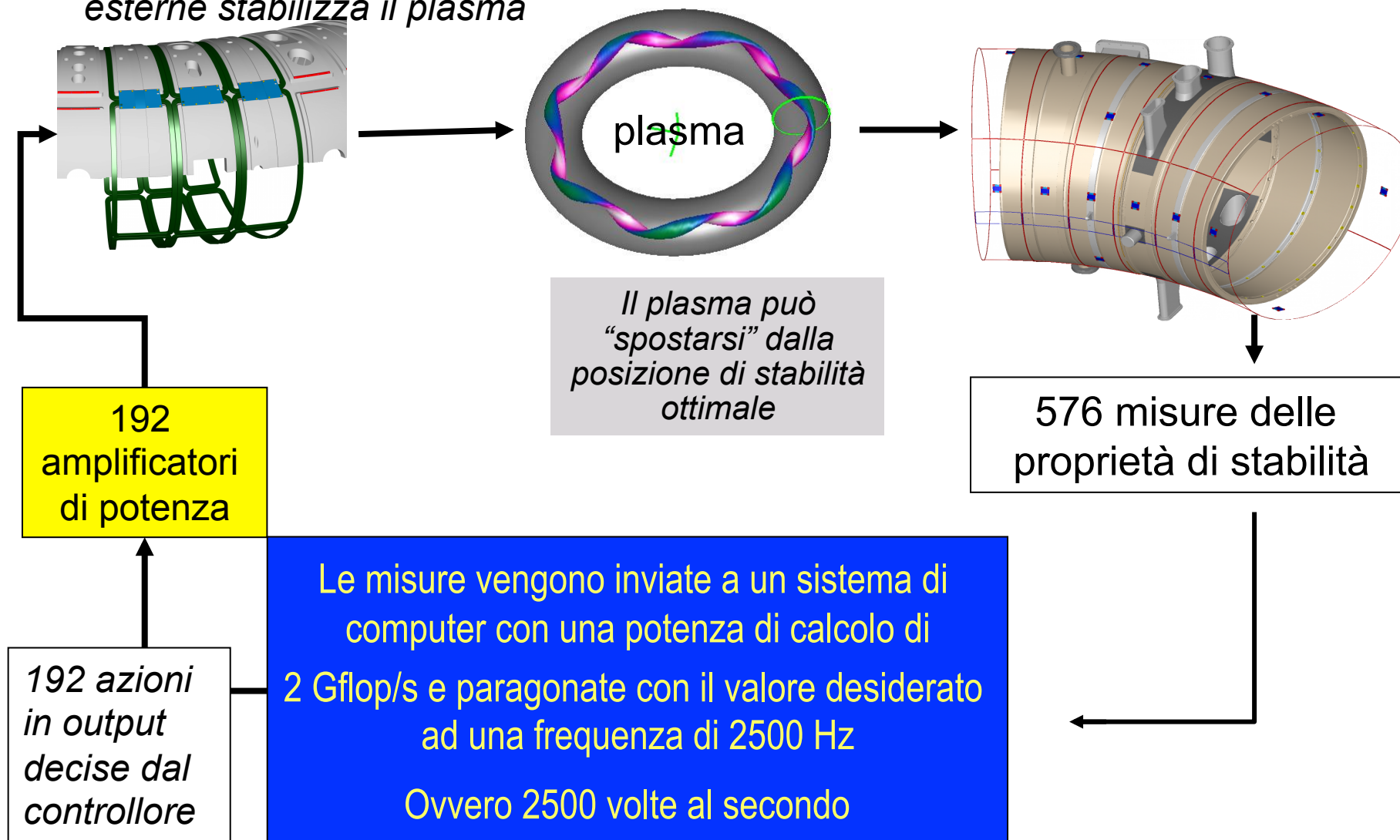
Specializzato nel controllo in feedback della stabilità, con il più completo sistema mai sviluppato in un esperimento di fusione a questo scopo

Uno schermo di carbonio per la camera di scarica



Architettura del sistema di feedback di RFX

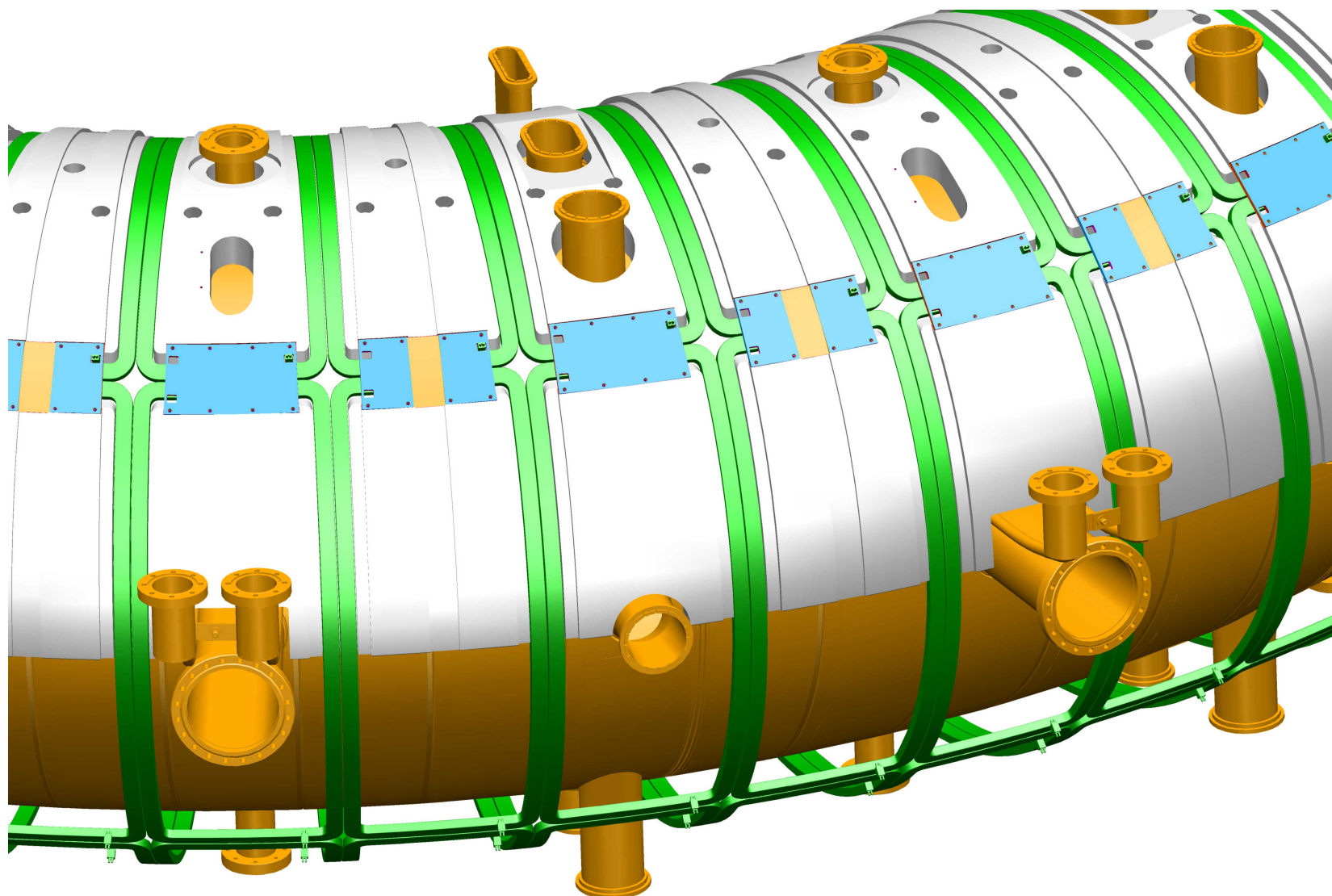
*Un sistema di bobine elettriche
esterne stabilizza il plasma*



Il sistema in feedback di RFX



CONSORZIO RFX
Ricerca Formazione Innovazione



Una sfida di gestione scientifica : creatività organizzata



Ricerca applicata per l' energia
Focalizzazione sull' obiettivo: la fusione



Programma scientifico



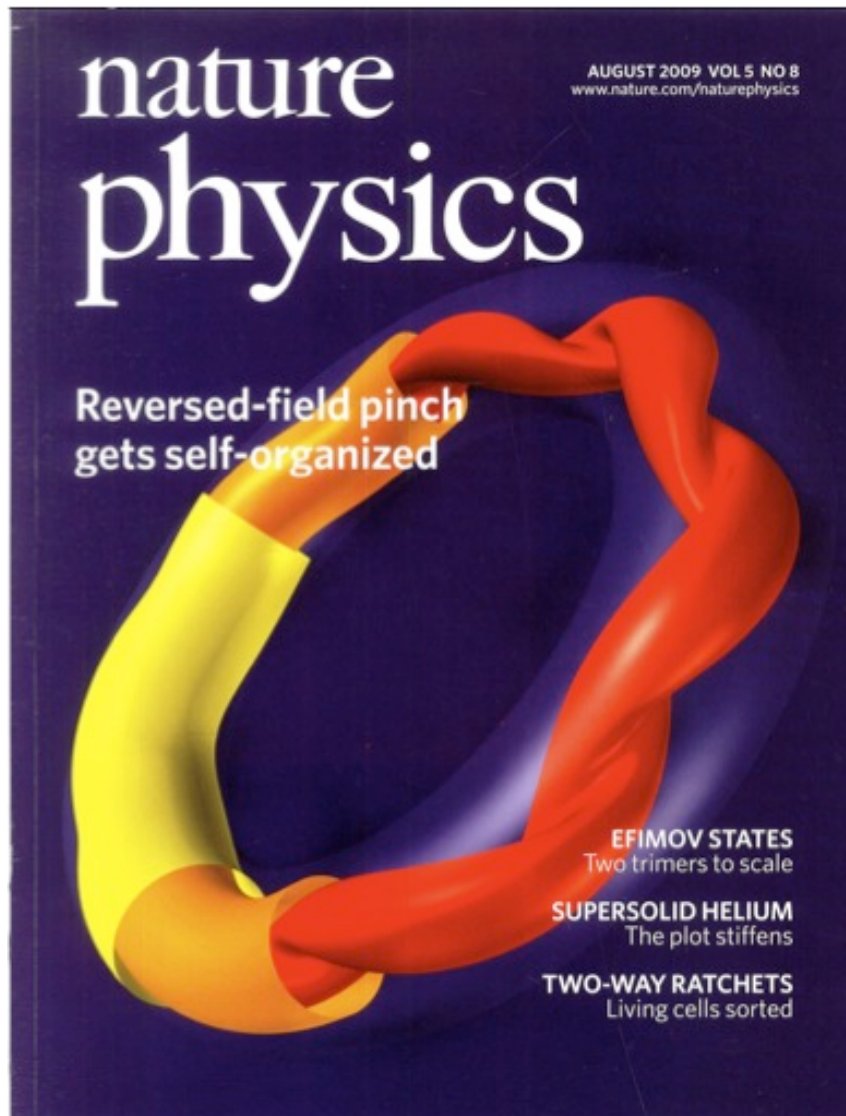
Creatività, autonomia, fantasia

Un' elica di plasma in RFX



Abbiamo prodotto in laboratorio un plasma da fusione a 15 milioni di gradi, scoprendo la sua naturale tendenza ad assumere la forma di un'elica

Da Padova un risultato di grande rilevanza



Il plasma assume spontaneamente una forma ad elica e migliora le sue prestazioni

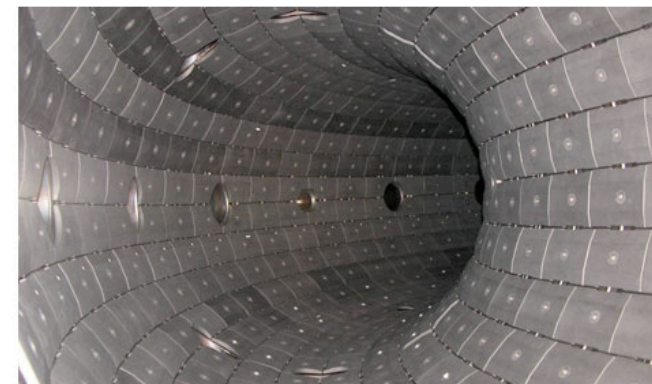
WIRED.IT

HOME NEWS REVIEWS FOTO V
Scienza Tecnologia Cultura Politica
TU SEI QUI > WIRED.IT > NEWS > SCIENZA > IL PLASMA DI P

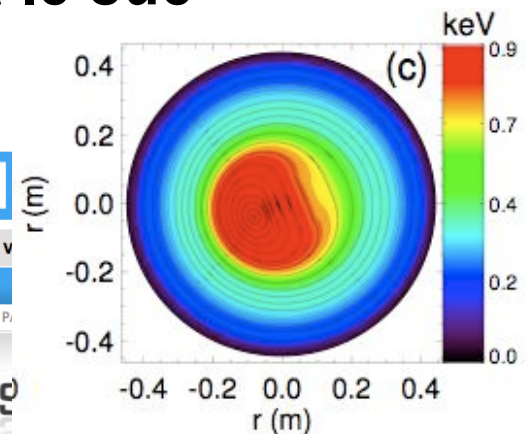
NEW

Il plasma di Padova: un'elica da 15 milioni di gradi

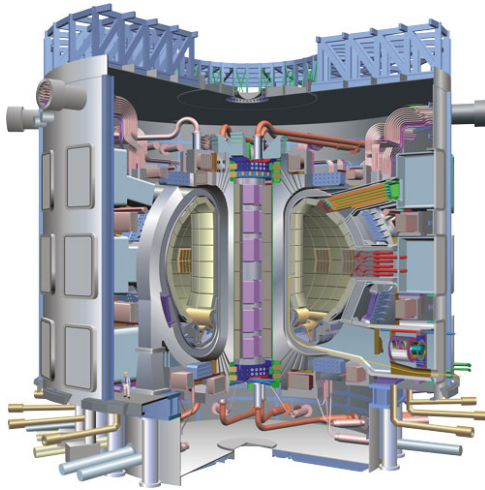
Di Fabio Deotto | 06 luglio 2009 | Categorie: Scienza



RFX visto dall'interno, il diametro è di 1 metro con un volume di 10 metri cubi.



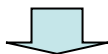
Additional Heating and Current Drive



ITER main parameters:

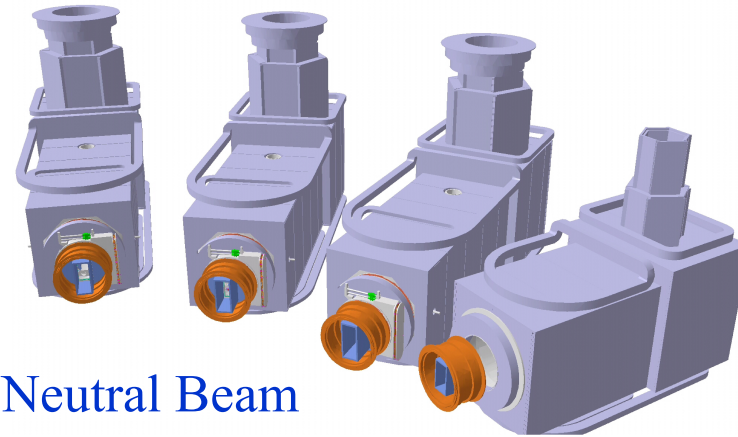
$Q > 10$

$P_{th} \sim 500 \text{ MW}$

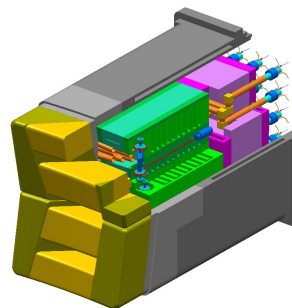


AH&CD requirements for ITER

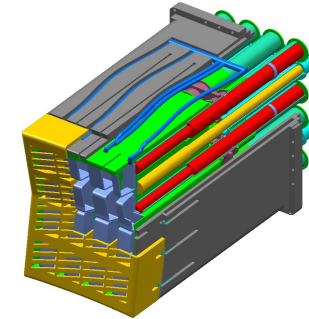
- 2 (+1) NBI ($16.5 \times (2+1)$) $\sim 50 \text{ MW}$
- EC+IC $\sim 20+20 \text{ MW}$



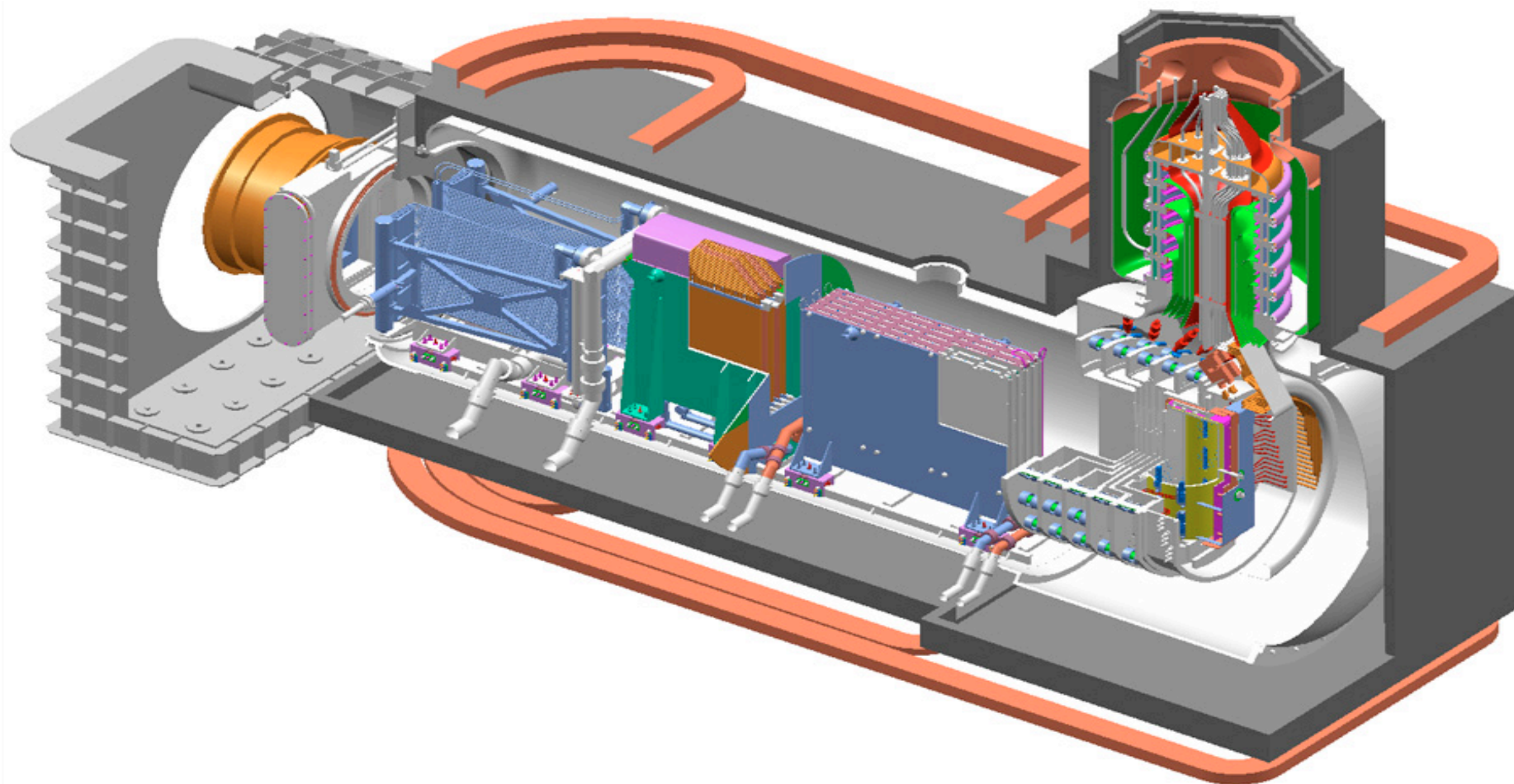
Neutral Beam
Injectors



Electron
Cyclotron
Antenna
(170 GHz)



Ion
Cyclotron
Antenna
(50 MHz)





Il Consorzio RFX



- Il Consorzio RFX è costituito da **CNR, ENEA, Università di Padova, INFN** ed Acciaierie Venete s.p.a. e suo scopo è lo svolgimento di attività di studio e di ricerca scientifica e tecnologica nel campo della **fusione termonucleare controllata** *nel quadro di uno specifico contratto di associazione con l'Euratom.*
- Il gruppo di ricerca è composto da circa 150 persone, **con un'età media di 43 anni**

- ITER: <http://www.iter.org/>
- Fusion for Energy (F4E): <http://fusionforenergy.europa.eu/>
- International Atomic Energy Agency (IAEA): <http://www.iaea.org/>
- The EFDA-JET website: <http://www.jet.efda.org/>
- **Consorzio RFX (Padua):** <http://www.igi.cnr.it/>

Acknowledgment



The views and opinions expressed herein do not necessarily reflect those of the European Commission (EC), Fusion for Energy (F4E) and ITER Organization (IO).

Pictures, photographs and data courtesy of Consorzio RFX, F4E, EFDA-JET, IO.

**Grazie per
l'attenzione !**