

# La ricerca sulla fusione nucleare al Consorzio RFX

- Padova, 17 giugno 2022 -

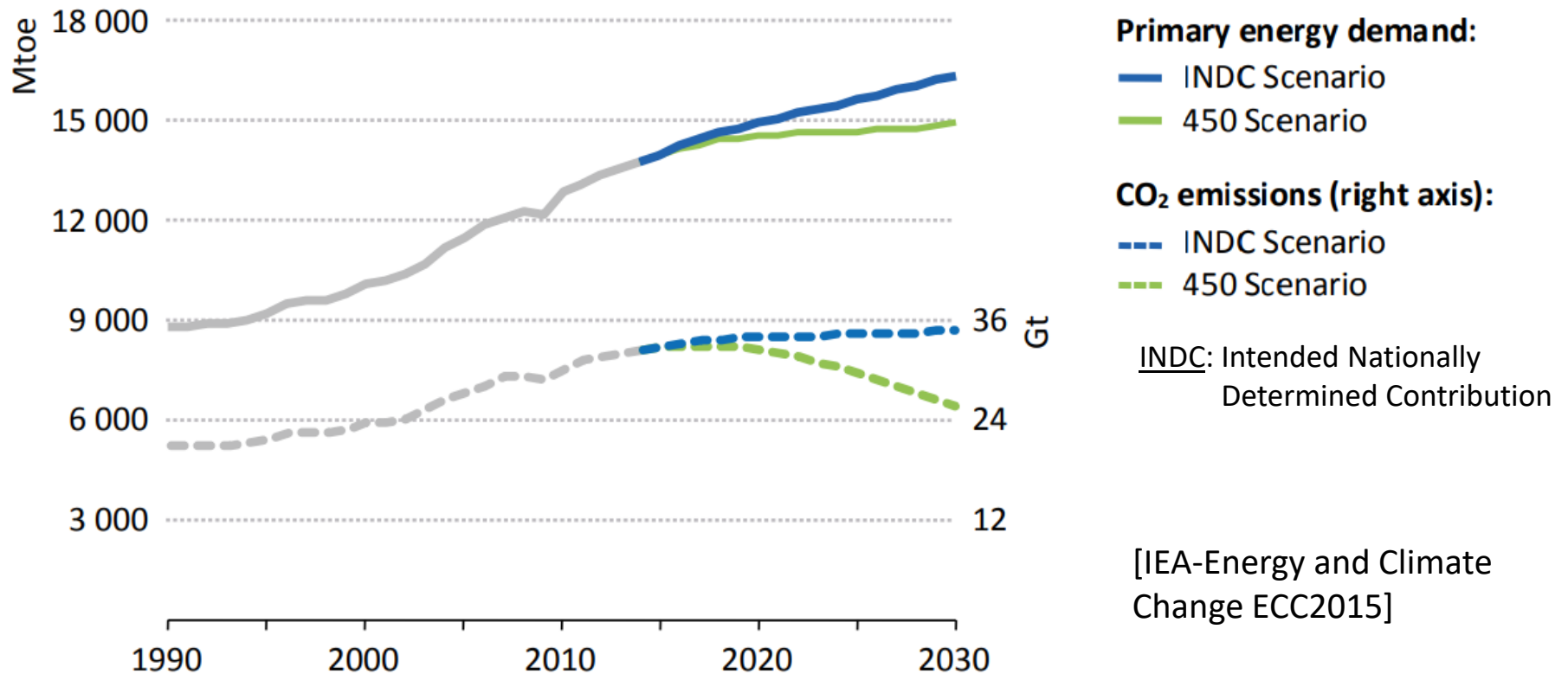
F. Fellin

- Consorzio RFX (CNR, ENEA, INFN, Università di Padova, Acciaierie Venete S.p.A.)  
Corso Stati Uniti 4 - 35127 Padova (Italy)
- [www.igi.cnr.it](http://www.igi.cnr.it)
- 049-8295000

- **Questione energetica** / perché studiare la fusione?
- Come avviene il processo di **fusione tra nuclei**?/ i plasmi in natura
- È possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?
- Qual è lo stato attuale della **ricerca** fusionistica nel mondo?
- Il prossimo passo: **ITER**
  - Il contributo italiano;
  - Il contributo padovano;
- Conclusioni e domande...

- **Questione energetica** / perché studiare la fusione?
- Come avviene il processo di **fusione tra nuclei?**/ i plasmi in natura
- È possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?
- Qual è lo stato attuale della **ricerca** fusionistica nel mondo?
- Il prossimo passo: **ITER**
  - Il contributo padovano
- **Conclusioni e domande...**

# Consumo di energia primaria al mondo e CO<sub>2</sub>



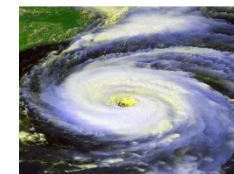
Note: Mtoe = million tonnes of oil equivalent; Gt = gigatonnes.

**La pressione demografica e il miglioramento della qualità di vita dei paesi sottosviluppati richiederà un incremento della domanda di energia primaria**

**In accordo con INDC, le dichiarazioni dei paesi presenti a COP21-2015, le emissioni di CO<sub>2</sub> rallentano ma non calano**

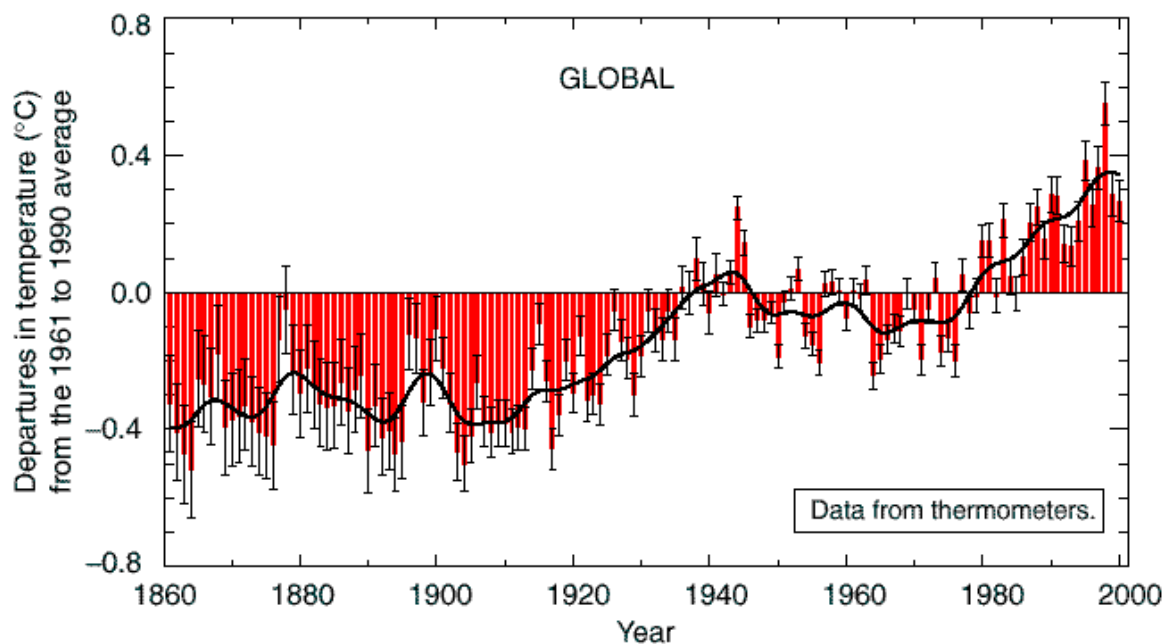


# Riscaldamento globale



## Variations of the Earth's surface temperature for:

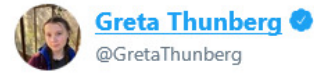
### (a) the past 140 years



1998: **protocollo di Kyoto** prevede una riduzione dell'emissione di CO<sub>2</sub> entro il 2012 del 6.5% rispetto alle rilevazioni del 1990

L'Italia? Firma il protocollo e lo ratifica nel 2002 ma... nel 2004 le nostre emissioni erano aumentate del **12%**! Anche gli altri paesi non fanno meglio di noi...

# In realtà tutto ormai corre velocemente...



**Greta Thunberg** ✓  
@GretaThunberg

Follow

March 15.  
The school strike continues.  
957 places in 82 countries and counting...  
Everyone is needed.  
Everyone is welcome.  
Please spread the word!  
Find your closest strike or register your own at  
[fridaysforfuture.org/events/list](https://fridaysforfuture.org/events/list)  
[#FridaysForFuture](#) [#SchoolsStrike4Climate](#)  
[#ClimateStrike](#)



5:39 AM - 10 Mar 2019

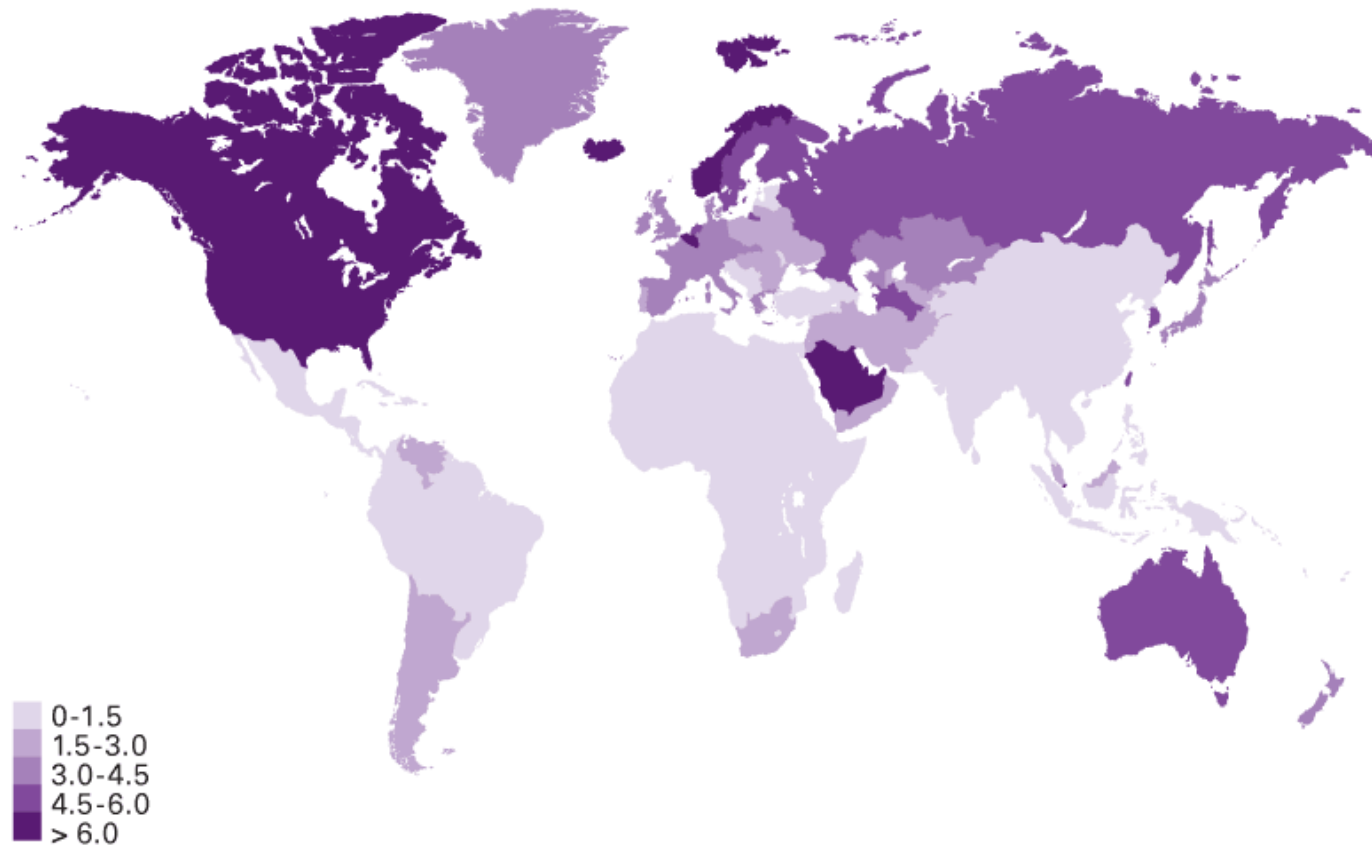
5,519 Retweets 9,312 Likes



235 5.5K 9.3K

## Consumo di energia primaria pro capite

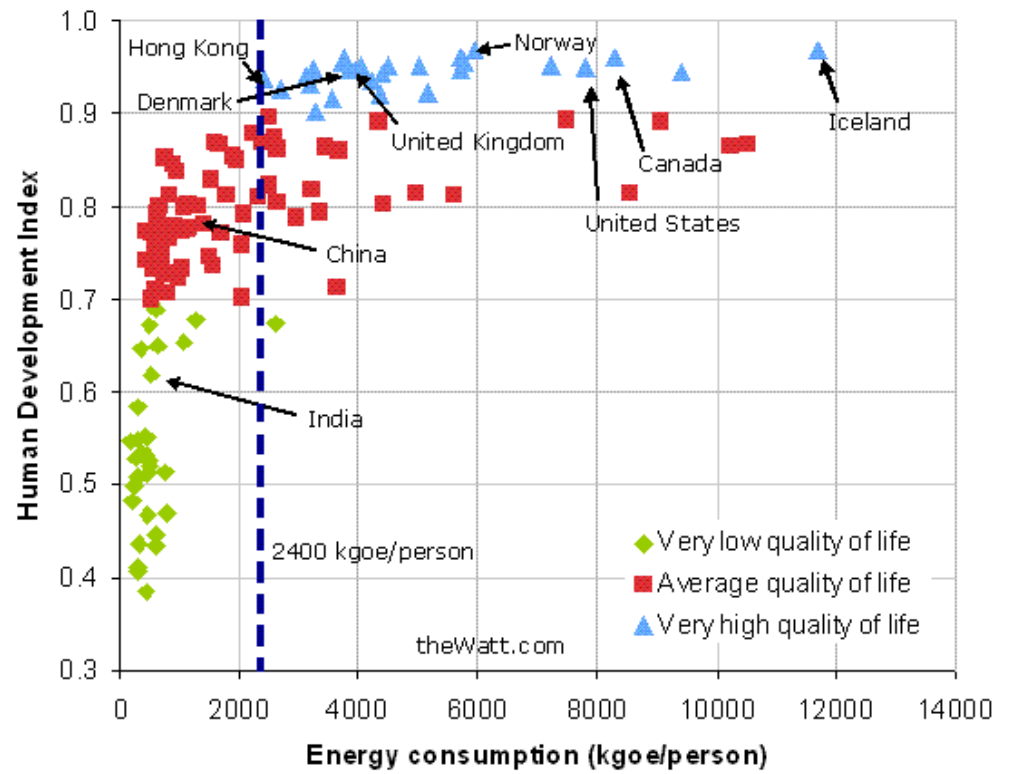
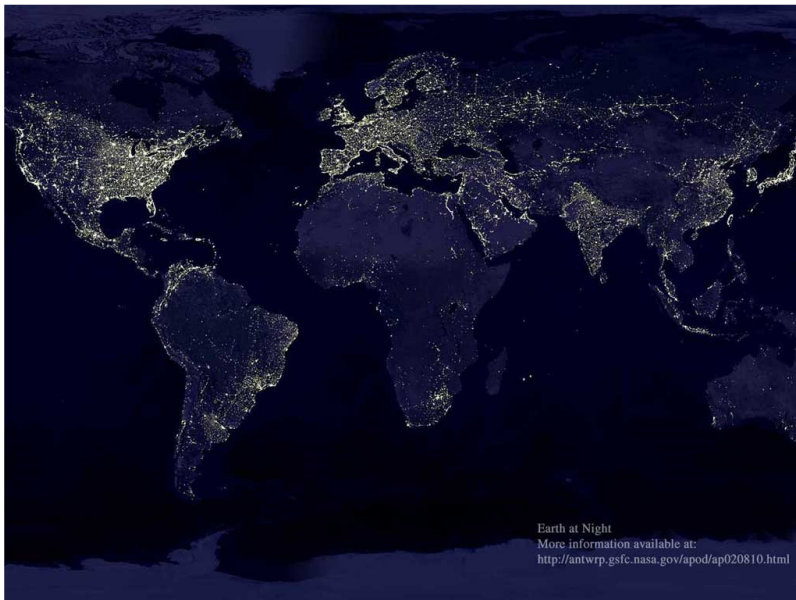
Consumption per capita 2007  
Tonnes oil equivalent



Lo scenario attuale cambierà presto per lo sviluppo della Cina e del Sud Est Asiatico

## Consumo energia pro-capite e qualità della vita

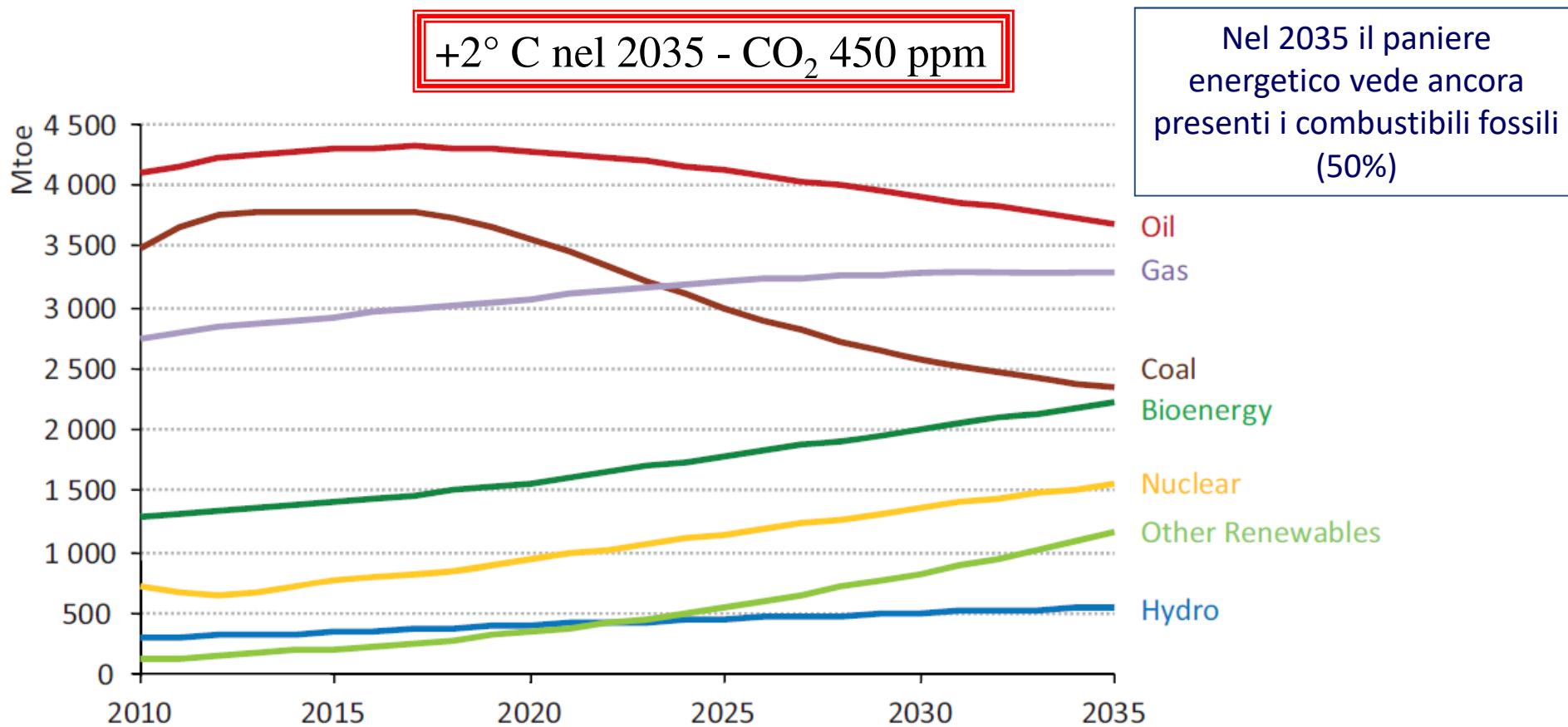
- Indice di sviluppo umano: speranza di vita, alfabetizzazione, reddito procapite, ...
- Soglia consumo procapite e qualità della vita
- Paesi in via di sviluppo e sottosviluppati durante prossimi 50 anni aumenteranno la loro domanda di energia (80% popolazione mondiale).



# Scenario energetico per il futuro

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

+2° C nel 2035 - CO<sub>2</sub> 450 ppm



**Necessità di differenziare più possibile le diverse fonti, con contributo di 30% di fonti low-carbon:**

**non possiamo trascurare nessuna alternativa!**

# Alternative a confronto

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

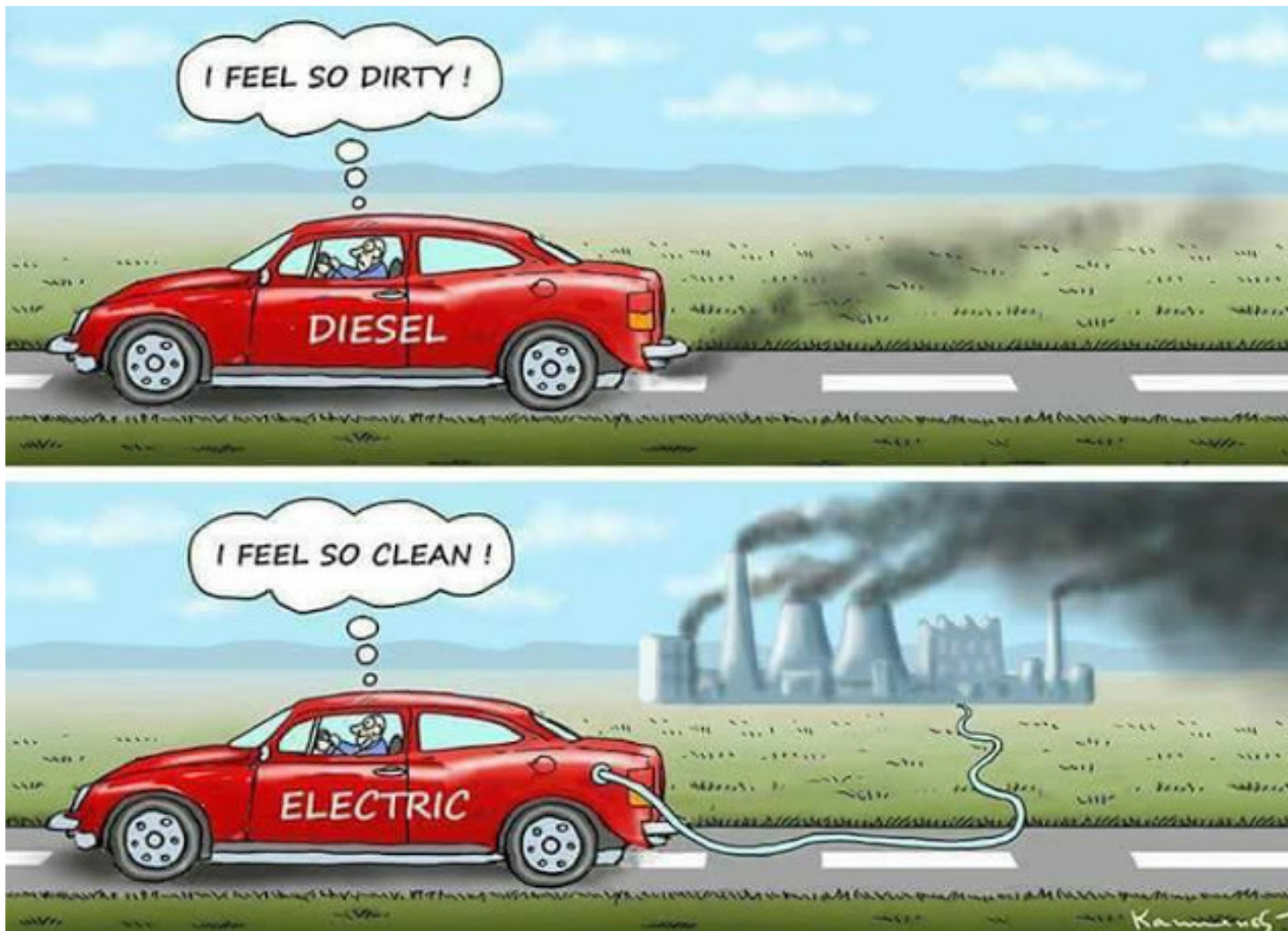
## Per una ipotetica centrale da 1 GW da altre fonti:

- **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*) **COSTO ELEVATO**
- **Fissione nucleare** → 35 tonnellate all'anno di uranio
- **Fusione nucleare** → 100 kg D e 150 kg T all'anno per una centrale da 1 GW  
- NB: 1 Kg di D+T equivale a 10.000 tonnellate di carbone

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

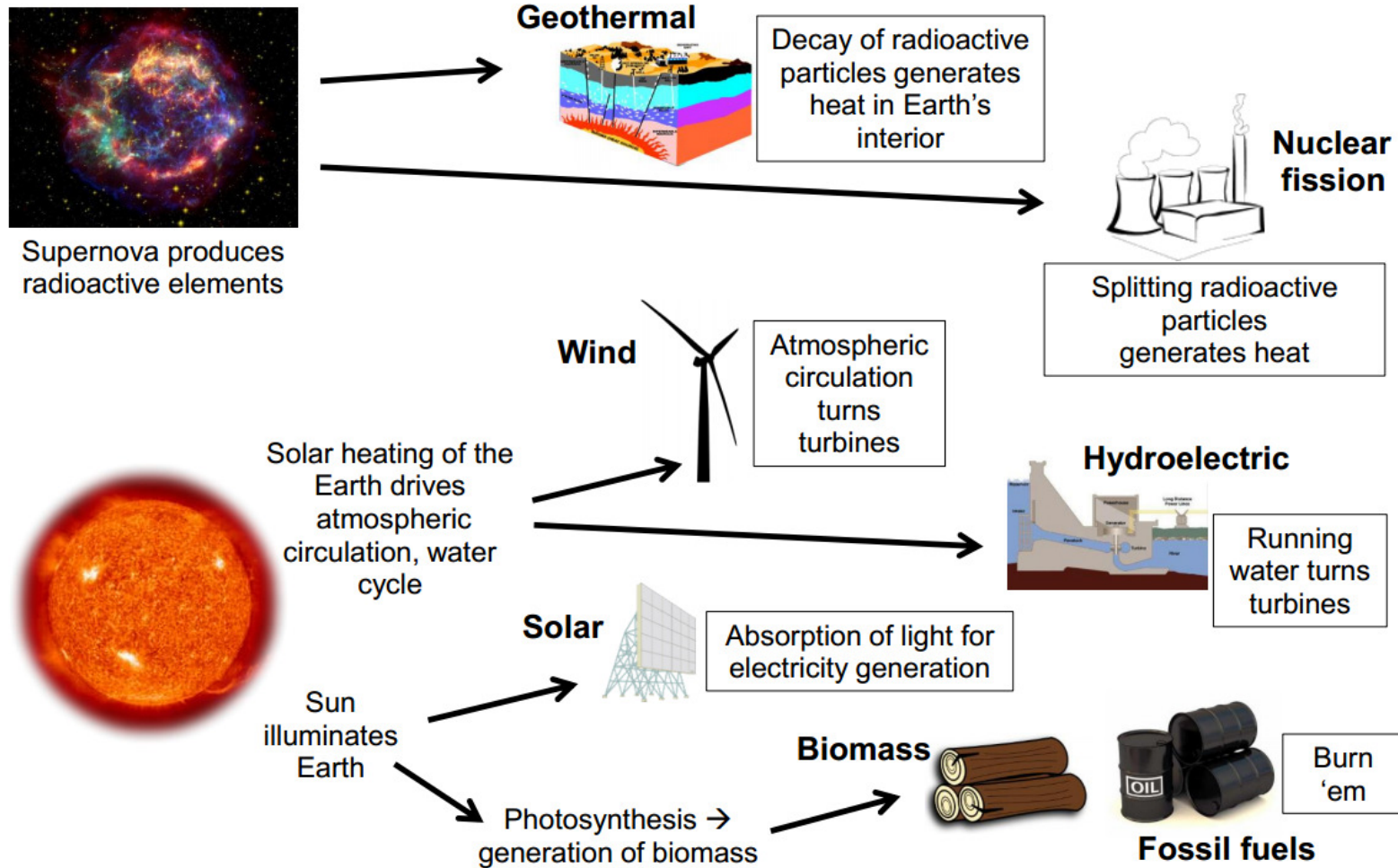


## Bisogna distinguere fonte e vettore di energia



La valutazione di una nuova fonte di energia (per esempio per trazione) va sempre effettuata considerando tutto il ciclo, dalla fonte primaria allo smaltimento finale.

# Da dove arriva l'energia?

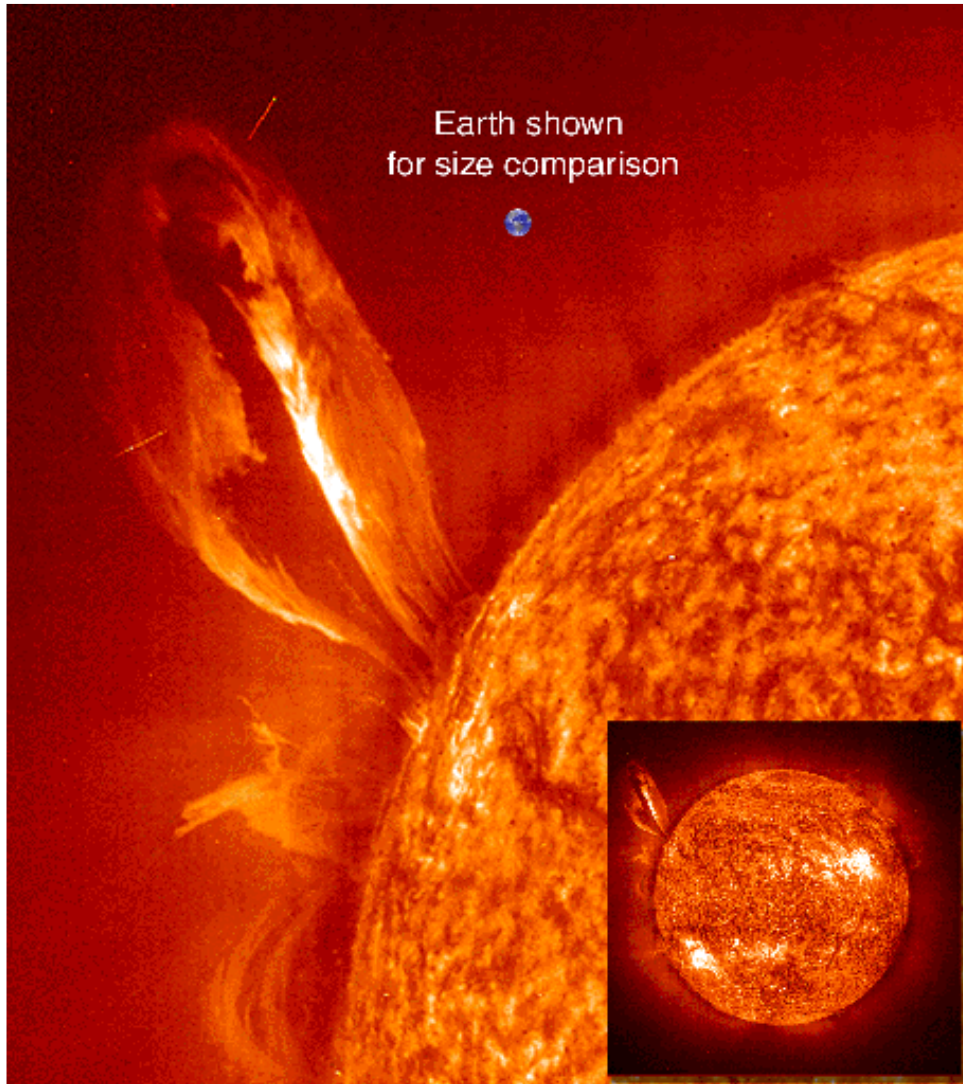


I processi di fusione che avvengono nelle stelle sono la fonte, diretta o indiretta, delle forme di energia più comuni che si usano quotidianamente sulla Terra



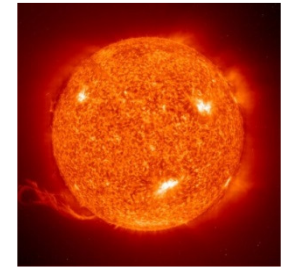
- Perché studiare la fusione?
- Come avviene il processo di fusione tra nuclei?
- È possibile riprodurlo e sfruttarlo sulla terra?
- Qual è lo stato attuale della ricerca fusionistica nel mondo?
- Il passo successivo: ITER
  - Il contributo padovano
- Conclusioni e domande...

## La fusione nucleare in natura

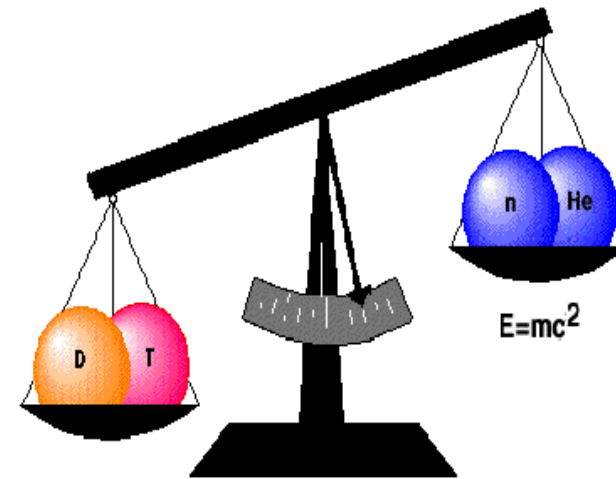
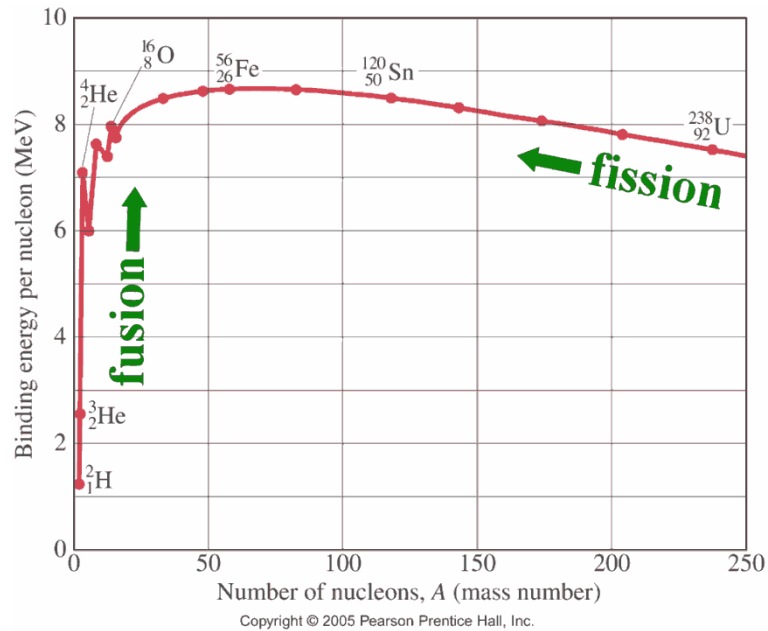


In natura la fusione nucleare funziona già bene. L'energia nel sole è fornita da processi di fusione che bruciano 600 milioni di tonnellate di idrogeno al secondo.

## Come avviene la fusione?



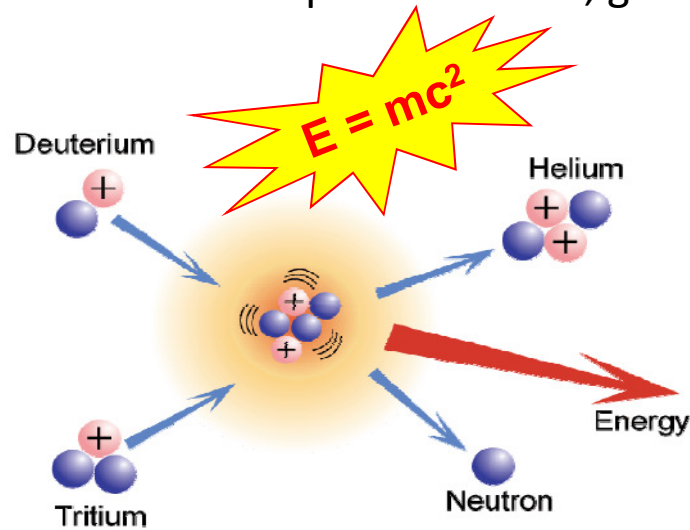
Nelle stelle i nuclei di atomi leggeri fondono insieme, formando elementi più pesanti e liberando una grande quantità di energia.



La fusione converte  
massa in energia!

# 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.



**RISORSE PER 20 MILIONI DI ANNI**

## Deuterio

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



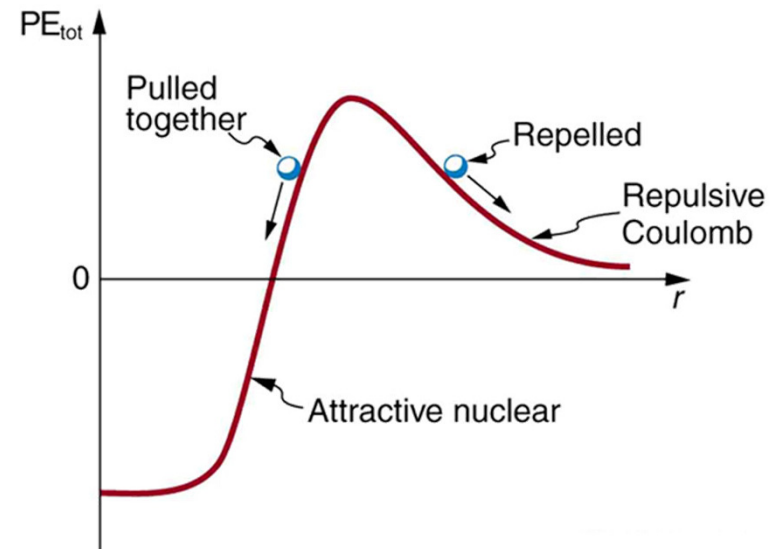
## Trizio ← Litio

- 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:

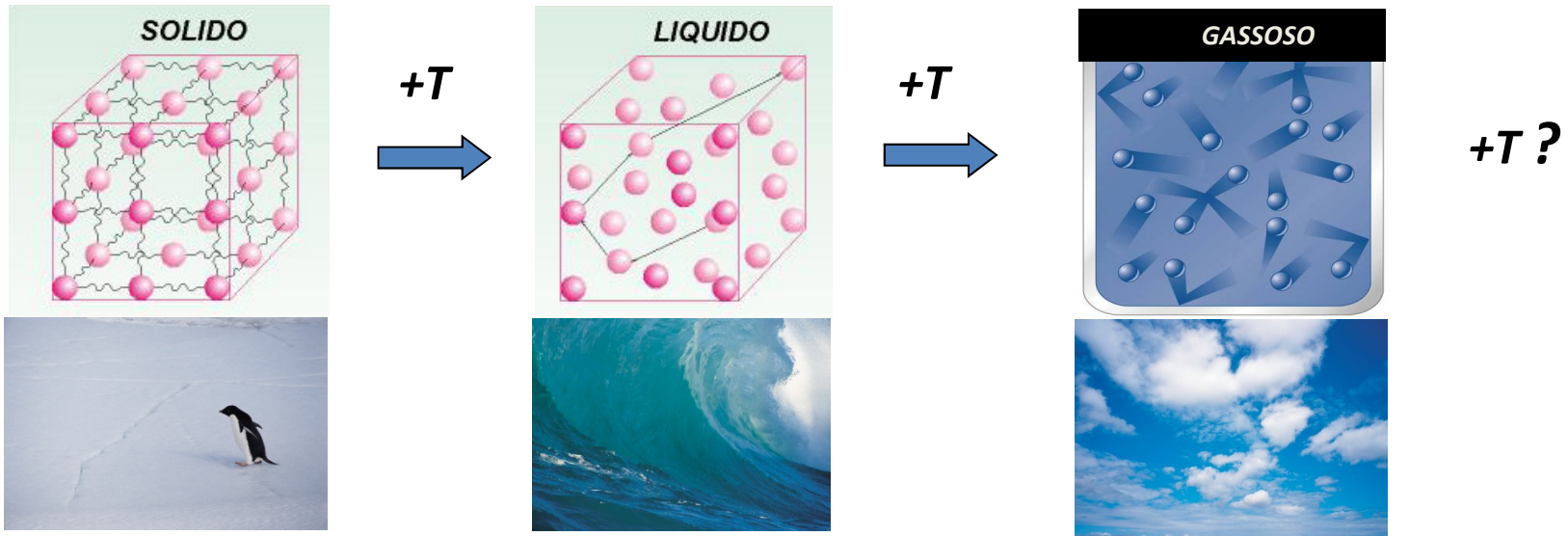
SOLE – 15 milioni di gradi °C

REATTORE – 150 milioni di gradi °C

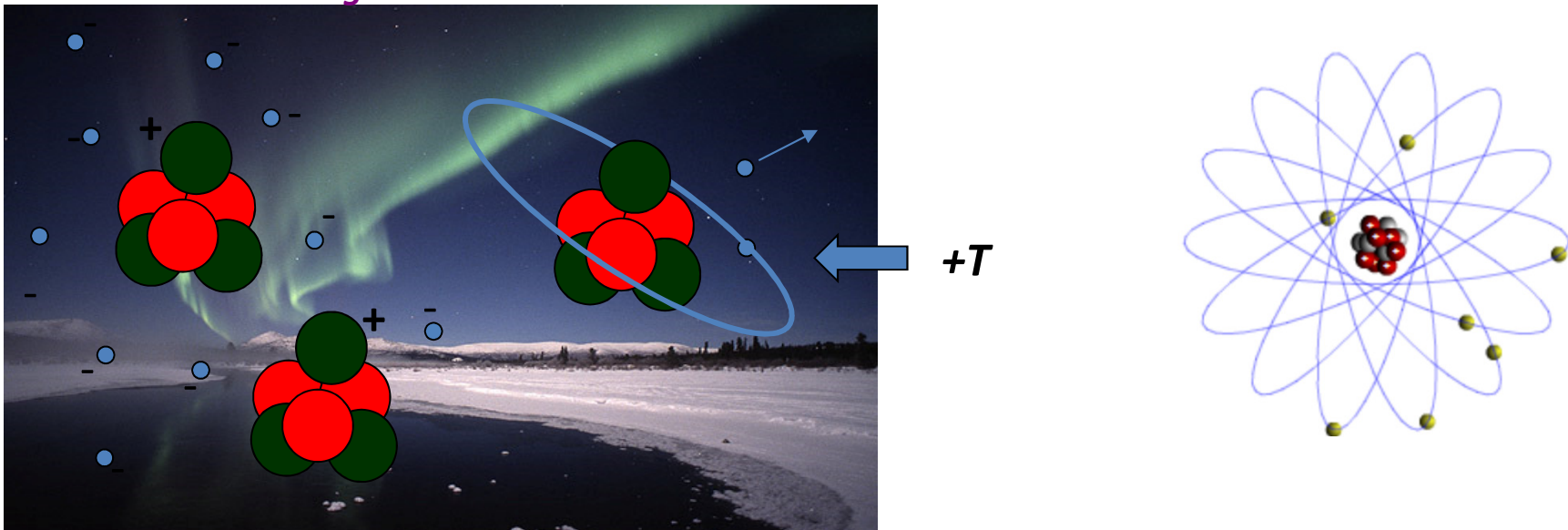
A tali temperature la materia si trova nello stato di PLASMA



# Plasma: il quarto stato della materia



**PLASMA: un gas altamente ionizzato**



## Plasmi in natura

La difficoltà ad “immaginare” cosa sia un plasma nasce dal fatto che in sulla Terra il plasma è uno stato molto raro della materia. Si trova per esempio nelle aurore boreali...





## Plasmi in natura

...o nei  
fulmini.




Fotografia di Fernando D'Angelo, Padova.



... ma in realtà nell'universo la grande maggioranza della materia si trova nello stato di plasma. Basti pensare a nebulose, galassie; stelle, gas interstellare...



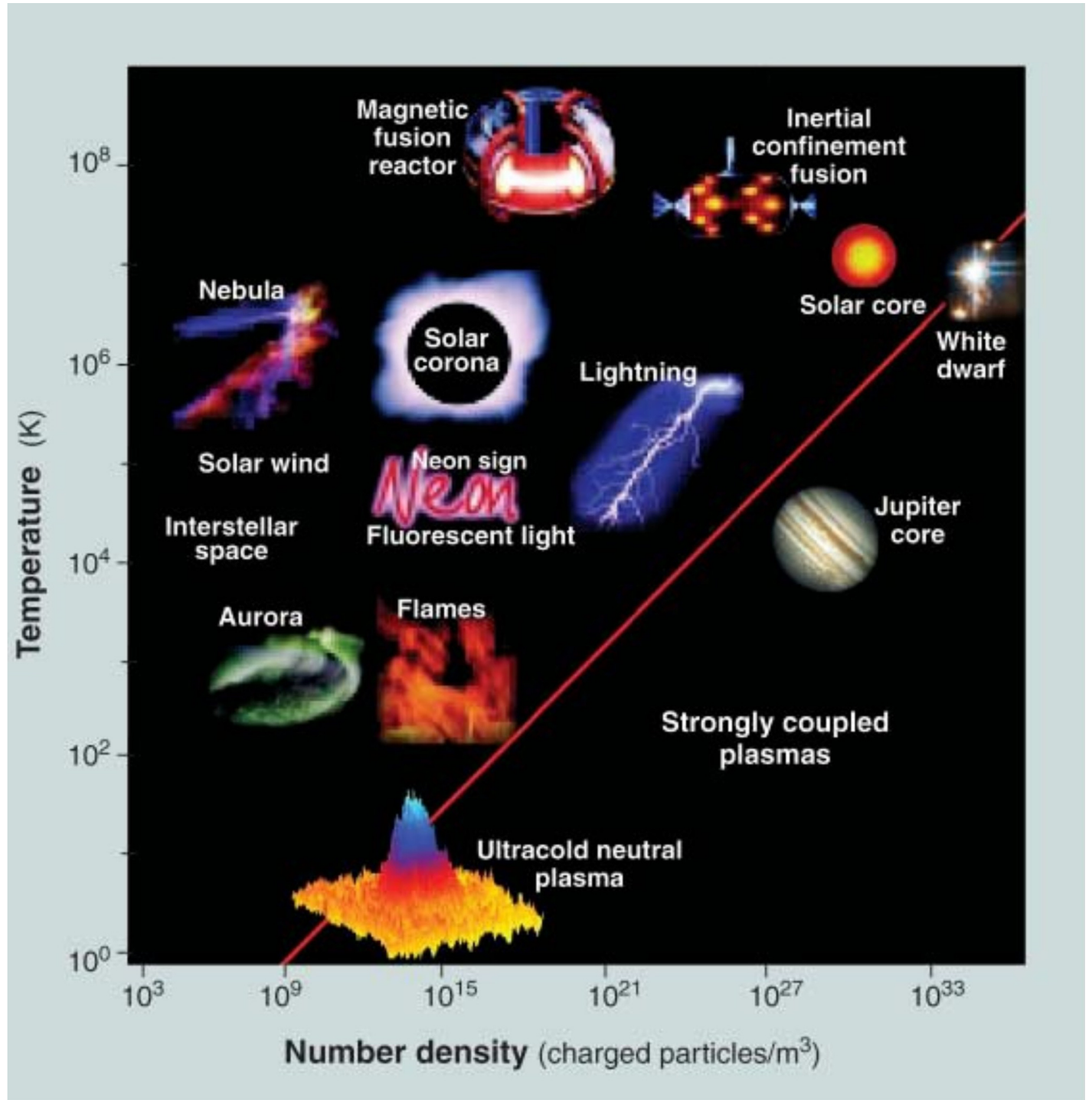


A deep-field astronomical image showing a vast field of galaxies. The galaxies are scattered across a dark, black background. They exhibit a wide variety of colors, including bright yellow, orange, red, blue, and green. Some galaxies are large and prominent, while others are small and distant. The shapes range from smooth, elliptical forms to more complex, irregular structures. The overall appearance is that of a rich, multi-colored population of galaxies.

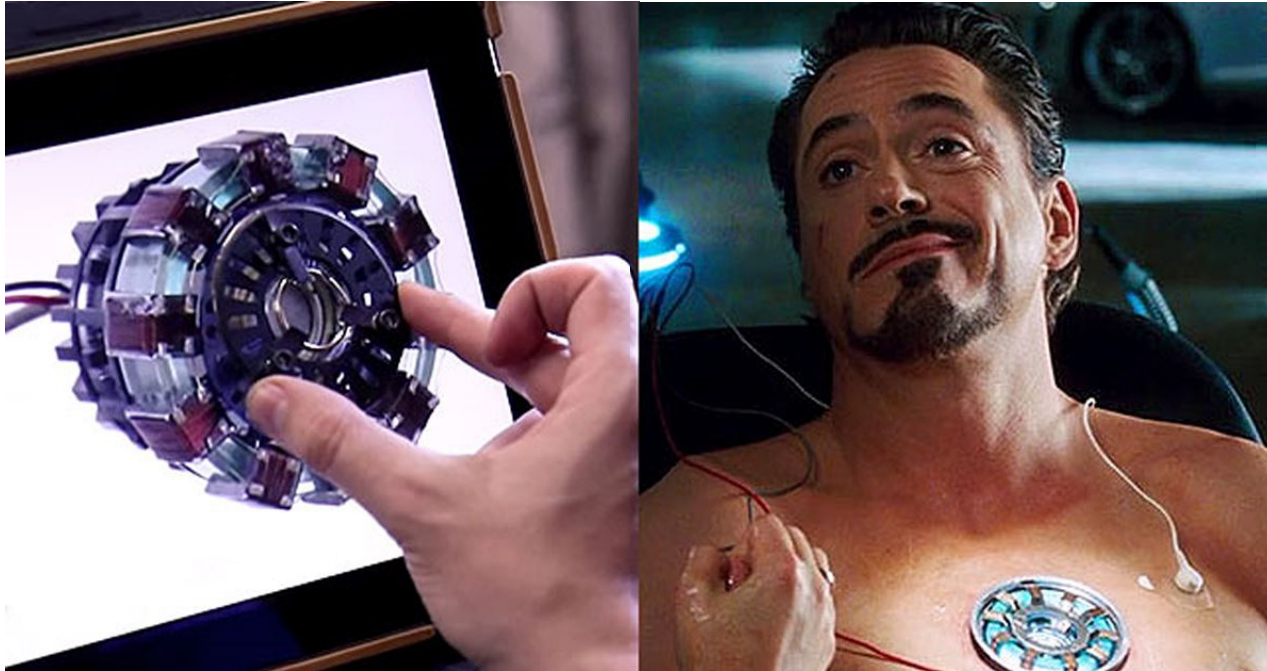
... ma in realtà nell'universo la grande maggioranza della materia si trova nello stato di plasma. Basti pensare a nebulose, galassie, stelle, gas interstellare...



...il 99% della materia ordinaria dell'universo si trova nello stato di plasma

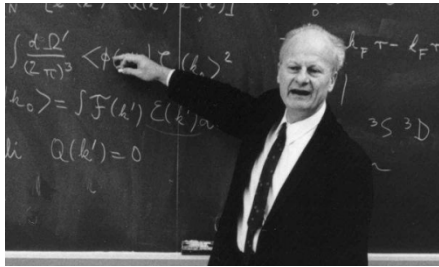


## La fusione sulla Terra....



**...e no! Qualcosa di piu' realistico**

## La fusione sulla Terra: un po' di storia...



1939: Hans Bethe  
come la fusione  
alimenta le stelle



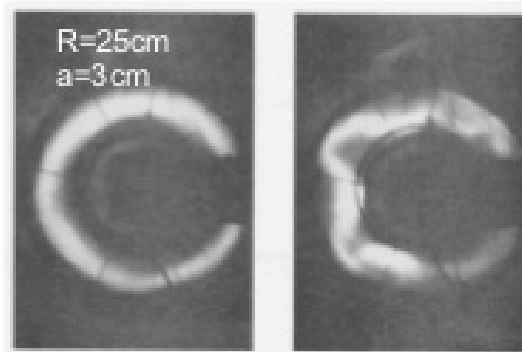
1951: I programmi di  
fusione nucleare hanno  
inizio in Russia e USA



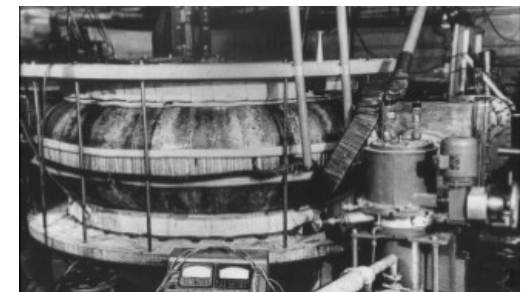
1952: Bomba H



1953: Atoms for Peace  
Conference (Ginevra):  
declassificazione della  
fusione (1958)



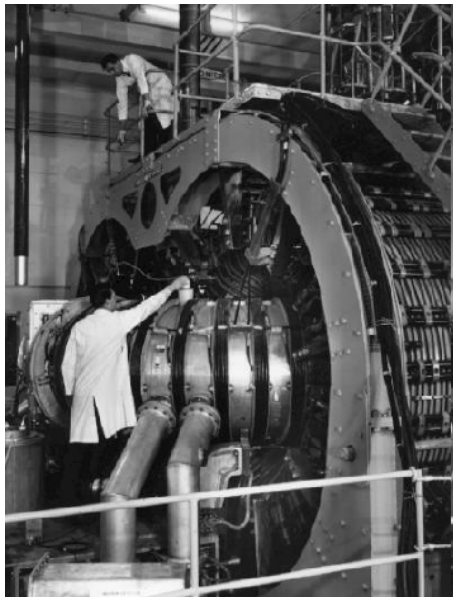
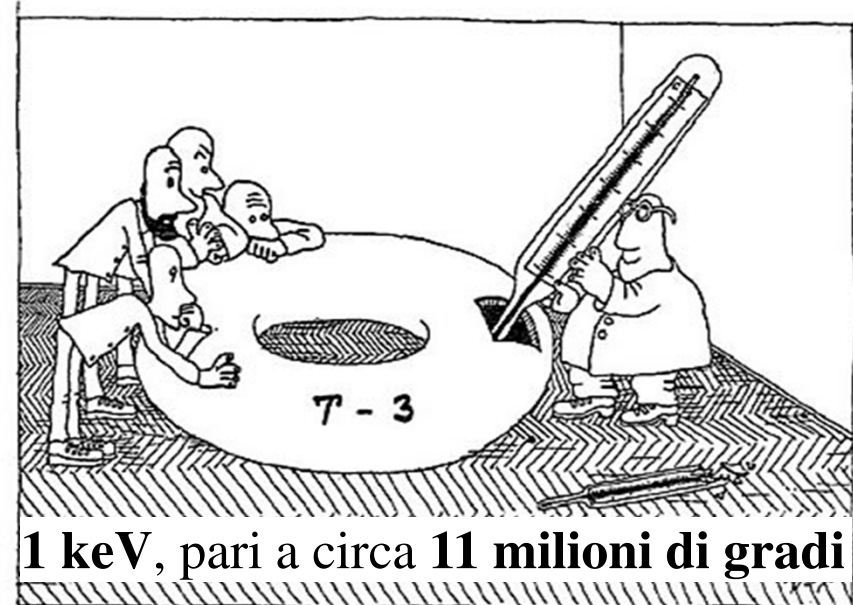
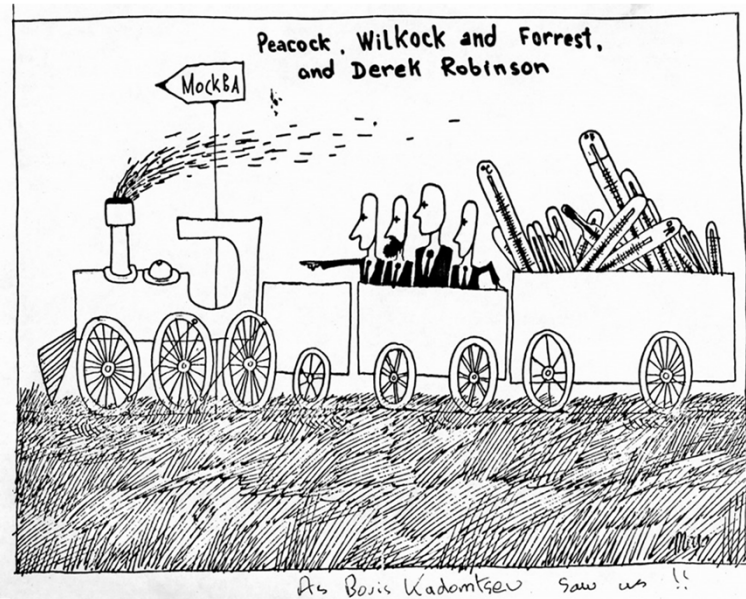
1953-1960.: Primi test su  
macchine di tipo pinch,  
basso confinamento



1968: Fusion conference  
Novosibirsk: gli scienziati  
Russi presentano i risultati  
di T3



## Un po' di storia...



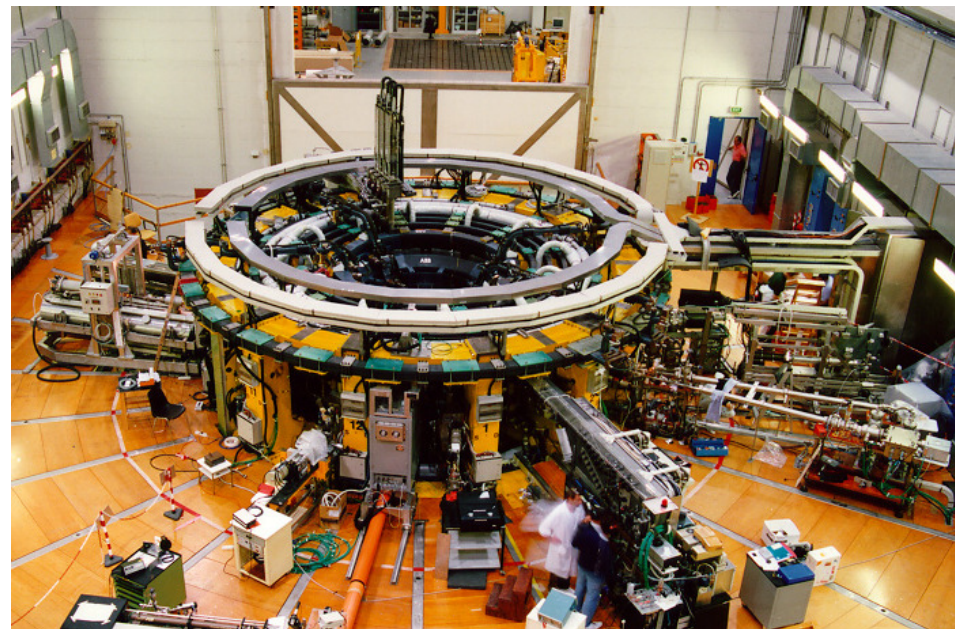
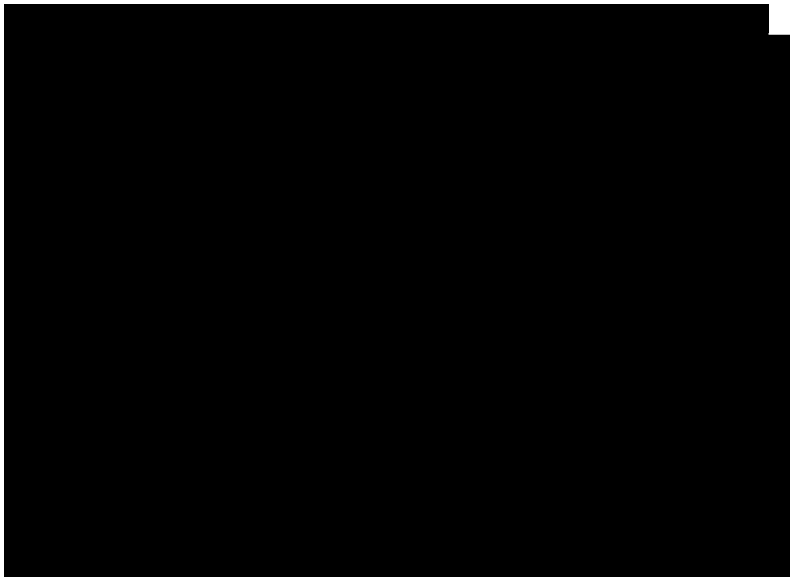
25 Gennaio 1958, ZETA – Culham (UK)

# Fusione in laboratorio: confinamento

Il plasma caldo non deve toccare le pareti del reattore: il vero contenitore è il **campo magnetico**

Agisce sulle particelle cariche del plasma:

Linee di campo di forma opportuna:  
CIAMBELLA o TORO

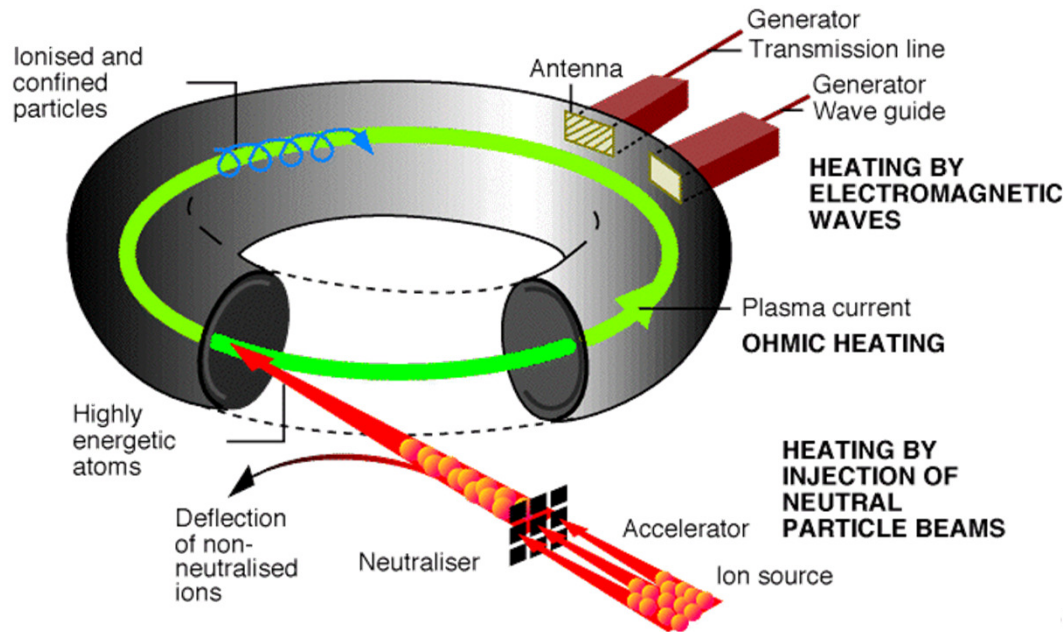


Forza di Lorentz  
 $F = E + qv \times B$

raggio~ 1-2 cm per protoni  
mm per elettroni



# Fusione in laboratorio: riscaldamento



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



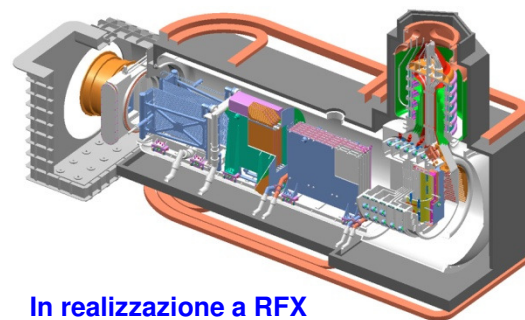
$$P = RI^2$$

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

$$@1keV$$

$$I \sim 10 \text{ MA}$$

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



In realizzazione a RFX

Onde EM: accoppiamento di  
 potenza tramite radiazioni  
 alla frequenza di risonanza



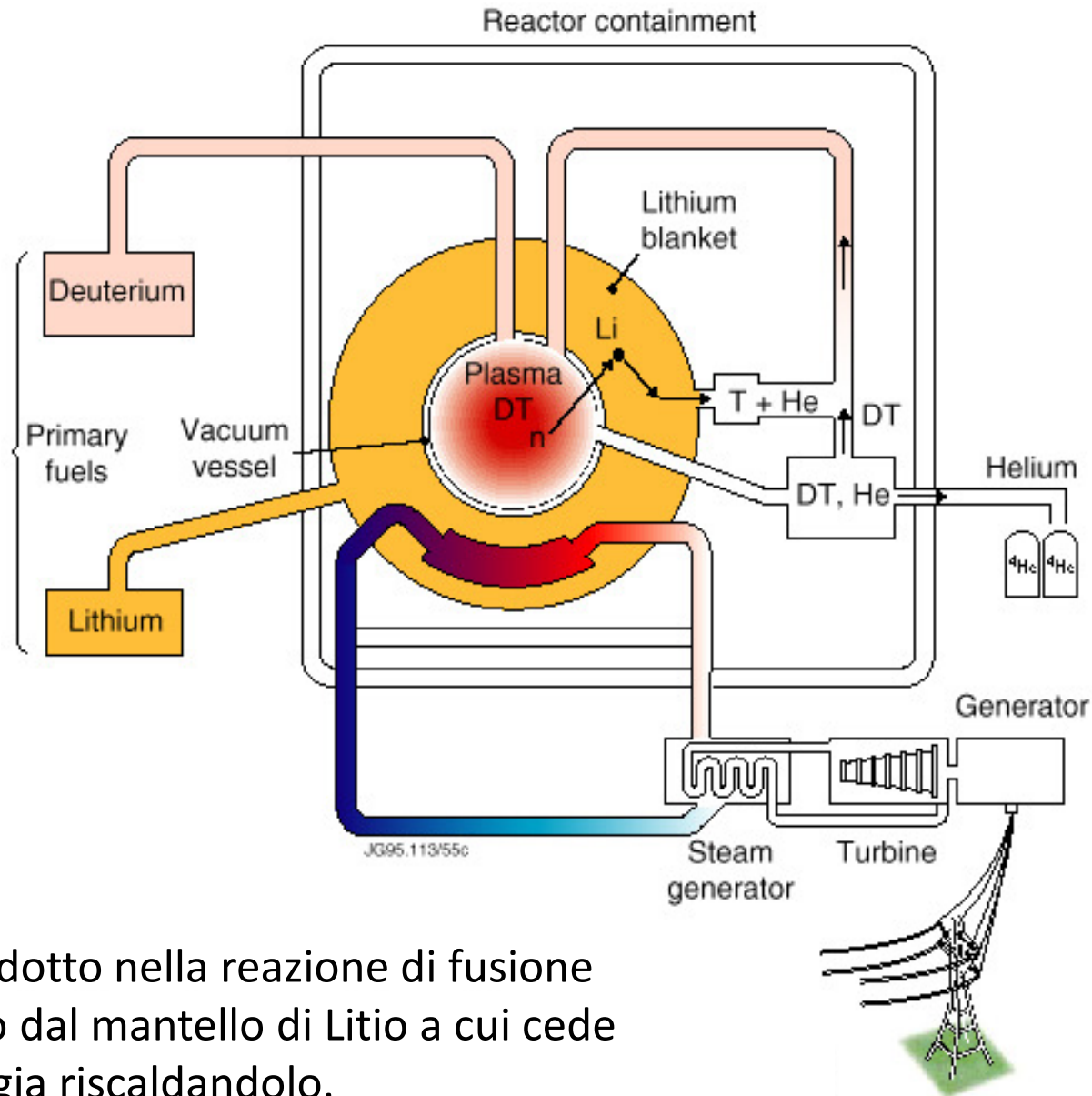
$$\Omega_{i/e} = \frac{qB}{m_{i/e}}$$

$$D/T: \sim 50 \text{ MHz}$$

$$e: \sim 100 \text{ GHz}$$



# Come funzionerà una centrale a fusione?



Il neutrone prodotto nella reazione di fusione viene rallentato dal mantello di Litio a cui cede la propria energia riscaldandolo.

# Tokamak

Il Joint European Torus (JET) è attualmente la più grande macchina in funzione per il confinamento magnetico di plasmi di interesse termonucleare.

## Parametri di JET:

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

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

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

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

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

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

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

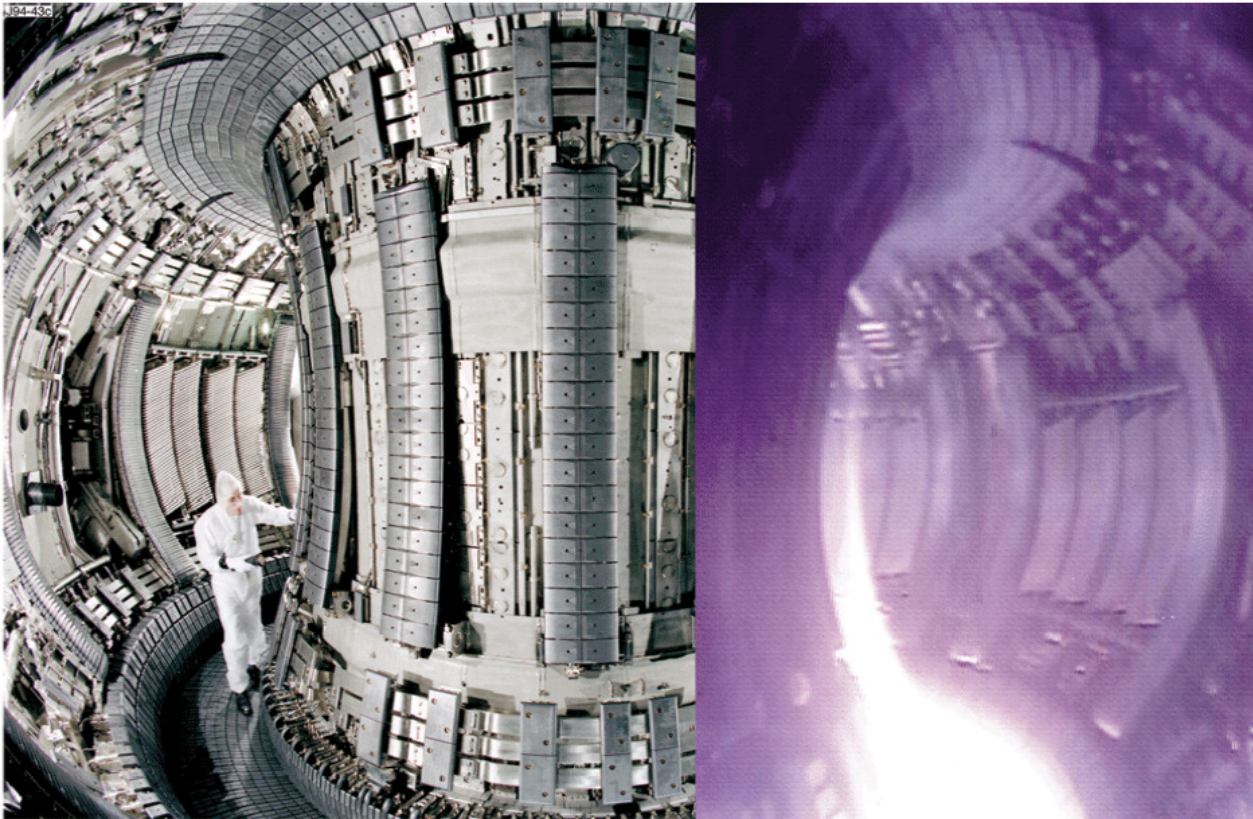
$$n_e = 1 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

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



# Tokamak

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



## 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  
**2020**: obiettivo **25 MW**  
**per 5s** (prossima diap.)



# Recenti risultati al JET

(conferenza stampa 9 feb 22)

## ITER NEWSLINE -

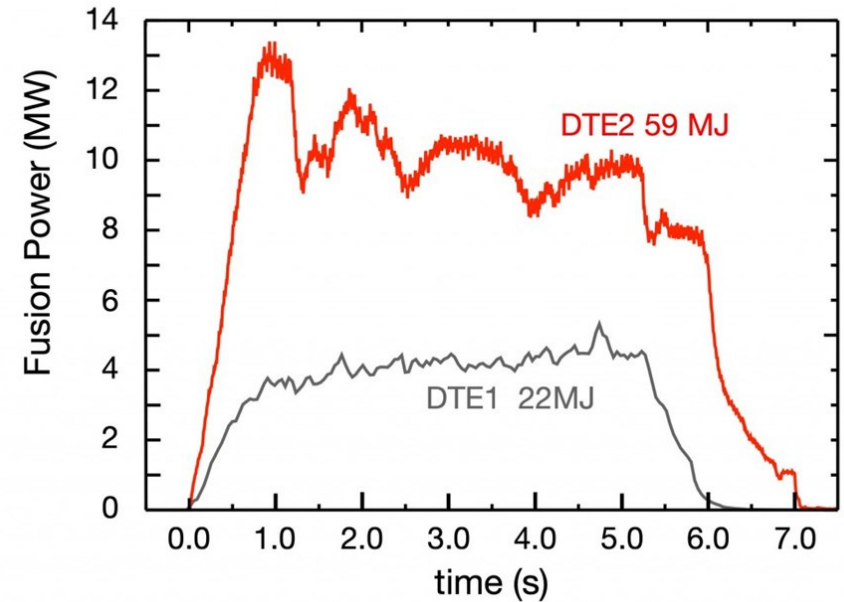
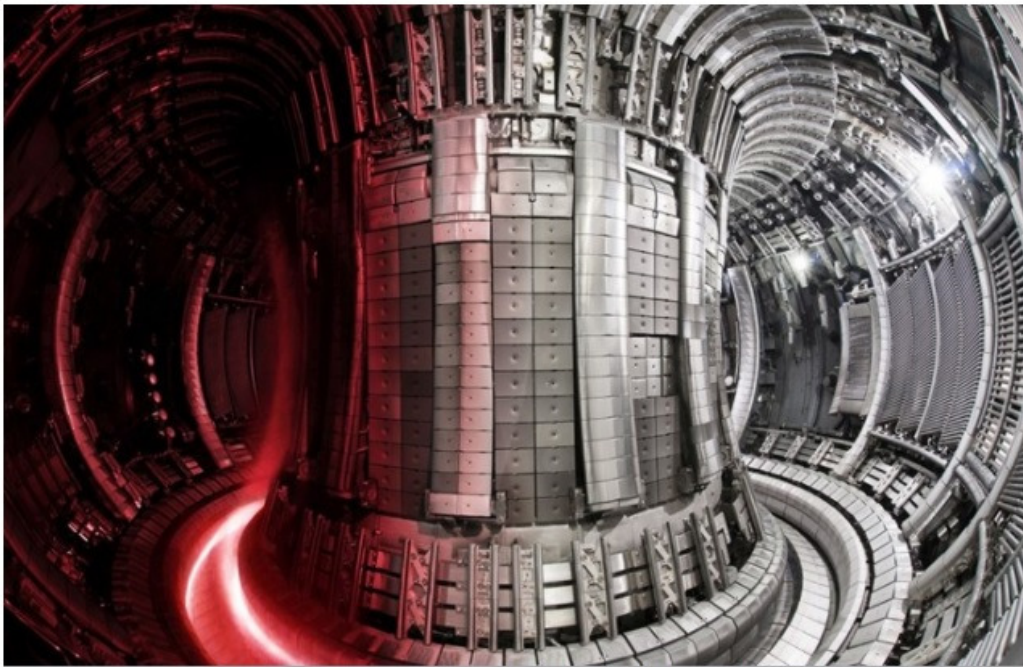
14 FEB, 2022

[Print](#) [Read the latest published](#)

Fusion world

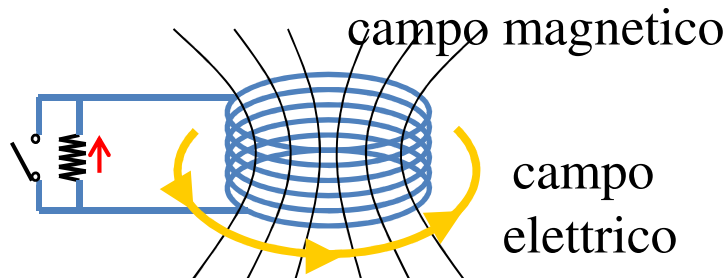
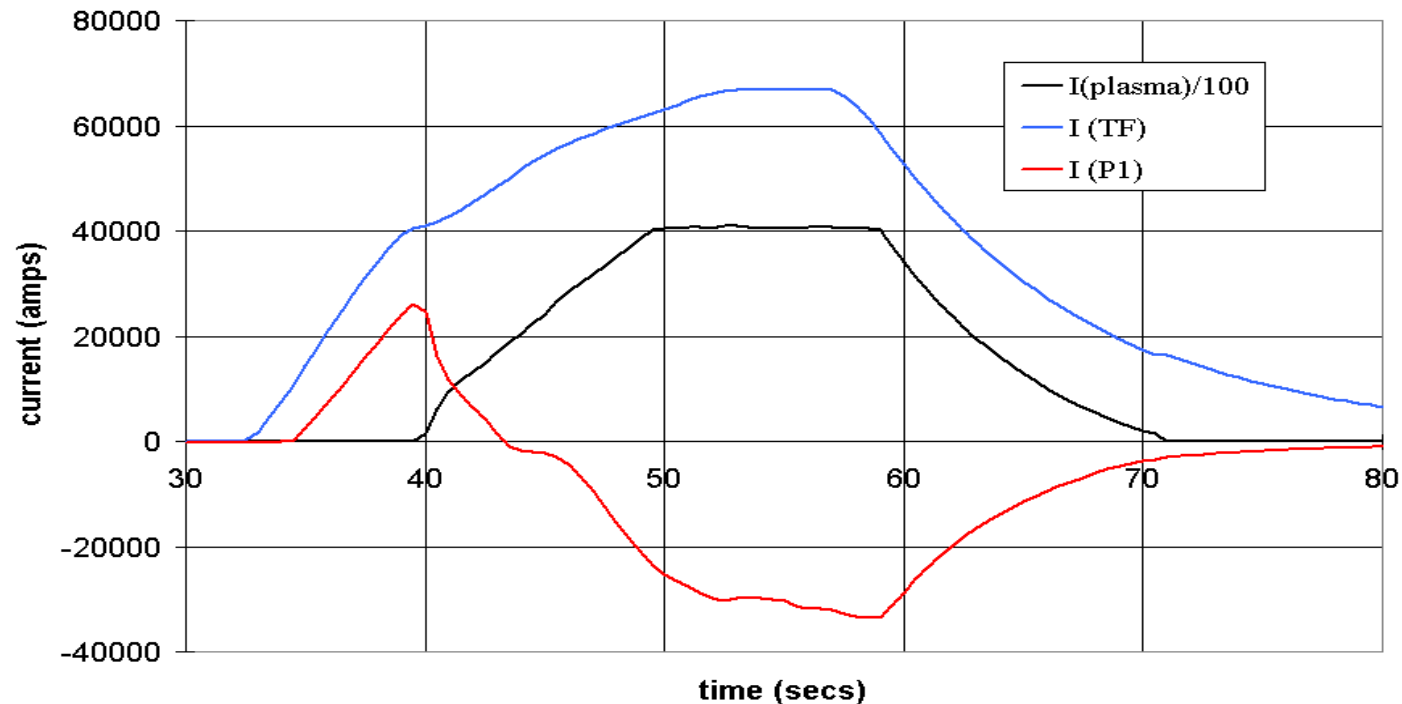
## JET MAKES HISTORY, AGAIN

The JET tokamak has achieved a first-ever sustained, high-confinement plasma using the same wall materials mix that ITER will use. The results aligned with prediction ... and this predictability is very good news for the ITER research program and for fusion in general.



*The results confirm that sustained high-fusion energy production is achievable using the D-T fuel mix planned on ITER and future devices. They also show that the fusion community has the capability to model what will happen in a fusion reactor.*

# Come accendere un plasma da 4 MA a JET



La corrente di plasma è indotta dalla variazione di corrente sull'avvolgimento primario,  $I(\text{P1})$ , dall'effetto trasformatore. Il gas è ionizzato a 40 secondi.

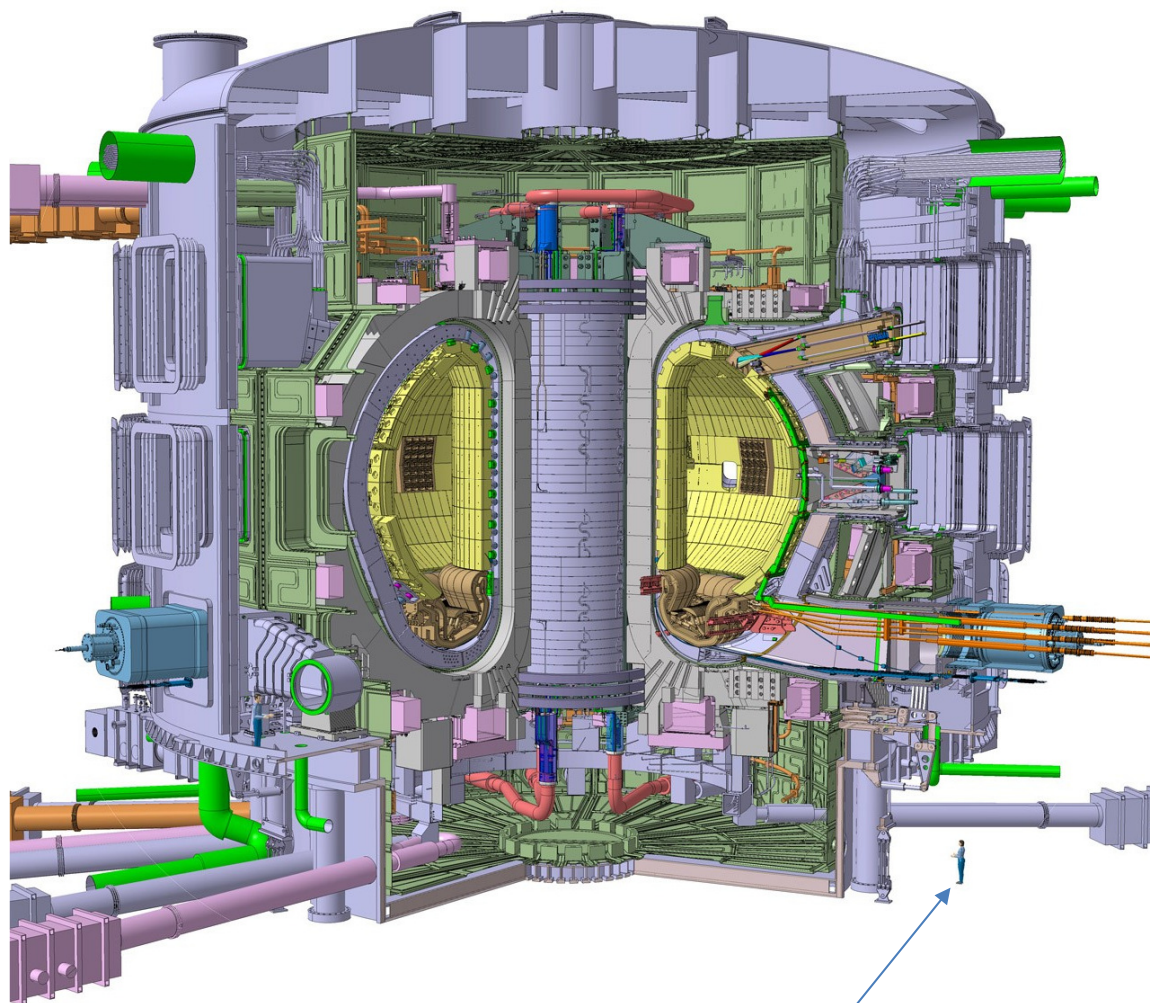
Nell'esempio si mostra un plasma con una corrente di 4 MA, ma sono stati raggiunti anche 6 MA.

- Perché 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?
- **L'esperimento pilota / internazionale: ITER**
  - Il contributo padovano: RFX e NBTF
  - Il contributo italiano: DTT
- Conclusioni e domande...

## 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***





ITER Japan website&SNS  
<http://www.fusion.qst.go.jp/ITER/>



ITER-JapanHP



Facebook  
@iterjapan



Twitter  
@iterjapan

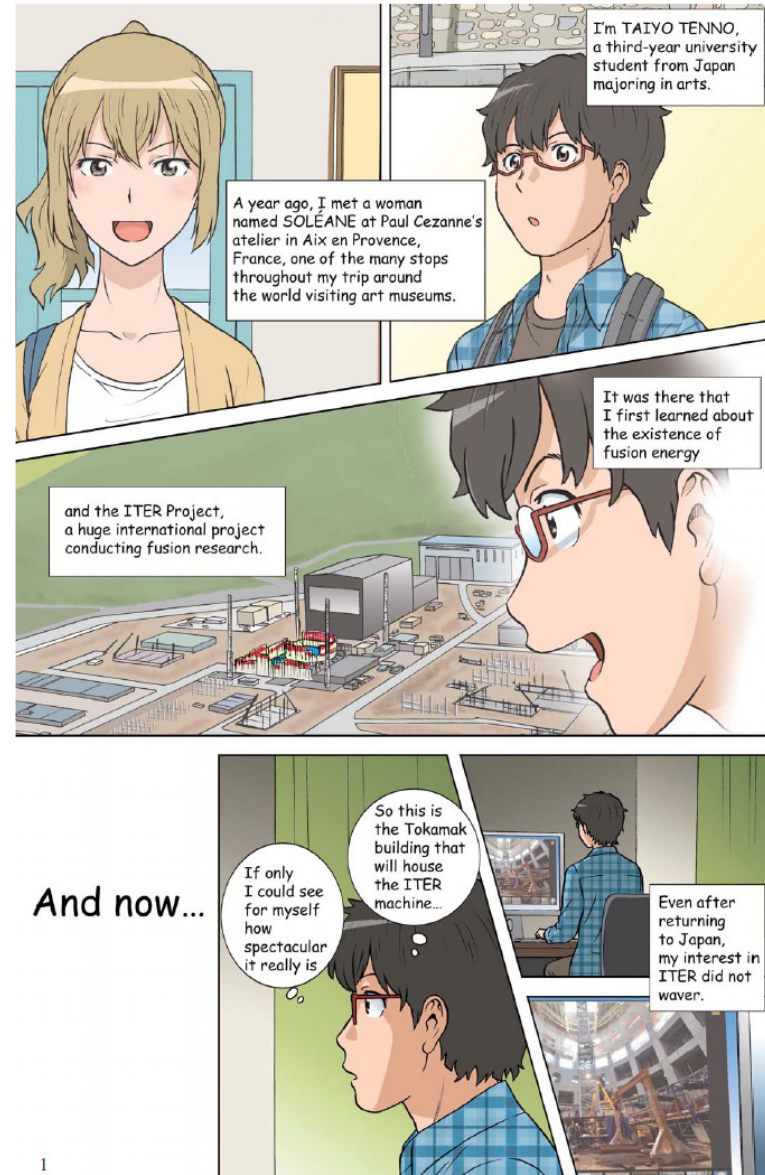
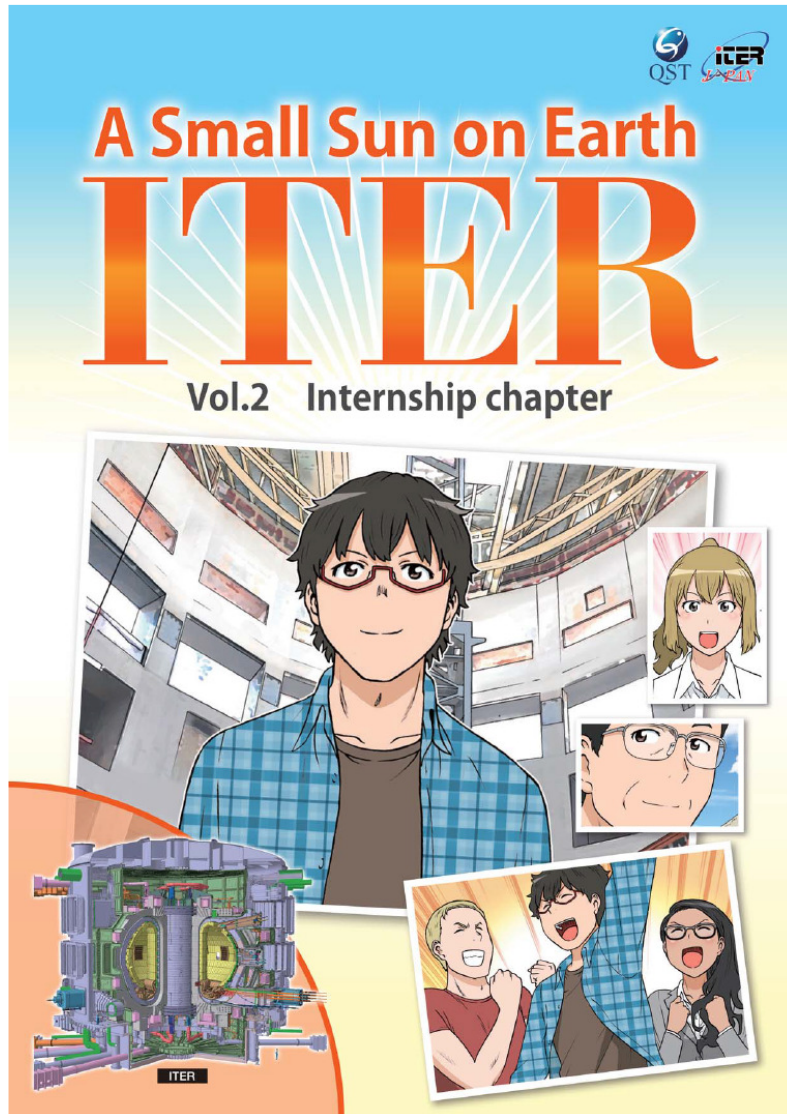


Instagram  
@iterjapan\_qst



<https://www.iter.org/news/publicationcentre>

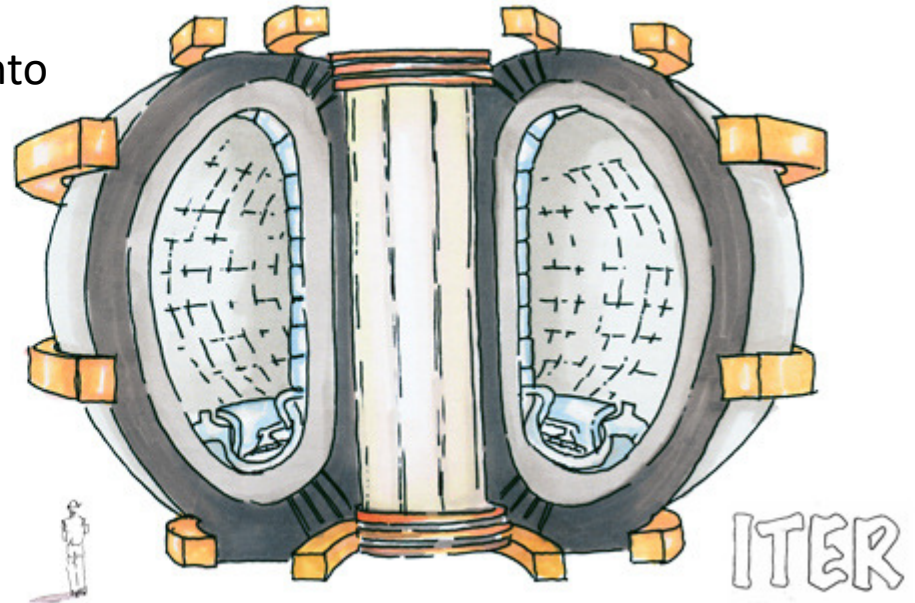
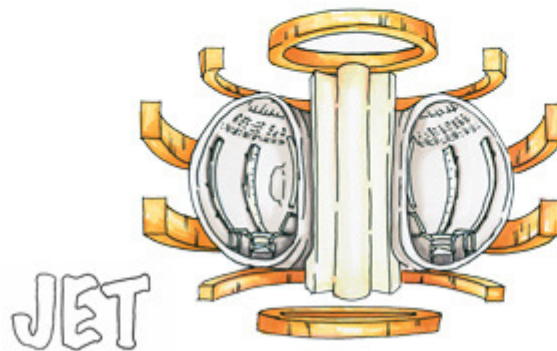
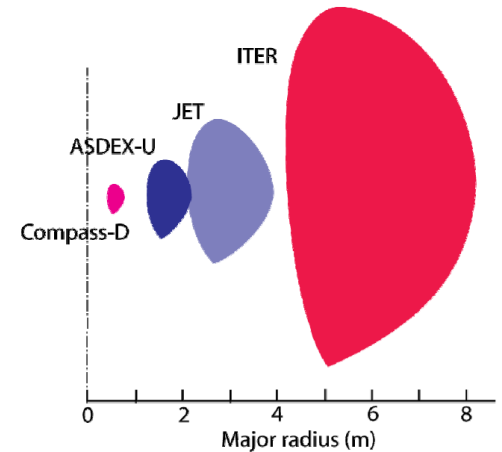




<https://www.iter.org/news/publicationcentre>

## 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 agli attuali esperimenti
- 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)



## Il contributo italiano DTT

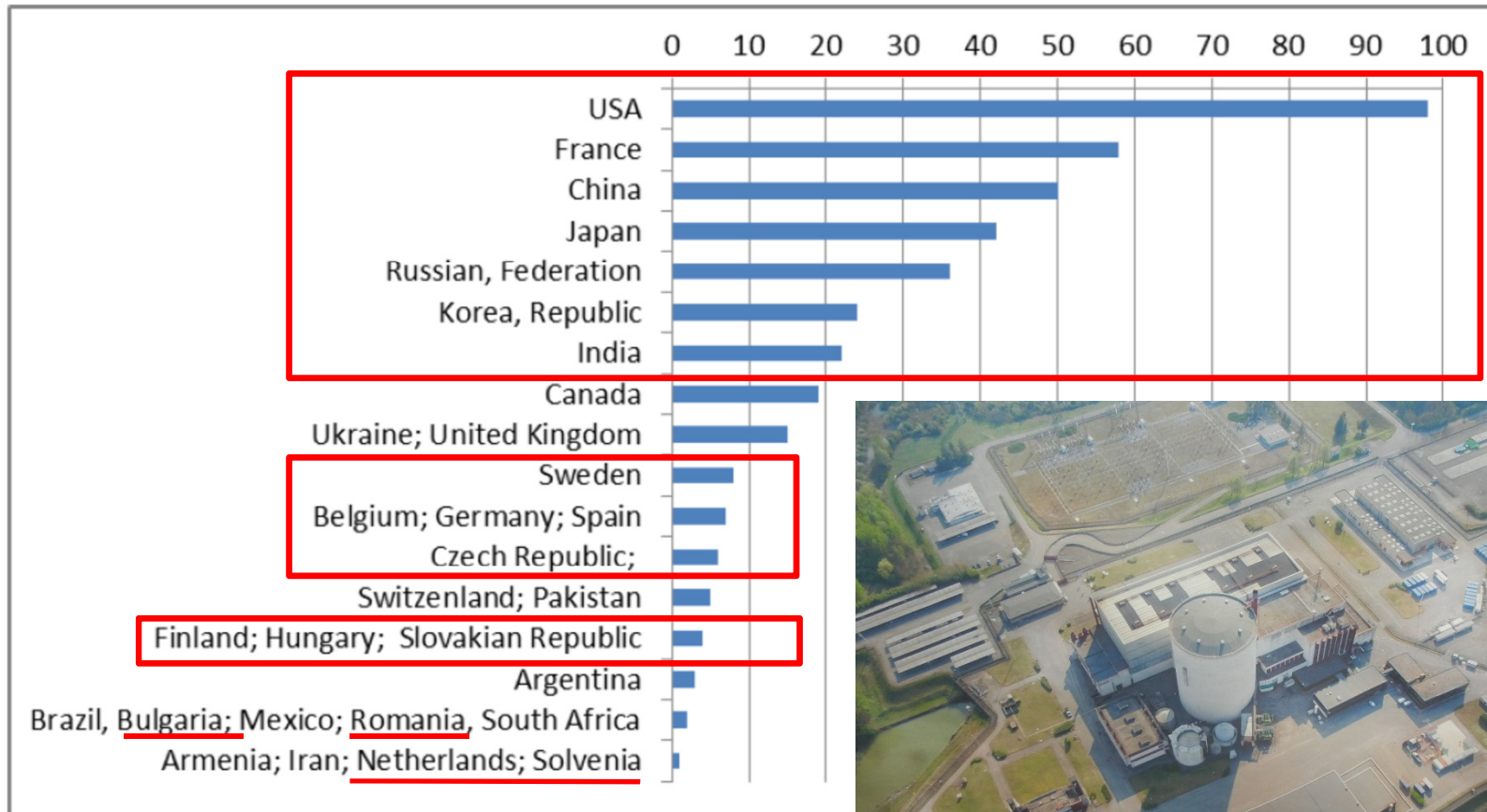
- **Divertor Test Tokamak**
  - alto 10 metri con raggio 5
  - 33 metri cubi di plasma
  - temperatura di 100 milioni di gradi
  - intensità di corrente di 6 MA
  - carico termico sui materiali fino a 50 MW per metro quadrato
- Il campo magnetico confinante sarà generato da 26 km di **cavi superconduttori** costruiti con niobio e stagno e 16 km con niobio e titanio. I superconduttori saranno alla temperatura di 4K, distanti solo poche decine di centimetri dal plasma a  $10^8\text{K}$
- Servirà per testare il componente «**divertore**» del futuro esperimento DEMO, il prototipo di reattore da fusione che rappresenta l'ultimo passo prima della commercializzazione della energia prodotta da fusione





## Nel frattempo...

- Nel breve e medio termine non si può prescindere dai caposaldi: risparmio energetico, efficienza energetica e diversificazione/ottimizzazione delle fonti;
- E' comunque significativo notare che i sette partner di ITER operano attualmente circa il 90% degli impianti nucleari a fissione in funzione (IAEA, dati 2018):



- 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...**

## Conclusioni

- Il panorama energetico mondiale richiede la scoperta e l'utilizzo di **nuove forme di energia**
- La **fusion 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
- La ricerca europea è leader mondiale nell'ambito della fusione, ospitando il **progetto ITER**
- **Il Consorzio RFX** contribuisce allo sviluppo di **tecnologie avanzate** per studi fusionistici anche collaborando con **realità industriali locali**



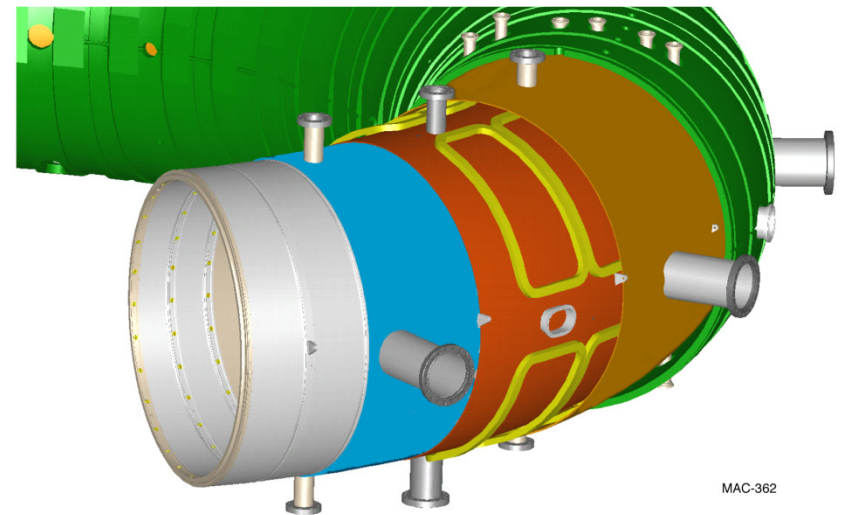
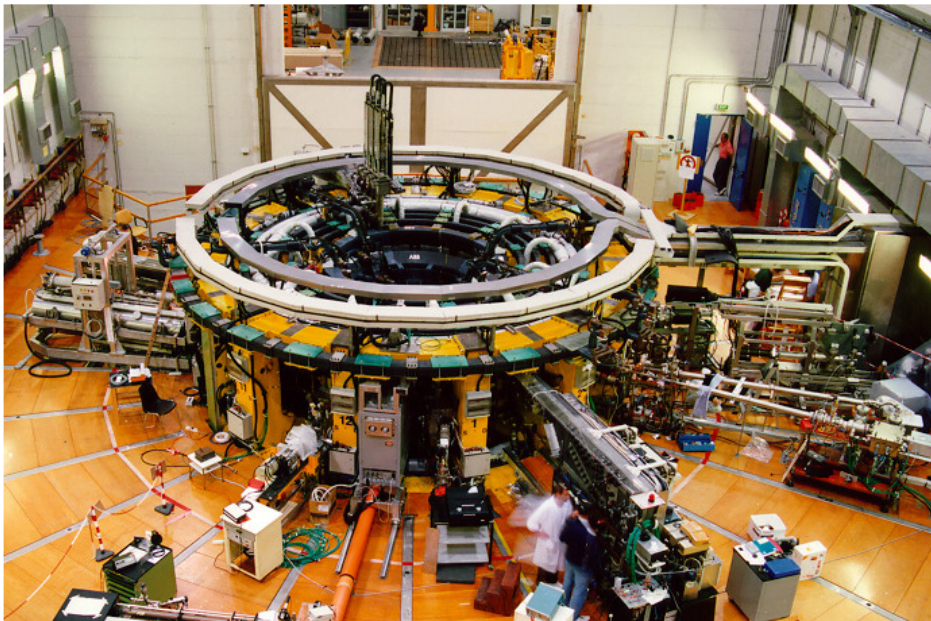


## RFX-mod, l'esperienza padovana

### Recentemente:

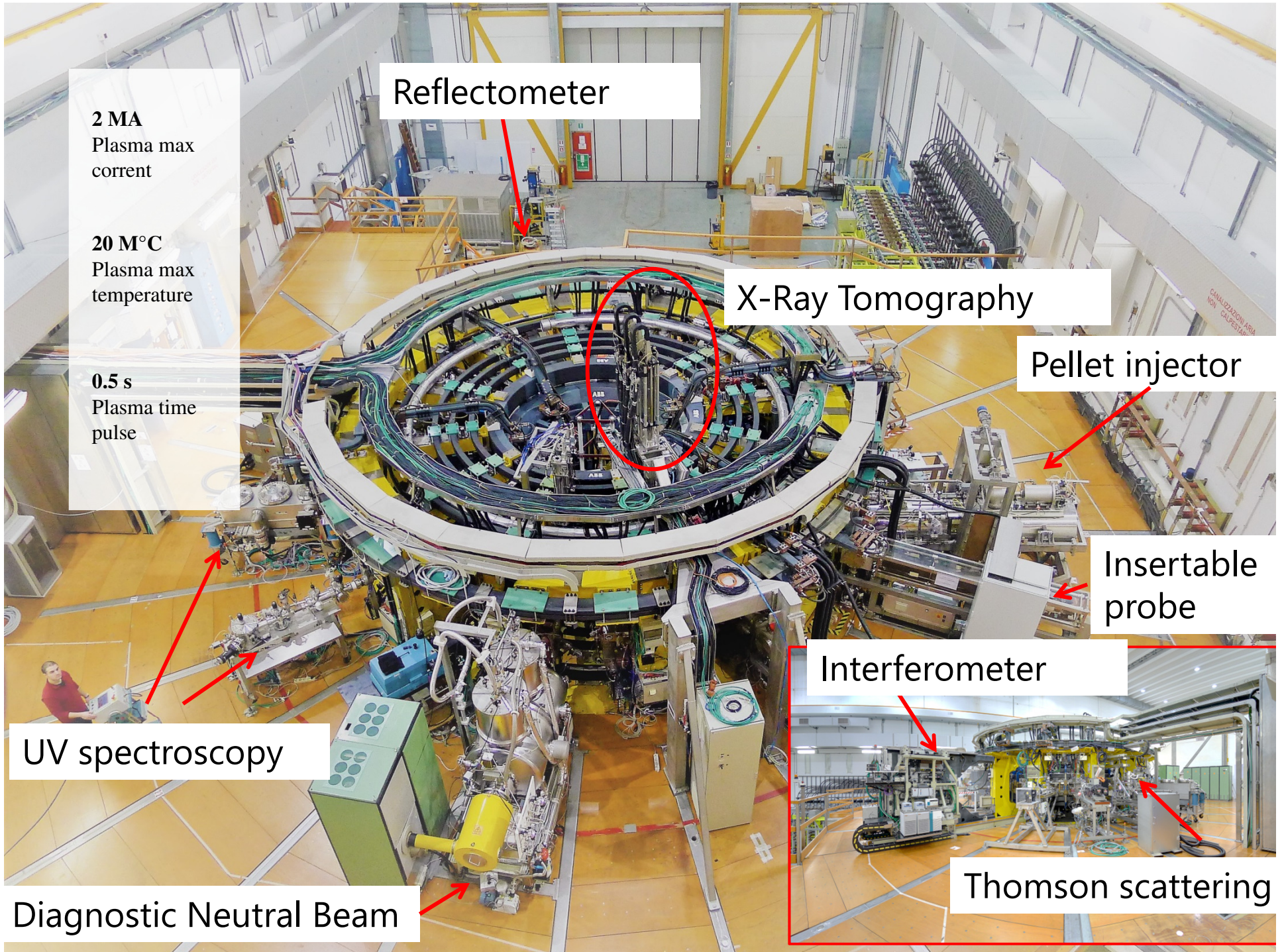
- plasma a  $T=17$  milioni di gradi °C in H
- dimostrata la possibilità di correggere gli errori di campo in maniera stazionaria

Raggio maggiore $R$	2 m
Raggio minore $a$	0.46 m
Max Corrente di plasma	2 MA
Max Campo magnetico toroidale applicato	0.7 T
Durata impulso	0.5 s



*Bobine gialle per controllo instabilità magnetoidrodinamiche*





2 MA  
Plasma max  
current

20 M°C  
Plasma max  
temperature

0.5 s  
Plasma time  
pulse

Reflectometer

X-Ray Tomography

Pellet injector

Insertable  
probe

UV spectroscopy

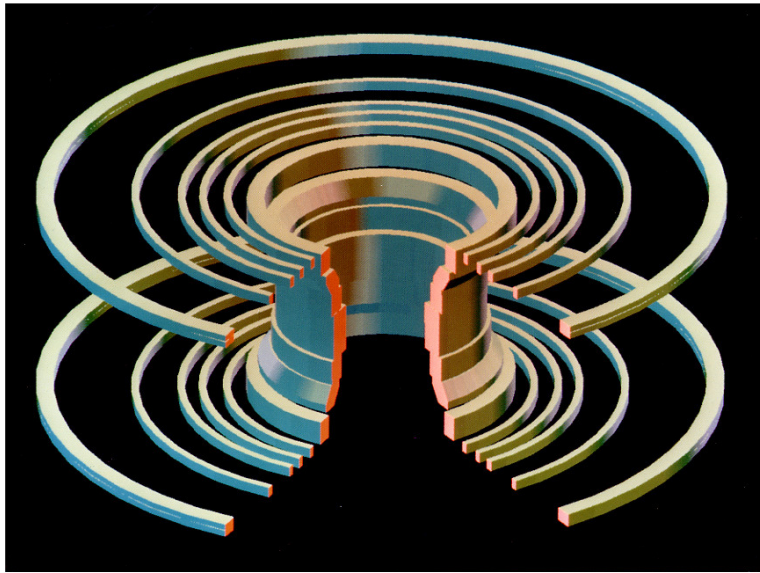
Interferometer

Diagnostic Neutral Beam

Thomson scattering

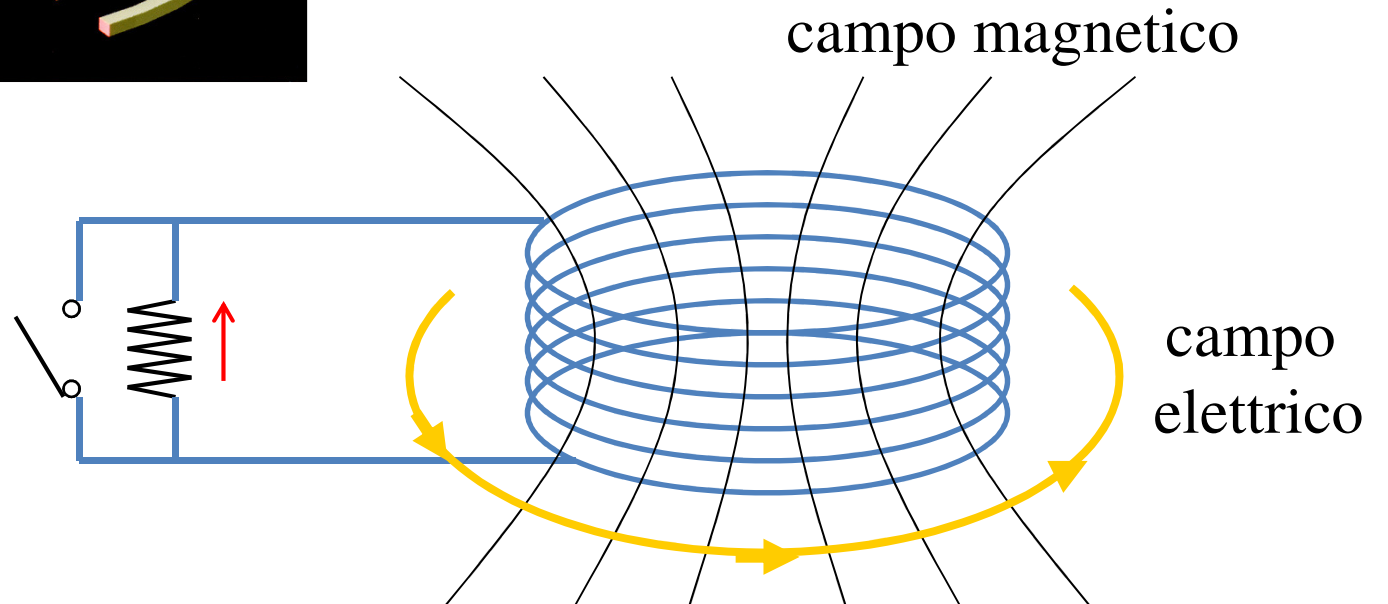


# RFX-mod: Avvolgimento Magnetizzante



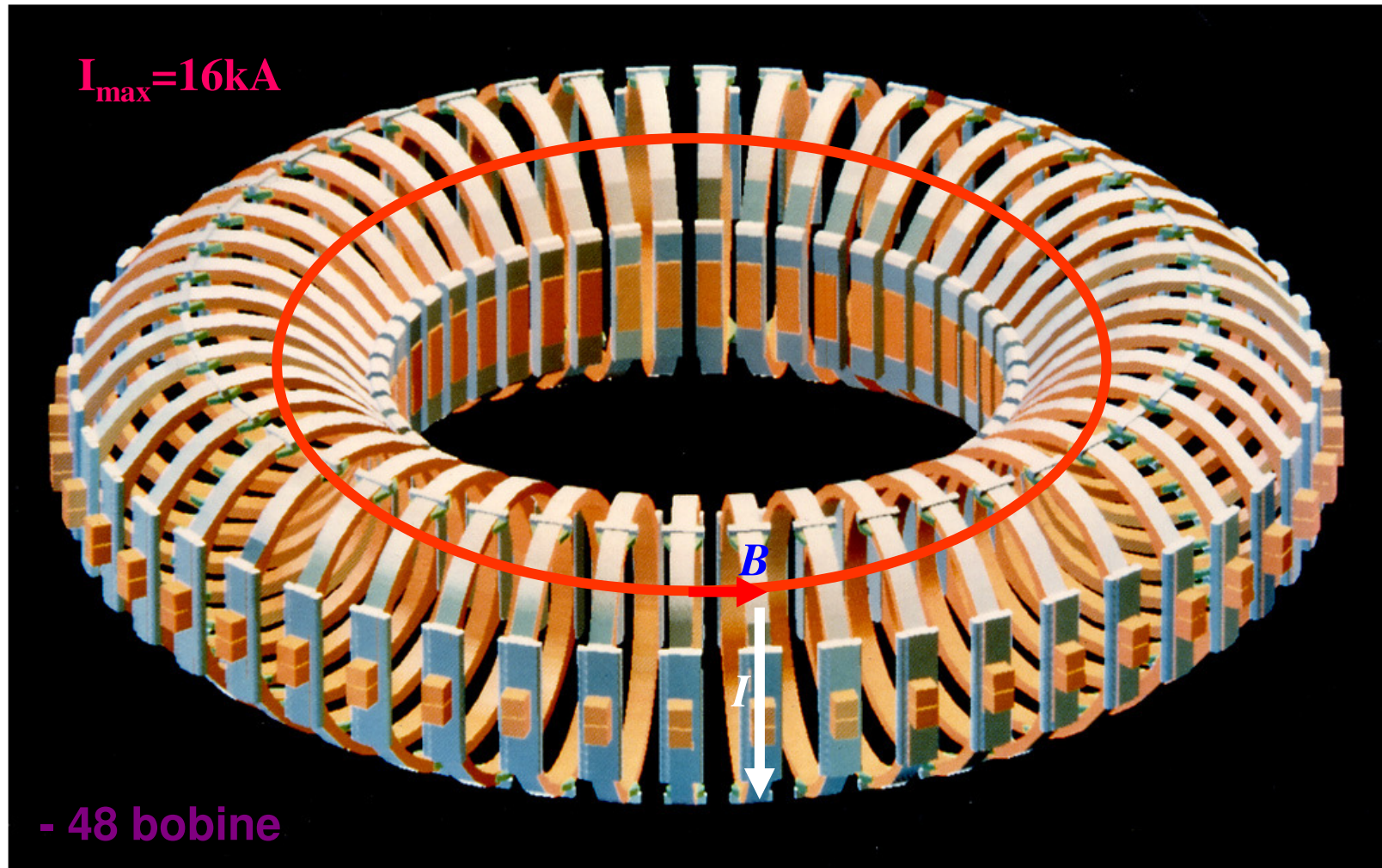
$I_{\max} = 50 \text{ kA}$

Legge di FARADAY:  
Variazione  
FLUSSO MAGNETICO  
→ f.e.m indotta

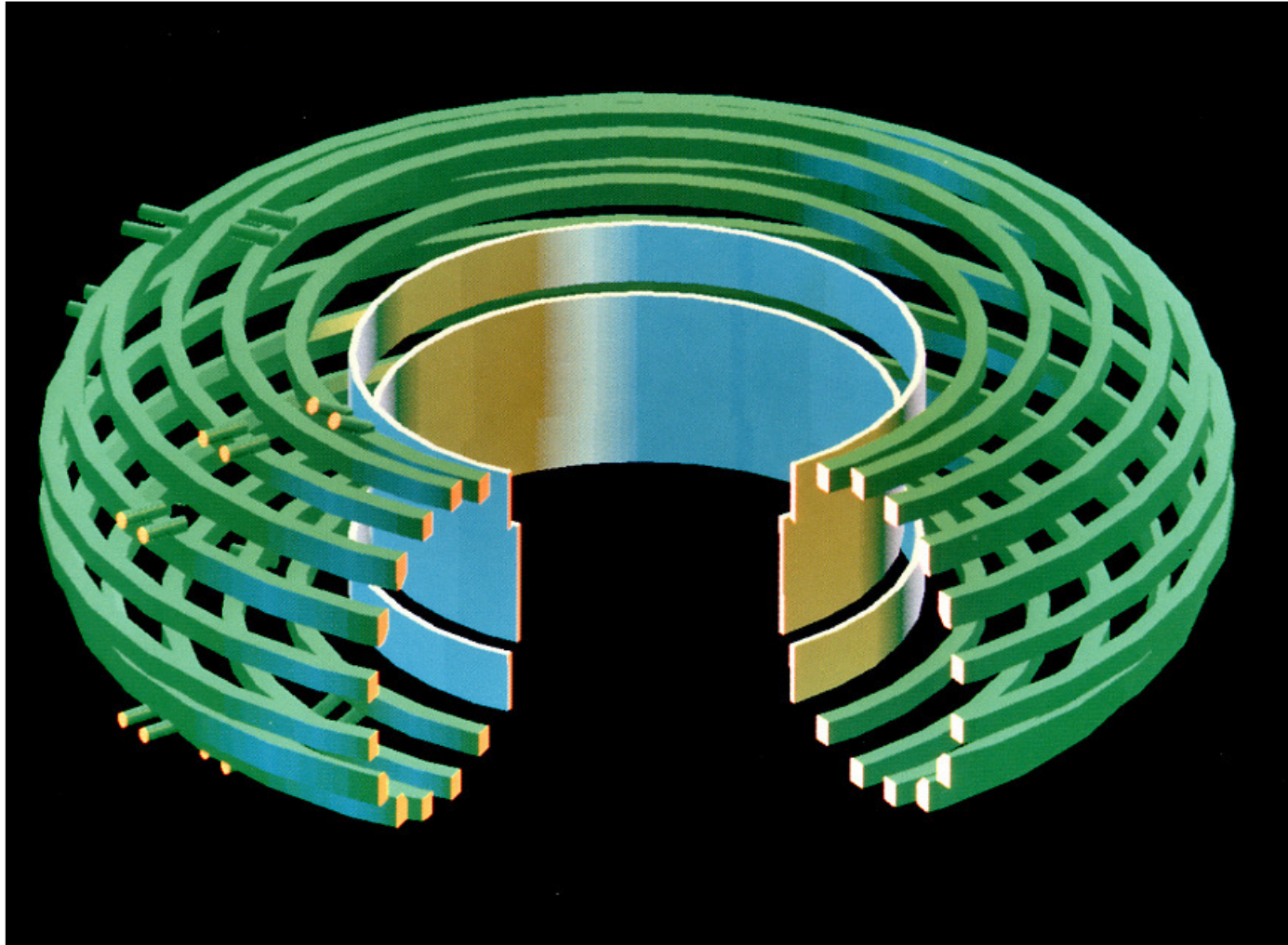




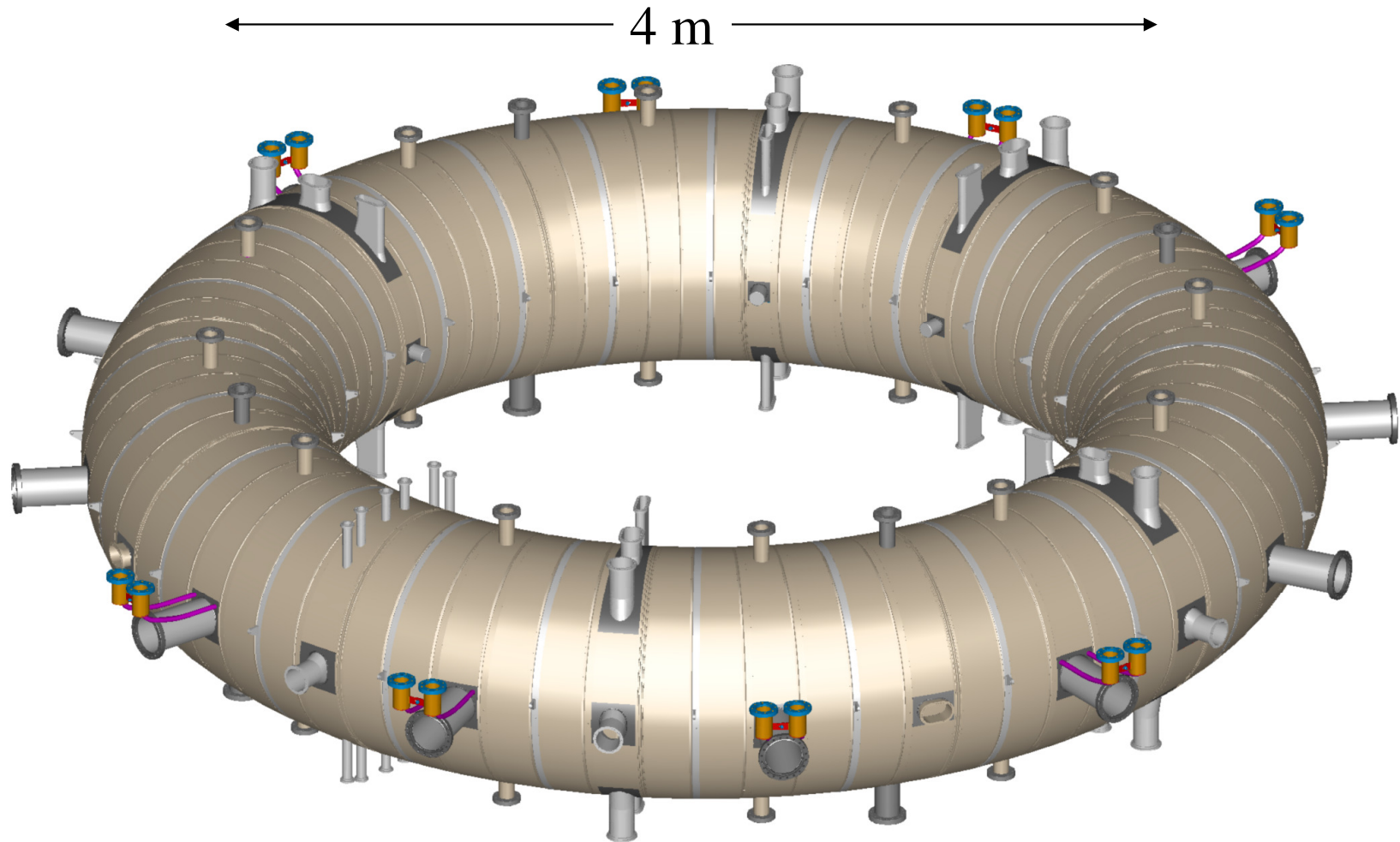
# RFX-mod: Avvolgimento Toroidale



# RFX-mod: Field shaping coils (vertical field)



## RFX-mod: Camera da Vuoto



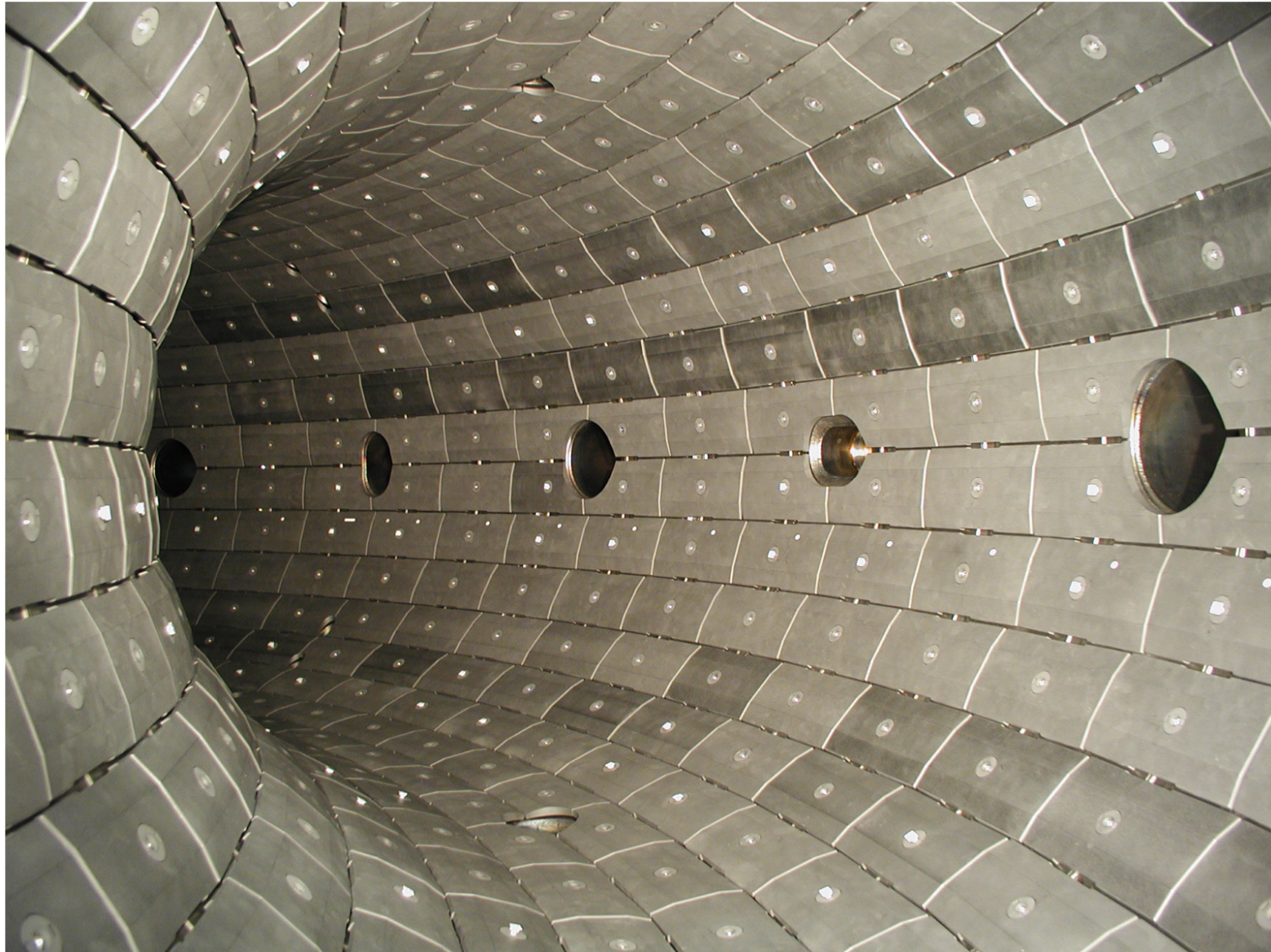
- acciaio

- spessore: 30mm

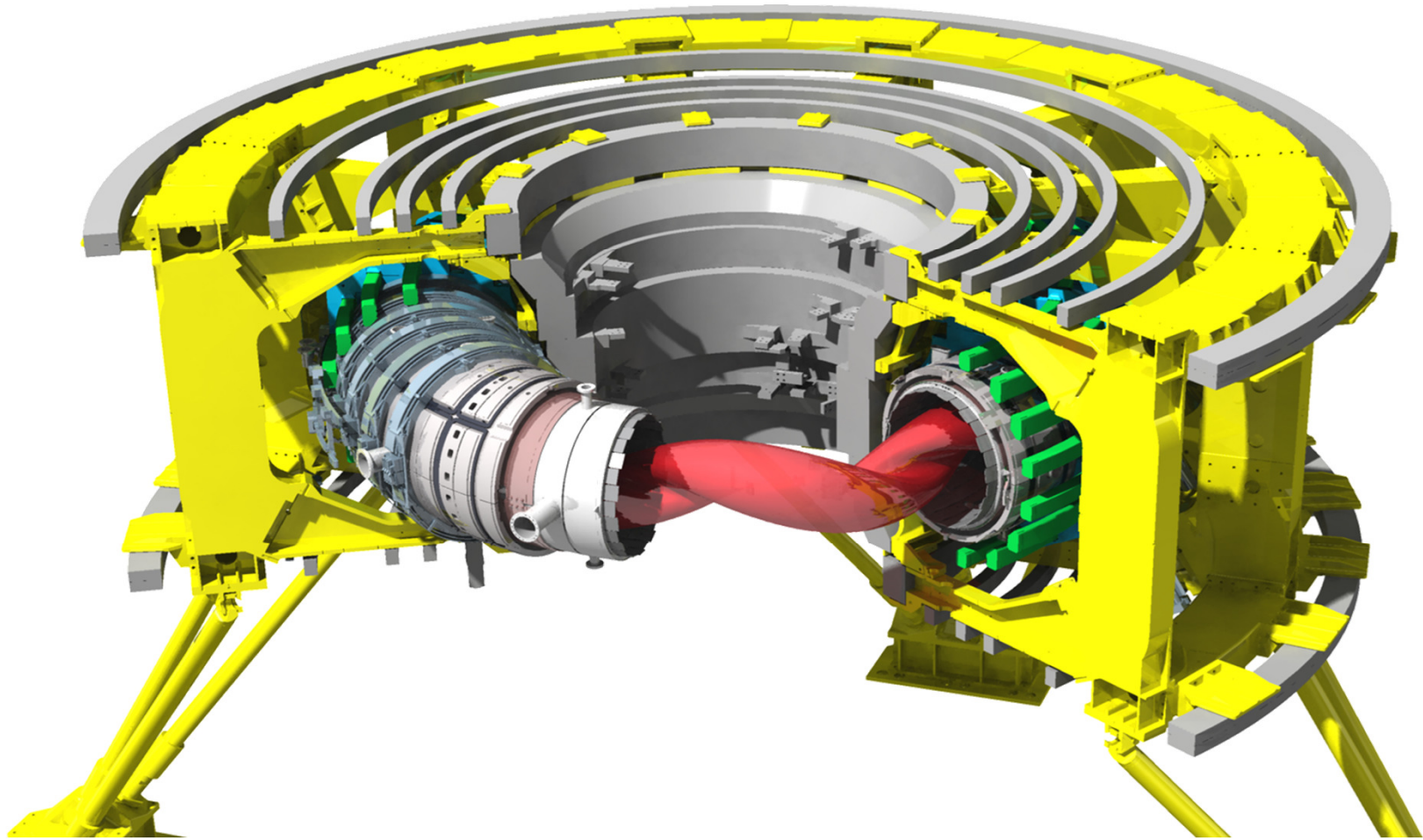
- aperture pompaggio: 150mm



## RFX-mod: prima parete



# RFX-mod





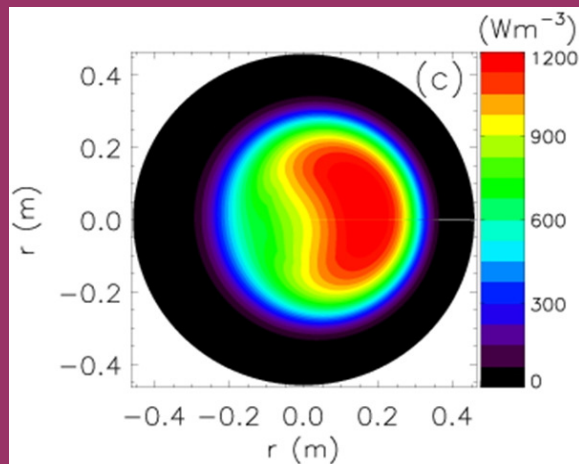
# The RFX results

## Solid base for an intense physics experimental program

Very encouraging results on the MHD control achievement and plasma parameter optimization

through the application of specific operation conditions:

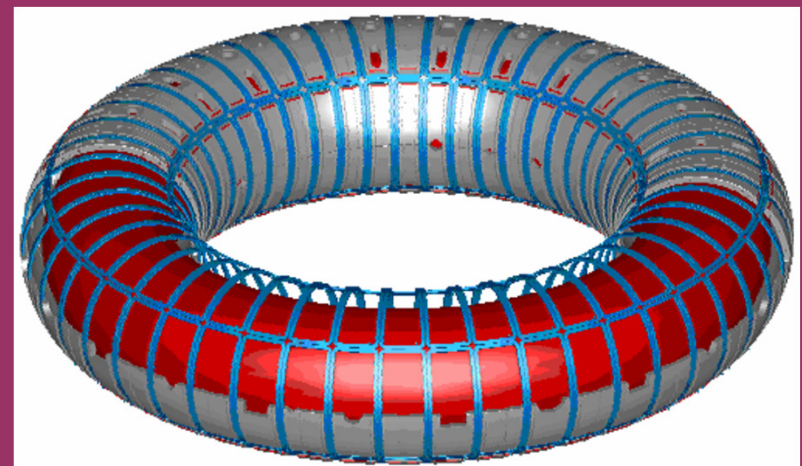
- \* advanced MHD real time control system using flexible MHD active control system made up of 48x4 (192) independently fed coils (full coverage )
- \* treatment of the graphite first wall (Boronization and Lithization) for density control



Tomographic image of a magnetic island in the RFX plasma



Article on the helical configuration obtained in RFX published on Nature Physics

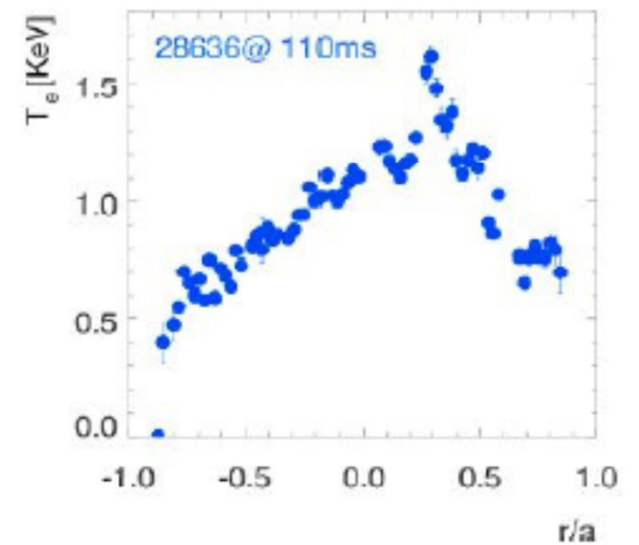
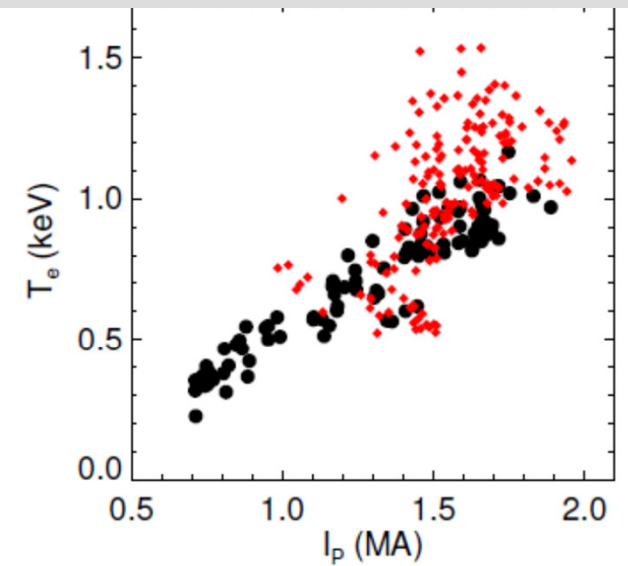
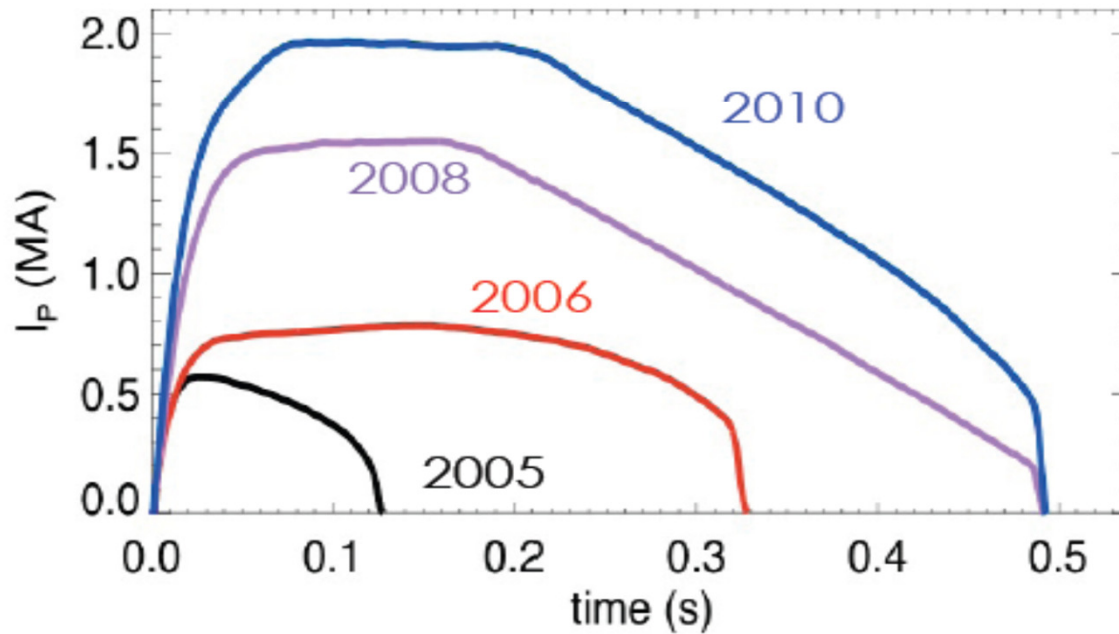


MHD real time control system



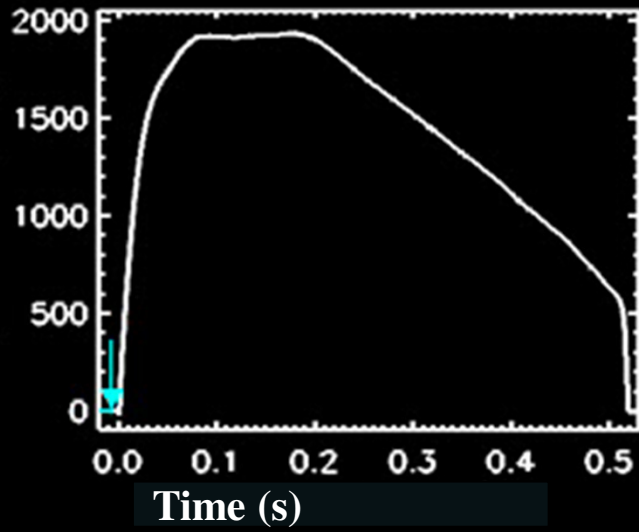
# Results on RFX-mod

RFX-mod: 2MA design value achieved

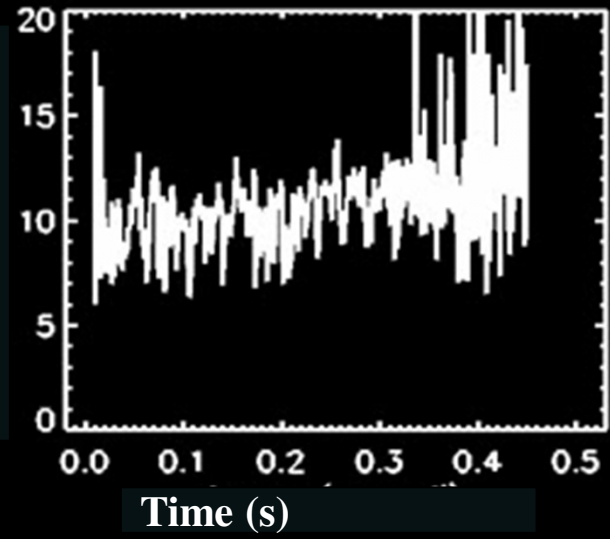


# RFX pulse

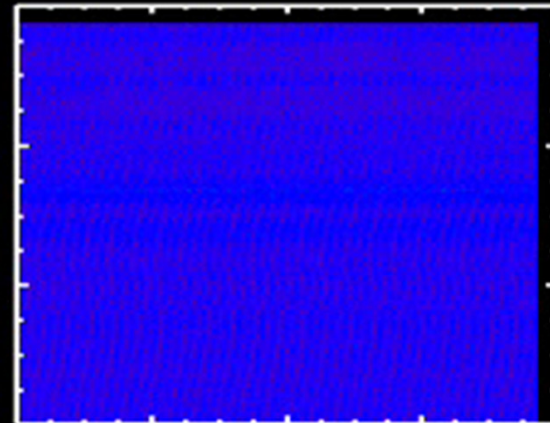
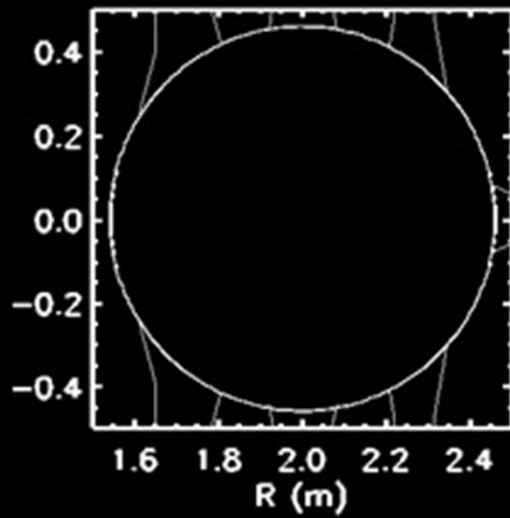
Plasma current (kA)



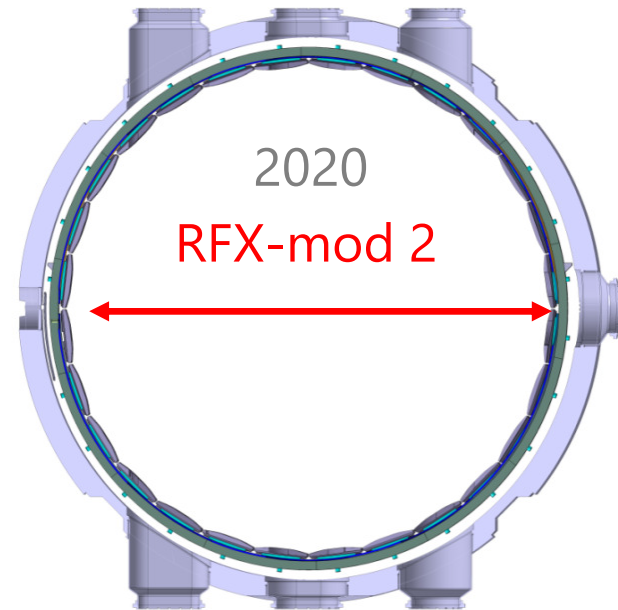
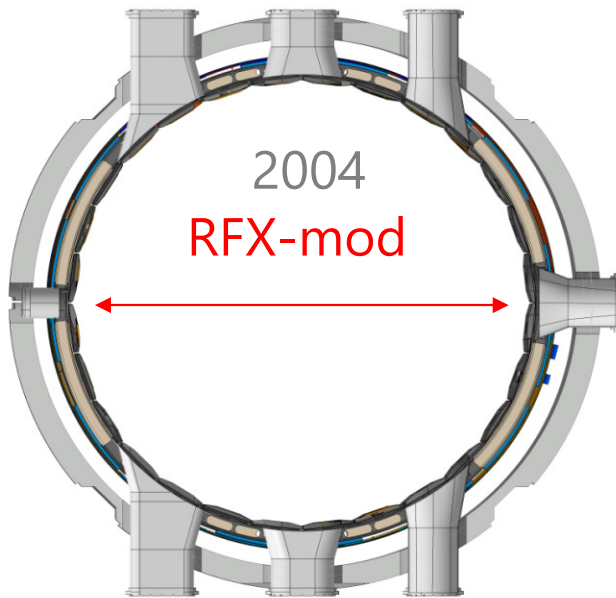
Temperature (M°C)



z (m)



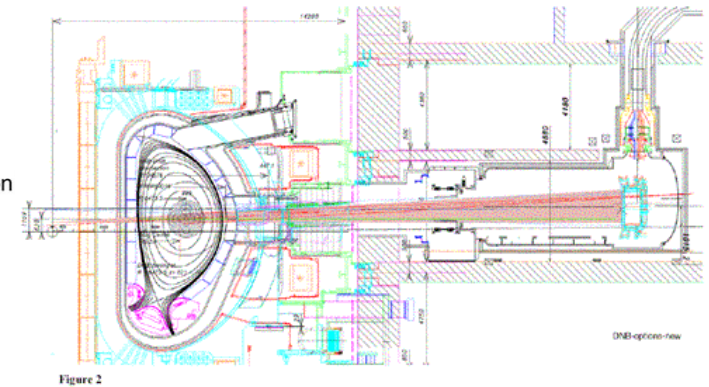
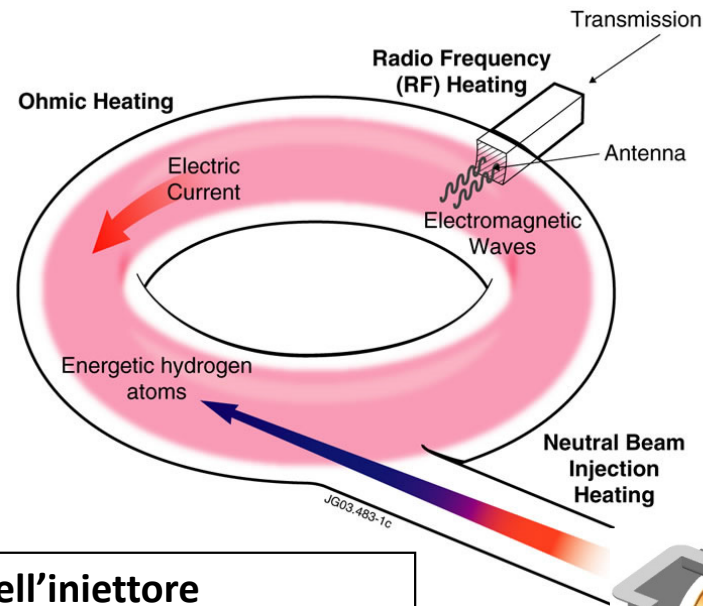
# MIAIVO project





# L'iniettore di neutri per ITER

L'iniettore di neutri da ioni negativi genera fasci di particelle neutre per riscaldare il plasma e per modificare la corrente di plasma di ITER con **impulsi di durata fino a 3600 s.**



**Il progetto e lo sviluppo dell'iniettore di neutri è una delle più grandi sfide ingegneristiche per la costruzione di ITER**

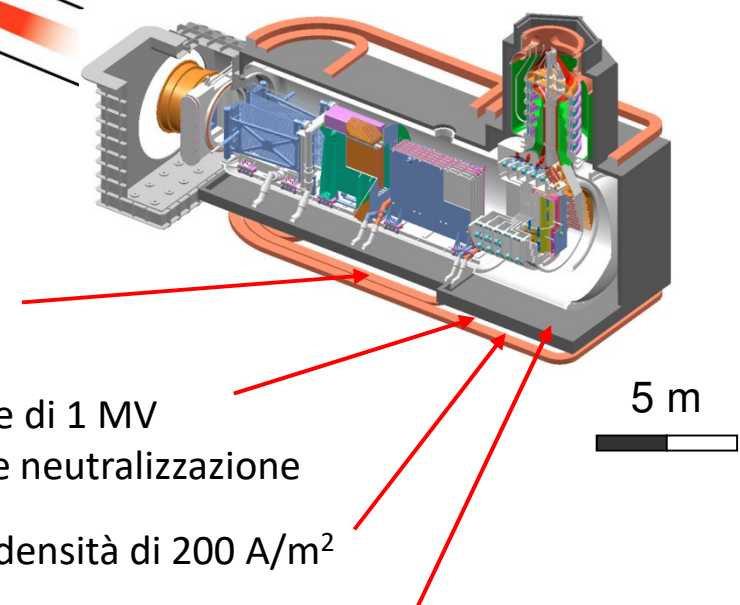
Il fascio è neutralizzato ( $D^0$ ) per penetrare nel plasma erogando una potenza di circa 16 MW

Il fascio di ioni è accelerato con salto di tensione di 1 MV

L'energia di 1 MeV impone ioni negativi per un'efficiente neutralizzazione

Estratti con intensità di 40 A e densità di 200 A/m<sup>2</sup>

Ioni negativi  $D^-$  sono prodotti all'interno di una sorgente







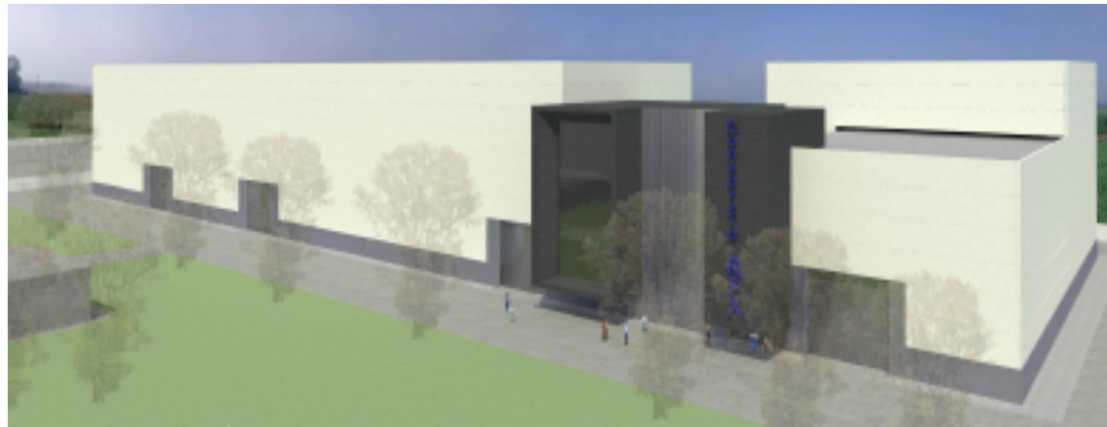
# MITICA and SPIDER experiments



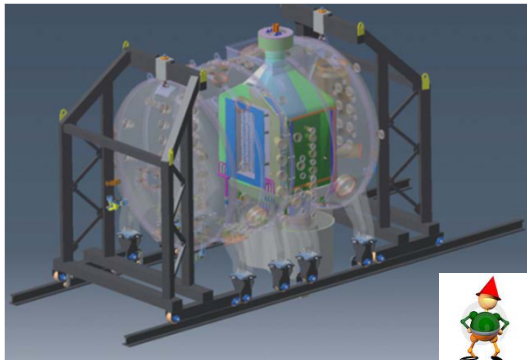


# PRIMA

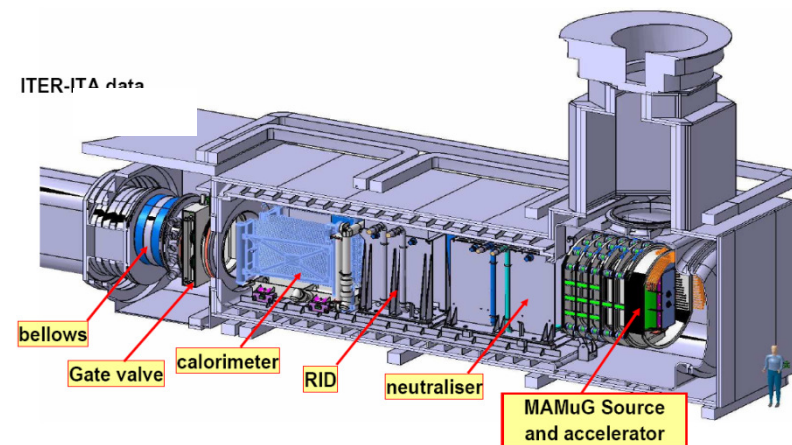
Padova Research on Iter Megavolt Accelerator



Two experiments will be housed in PRIMA



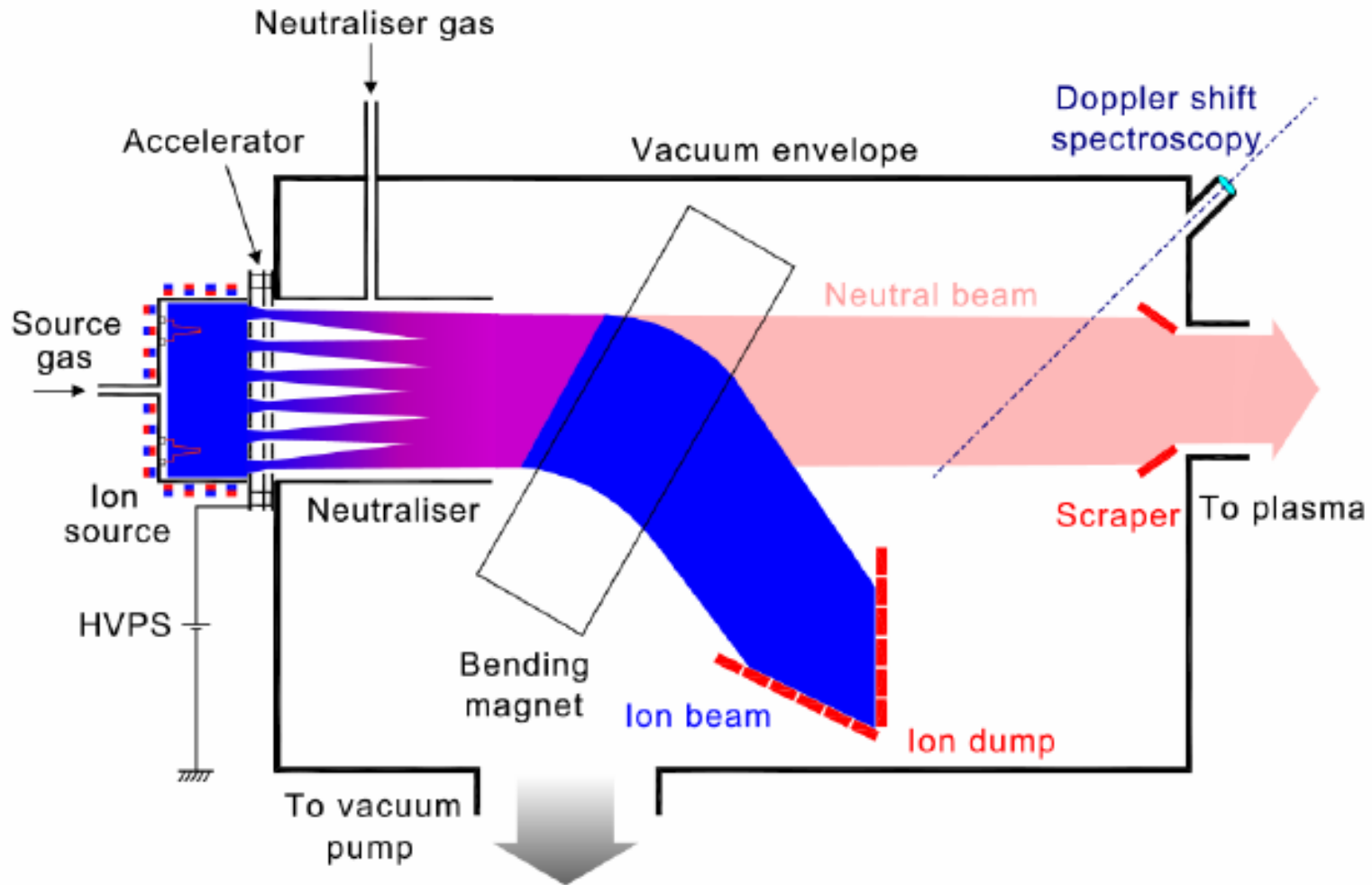
**SPIDER**  
Source for Production of Ion  
of Deuterium Extracted  
from Rf plasma



**MITICA**  
Megavolt ITER Injector  
&  
Concept Advancement

# Neutral beam injection principle

## *NBI Principle*



## Contatti e bibliografia

- Consorzio RFX, corso Stati Uniti, 4 35127 Padova  
tel 049-8295000

### Bibliografia e approfondimenti:

- [www.igi.cnr.it](http://www.igi.cnr.it) (Consorzio RFX)
- [www.iaea.org](http://www.iaea.org)
- [www.iter.org](http://www.iter.org)

Le immagini mostrate in questa presentazione sono di proprietà dei rispettivi autori e sono usate a solo scopo informativo, non a fini di lucro.