

***Imbrigliare l'energia delle stelle***  
***Prospettive della fusione nucleare  
come fonte energetica***

***Giuseppe Mazzitelli***  
***ENEA***

***Convegno “ETICA,MORALE,AMBIENTE “***

***Chieti 11 Aprile 2008***



# Portare l'energia delle stelle sulla terra

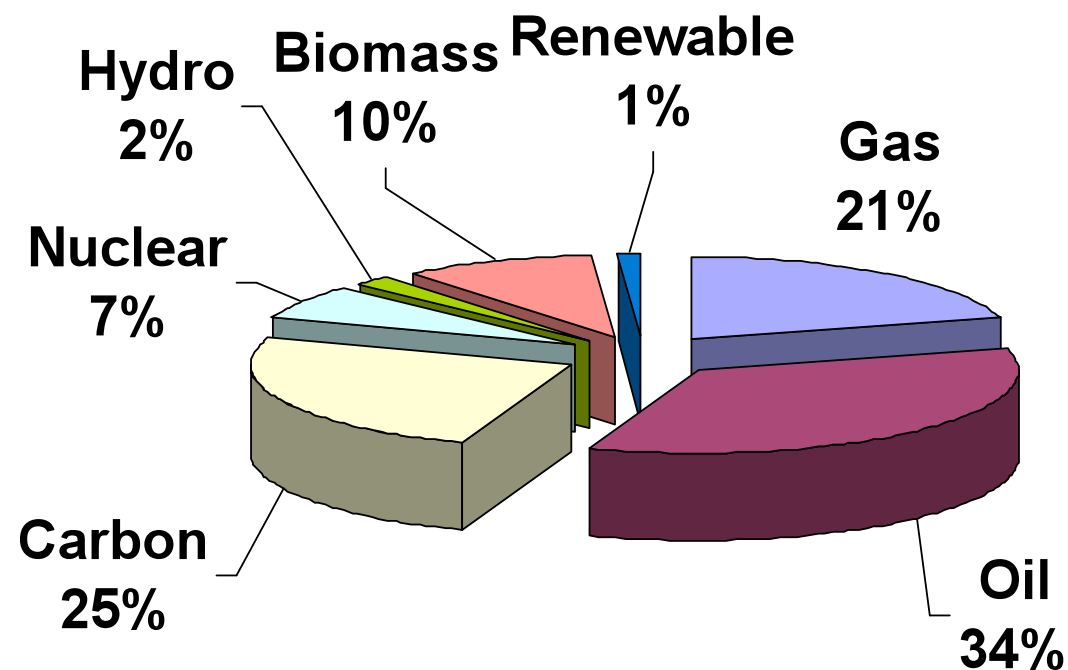
## Perché ?

## Fonti Energetiche :

- **Solare**
- **Idroelettrica (evaporazione)**
- **Eolica (riscaldamento atmosfera)**
- **Combustibili fossili, biomasse (fotosintesi)**

**hanno origine da**  
**Reazioni di Fusione**

# Ripartizione delle fonti energetiche

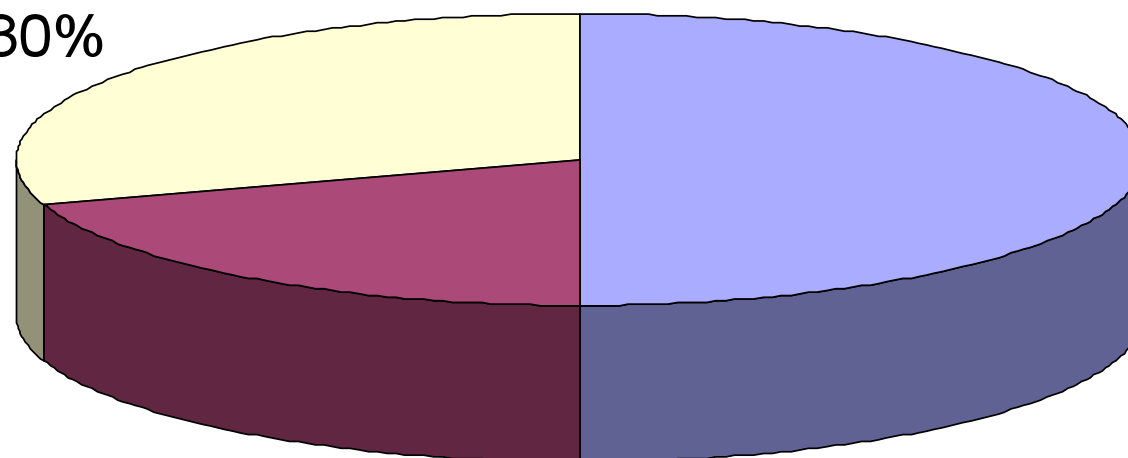


**Dati Mondiali 2005**

# Ripartizione delle fonti energetiche

Altro

30%



**GAS**

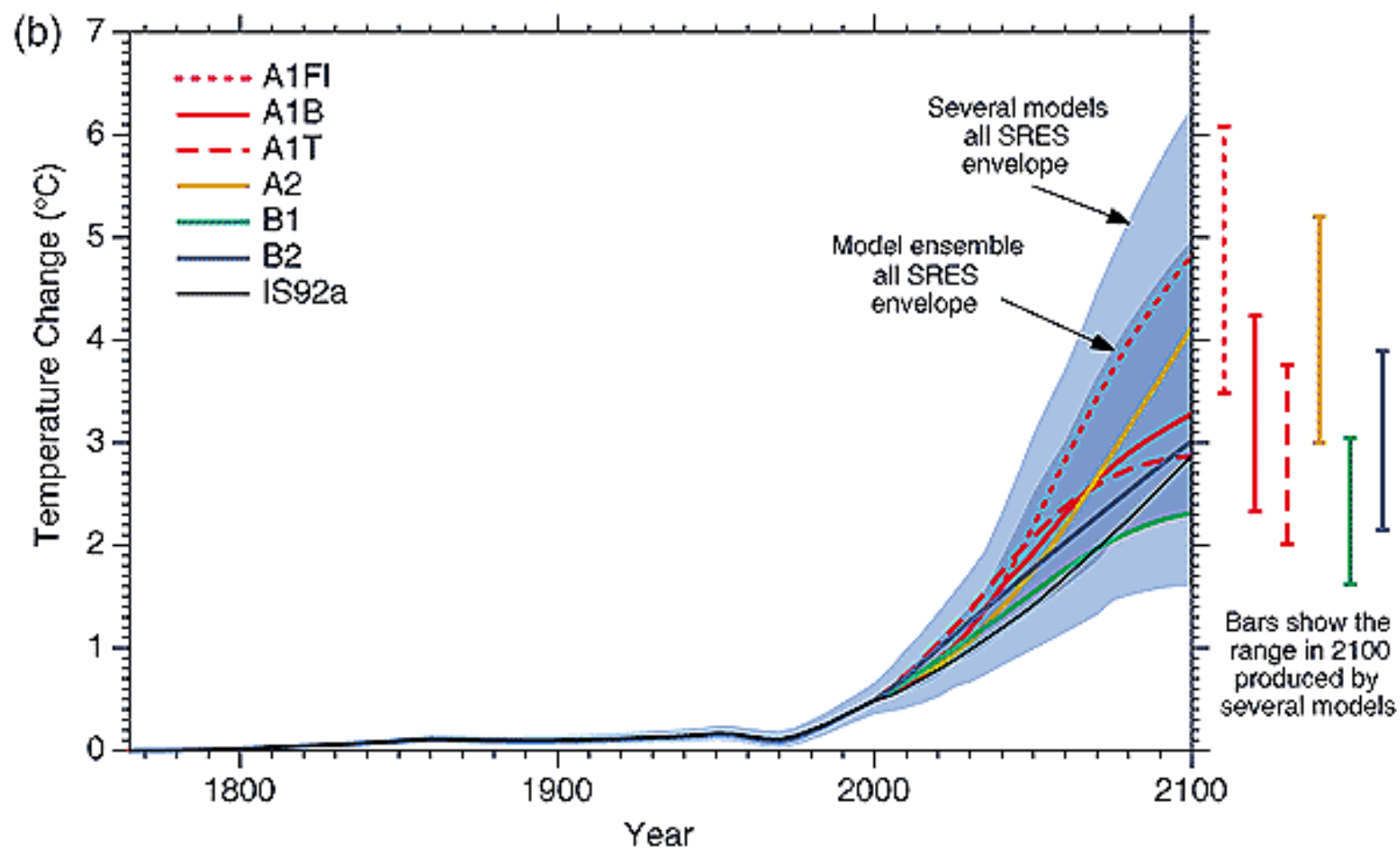
50%

20%

**IMPORTAZIONE**

**Dati Italia 2007**

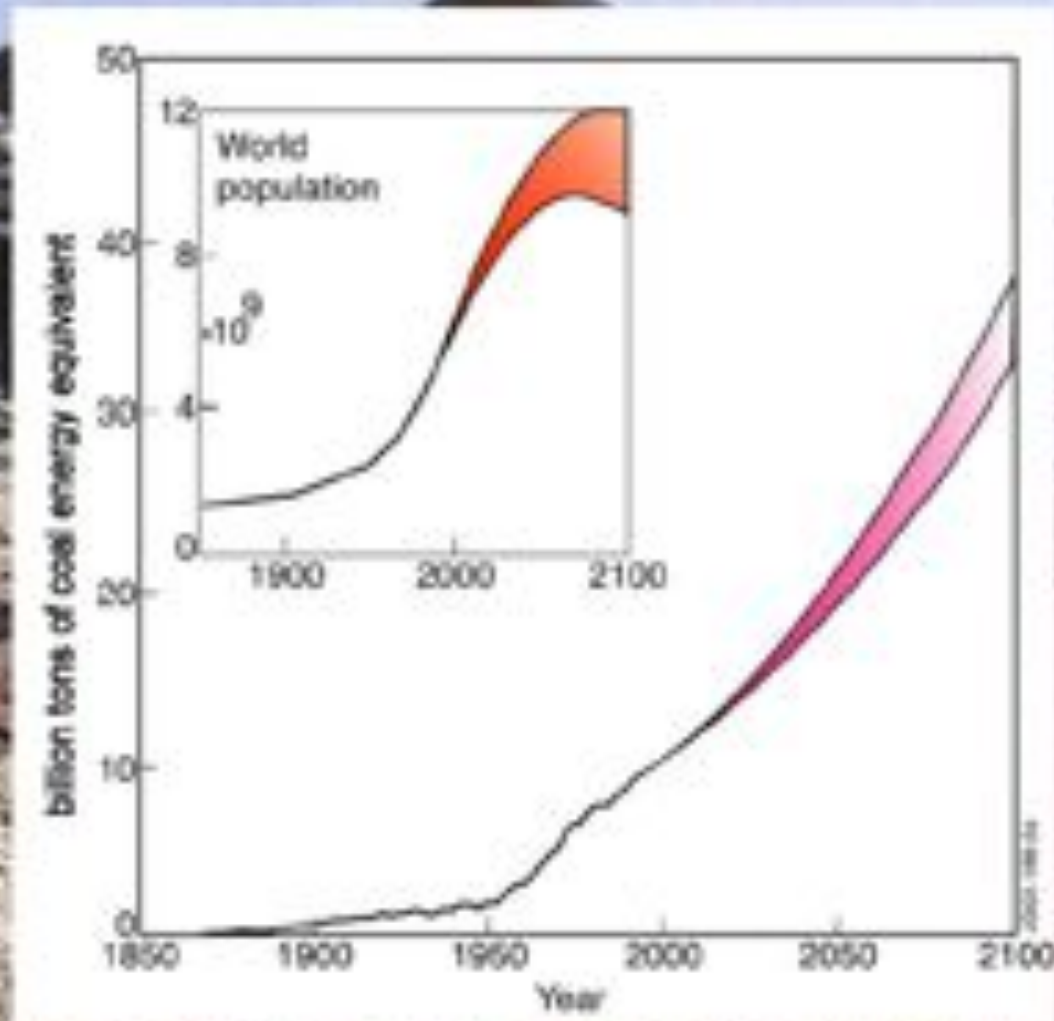
# Cambiamenti climatici



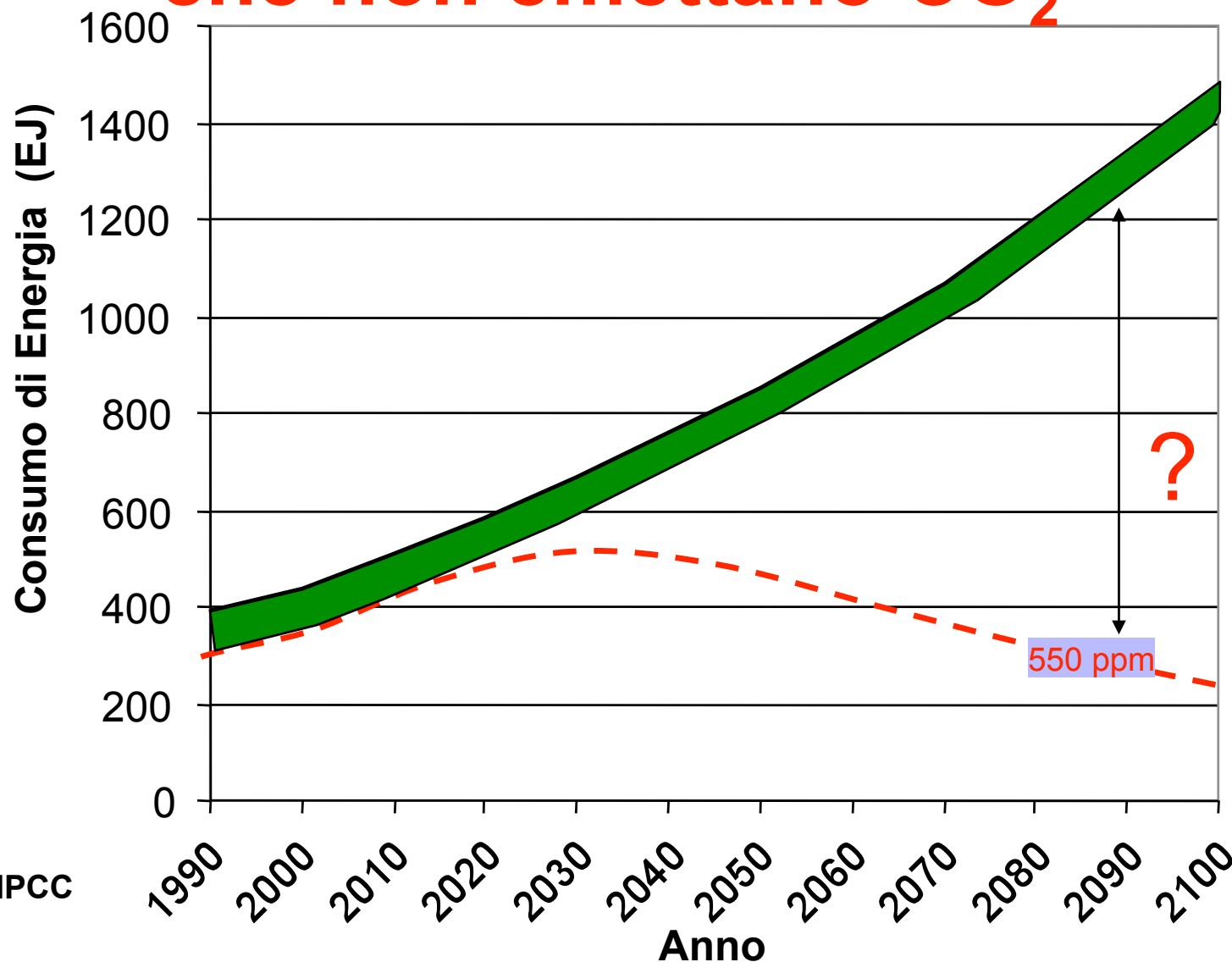
# Crescita Mondiale della Popolazione

**La popolazione e  
La domanda di  
energia stanno  
crescendo  
rapidamente**

**Le previsioni  
indicano che  
continueranno a  
crescere**



# Abbiamo bisogno di fonti energetiche che non emettano CO<sub>2</sub>



Source: VN, IPCC

G. Mazzitelli

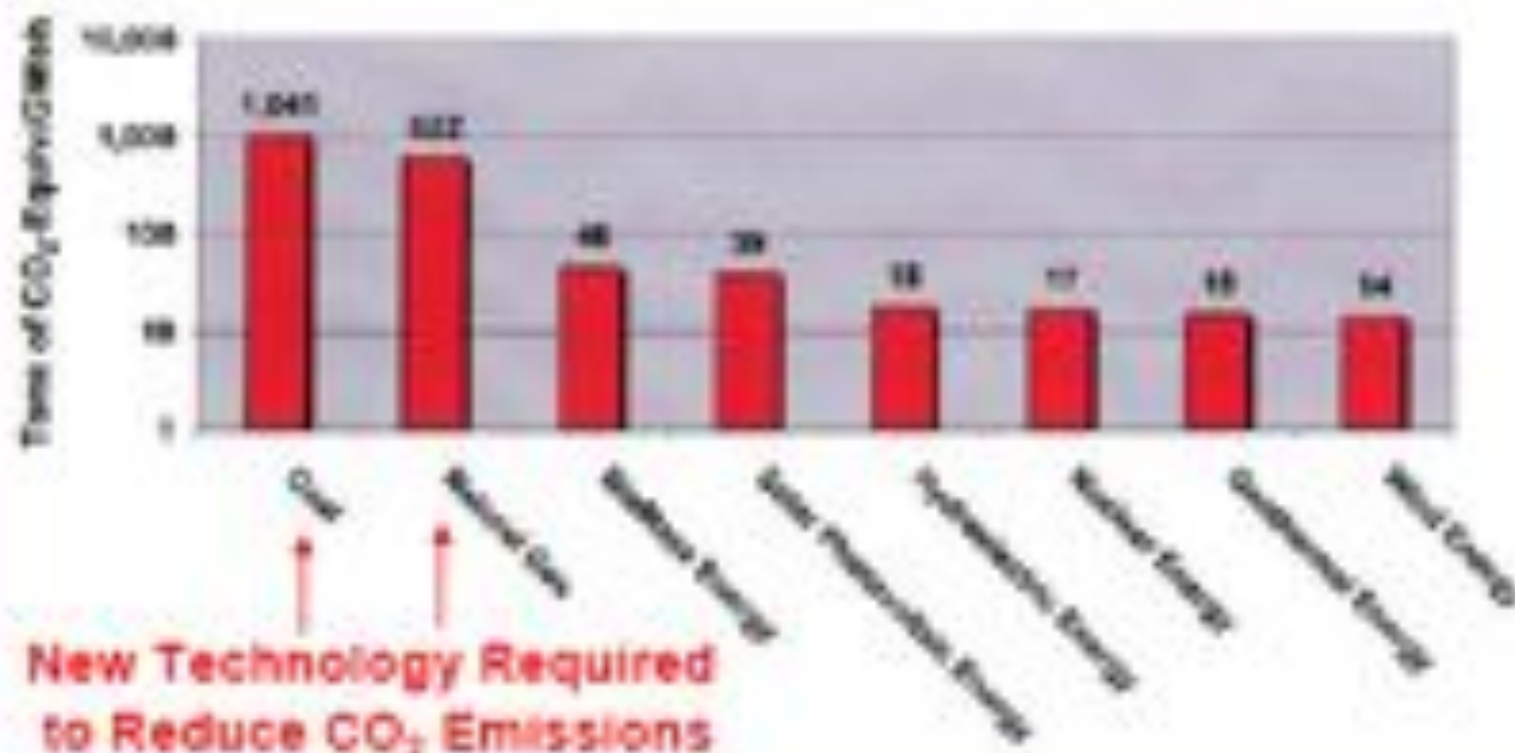
Chieti 11/04/08 8

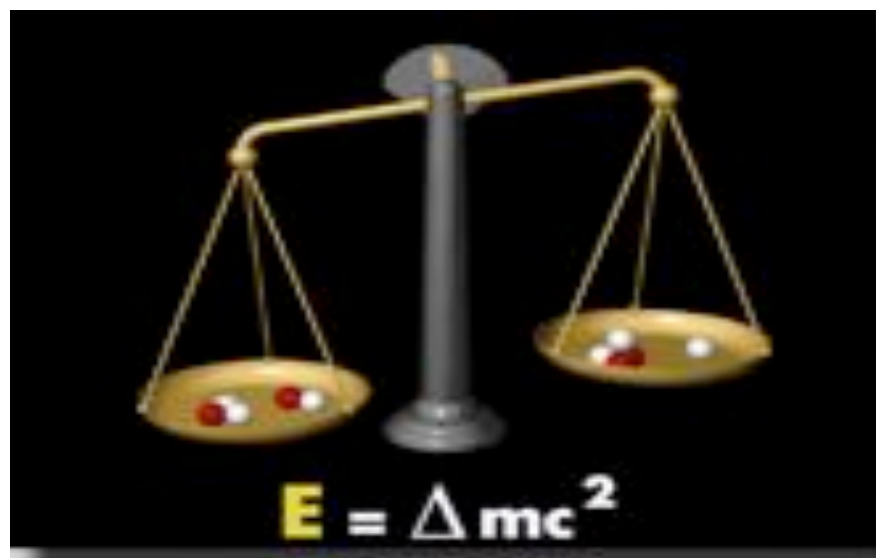




## Economics & Environmental Issues (Cont'd)

CO<sub>2</sub> Generated After Producing  
One GigaWatt-Hour of Electricity By Indicated  
Energy Source (U.S. EIA)

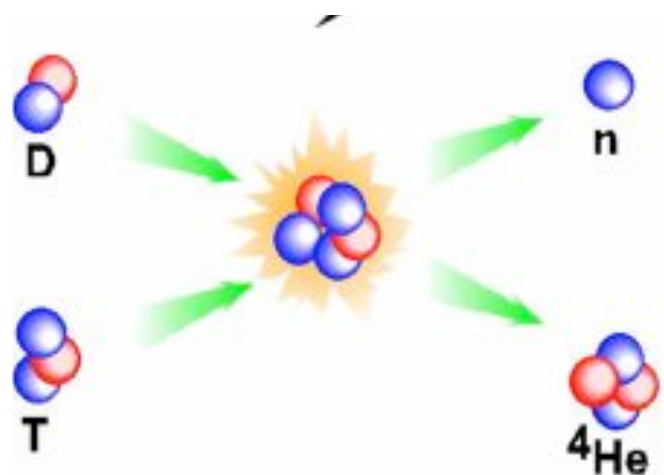




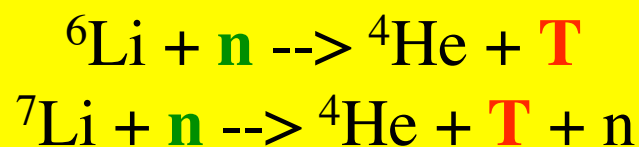
## La reazione di Fusione

La **fusione nucleare** é il processo nel quale nuclei di elementi leggeri si fondono insieme per formare nuclei più pesanti con un difetto di massa che viene trasformata in energia secondo la legge di Einstein  **$E=mc^2$**

La reazione di fusione su cui sono attualmente concentrati gli studi è:



Il **Deuterio** è contenuto nell'acqua  
Il **Trizio** si produce dal Litio con la  
Reazione





## I Vantaggi della fusione

- E' una fonte di energia che utilizza combustibili che sono abbondanti ed ampiamente disponibili in tutto il mondo.
- Il Deuterio contenuto nell'acqua di mare é sufficiente per trecentomilamiloni di anni
- Il litio, abbondante sulla terra e negli oceani, é sufficiente per circa 2000 anni

## I Vantaggi della fusione (continua)

- La fusione non produce gas responsabili dell'effetto serra ( $\text{CO}_2$ ) o le piogge acide ( $\text{SO}_2$ ,  $\text{NO}_2$ )
- I reattori a fusione sono intrinsecamente sicuri: eventi tipo Cernobyl non sono fisicamente possibili e anche nel caso di maggior incidente non sono necessarie misure di evacuazione per la popolazione

## I Vantaggi della fusione (continua)

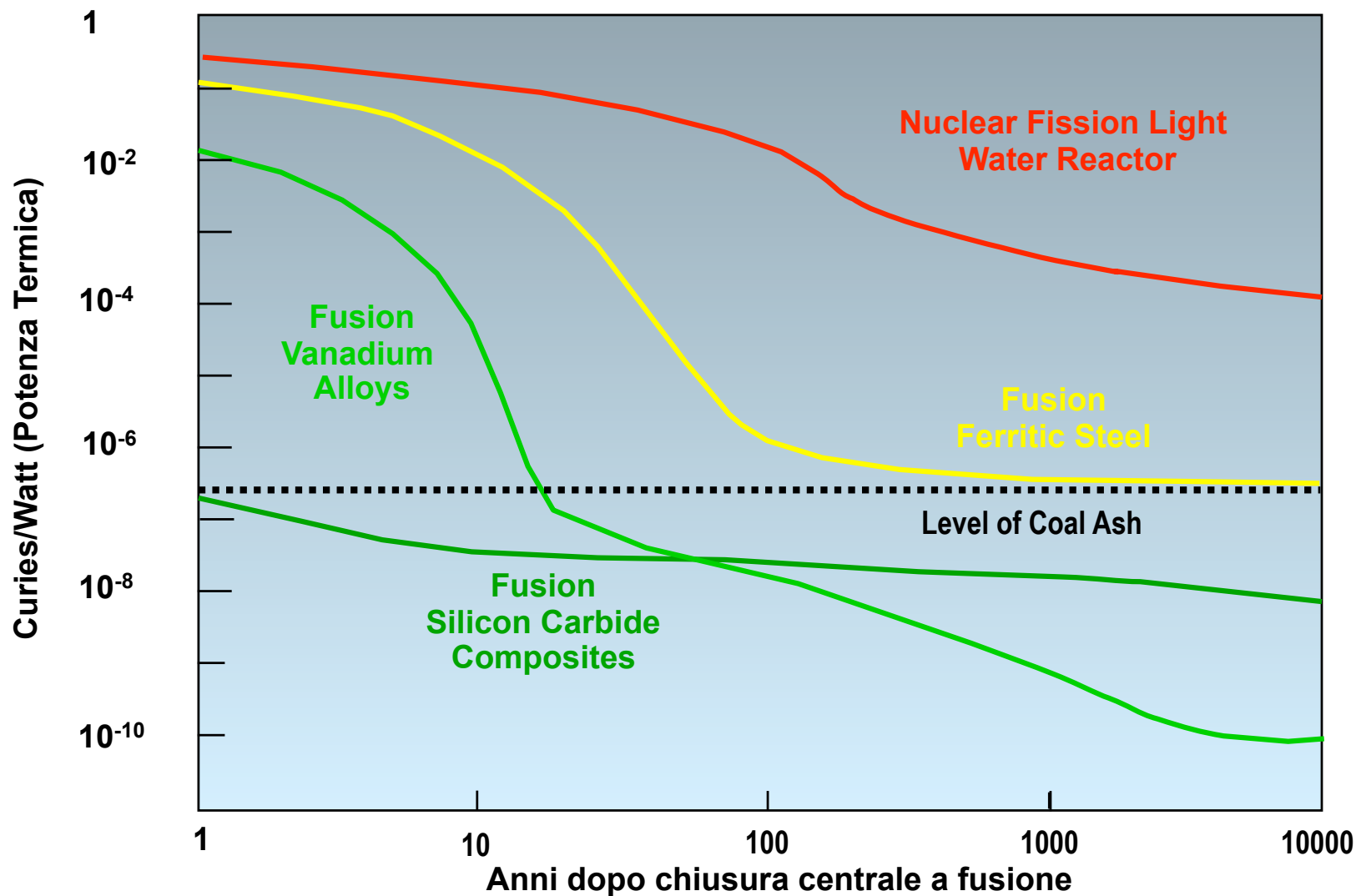
- I combustibili non sono interessati da problemi di proliferazione nucleare
- Le reazioni di fusione non producono scorie radioattive però...



## I Vantaggi della fusione (continua)

- ... la struttura della macchina a causa dei neutroni prodotti diventerà radioattiva. Questo effetto può essere minimizzato con una accurata scelta di materiali a bassa attivazione che, dopo un tempo inferiore a cento anni, non costituiranno più un pericolo. In questo modo le future generazioni non erediteranno scorie che devono essere depositate in luoghi sicuri per secoli.

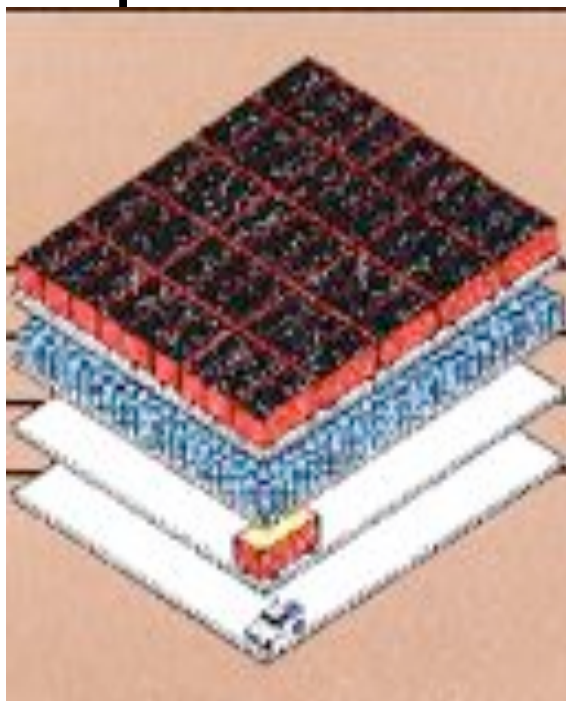
# Basso Impatto sull'ambiente





## I Vantaggi della fusione (continua)

- Le reazioni di fusione liberano una quantità enorme di energia



Carbone 2.000.0000 Tonnellate

Petrolio 1.600.000 Tonnellate

Ossido di Uranio 30 Tonnellate

Deuterio 0.25 Tonnellate

## I Vantaggi della fusione (continua)

10g D da 500 l di acqua + 15g di T

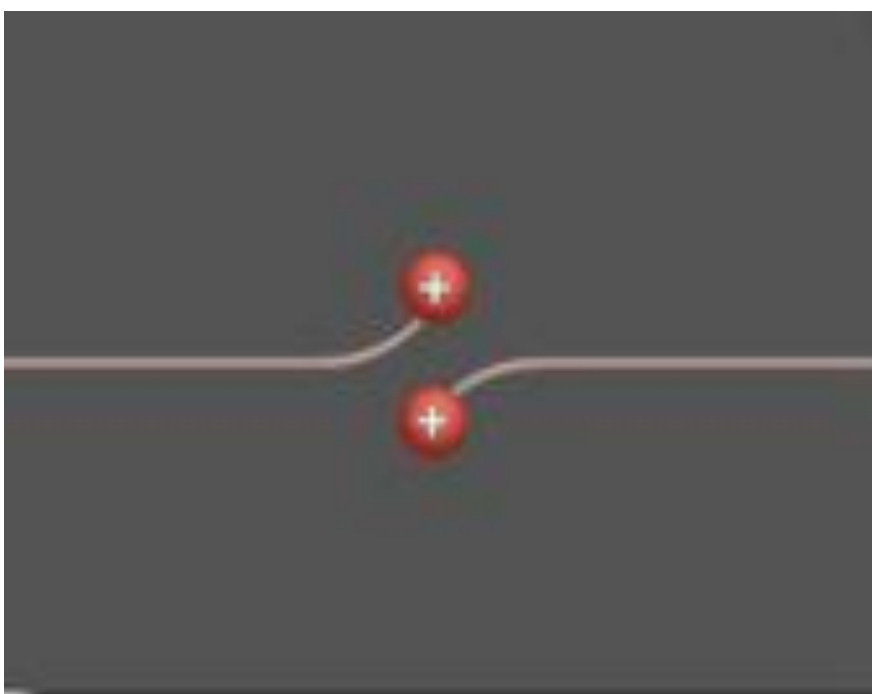
Forniscono ad un cittadino europeo  
l'elettricità di cui ha bisogno durante **tutta**  
la sua vita

e

può ancora bere 500 litri di acqua!!!

## Gli **Svantaggi** della fusione

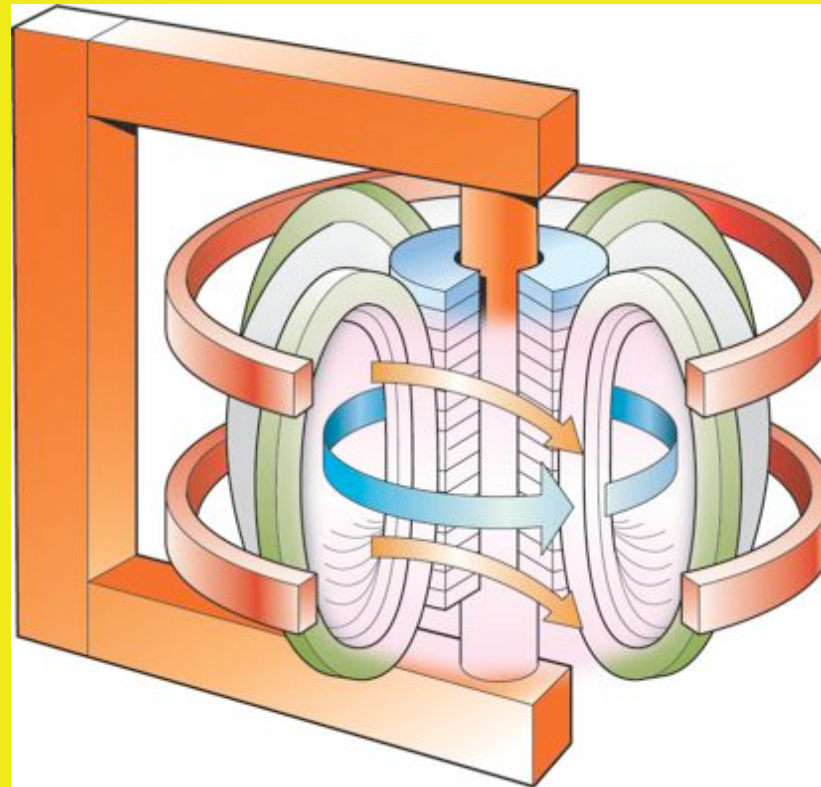
- I reattori a fusione sono tecnicamente complessi e richiedono un alto investimento di capitali
- I progressi scientifici sono stati molto rapidi ma per un reattore commerciale é richiesto ancora molto tempo ( circa 50 anni )



## I Principi fisici

Per portare a contatto di fusione i nuclei del D e del T - **ambedue carichi elettricamente** - bisogna superare la repulsione elettrostatica

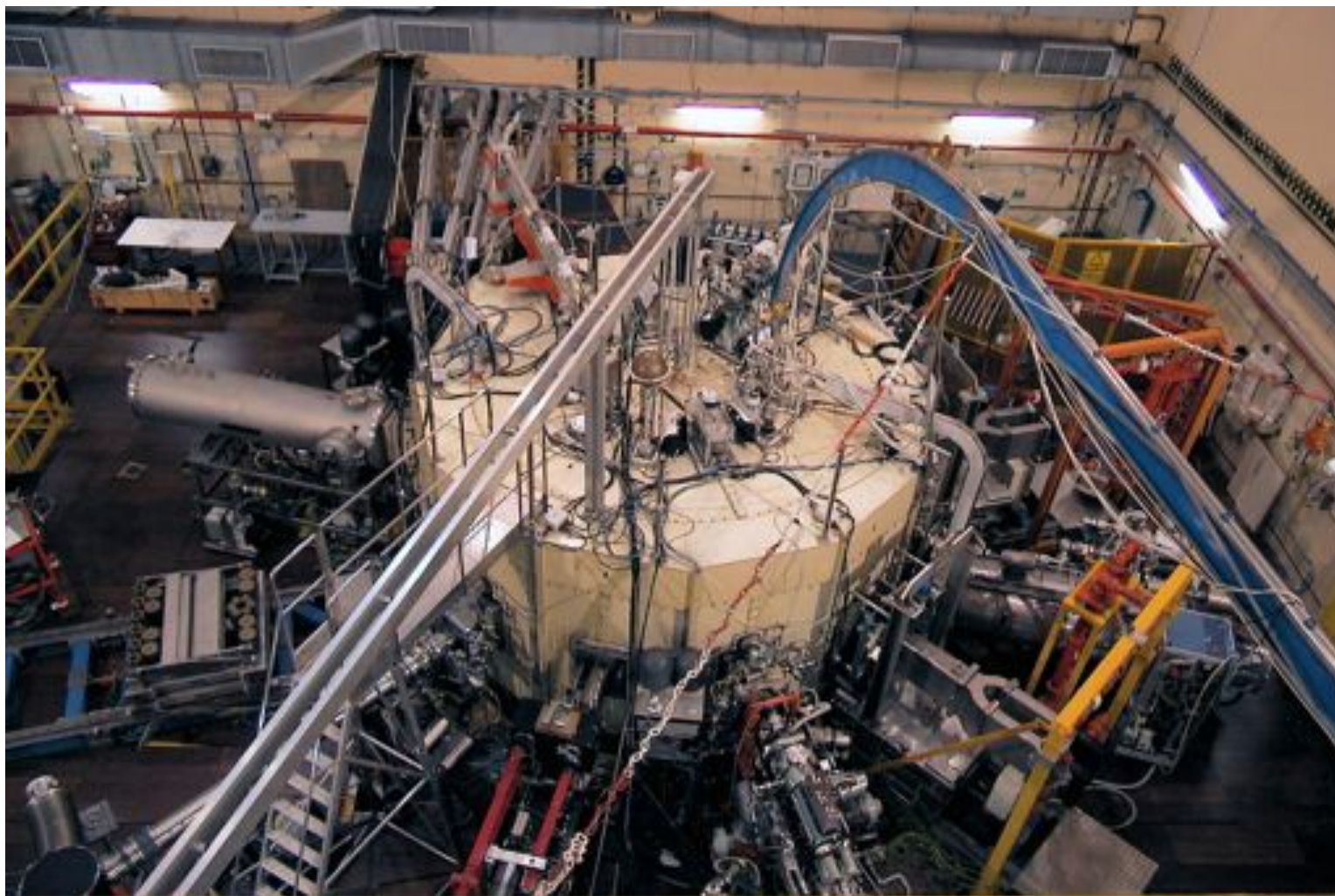
# The Tokamak



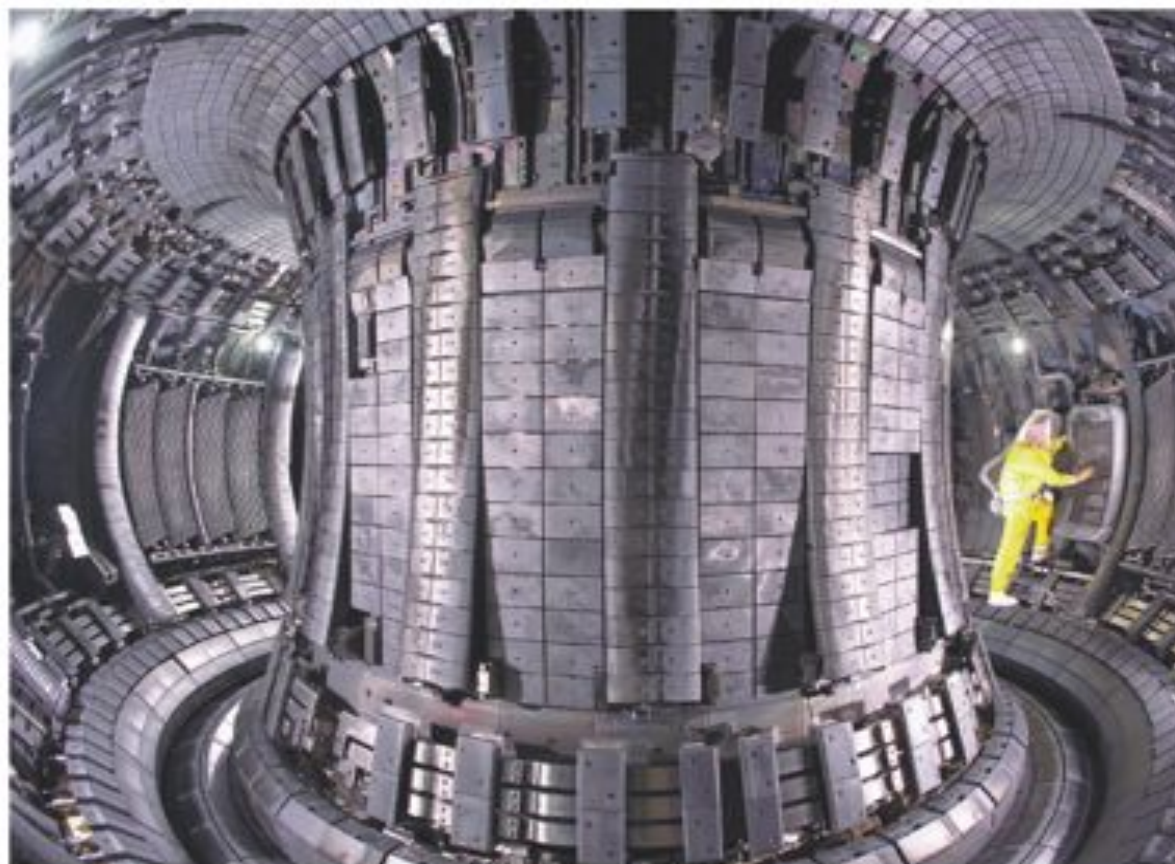
**Russo: Toroydal'naya Kamera i Magnitnaya Katushka**  
 Camera toroidale con bobine magnetiche



# Frascati Tokamak Upgrade FTU

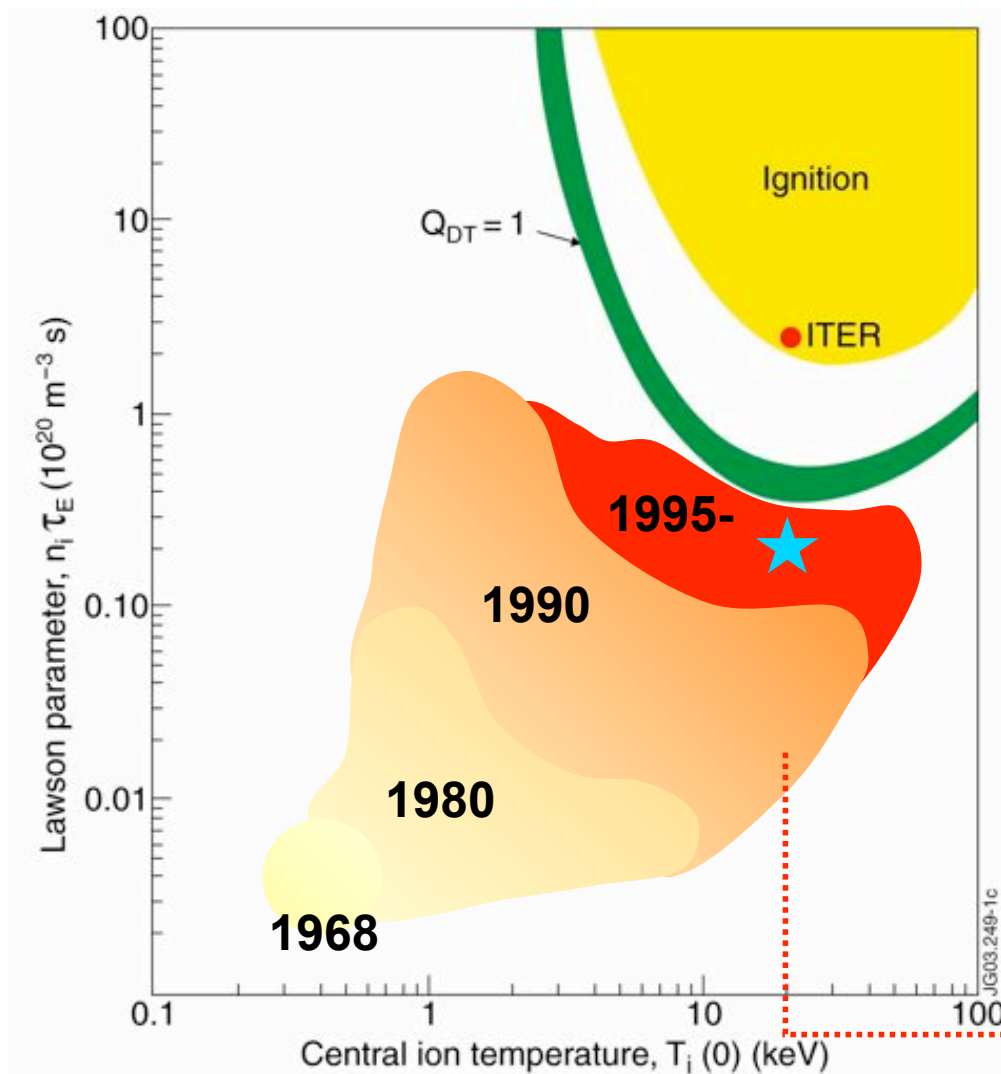


# Joint European Torus JET



JET Joint Undertaking  
Abingdon, Oxfordshire OX14 3EA

# Progressi nelle Ricerche sulla Fusione



$$n \times \tau_E \times T > 10 \text{ bar s}$$

$$Q = P_{\text{fusion}} / P_{\text{input}}$$

Ignition  $\rightarrow Q = \infty$

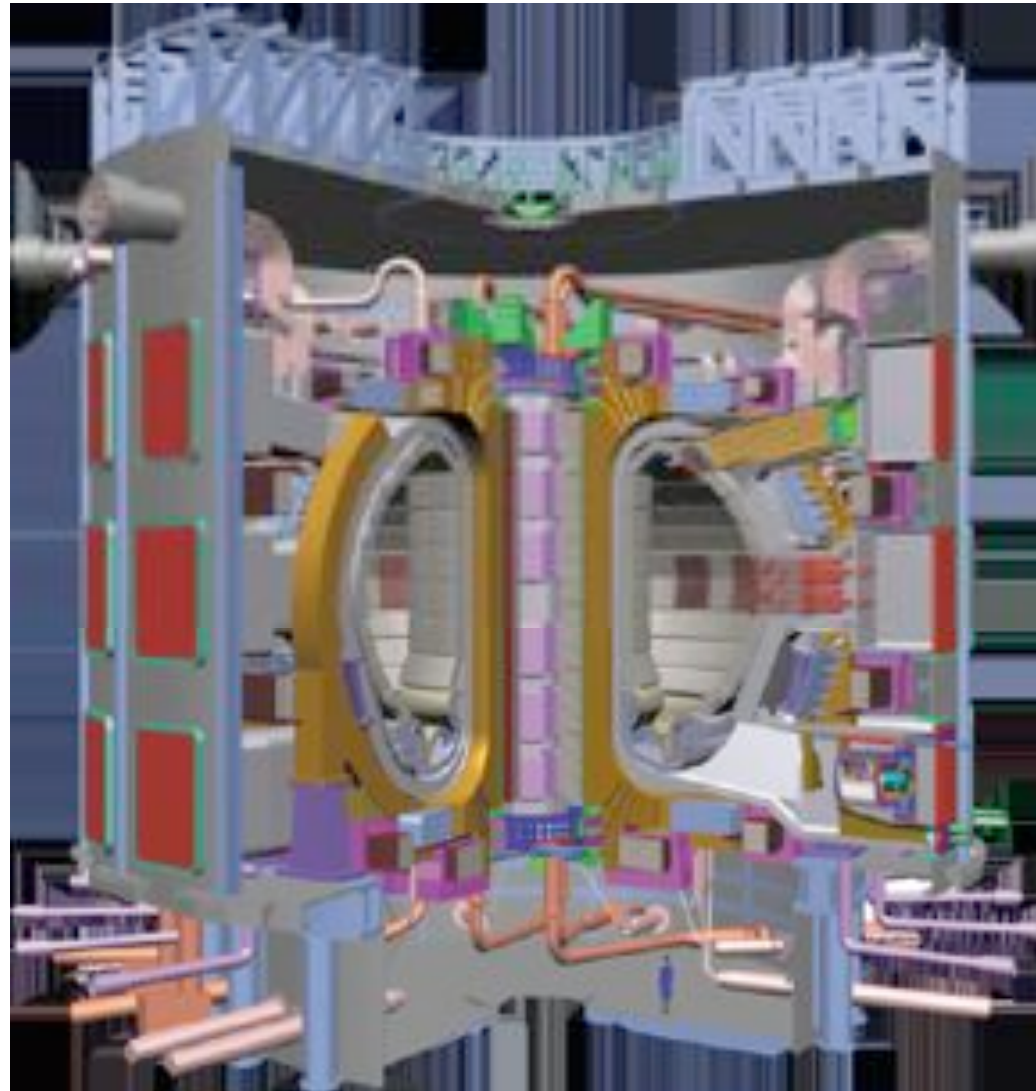
Breakeven  $\rightarrow Q = 1$

JET (1997)  $\rightarrow Q = 0.65$

$T \sim 200 \text{ million degrees}$



# ITER



# ITER



## International Tokamak Experimental Reactor

**ITER** è una collaborazione internazionale per costruire il primo esperimento scientifico capace di produrre un plasma che si auto-sostiene e di produrre energia dalle reazioni di fusione.

La missione di **ITER** è dimostrare la fattibilità tecnico-scientifica della fusione nucleare per la produzione di energia

# I Partners di ITER



# Firma dell'Accordo – Nov. 2006





# Il Sito di ITER– Cadarache (Francia)



## Il Sito di ITER - Cadoneghe (Treviso)





# La tecnologia di ITER è già sviluppata

## CENTRAL SOLENOID MODEL COIL



Radius 3.5 m  
Height 2.8m  
 $B_{max}=13$  T  
 $W = 640$  MJ  
0.6 T/sec

R&D Activities completed by July 2001.

## VACUUM VESSEL SECTOR



Double-Wall, Tolerance  $\pm 5$  mm



## REMOTE MAINTENANCE OF DIVERTOR CASSETTE



Attachment Tolerance  $\pm 2$  mm

## BLANKET MODULE



HIP Joining Tech  
Size : 1.6 m x 0.93 m x 0.35 m



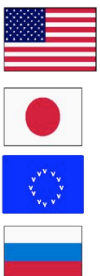
## TOROIDAL FIELD MODEL COIL



Height 4 m  
Width 3 m  
 $B_{max}=7.8$  T  
 $I_{max} = 80$  kA

## REMOTE MAINTENANCE OF BLANKET

✗ Impossibile visualizzare l'immagine. La memoria del computer potrebbe essere insufficiente per aprire l'immagine oppure l'immagine potrebbe essere danneggiata. Ricaricare il computer e aprire di nuovo il file. Se viene visualizzata di nuovo la x rossa, potrebbe essere necessario eliminare l'immagine e inserirla di nuovo.



## DIVERTOR CASSETTE



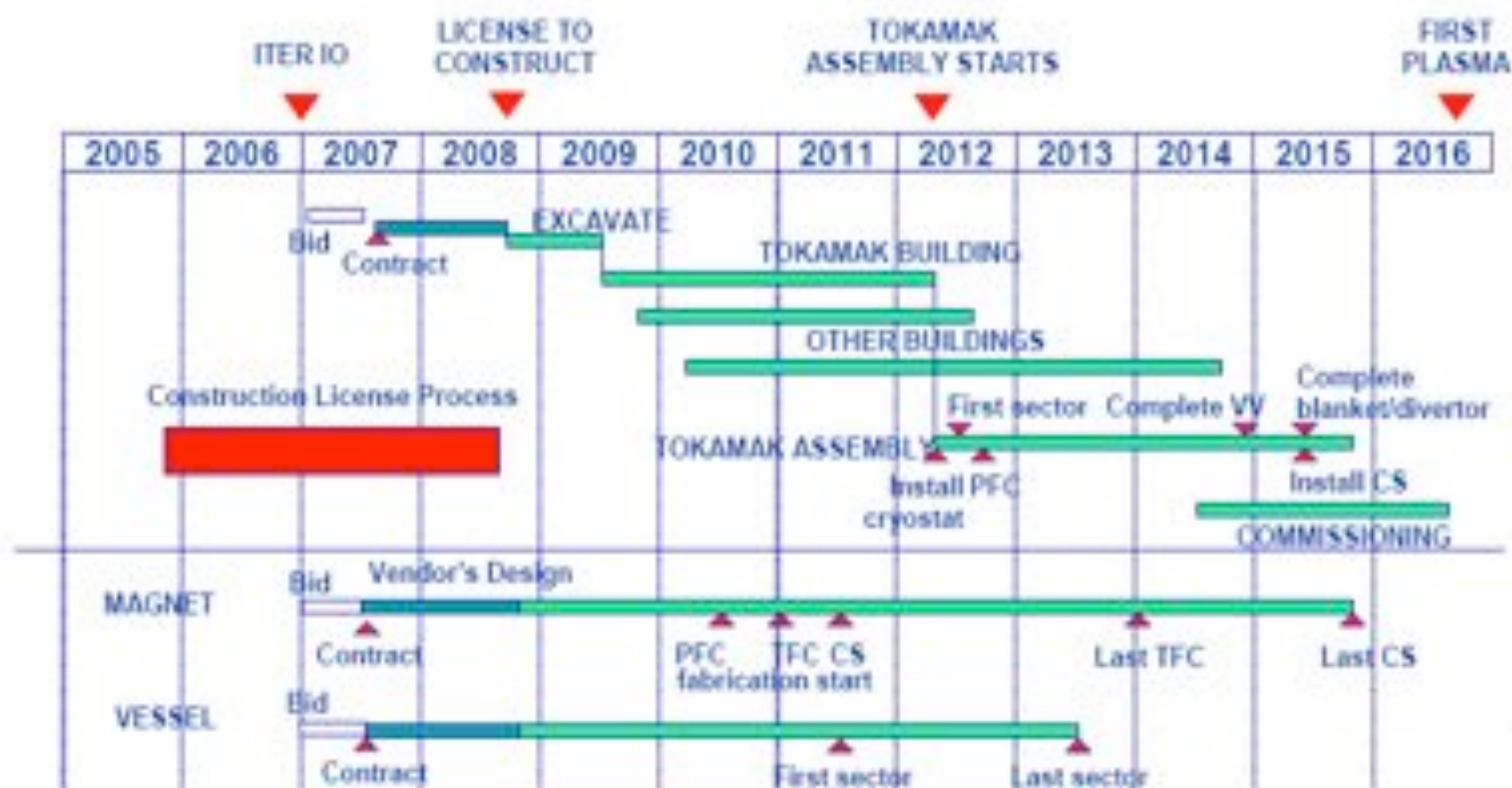
**Chieti 11/04/08**

31

4 t Blanket Sector  
Attachment Tolerance  $\pm 0.25$  mm

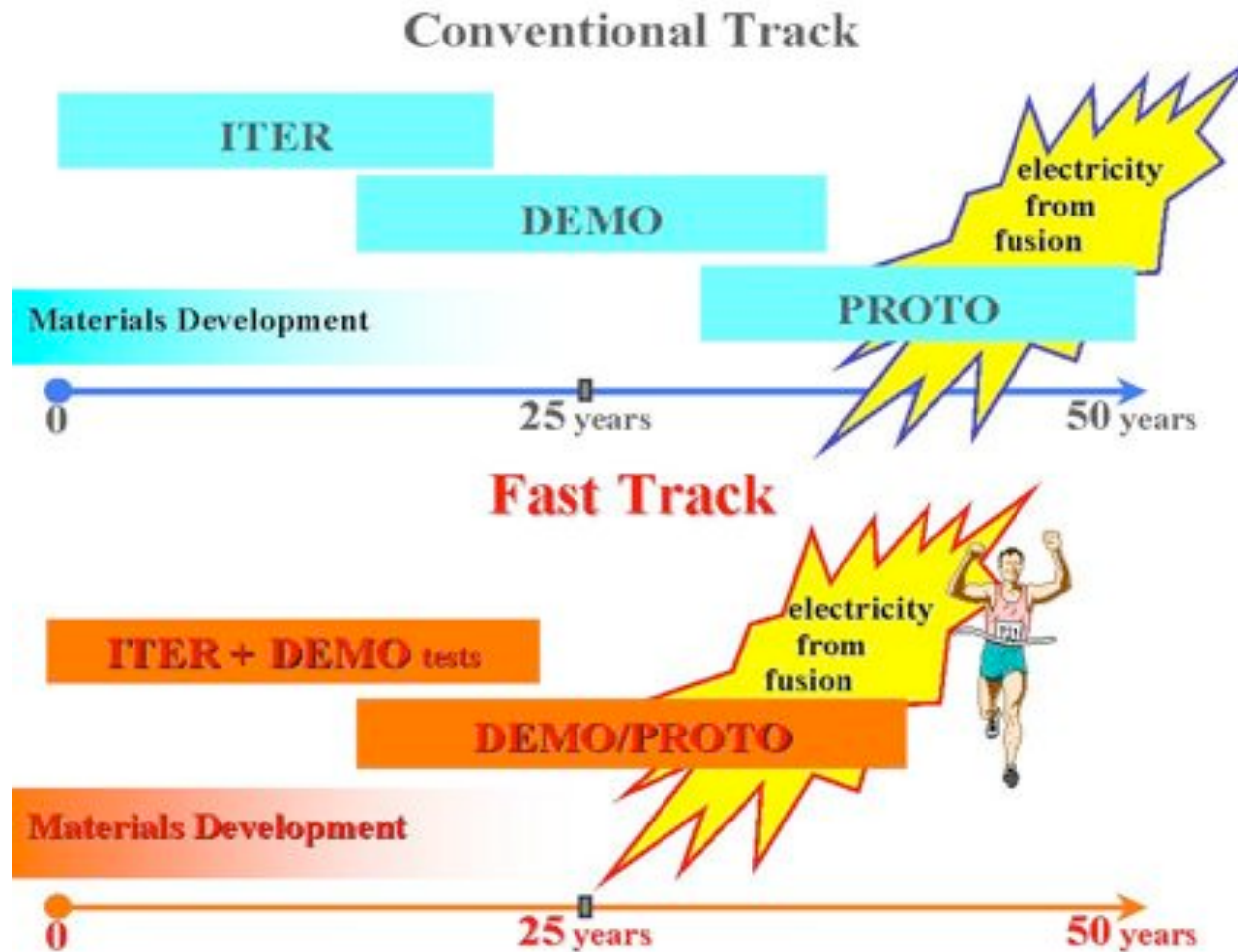


# Integrated Project Schedule

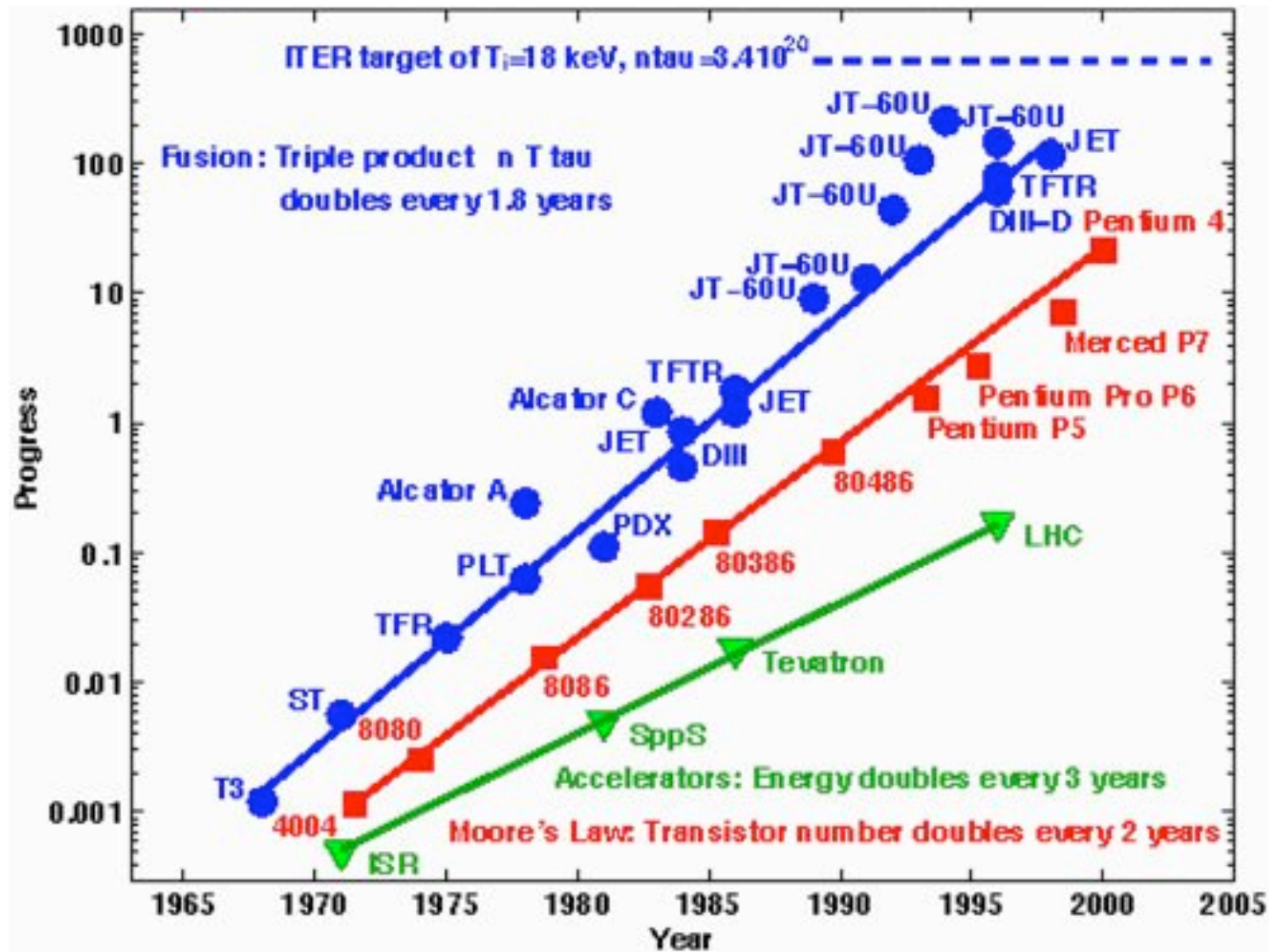




# Verso il reattore commerciale

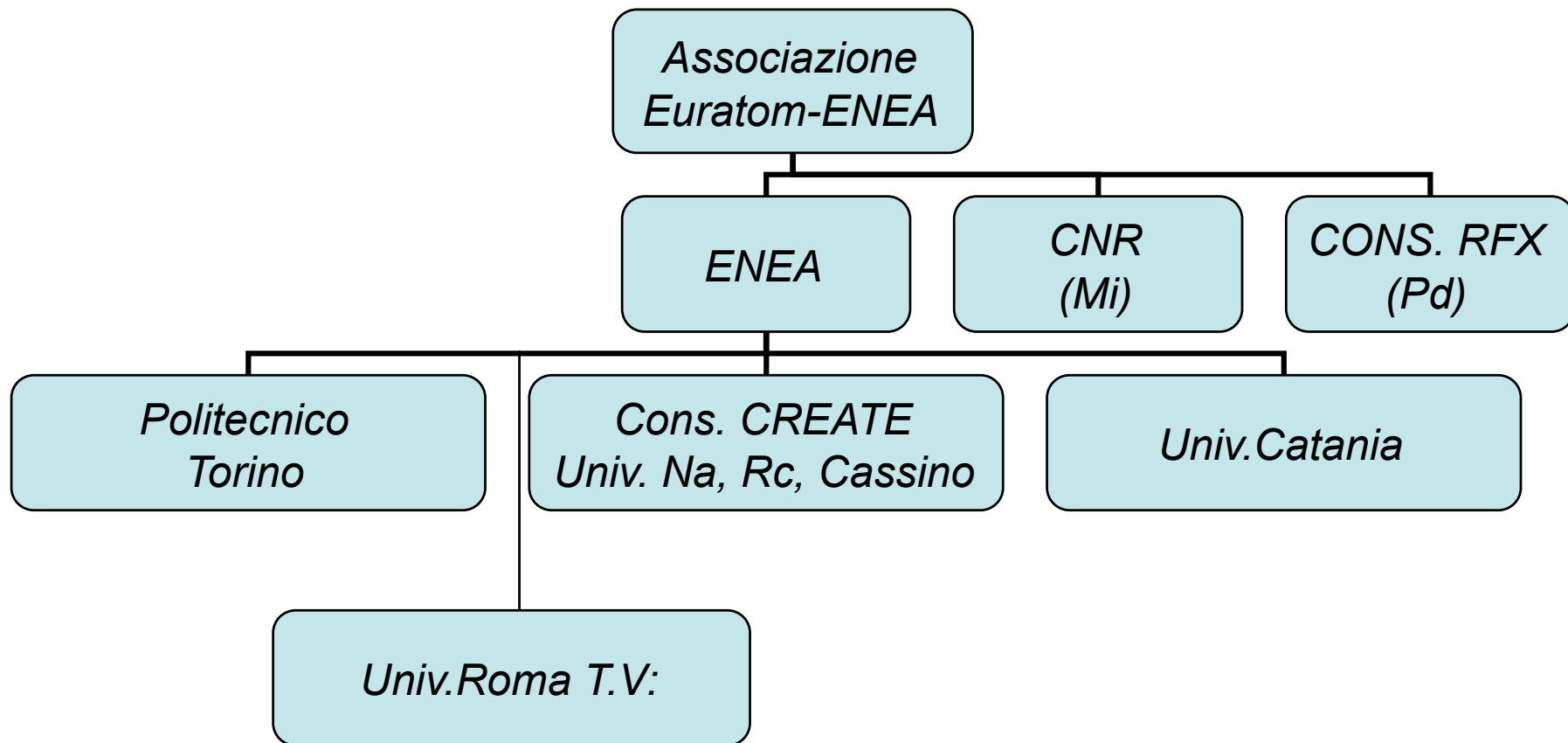


# Verso il reattore commerciale



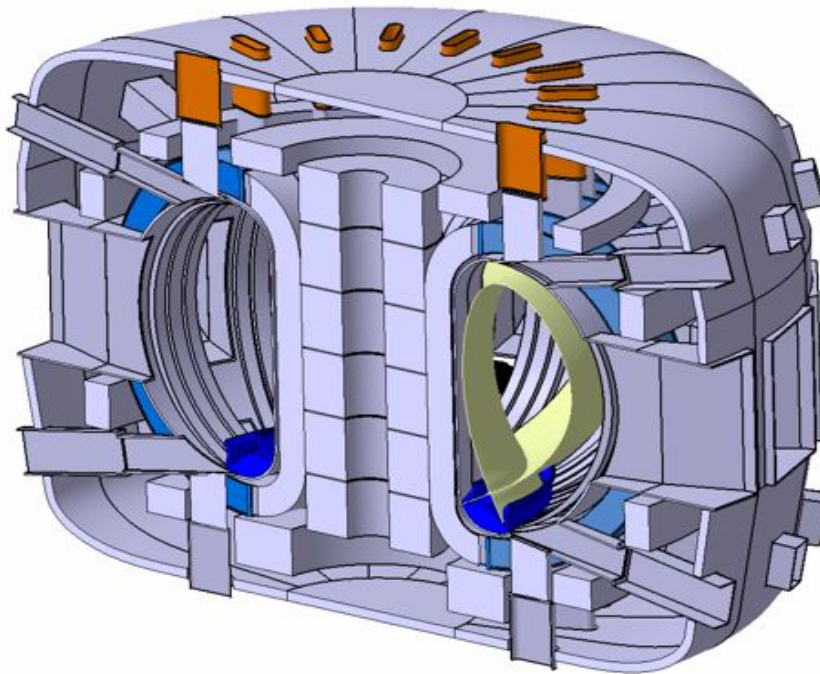
# Associazione Euratom-ENEA

(circa 500 persone di cui circa 300 laureati)





## Parametri di FAST



Plasma Current (MA)	6.5
$B_T$ (T)	7.5
Major Radius (m)	1.82
Minor Radius (m)	0.64
Elongation $k_{95}$	1.7
Triangularity $\delta_{95}$	0.4
Safety Factor $q_{95}$	3
$\langle n \rangle$ (m <sup>-3</sup> )	$2 \times 10^{20}$
Flat-top (s)	13
H&CD power (MW)	40
ICRH	30
ECRH	4
LH	6
P/R (MW/m)	22

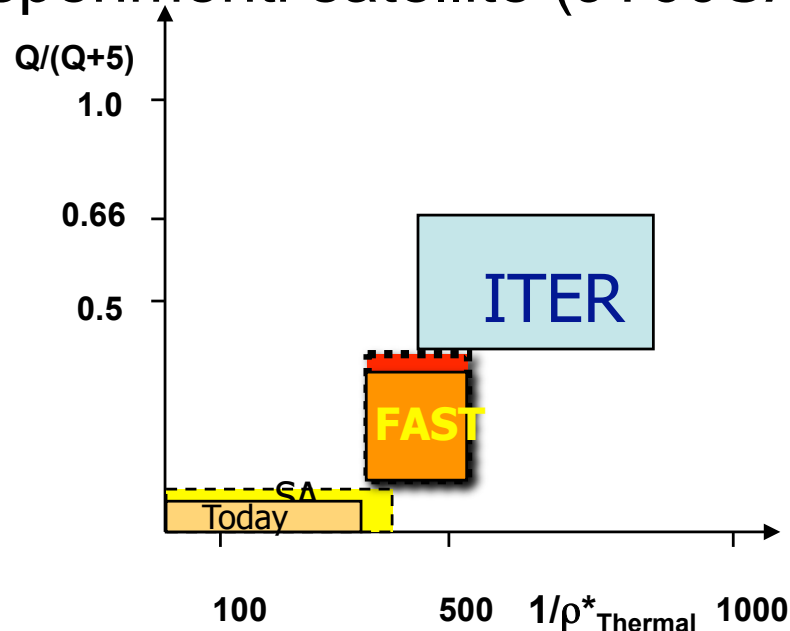


# FAST: obiettivi

Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione



- **FAST** (**F**usion **A**dvanced **S**tudies **T**orus) è una facility studiata per coprire nel modo più ampio possibile gli obiettivi del programma europeo in supporto ad ITER e DEMO (Tokamak satellite)
- **FAST** copre gli aspetti di fisica e tecnologia ancora largamente inesplorati complementando il programma di altri esperimenti satellite (JT60SA)



$Q/(Q+5)$ : indice performance  
(1 uguale ignizione)

$1/\rho^*_{\text{Thermal}}$ : qualità 'reattoristica'  
del plasma

# CONCLUSIONI

- **Energia ed ambiente sono due facce della stessa medaglia.**
- **Produrre energia elettrica tramite le reazioni di fusione è una, se non l'unica, fonte per uno sviluppo compatibile con l'ambiente.**



Grazie per l'attenzione

# ITER

ITER sarà un macchina nucleare:  $1.5 \times 10^{20}$  neutrons/s

<b>R (m)</b>	<b>6.2</b>
<b>a (m)</b>	<b>2</b>
<b>flat-top lenght (s)</b>	<b>1000</b>
<b>B<sub>t</sub> (T)</b>	<b>5.3</b>
<b>I<sub>p</sub> (MA)</b>	<b>15</b>
<b>P<sub>fus</sub> (MW)</b>	<b>500</b>
<b>P<sub>aux</sub> (MW)</b>	<b>40-90</b>
<b>P<sub>α</sub> (MW)</b>	<b>85</b>
<b>Q (P<sub>fus</sub> /P<sub>in</sub>)</b>	<b>10</b>
<b>β<sub>T</sub> β<sub>p</sub></b>	<b>2,5%, 0.7</b>



# Final Words

**E.L.Artsimovich's celebrated reply to the question**

**“When will fusion be ready ?”**

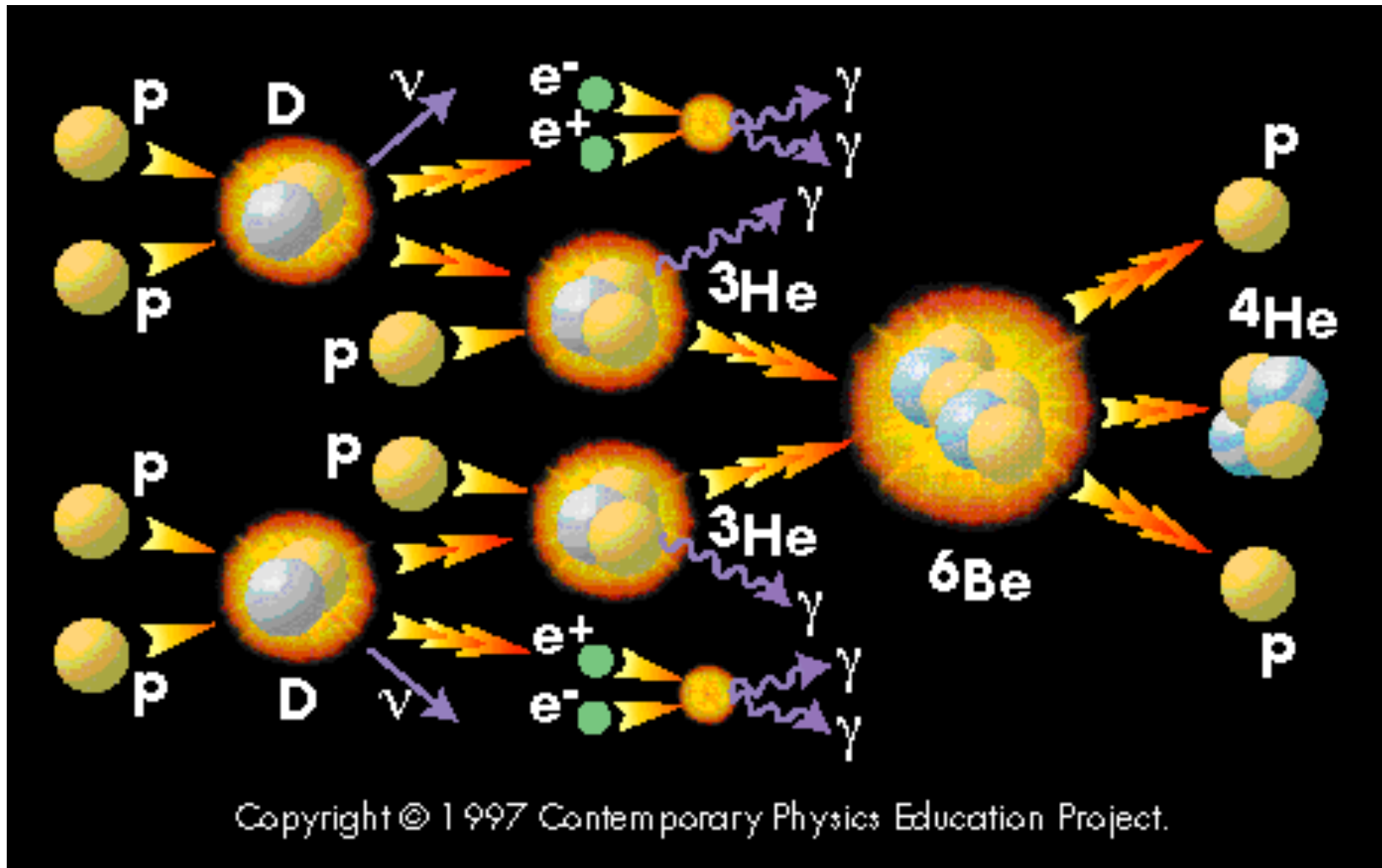
**“Fusion will be ready when society need it”**

**(1973)**

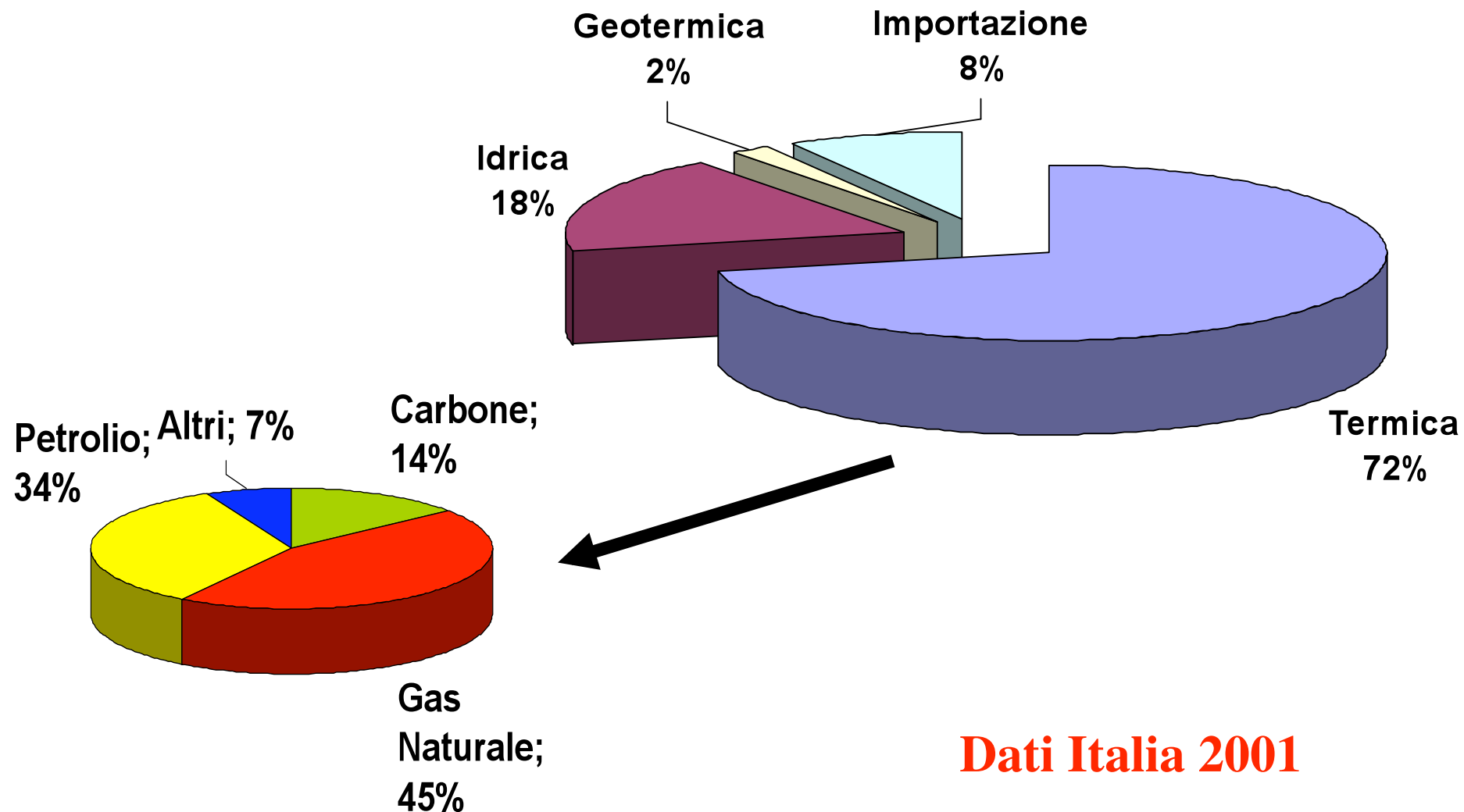
**The need is clear**

**Must aspire and work to deliver fusion as fast  
as we can**

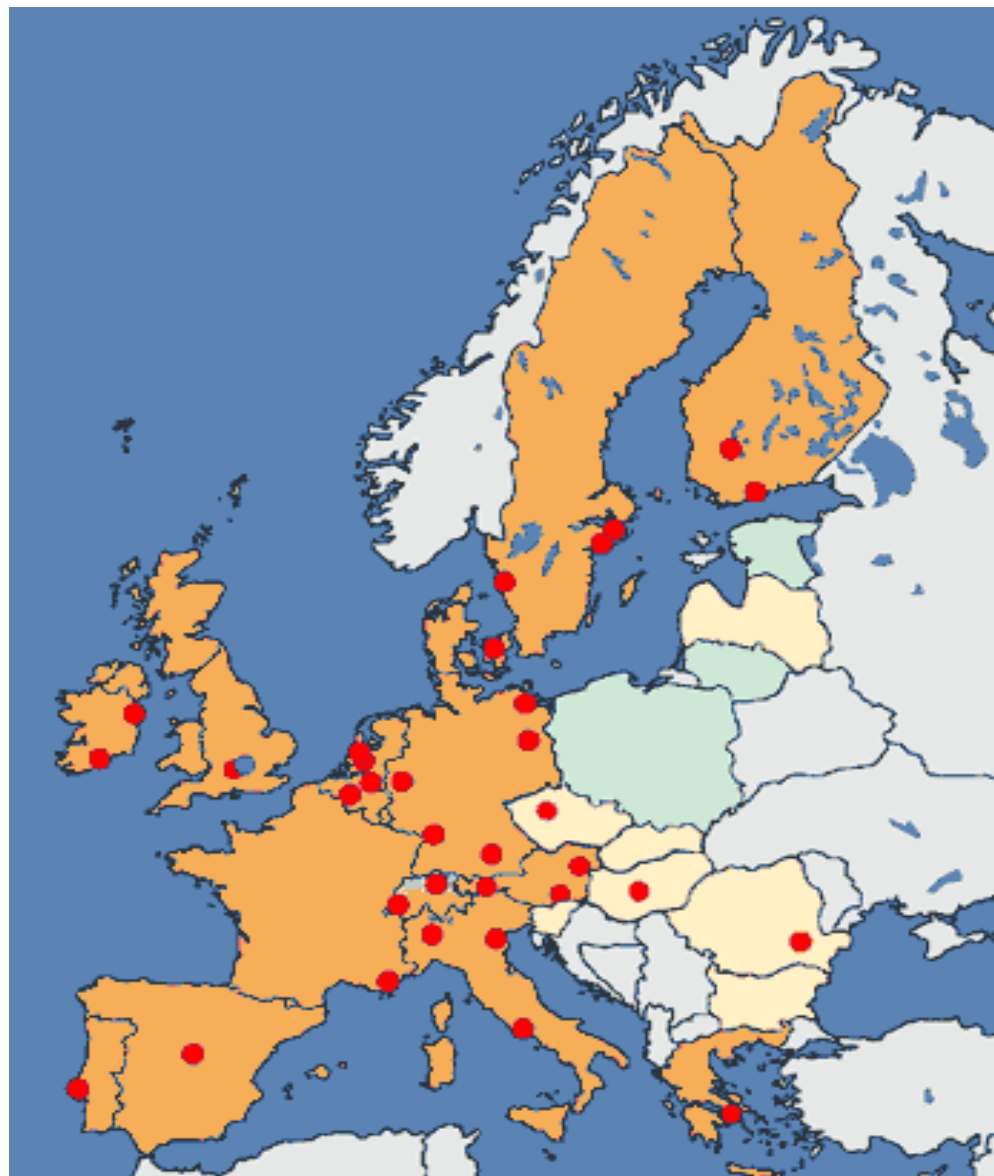
# Reazioni Nucleari nel Sole



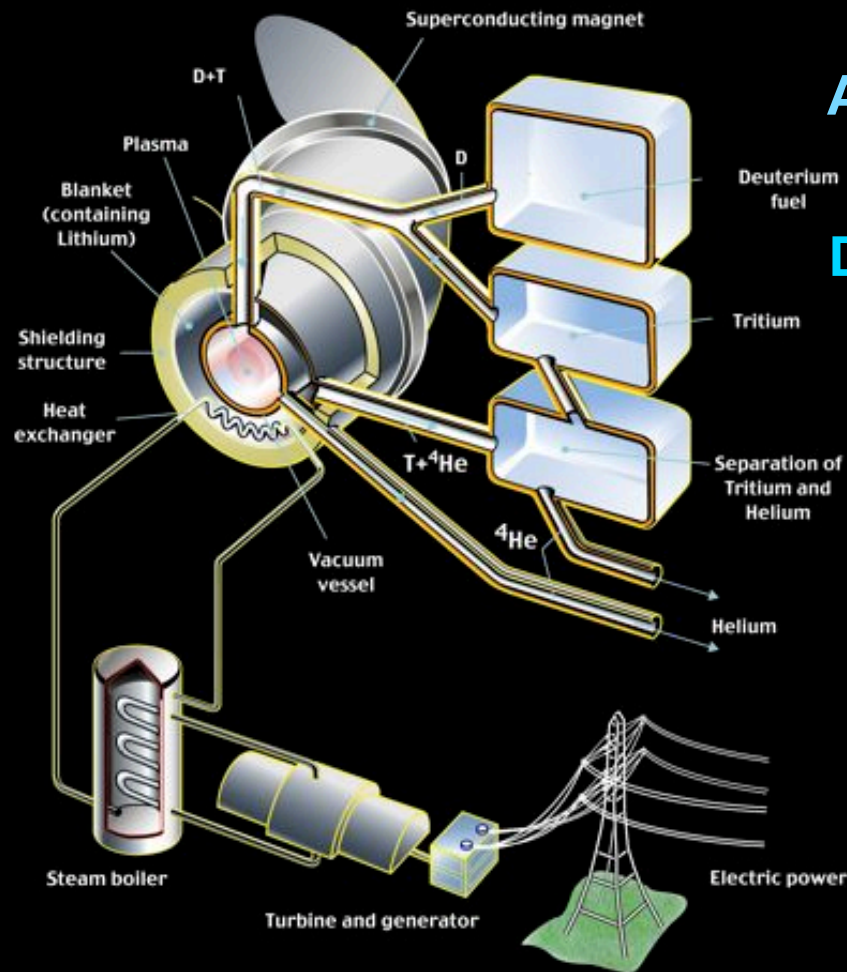
# Ripartizione delle fonti energetiche



# I laboratori europei operanti sulla fusione



# A Fusion Power Plant



A Lithium Blanket produces Tritium



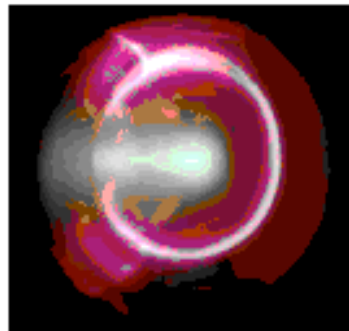
A heat exchanger in this blanket produces steam that drives turbines



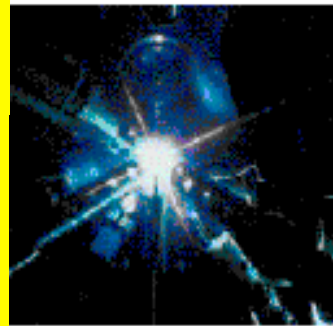
**Electricity**

## I Principi fisici

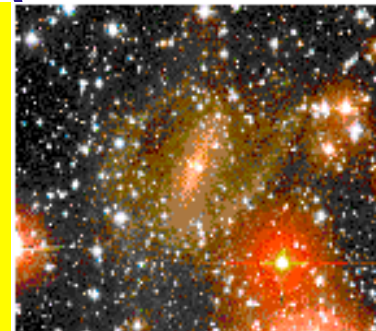
Come produrre e confinare plasmi così



Confinamento  
Magnetico



Confinamento  
Inerziale

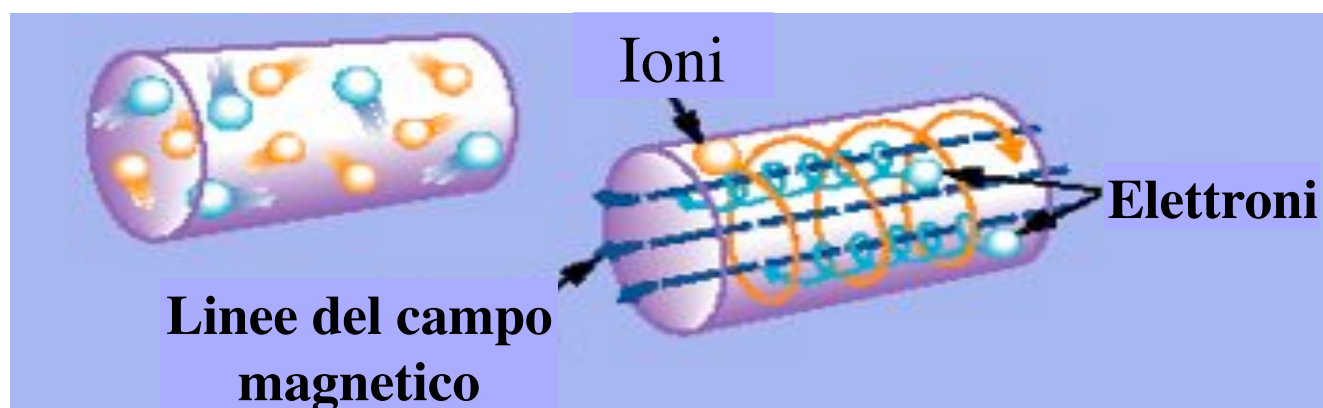


Gravità

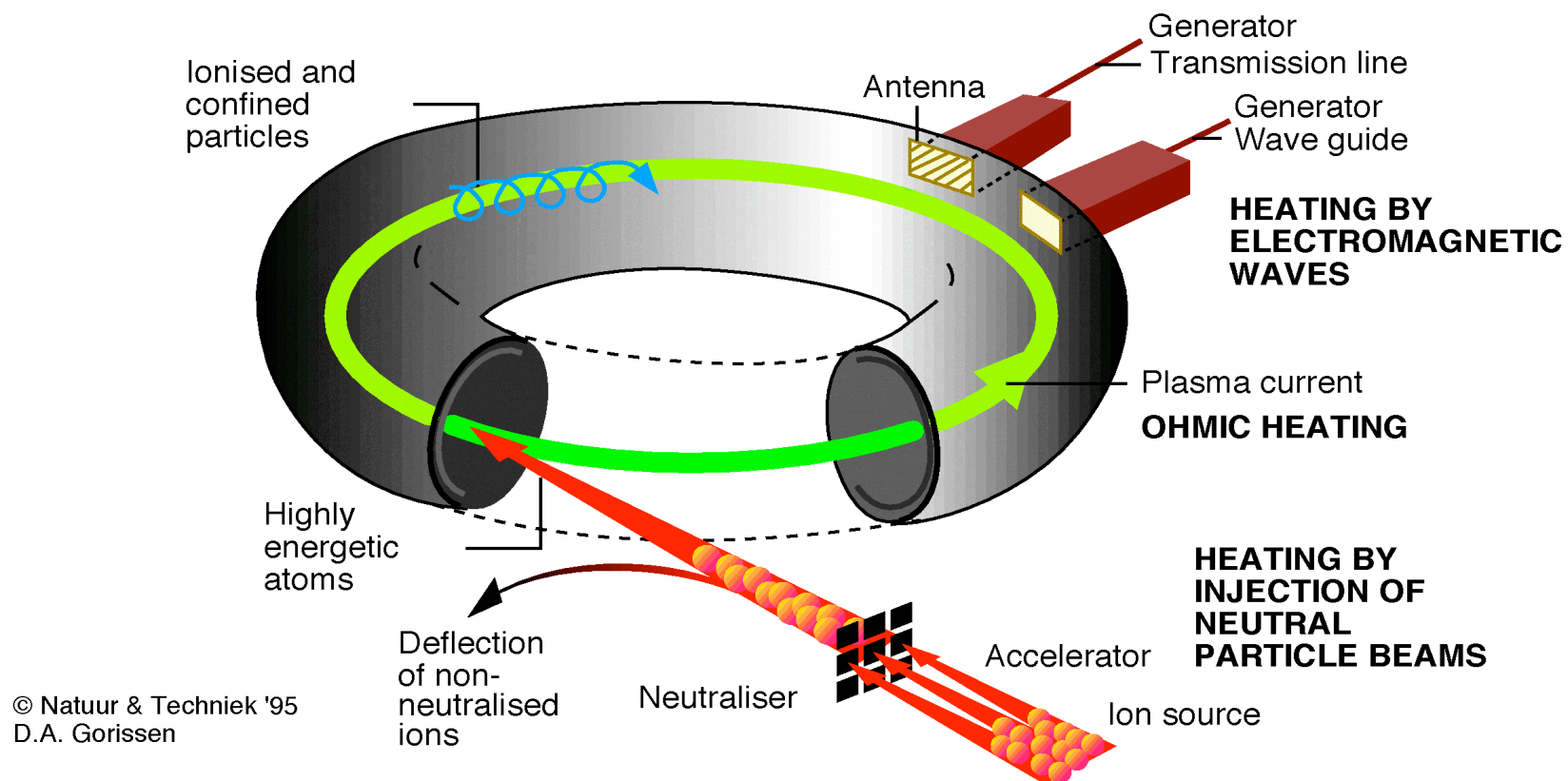


## Il confinamento magnetico

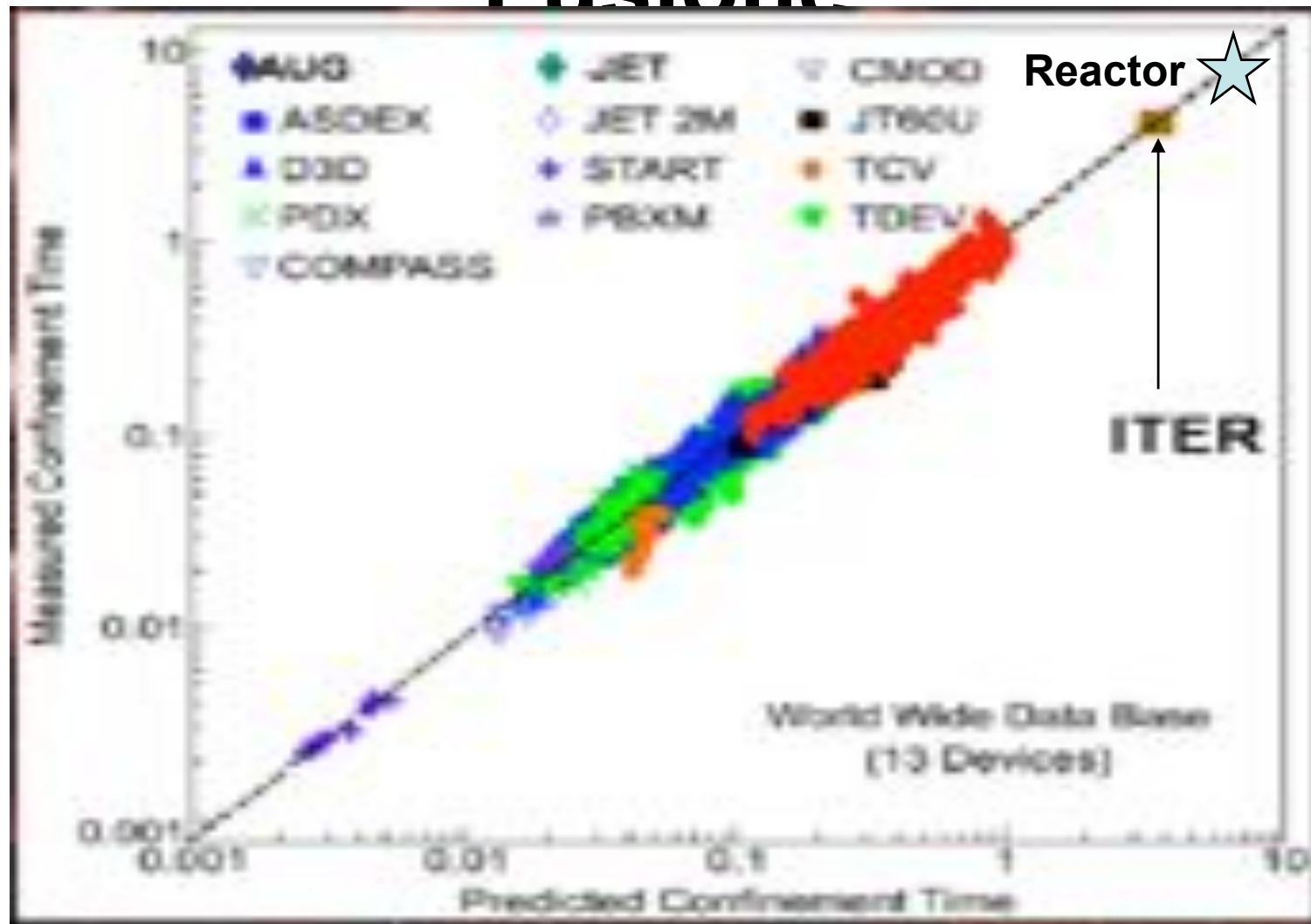
Le particelle cariche in presenza di un campo magnetico non sono libere nel loro moto, ma spiralizzano lungo le linee di forza del campo magnetico



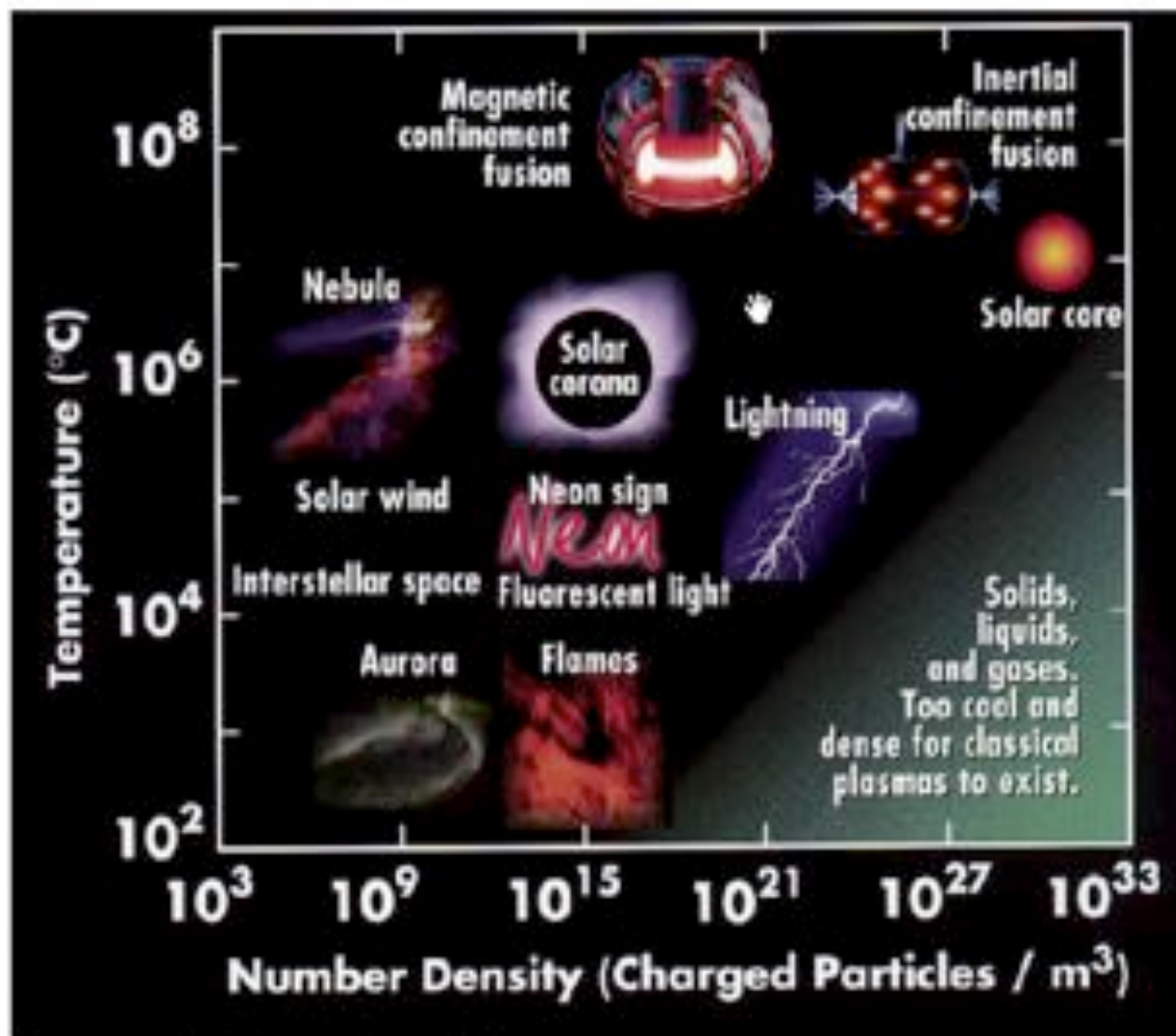
# Riscaldamento del Plasma



# Progressi nelle Ricerche sulla Fusione



# I plasmi in natura



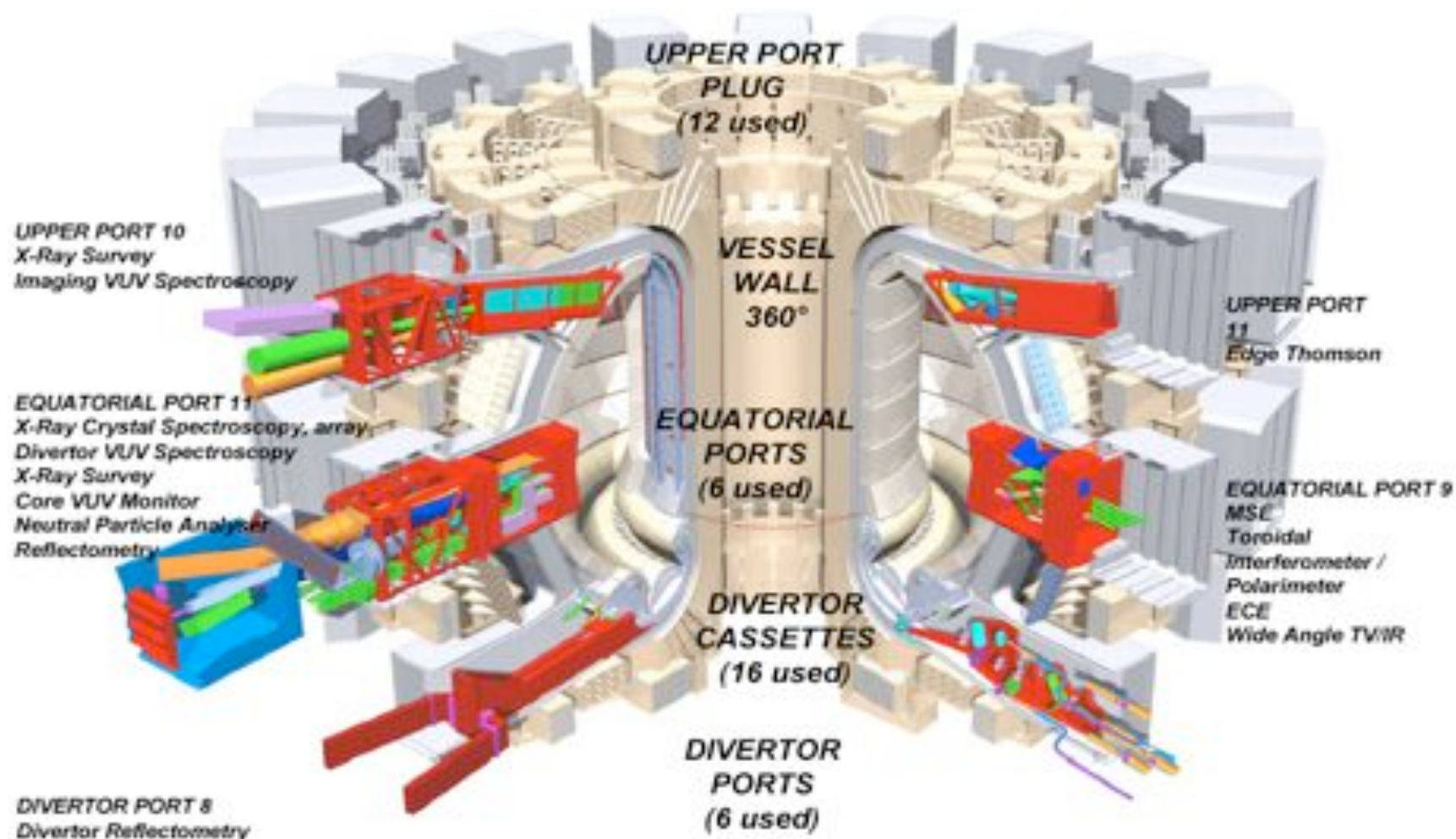
## International Tokamak Experimental Reactor

### Obiettivi:

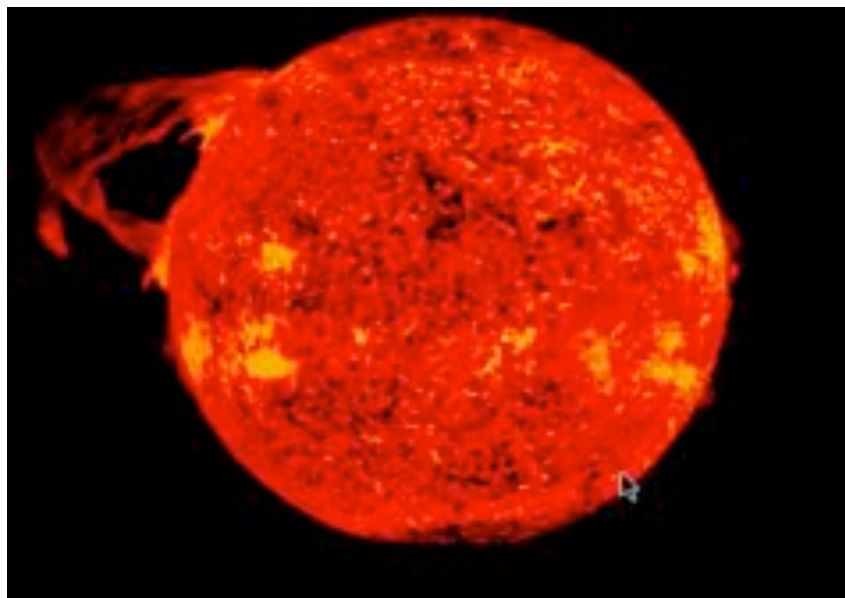
- dimostrare la produzione estesa nel tempo di energia;  $P \geq 500$  MW,  $Q \geq 10$
- provare tecnologie essenziali per il reattore (come le bobine superconduttrici) in un sistema integrato.



# Le diagnostiche sono la chiave scientifica di ITER







Perché la fonte di energia del **sole** e delle altre stelle sono le **reazioni nucleari di fusione**

Ogni secondo nel sole circa 700 t di H si trasformano in He. Queste reazioni producono  $4 \times 10^{26}$  watt (!) di cui meno di un milionesimo cade sulla terra.



# Nuclear Power Plants in Europe

Map from American Nuclear Society, Inc.



Where are the Plants in Europe? U.K., Spain, France, Switzerland, Germany, Belgium, Czech Republic, Slovakia, Slovenia, Hungary, Romania, Bulgaria, Sweden, Finland, etc.



# Partecipazione a ITER

Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione



## ITER

### Central Solenoid

Nb<sub>3</sub>Sn, 6 modules

### Toroidal Field Coil

Nb<sub>3</sub>Sn, 18, wedged

### Poloidal Field Coil

Nb-Ti, 6

### Cryostat

24 m high x 28 m dia.

### Vacuum Vessel

9 sectors

### Blanket

440 modules

### Port Plug

heating/current  
drive, test blankets  
limiters/RH  
diagnostics

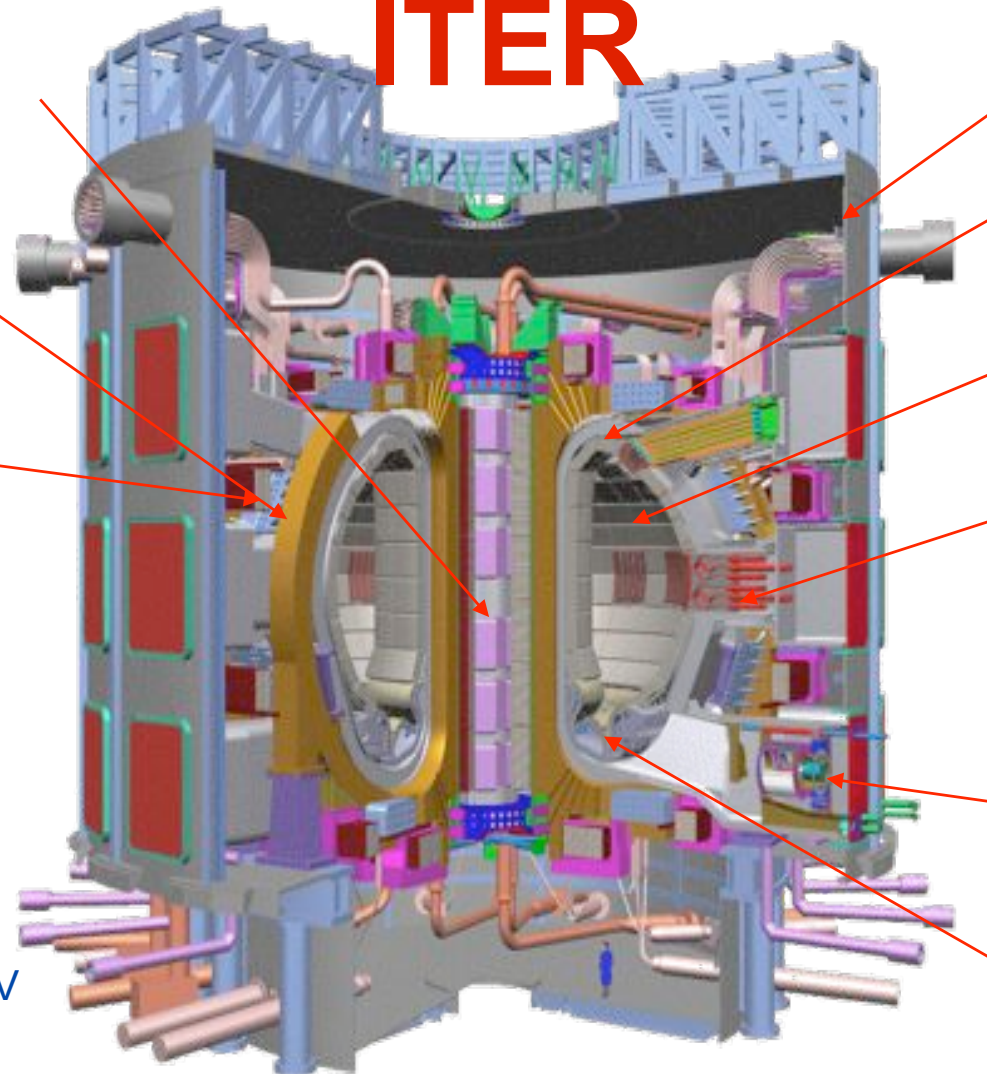
### Torus

Cryopumps, 8

### Divertor

54 cassettes

Major plasma radius 6.2 m  
Plasma Volume: 840 m<sup>3</sup>  
Plasma Current: 15 MA  
Typical Density: 10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup>  
Typical Temperature: 20 keV  
Fusion Power: 500 MW  
Bt 5,3 T on plasma axis



Machine mass: 23350 t (cryostat + VV + magnets)





- In particolare **FAST** si propone di:
  - Studiare fenomeni di dinamica non lineare legati alla presenza di particelle veloci (come le alfa) tipici di un plasma che brucia
  - Ottenere un plasma con caratteristiche molto simili a quelle di ITER
  - Qualificare soluzioni tecnologiche innovative per i componenti affacciati al plasma (W, metalli liquidi)
  - Preparare scenari di plasma ‘avanzati’ rilevanti per il reattore e contribuire al progetto e R&D di DEMO
  - Sviluppare diagnostiche necessarie per ITER e DEMO



- Definite le condizioni operative che spaziano dalle altissime prestazioni ( $Q=3$ ), a impulsi fino a 200s di durata ('Scenari Avanzati')
- Realizzato il progetto di massima del tokamak (progetto meccanico, alimentazioni elettriche, sistemi ausiliari etc.)
- Studiati due possibili siti: Frascati, Casaccia
- Effettuato studio fattibilità estensione rete a 400 kV presso i siti



# Partecipazione a ITER

Associazione Euratom-ENEA sulla Fusione



## ITER

### Central Solenoid

Nb<sub>3</sub>Sn, 6 modules

### Toroidal Field Coil

Nb<sub>3</sub>Sn, 18, wedged

### Poloidal Field Coil

Nb-Ti, 6

### Cryostat

24 m high x 28 m dia.

### Vacuum Vessel

9 sectors

### Blanket

440 modules

### Port Plug

heating/current  
drive, test blankets  
limiters/RH  
diagnostics

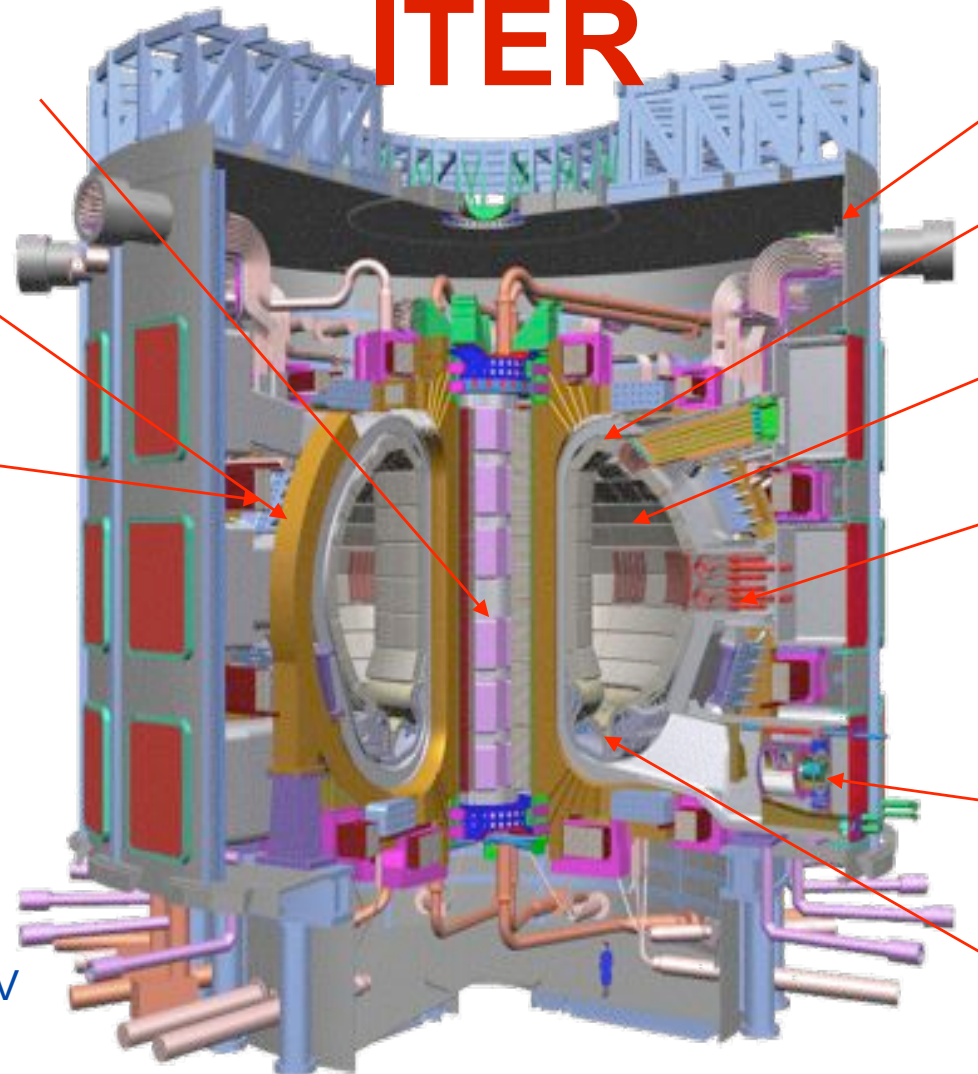
### Torus

Cryopumps, 8

### Divertor

54 cassettes

Major plasma radius 6.2 m  
Plasma Volume: 840 m<sup>3</sup>  
Plasma Current: 15 MA  
Typical Density: 10<sup>20</sup> m<sup>-3</sup>  
Typical Temperature: 20 keV  
Fusion Power: 500 MW  
Bt 5,3 T on plasma axis



Machine mass: 23350 t (cryostat + VV + magnets)