

**note per lezioni a Masterclass 2016, Università' di
Padova, Dip. Fisica G. Galilei, 14-17 marzo 2016**

La fusione termonucleare controllata. Una introduzione e gli esperimenti ITER, RFX-mod e IFMIF-EVEDA

A. Pisent, M. Cavenago

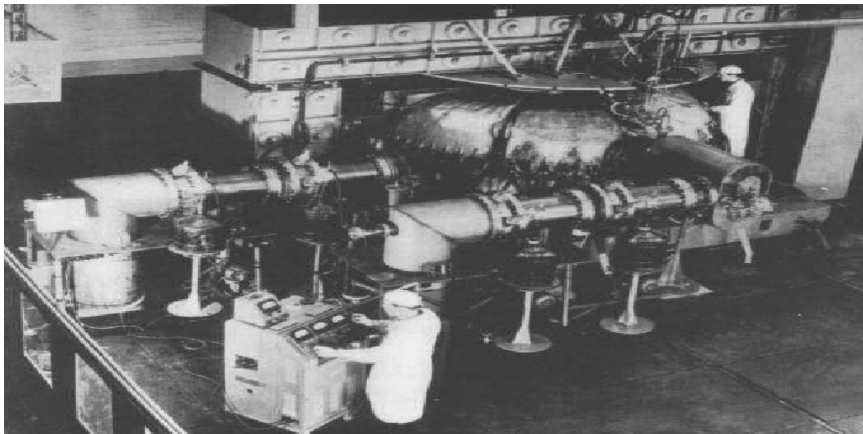
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali di Legnaro
viale dell'Università' n. 2, Legnaro (PD)

Sommario

- Fusione nucleare: parte della soluzione del problema dell'approvvigionamento energetico a lungo termine
- Problemi specifici
- Componenti di un reattore a fusione
- I programmi di ricerca ITER, RFX and IFMIF
- Le prospettive

Cronologia

- Scoperta del Deuterio (Urey et al 1932)
- Teoria sui cicli di fusione nelle **stelle** (Bethe, 1939).
- Programma sulla fusione russo: Sakharov e Tamm suggeriscono "magnetic insulation" (1950).



II
тороидальная камера с магнитными катушками"
(**TOKAMAK**= toroidal'naya kamera s magnitnimi
katushkami)
[camera toroidale con bobine magnetiche]

(Artsimovich, 1958, URSS)

- Sviluppo della bomba H (Teller et al., 1951).
- I lavori sulla fusione vengono gradualmente declassificati (1955-1958).
- 1997 JET produce energia da fusione D-T pari al 60% dell'energia somministrata dai sistemi ausiliari ($Q=0.6$)
- 2007 Approvata la costruzione di ITER, e centrali a fusione dopo il 2050

La ricerca per la fusione nucleare in Italia: principali enti coinvolti

- ENEA
- INFN
- CNR
- Numerose Università (fisica, elettrotecnica..)

- In stretto contatto con le istituzioni europee : Euratom, Fusion for Energy (F4E), Eurofusion
- In area padovana

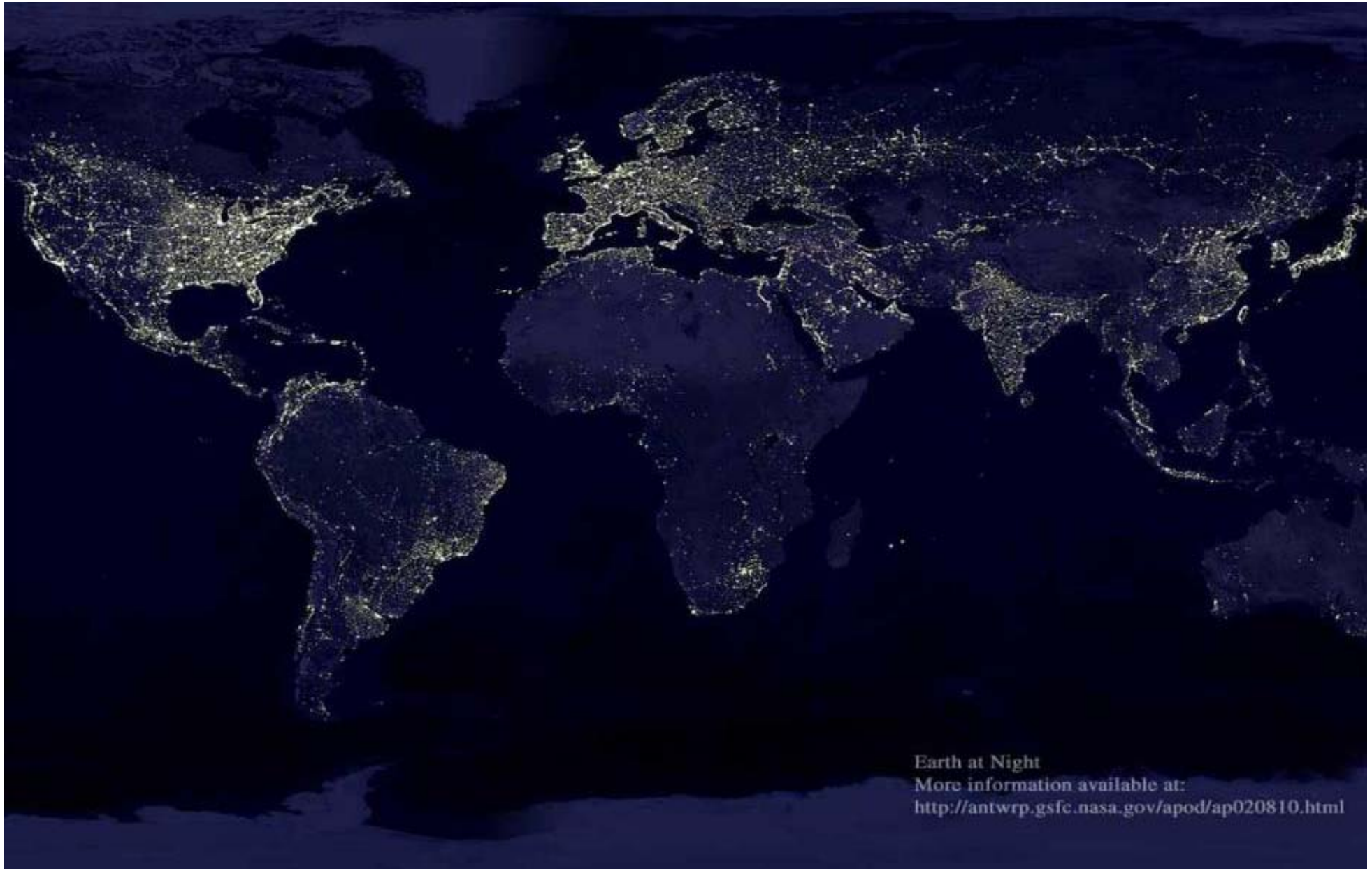
Consorzio RFX (ENEA, CNR, INFN, Unipd, Acciaierie Venete)



INFN Laboratori Nazionali di Legnaro

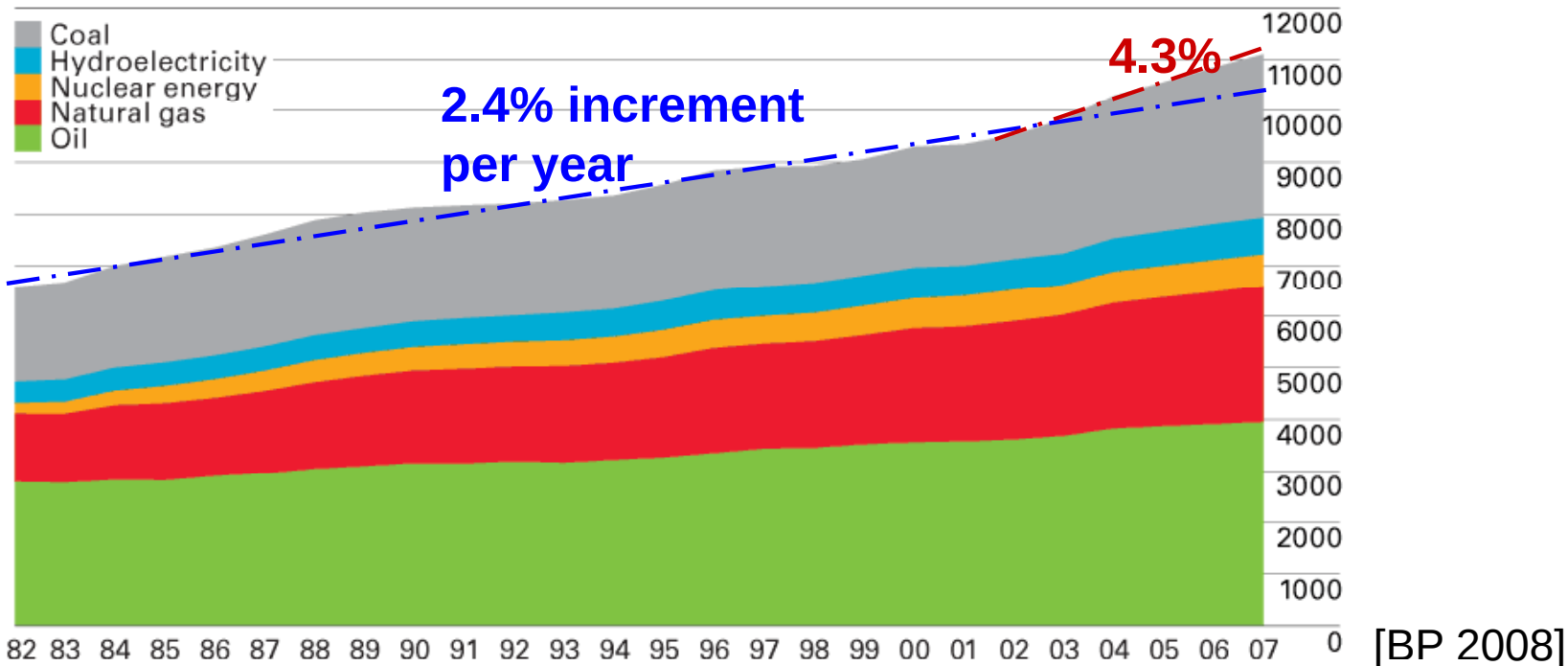


Consumo energia pro-capite e qualità della vita



Consumo di energia primaria al mondo

World consumption
Million tonnes oil equivalent



- Crescente consumo di energia da combustibili fossili: paesi in via di sviluppo ed in quelli in transizione
- Impatto ambientale (inquinamento) per minor costo degli impianti di conversione e per carenza di tecnologia e di regolamentazione.
- Crescita delle emissioni di CO₂ più rapida della domanda di energia.

**Il Piano della UE
del dicembre 2008**

**Una politica energetica per la
riduzione CO₂**

- Limiti all'utilizzo dei combustibili fossili
- Sviluppo tecniche per sequestro CO₂
- Reattori termici a fissione

Diversificazione delle fonti

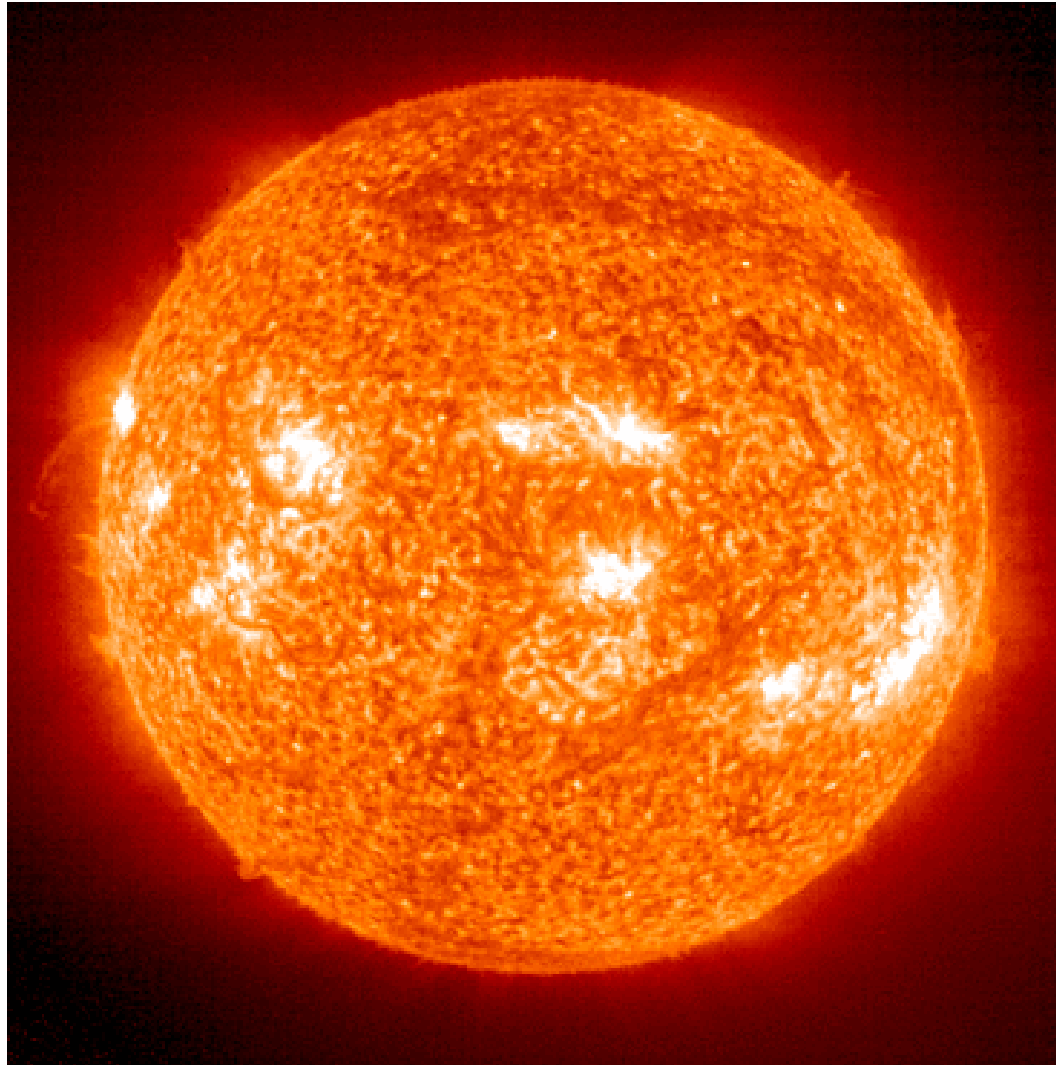
Incremento risparmio energetico

**Miglioramento efficienza
energetica**

- Sviluppo rinnovabili
- Sviluppo della fissione di IV° generazione
- Incentivi per l'efficienza energetica

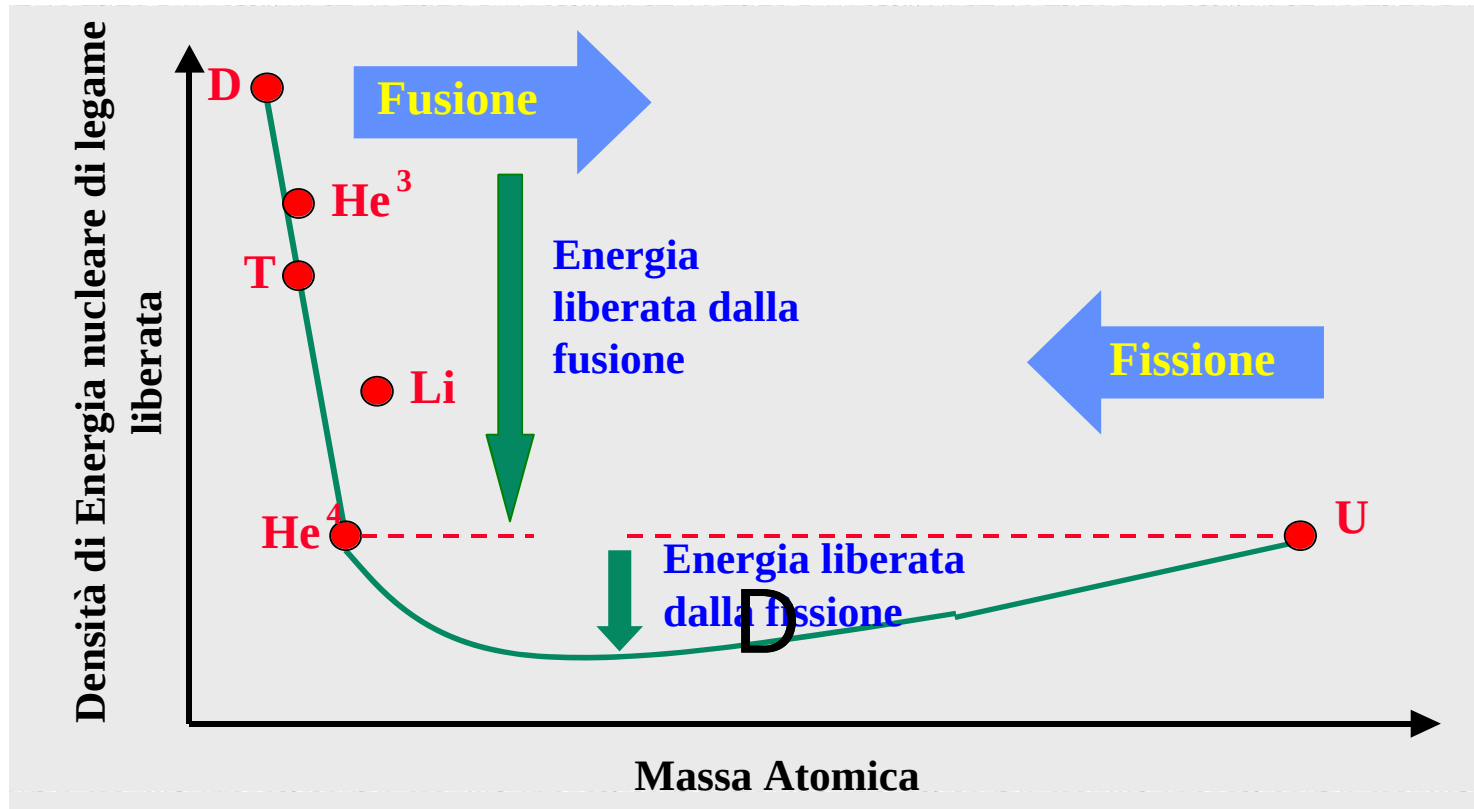
OBIETTIVO: ridurre le emissioni CO₂ del 60-80% entro il 2050

Come avviene la fusione nelle stelle?

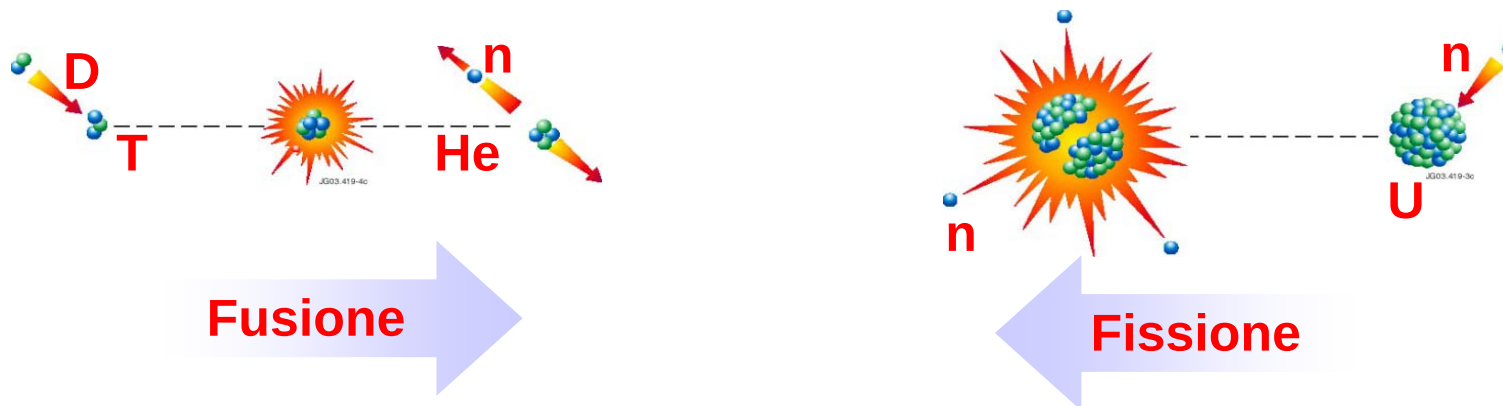


Possiamo fare lo stesso?

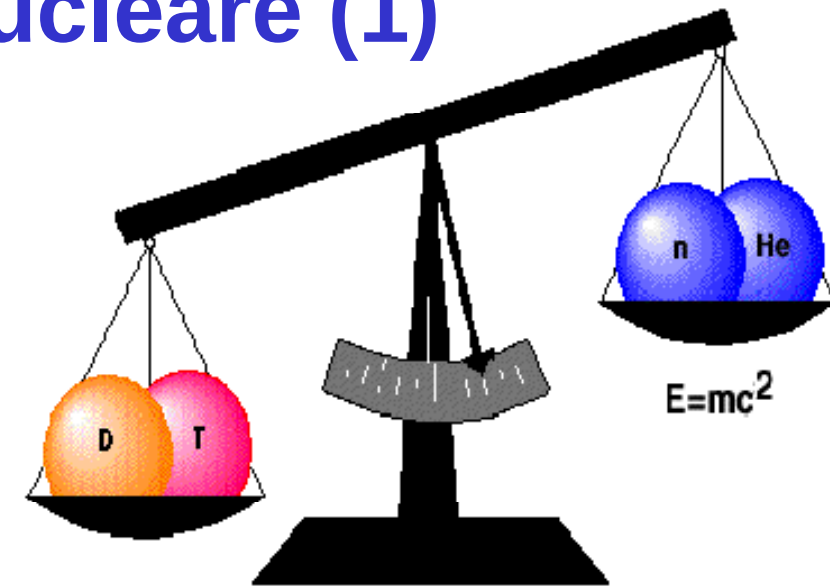
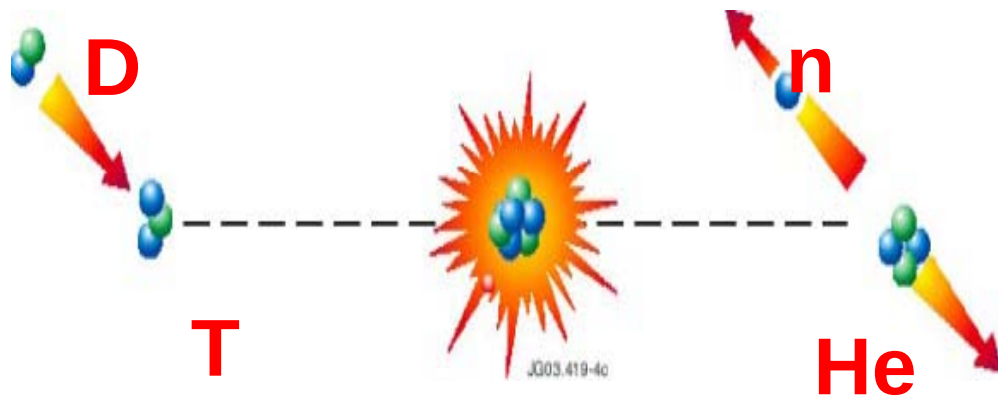
Origine dell'energia nucleare



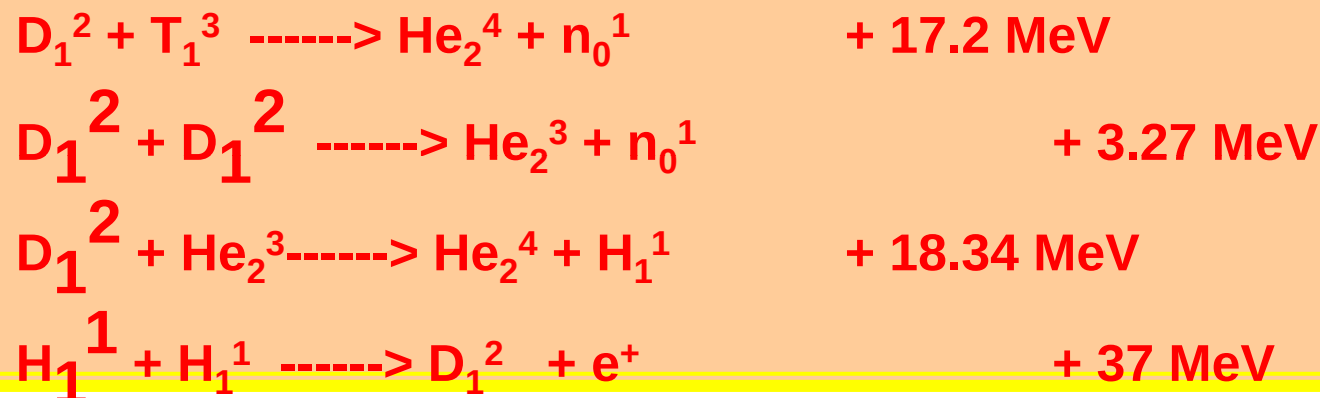
$$= \Delta mc^2$$



La fusione nucleare (1)

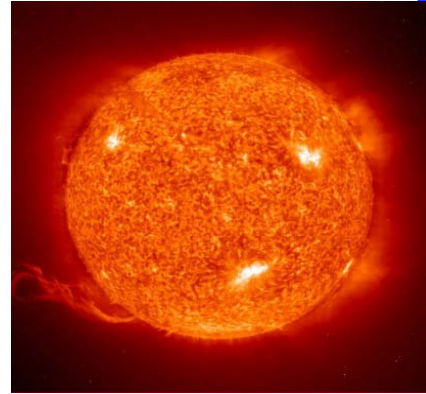


- Massa Deuterio + Trizio = $8.3498 \cdot 10^{-24}$ g
- Massa totale dei prodotti della Fusione nucleare:
 - Elio + 1 neutrone = $8.3192 \cdot 10^{-24}$ g
- $\Delta m = 0.0306 \cdot 10^{-24}$ g = 17.2 MeV



La fusione nucleare (2)

La fusione nucleare avviene continuamente nel sole e nelle altre stelle, e sarebbe vantaggioso riprodurla sulla terra perche':



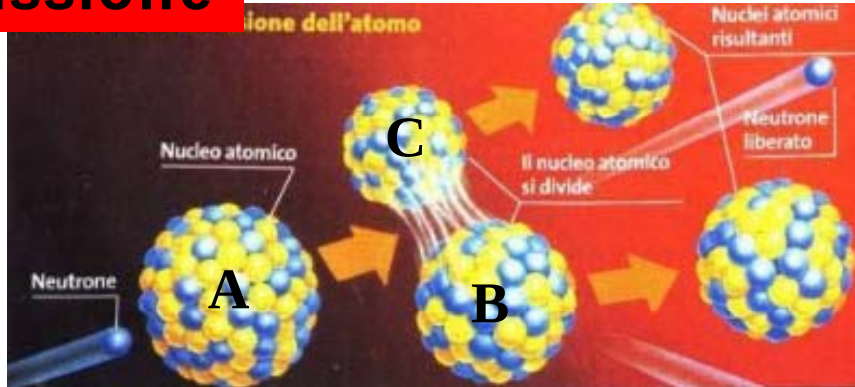
- non viene prodotta CO_2
- assenza di rilevante materiale radioattivo
- produzione costante di energia (permetterebbe di soddisfare il carico di base della rete elettrica)
- disponibilità di materie prime illimitata su scala storica

I problemi:

- l'innesco delle reazioni di fusione richiede temperature molto elevate (>100 milioni di gradi)
- il controllo della materia in queste condizioni straordinarie (plasma) è molto complesso

L'origine dell'energia nucleare: le energie di legame del nucleo sono di MeV (e non eV come per legami molecolari)

Fissione



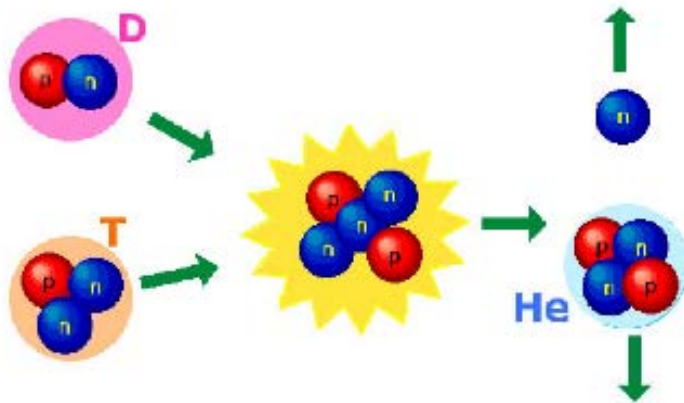
$$E = mc^2$$

$$m \approx 10^{-28} \text{ kg}$$

$$E = 200 \text{ MeV}$$

$$E/m = 95 \text{ MJ/kg}$$

Fusione



$$E = mc^2$$

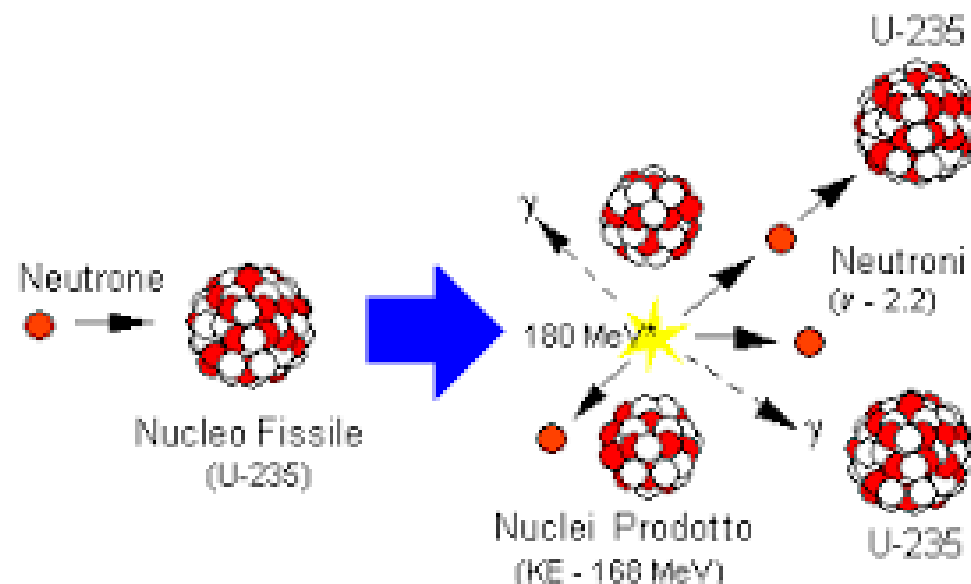
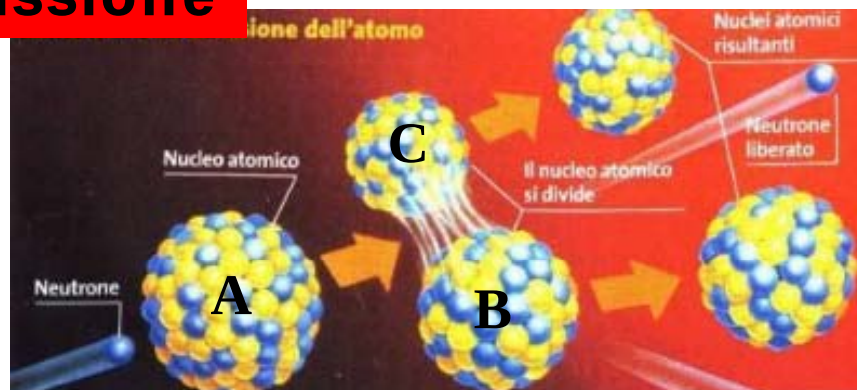
$$m \approx 10^{-29} \text{ kg}$$

$$E = 17.59 \text{ MeV}$$

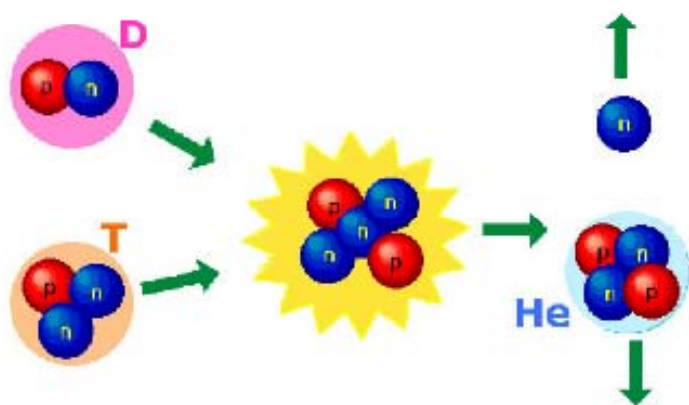
$$E/m = 330 \text{ MJ/kg}$$

La fissione è la proverbiale reazione a catena: un neutrone urta un nucleo 'fissile' che si rompe in due frammenti e 2 o 3 neutroni; e così via

Fissione



Fusione



La fusione non è una reazione a catena:
I due nuclei reagenti hanno lo stesso segno e si respingono, evitando gli urti, a meno che vengano spinti l'uno contro l'altro

Come procurare i reagenti:

- Il D è un isotopo presente nell'acqua del mare $\sim 30 \text{ g/m}^3$
- il T è un isotopo radioattivo di H, vita media 12.33 anni, non si trova in natura e deve essere prodotto nel reattore

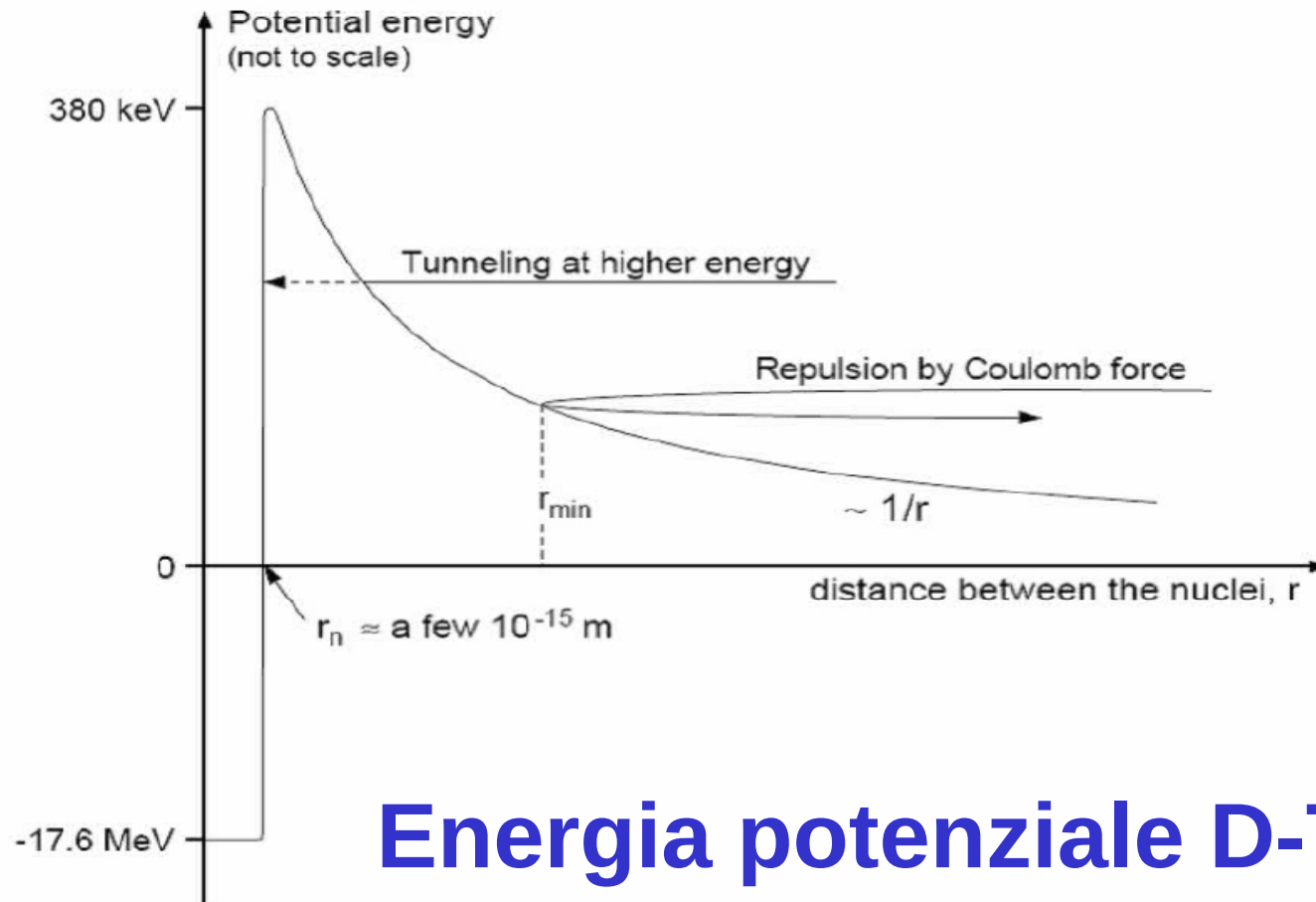


a partire dal litio (presente nell'acqua del mare $\sim 0,2 \text{ g/m}^3$ e nella crosta terrestre) oppure reperito, in quantità limitata, tra i prodotti di reazione di alcuni reattori a fissione.

Il litio verrà posizionato nel mantello (blanket) del reattore, preceduto da uno strato di Berillio che ha la funzione di moltiplicare i neutroni (mediante reazione nucleare tra berillio e neutrone)

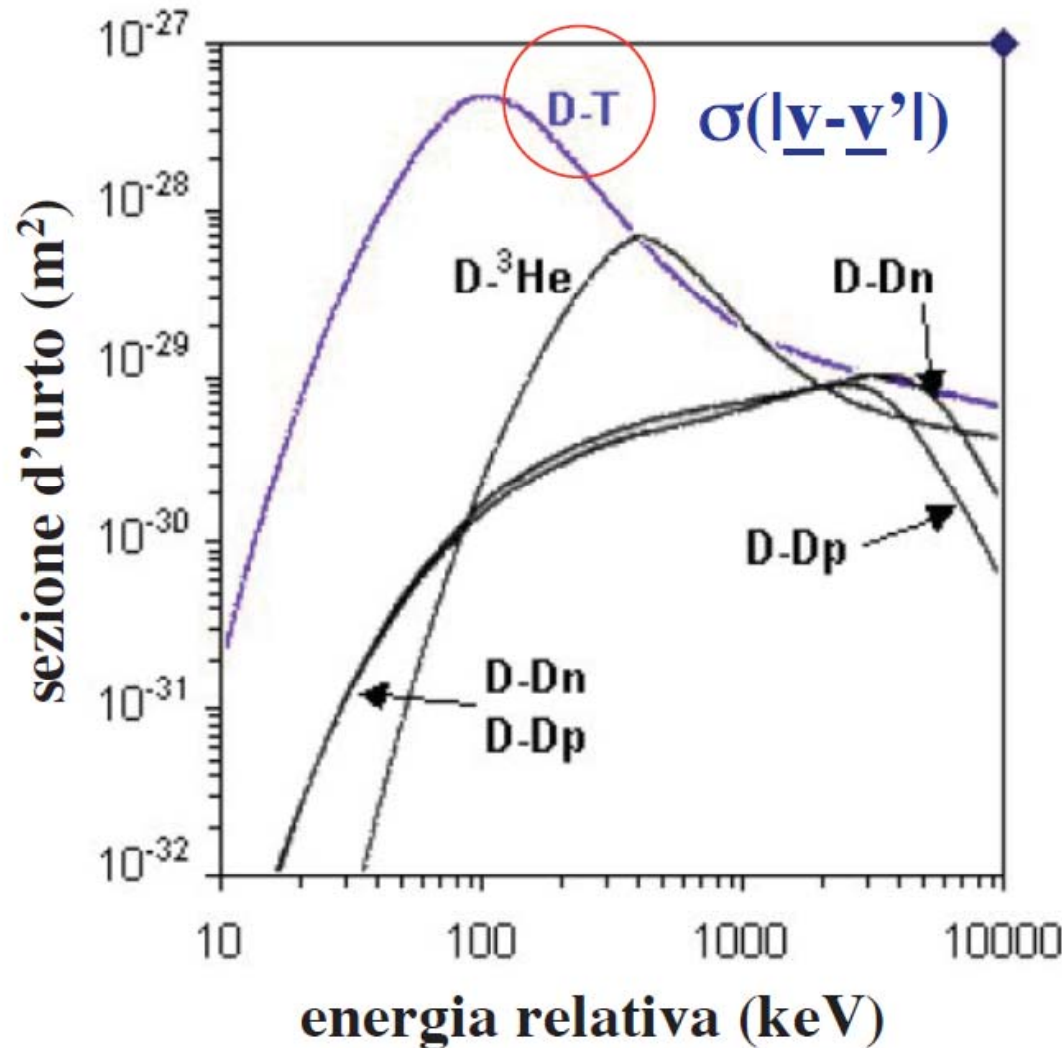
Come avvicinare sufficientemente i nuclei per superare la repulsione far avvenire la fusione

:



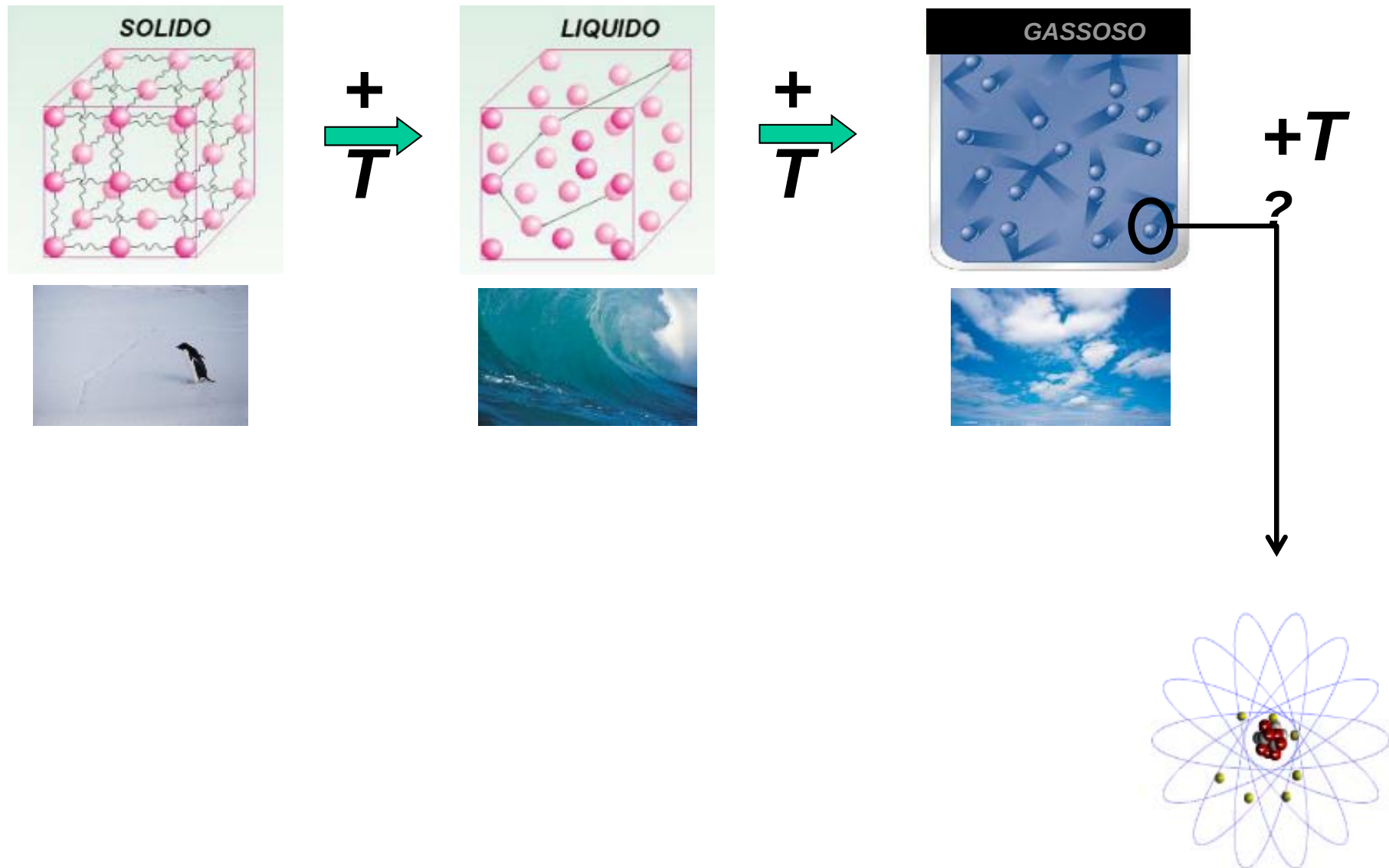
Energia potenziale D-T

Prob. di reazione $D+T \rightarrow {}^4\text{He} (3.52 \text{ MeV}) + n (14.1 \text{ MeV})$

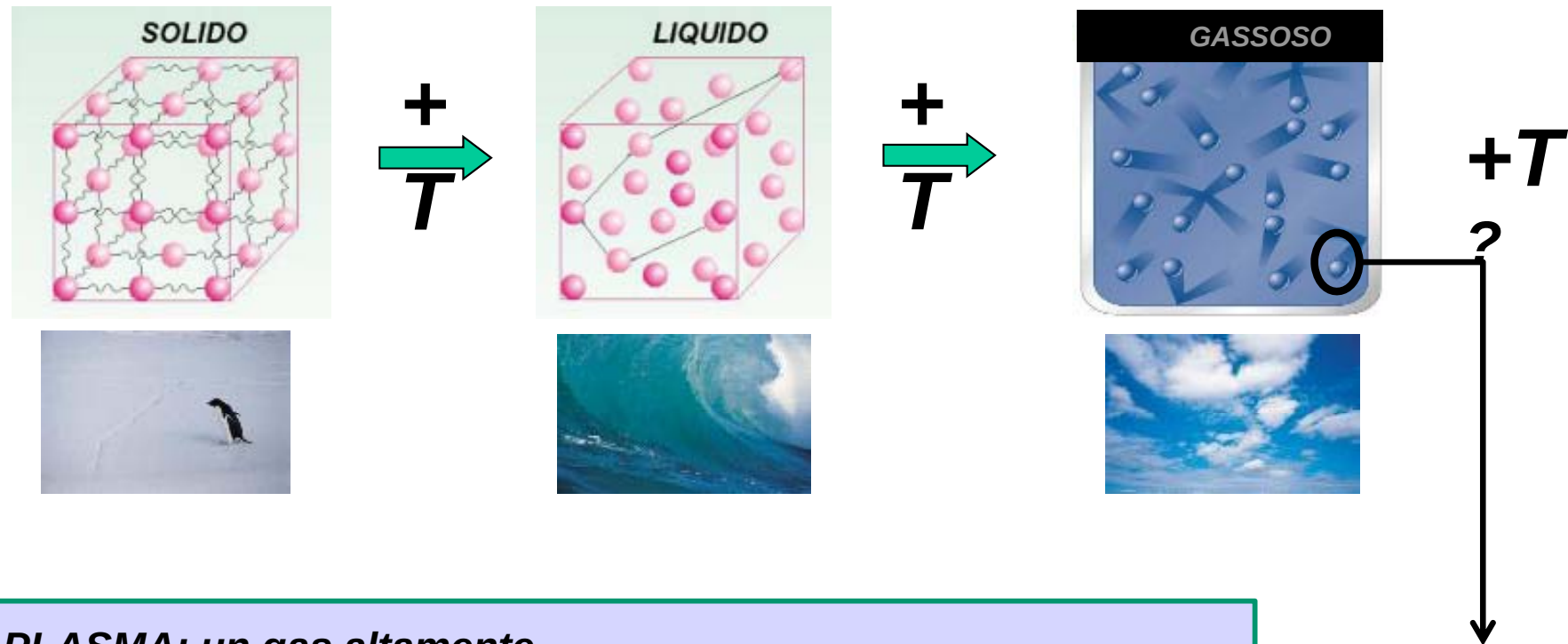


- Misurata ad un acceleratore (dimensionalmente una superficie, in analogia allo scattering di Rutherford).
- Perché D e T si scontrino con sufficiente energia occorre che l'energia cinetica sia almeno 20 keV
- 1 eV sono circa 11 000 deg, **la miscela D-T deve stare ad almeno 10^8K !**

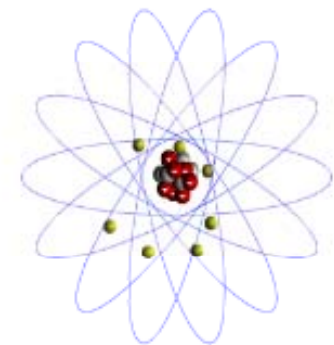
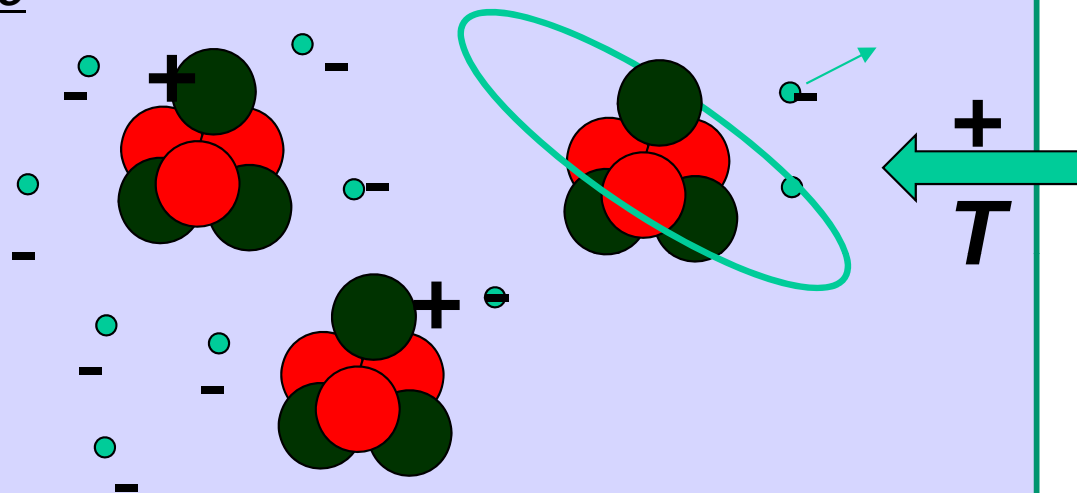
Plasma: il quarto stato della materia



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 natura (sulla Terra) il plasma è uno stato molto raro della materia. Alcuni esempi sono le aurore boreali:

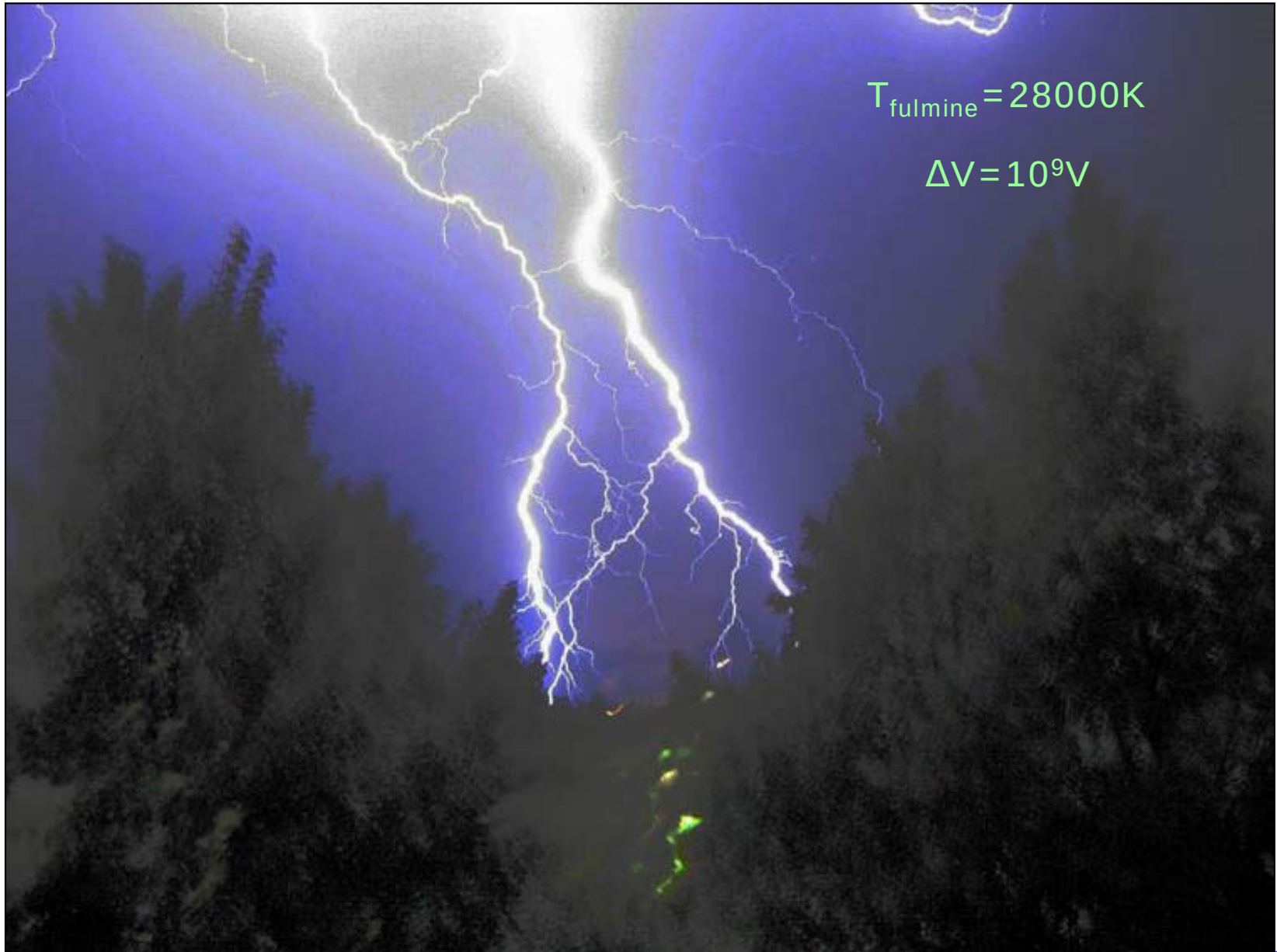


causate da particelle cariche intrappolate nel campo magnetico terrestre



Plasmi in natura

altro
esempio:
i fulmini.



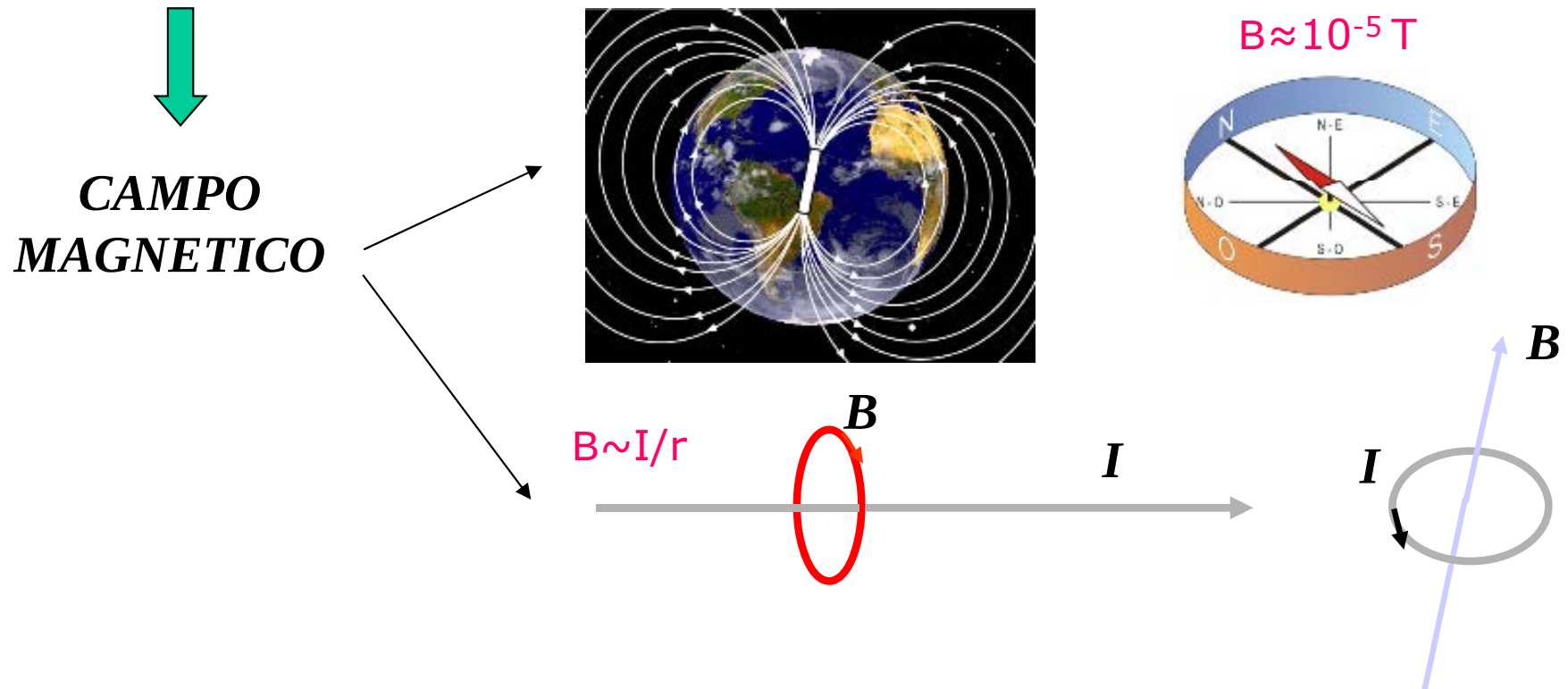
$$T_{\text{fulmine}} = 28000\text{K}$$

$$\Delta V = 10^9\text{V}$$

Fotografia di
Fernando
D'Angelo,
Padova.

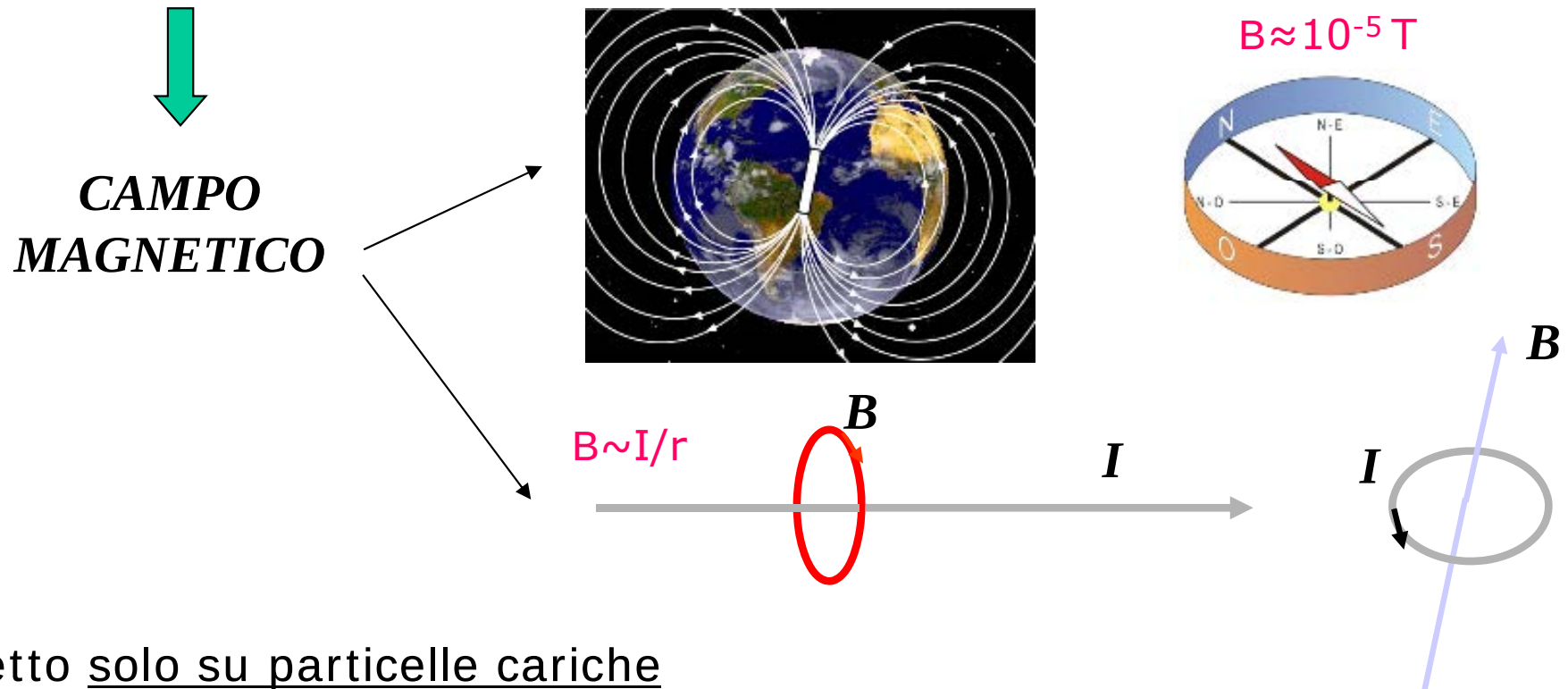
Il “contenitore” è il campo magnetico

- Sono raggiunte altissime temperature (~ 100 milioni di gradi).
Come confinare il plasma?

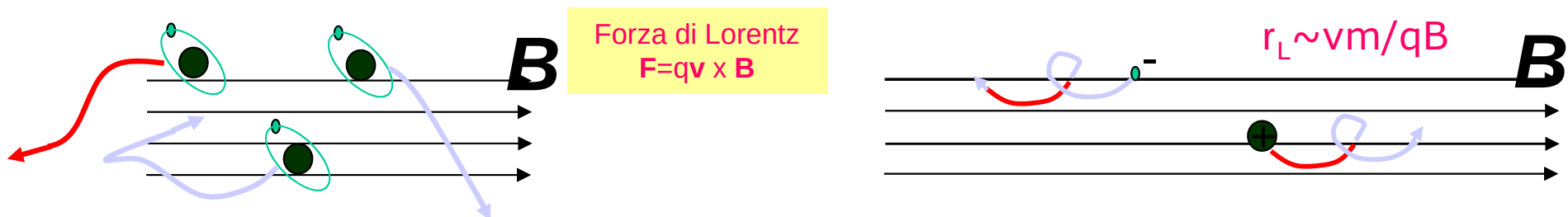


Il “contenitore” è il campo magnetico

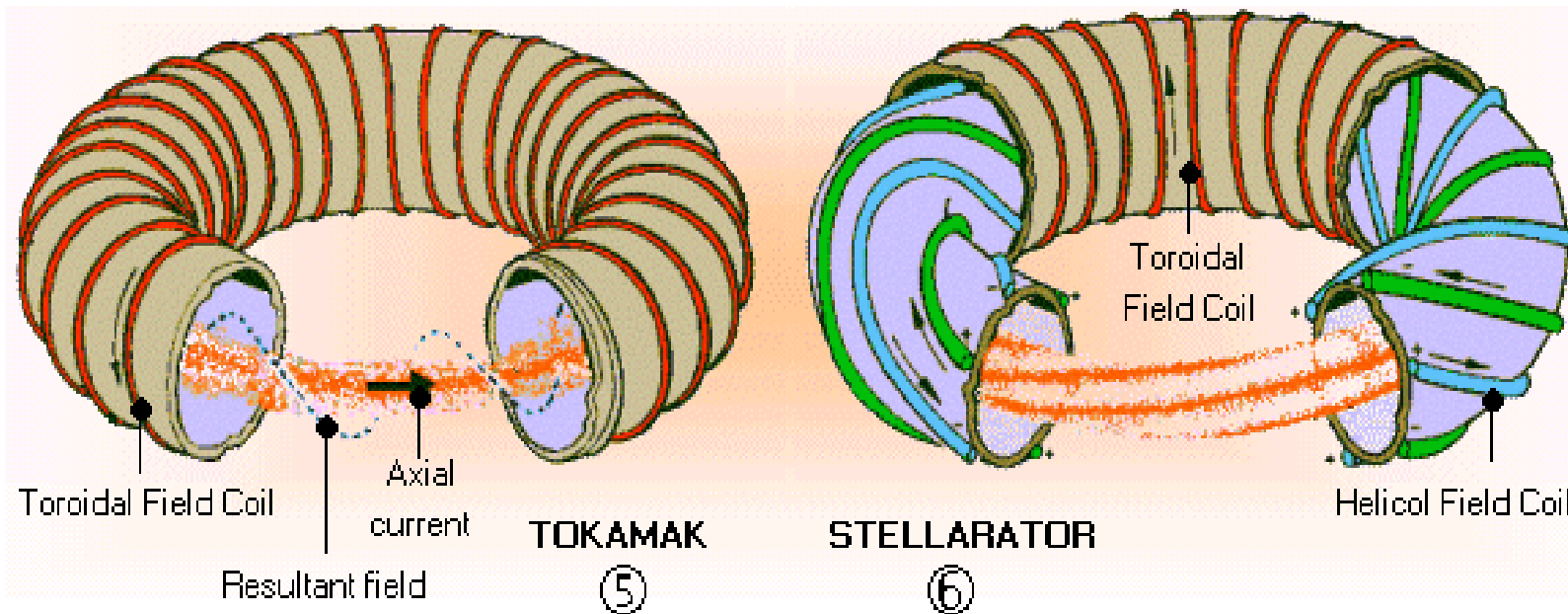
- Sono raggiunte altissime temperature (~100 milioni di gradi).
Come confinare il plasma?



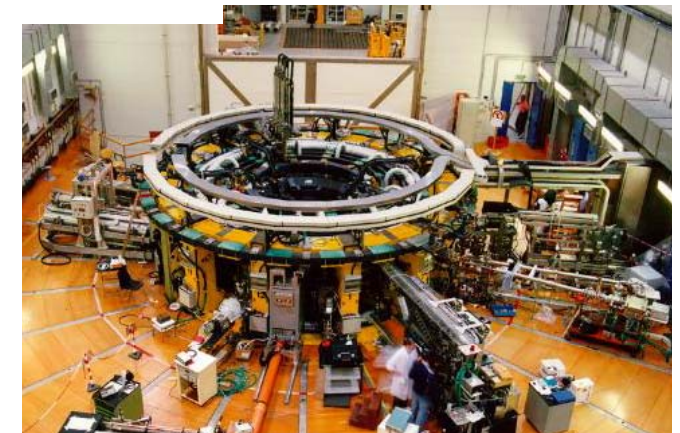
- Effetto solo su particelle cariche



Fusione in laboratorio: confinamento



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



RFX Camin, Padova

Requisiti del campo magnetico: forma (1) e forza (2)

(1) La forma a ciambella ossia ad anello (in geometria: toro, e vediamo quanto la geometria e' importante)

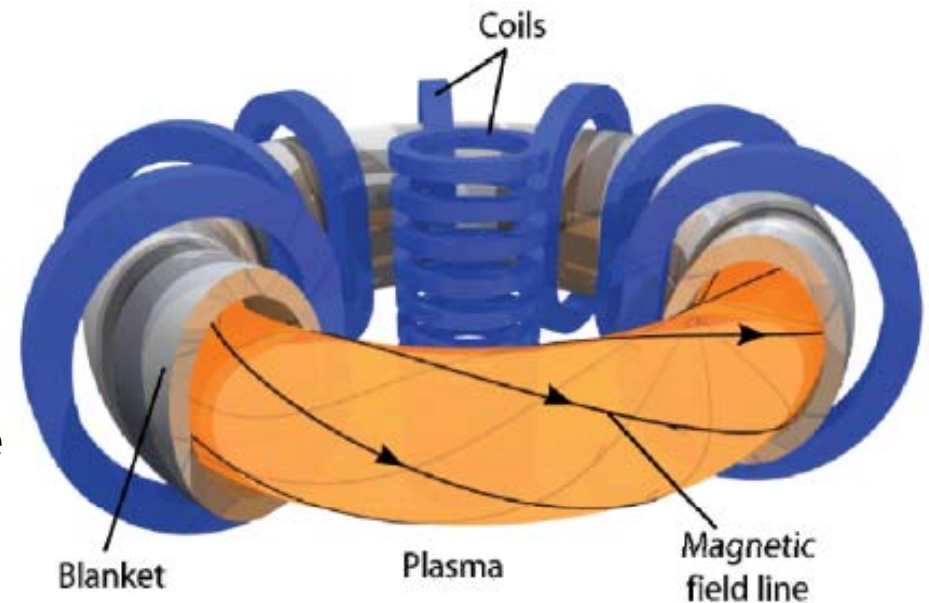
(1.1) Gli elettroni girano/spiraleggiano velocemente (decine di ps) intorno alle linee di campo magnetico con un raggio (detto di Larmor) molto piccolo: il che e' un inizio di confinamento

(1.2) Ma spiraleggiando gli elettroni potrebbero viaggiare lungo le linee di campo (e scappare in microsecondi); dunque si progetta il reattore con linee di campo chiuse ad anello (in russo: to ka mak)

(1.2) Gli elettroni confinati attirano gli ioni: ma in qualche millisecondo, i loro moti potrebbero auto-organizzarsi collettivamente in modo da sfuggire a linee di campo semplicemente chiuse ad anello; per cui le linee in un tokamak sono ritorte su stesse per confinare meglio l'insieme di ioni ed elettroni (miscelare i moti collettivi, per impedirli)

(1.3) Ovviamente ci sono forme di linee di campo magnetico piu' complesse di un **tokamak: lo stellarator ed il reversed field pinch** ad esempio ancora piu' difficili da realizzare a parita di intensita di campo magnetico

Linee di campo di forma opportuna:
CIAMBELLA o TORO



Requisiti del campo magnetico: forza/intensita (2)

(2) La forza o in termini ufficiali, la pressione p_m del campo magnetico deve essere molto piu' grande della pressione del plasma, in una formula

$$p = nk_B(T_i + T_e) \ll \frac{B_T^2}{2\mu_0} = p_m$$

p_m = pressione/trazione sugli elementi magnetici

p = pressione del plasma, T_i temperatura degli ioni, T_e temperatura degli elettroni

n densità degli elettroni o degli ioni (circa 10^{20} m^{-3} in ITER)

B_T campo magnetico toroidale (5.3 T in ITER)

(per confronto, un tipico elettromagnete di potenza con nucleo di ferro raggiunge circa 1.5 T)

La costante di Boltzmann $k_B = 1.3804 * 10^{-23} \text{ J/K}$ esprime come energia (in Joules, simbolo J) l'effetto di temperature misurate in gradi Kelvin (simbolo K)

La costante permeabilità magnetica del vuoto $\mu_0 = 1.257 * 10^{-6} \text{ Tm / A}$ esprime l'interazioni di campi magnetici (nome ufficiale: densità di flusso magnetico), misurati in Tesla (simbolo T) e correnti (misurate in Ampere, simbolo A).

ITER:

$p \approx 2.5 \text{ atm}$

$p_m \approx 10^2 \text{ atm}$

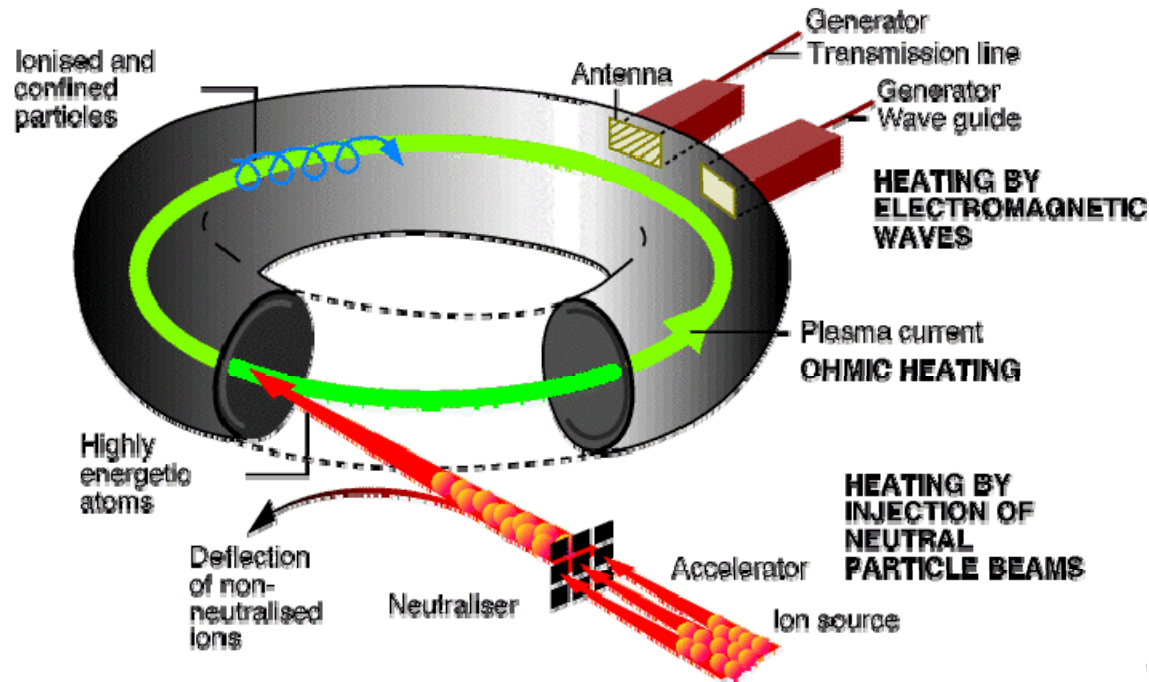
(atm e' il simbolo dell'unita' di misura atmosfera; [confronta una gomma auto: aria a 2+1 atm](#). L'unita SI di pressione e' il pascal, simbolo Pa, con equivalenza $1 \text{ atm} = 10^5 \text{ Pa}$)

Fusione termonucleare controllata: linee di ricerca a confinamento magnetico

- Tokamak (ITER)
 - Configurazione magnetica semplice e superfici isobare ben definite
 - alto tempo di confinamento dell'energia (1s)
 - **Elevati campi magnetici -> bobine superconduttrici**
 - **Limite in corrente per il riscaldamento ohmico (instabilità) -> riscaldamenti aggiuntivi**
- Stellarator
 - Semplicità concettuale di progettazione della configurazione magnetica
 - No corrente di plasma (meno instabilità) -> **riscaldamenti aggiuntivi**
 - **Elevata complessità tecnologica nella costruzione delle bobine**
- Reversed Field Pinch (RFX-mod)
 - Configurazione magnetica auto-organizzata
 - Assenza di un limite in corrente di plasma -> riscaldamento ohmico
 - **tempo di confinamento ridotto (3-4 ms) a causa della caoticità del campo magnetico**

Ma come riscaldare il plasma a temperature termonucleari?

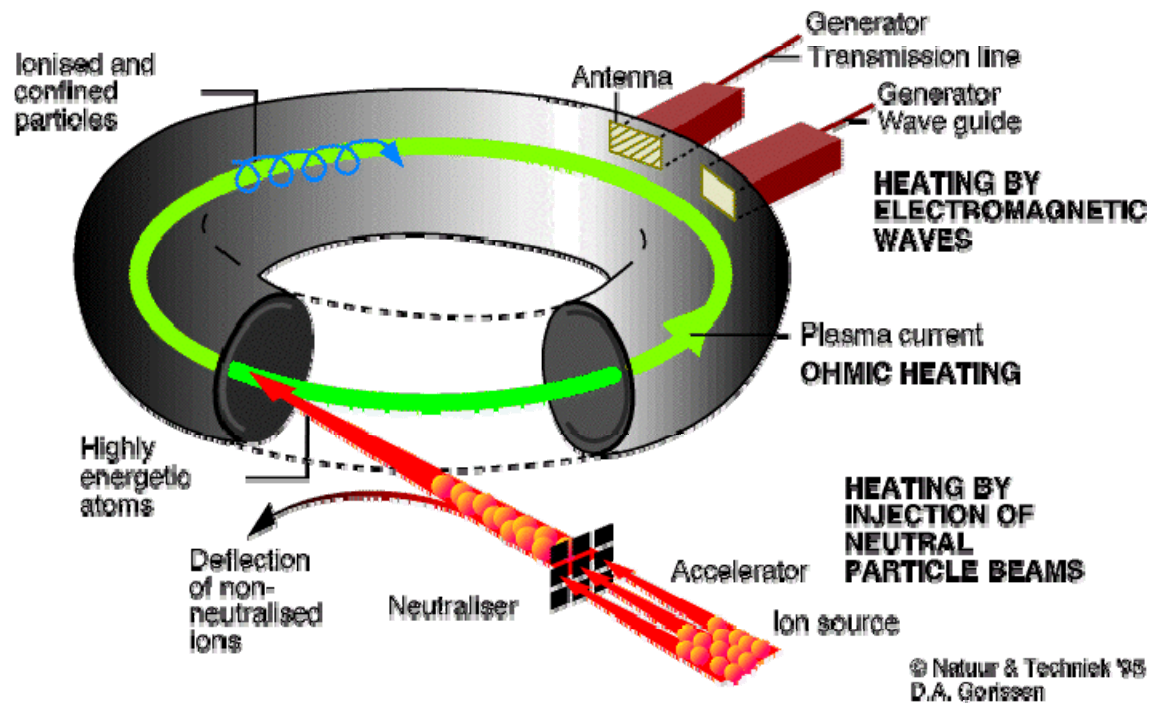
Fusione in laboratorio: riscaldamento



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



Fusione in laboratorio: riscaldamento



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



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



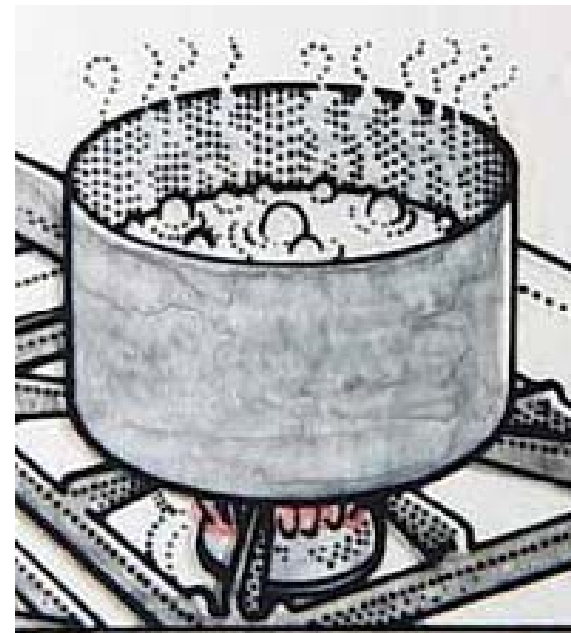
Condizioni di ignizione

- Tempo di **confinamento energetico** τ

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + P_{ext}$$

È il tempo in cui il sistema lasciato a sé stesso si raffredda, P_{ext} è la potenza del riscaldamento esterno; dipende dalla capacità termica e dai sistemi di trasmissione dell'energia (casi macroscopici può essere di molti minuti).

Per il plasma caldo τ è dell'ordine dei secondi (principalmente dissipazione per bremsstrahlung).



Condizioni di ignizione

- Tempo di **confinamento energetico** τ

$$\frac{dW}{dt} = -\frac{W}{\tau} + P_{ext}$$

È il tempo in cui il sistema lasciato a sé stesso si raffredda, P_{ext} è la potenza del riscaldamento esterno; dipende dalla capacità termica e dai sistemi di trasmissione dell'energia (casi macroscopici può essere di molti minuti).

Per il plasma caldo τ è dell'ordine dei secondi (principalmente dissipazione per bremsstrahlung).

La densità di plasma dell'ordine di 10^{20} m^{-3} .

La condizione di ignizione del plasma, ovvero condizione in cui l'energia di fusione trasmessa al plasma (energia cinetica dell'elio) mantiene la temperatura del plasma **si esprime come prodotto di temperatura x densità del plasma x tempo di confinamento.**



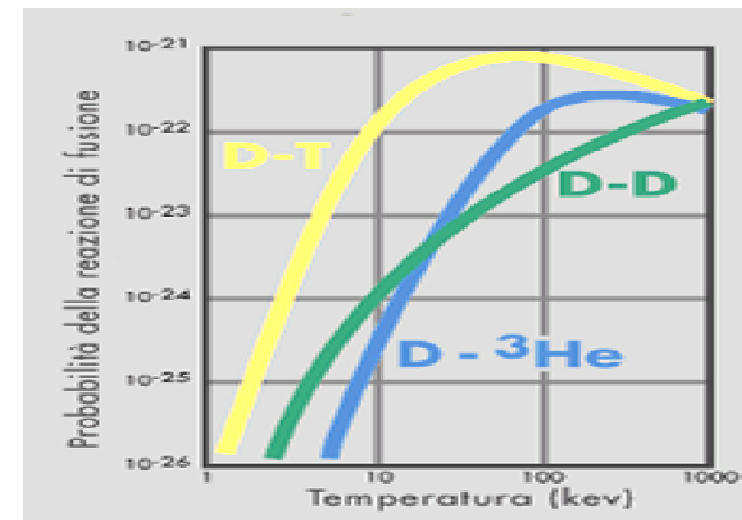
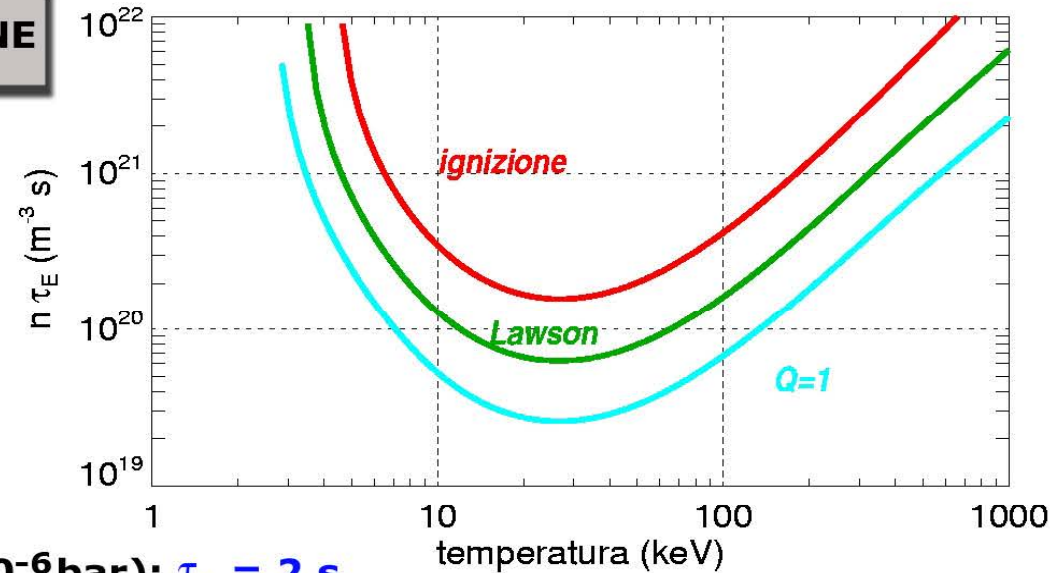
$$nT\tau > 3 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ s keV}$$

Condizioni per realizzare la fusione: il criterio di Lawson (1957)

CARATTERISTICHE DEL PLASMA PER FUSIONE

- **temperatura:** $T = 230.000.000^{\circ} \text{C} = 20 \text{ keV}$
- **densità per tempo di confinamento:**
$$n \tau_E = \frac{10^{20} \text{ atomi} \cdot \text{s}}{\text{m}^3}$$

per es.:
 - **plasma a densità atmosferica:** $\tau_E = 2 \mu\text{s}$
 - **plasma a densità di laboratorio (pressione 10^{-6} bar):** $\tau_E = 2 \text{ s}$
- Si definisce un fattore di guadagno:
 $Q = \text{energia ricavata} / \text{energia immessa}$
- Il criterio di Lawson porta a concludere che un reattore, per essere economicamente conveniente, richiede almeno $Q > 3$ ($Q = 10$ nei recenti studi)



Risultati ottenuti per i parametri di fusione

prodotto triplo $n\tau T$: densità del plasma · tempo di confinamento dell'energia · temperatura del plasma:

$$nT\tau [m^{-3}s keV]$$

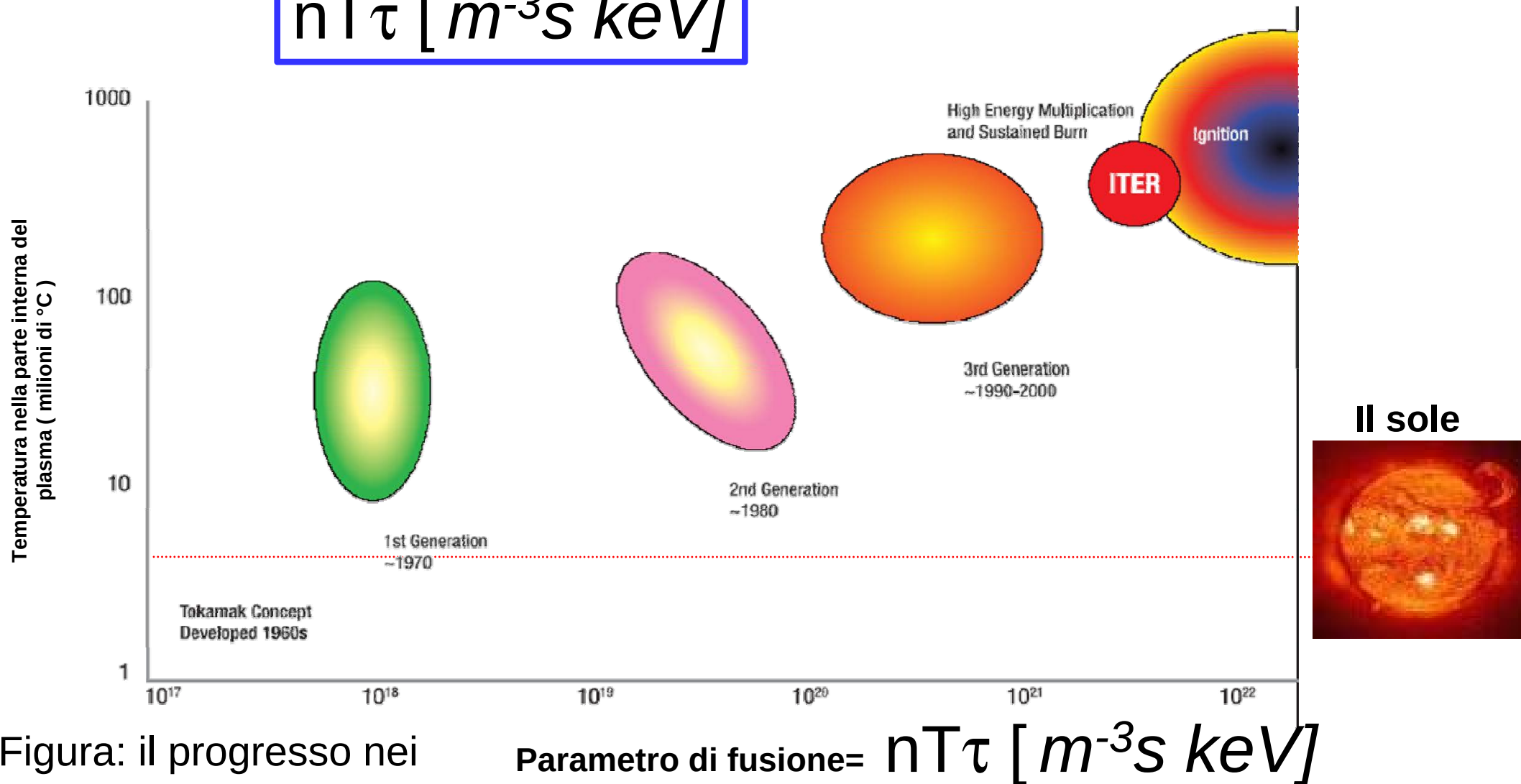


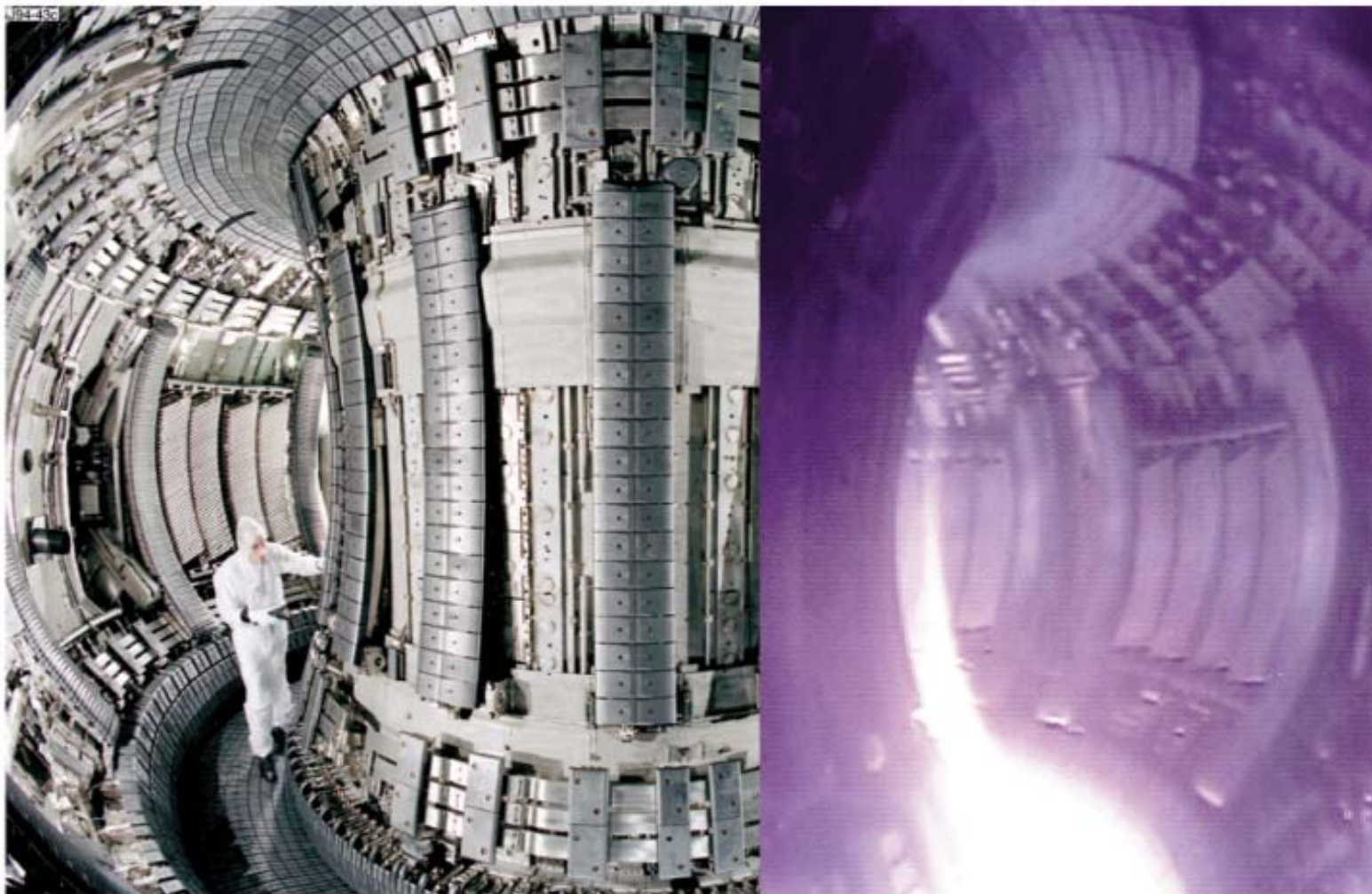
Figura: il progresso nei parametri di fusione

Parametro di fusione= $nT\tau [m^{-3}s keV]$

-

Pisent & Cavenago, Fusion experiments: ITER, RFX and IFMIF, Univ. Padova, Dip. Fisica G. Galilei, 14-17/3/16

Plasmi in laboratorio: JET (Joint European Torus)



Nel 1997 a JET hanno svolto esperimenti in D+T 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

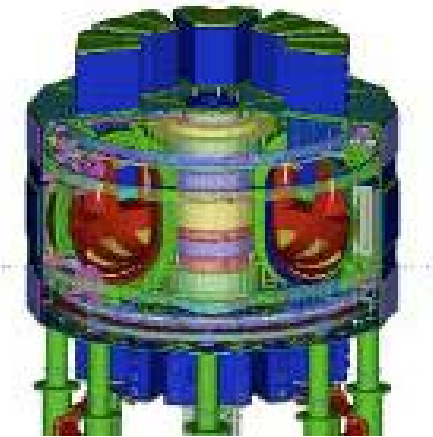
Quattro nuovi tokamak superconduttivi saranno dedicati allo studio dei problemi delle configurazioni tokamak stazionarie avanzate nei “non-burning” plasmi



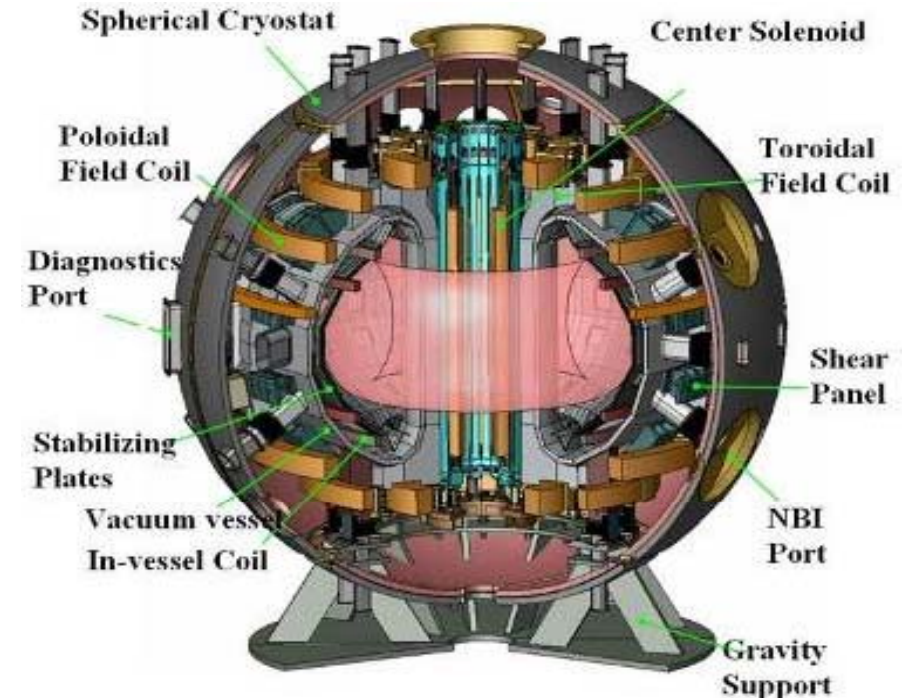
Cina EAST: $R = 1.7\text{m}$, 2MA, 2006



Korea KSTAR: $R = 1.8\text{m}$, 2MA, 2008

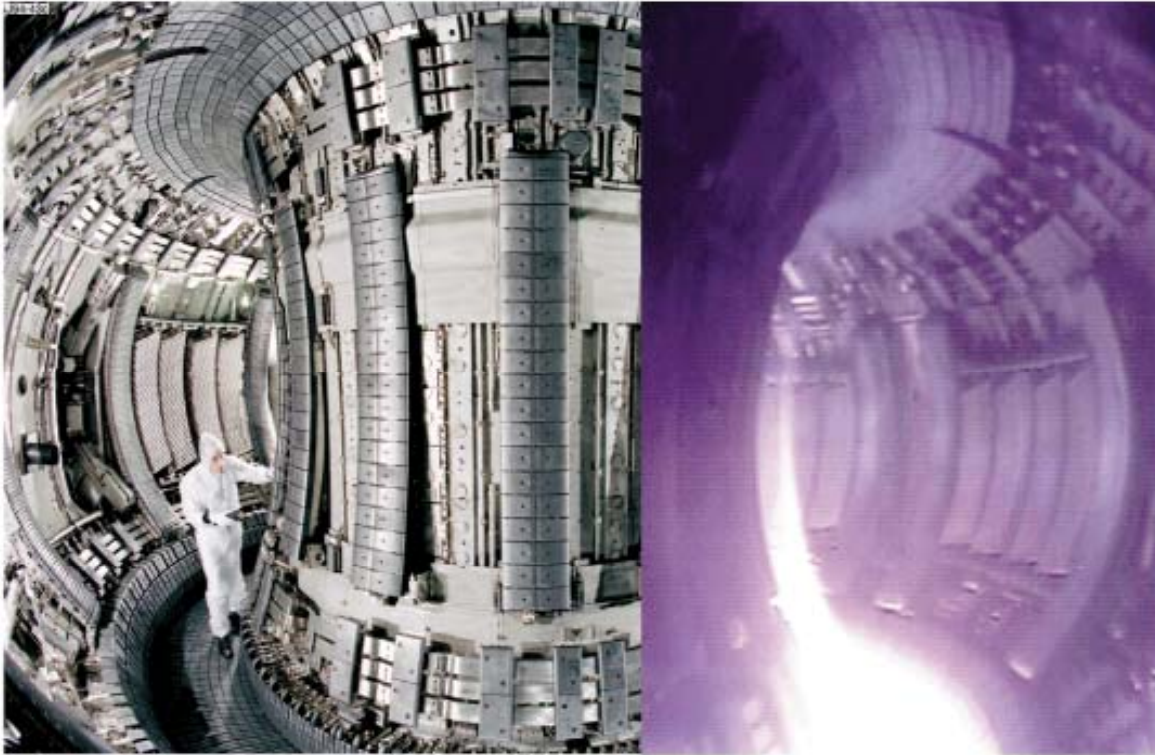


India SST-1: $R = 1.1\text{m}$, 0.22MA, 2008



Japan JT-60SA: $R = 3\text{m}$, 5.5 MA, 2014

Fusione: approccio multidisciplinare



Fisica:

- *Instabilità magnetiche*
- *Interazione plasma – parete*
- *Funzionamento continuo*
- *Burning plasma*

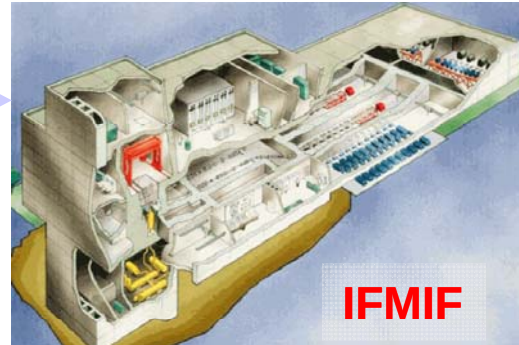
Scienze dei materiali:

- *Flussi potenza (10-20 MW/m²)*
- *Flusso neutronico*
- *Limitato inquinamento del plasma*

Ingegneria:

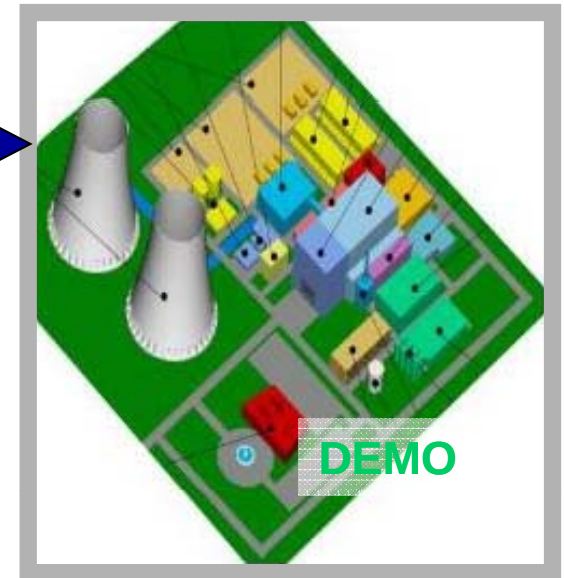
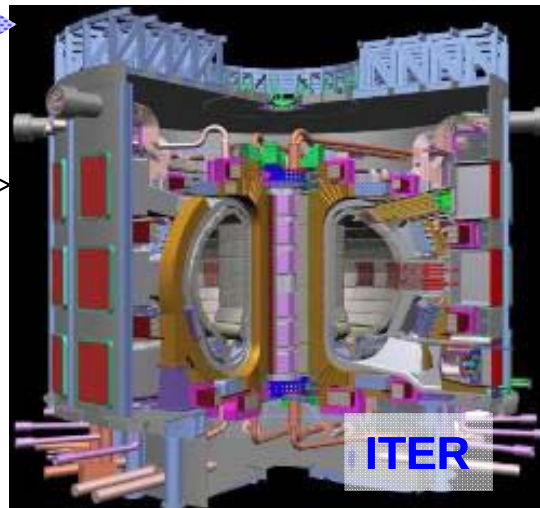
- *Tecnologia dei superconduttori*
- *Sistemi di potenza ausiliaria*
- *Movimentazione remota robotizzata*

**Materiali strutturali
e moduli mantello**



Sistema integrato:

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



Impianti per R&S

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

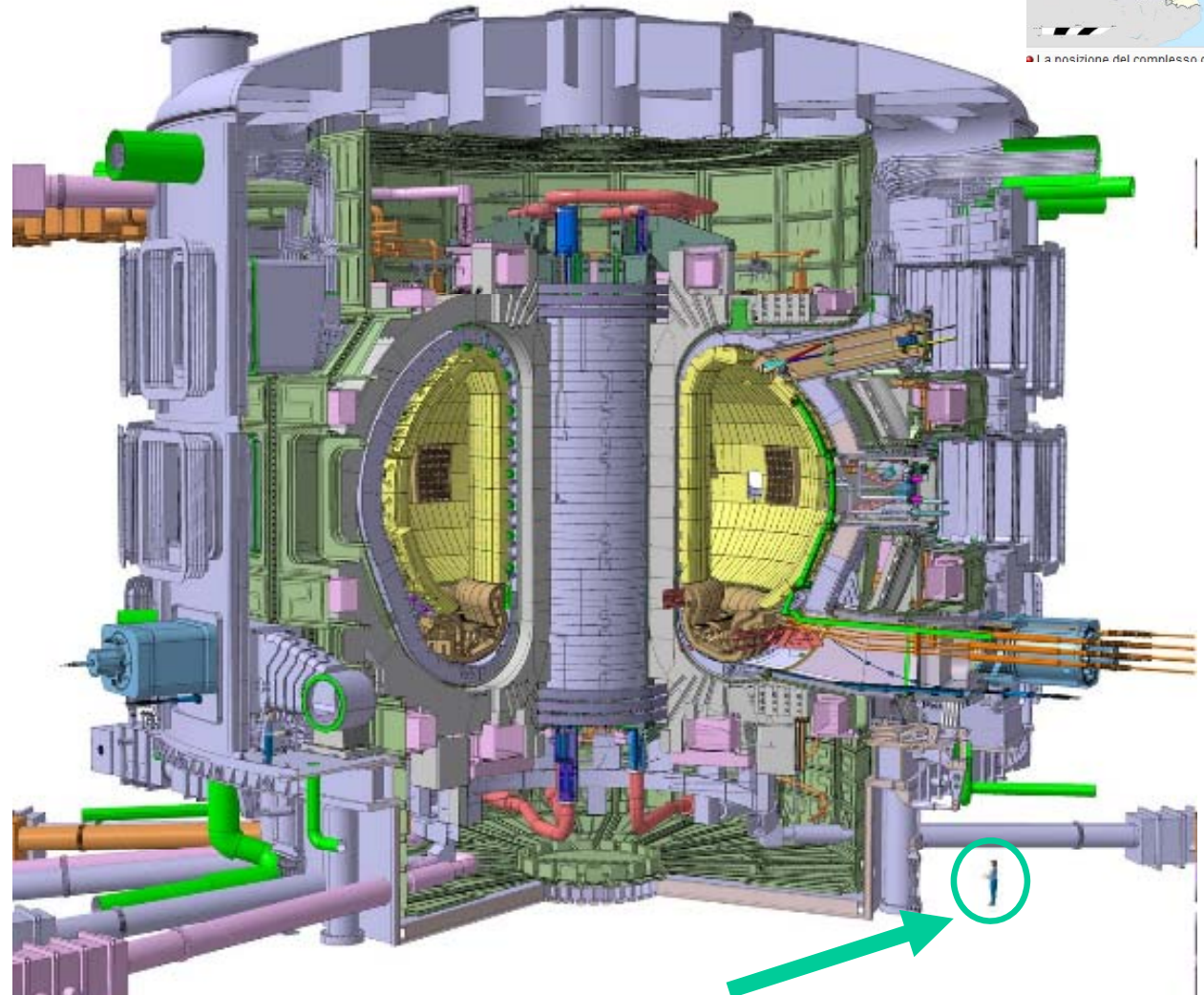
**JET, JT60-SA, FAST
altre macchine**

1) Il futuro: il progetto ITER

International Thermonuclear Experimental Reactor



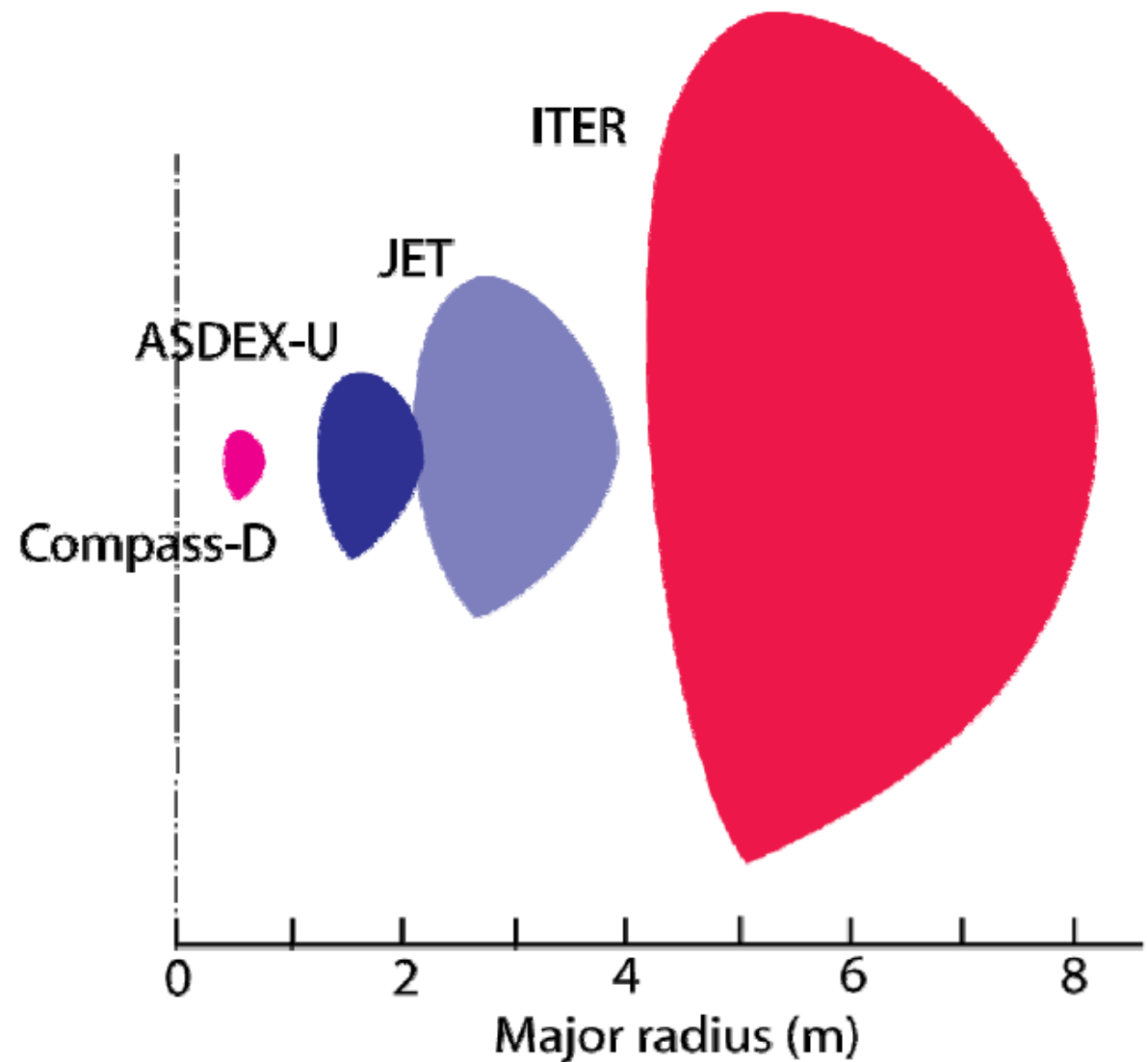
La posizione del complesso di ITER

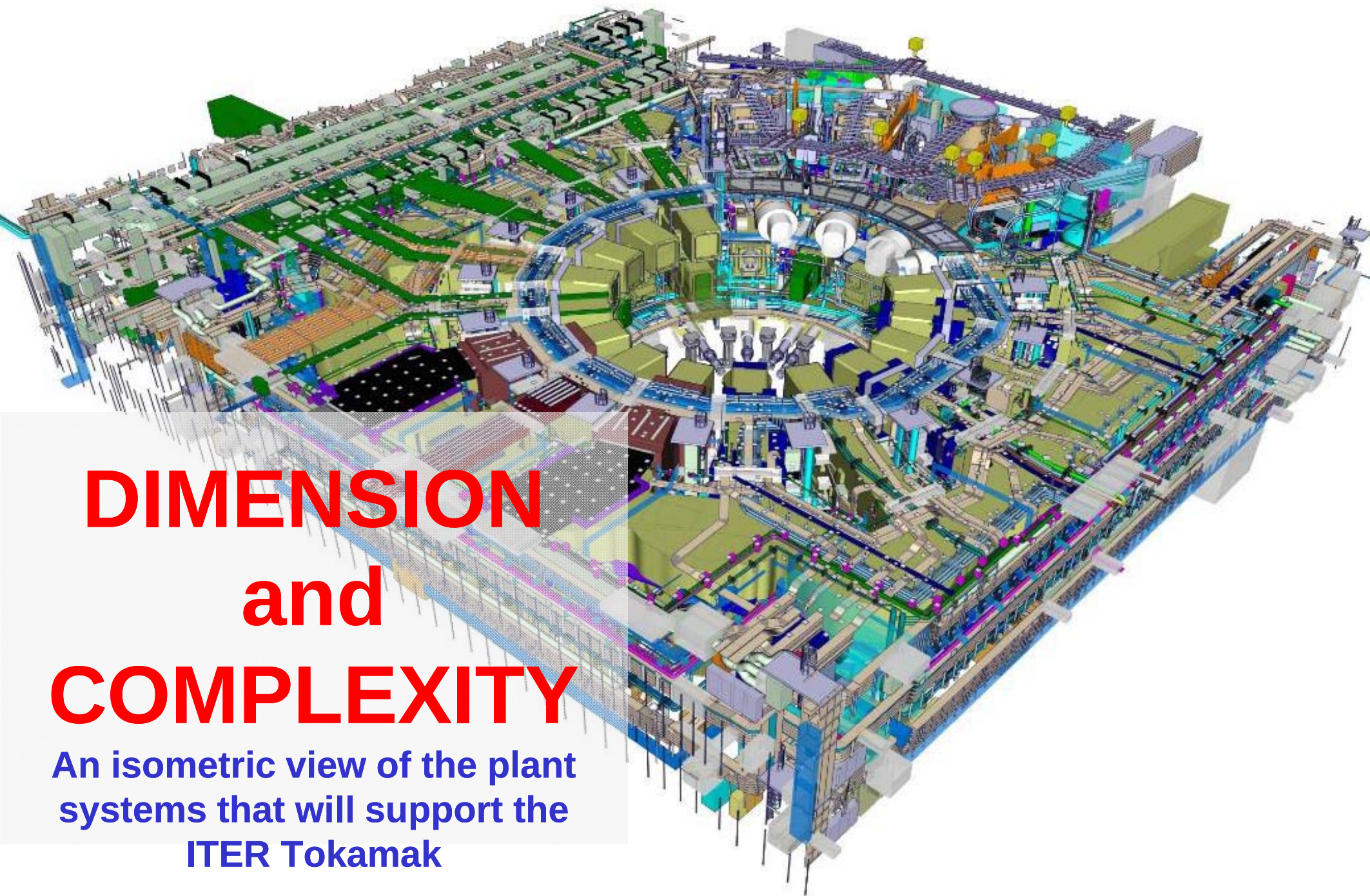


Dimensione di una persona in ITER

Obiettivi di ITER

- Dimostrare la capacità tecnologica di costruire e gestire un impianto da fusione 10 volte più grande di JET
- Operare stabilmente con $Q = 5-10$
- Studiare un plasma stazionario che produce energia da fusione in laboratorio
- Sviluppare e studiare la tecnologia per gestire il Tritio
- Provare sistemi di confinamento e riscaldamento del plasma

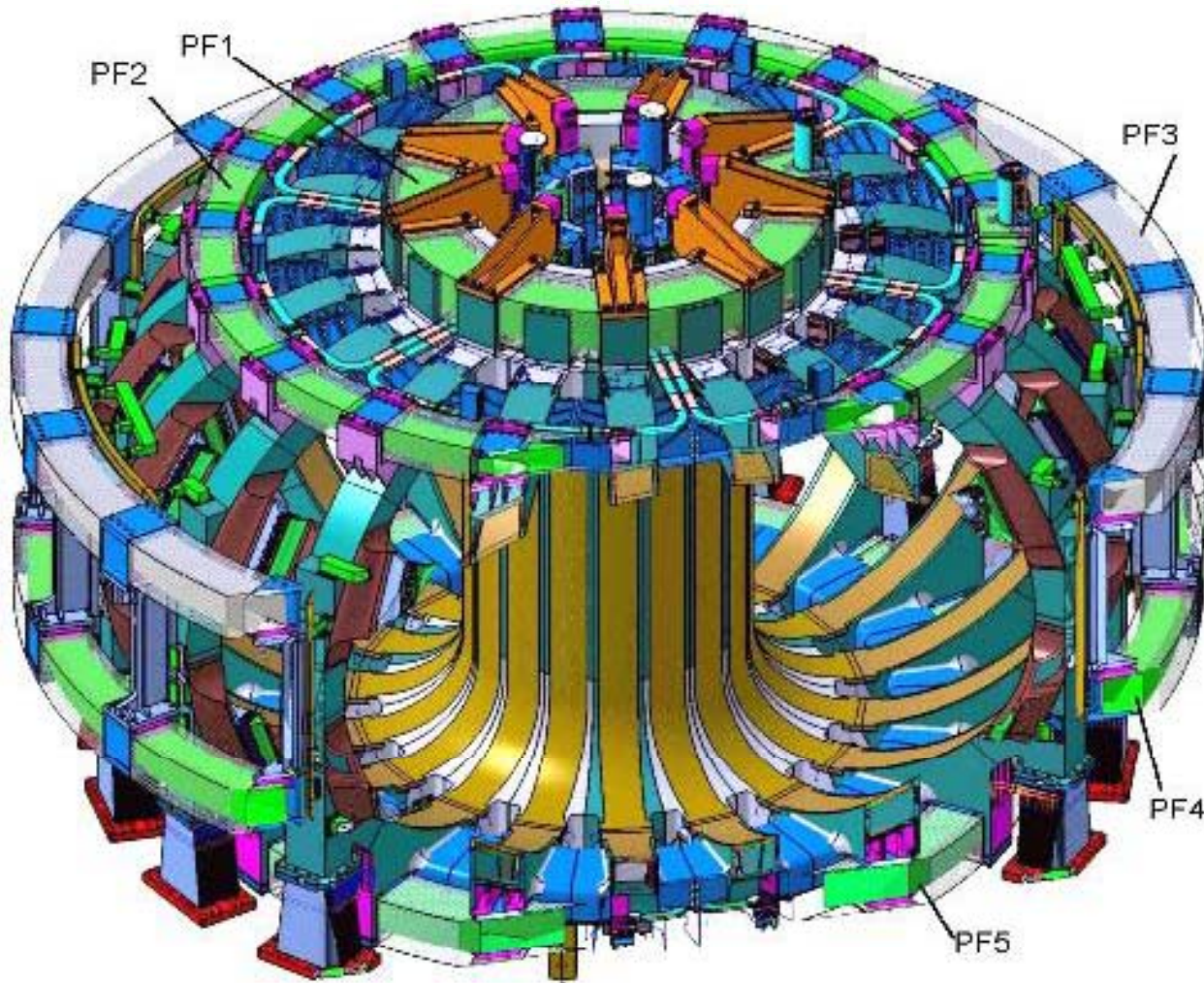




DIMENSION and COMPLEXITY

**An isometric view of the plant
systems that will support the
ITER Tokamak**

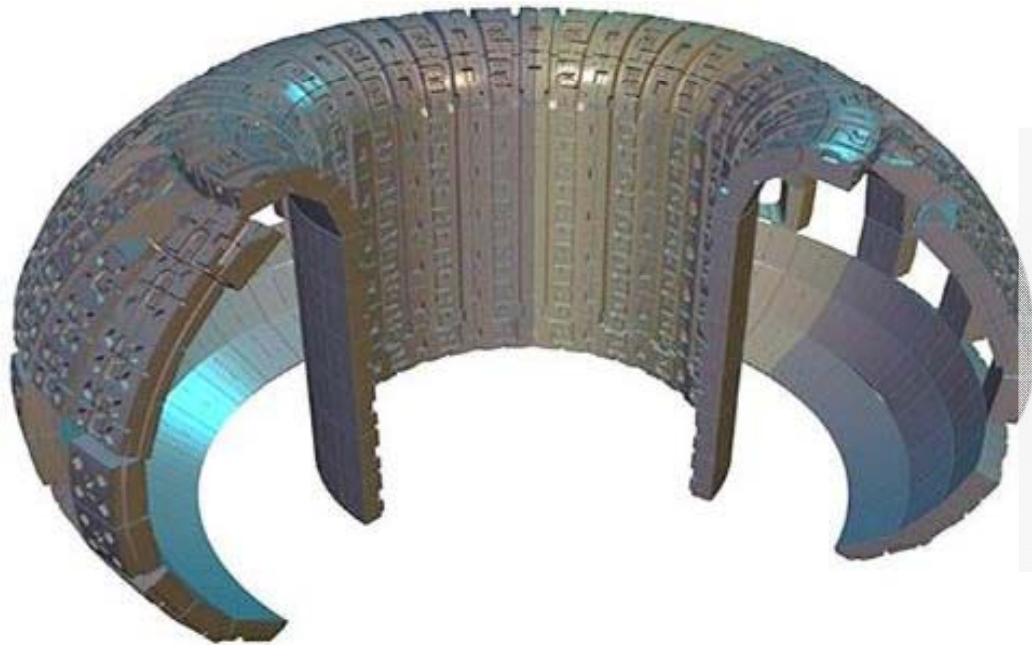
To pinch the plasma away from the walls and contribute to maintaining the plasma's shape and stability



POLOIDAL COILS

IT IS WHERE

the kinetic energy of neutrons is transformed into heat energy and collected by the coolants



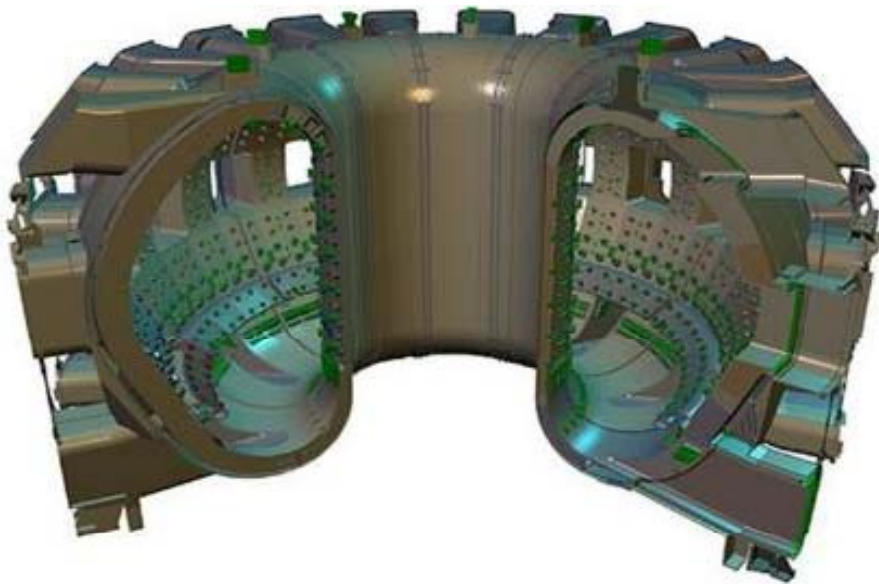
THE BLANKET

The blanket covers the interior surfaces of the vacuum vessel, providing shielding to the vessel and the superconductive magnets from the high thermal loads from the heat and neutron fluxes of the fusion reaction.

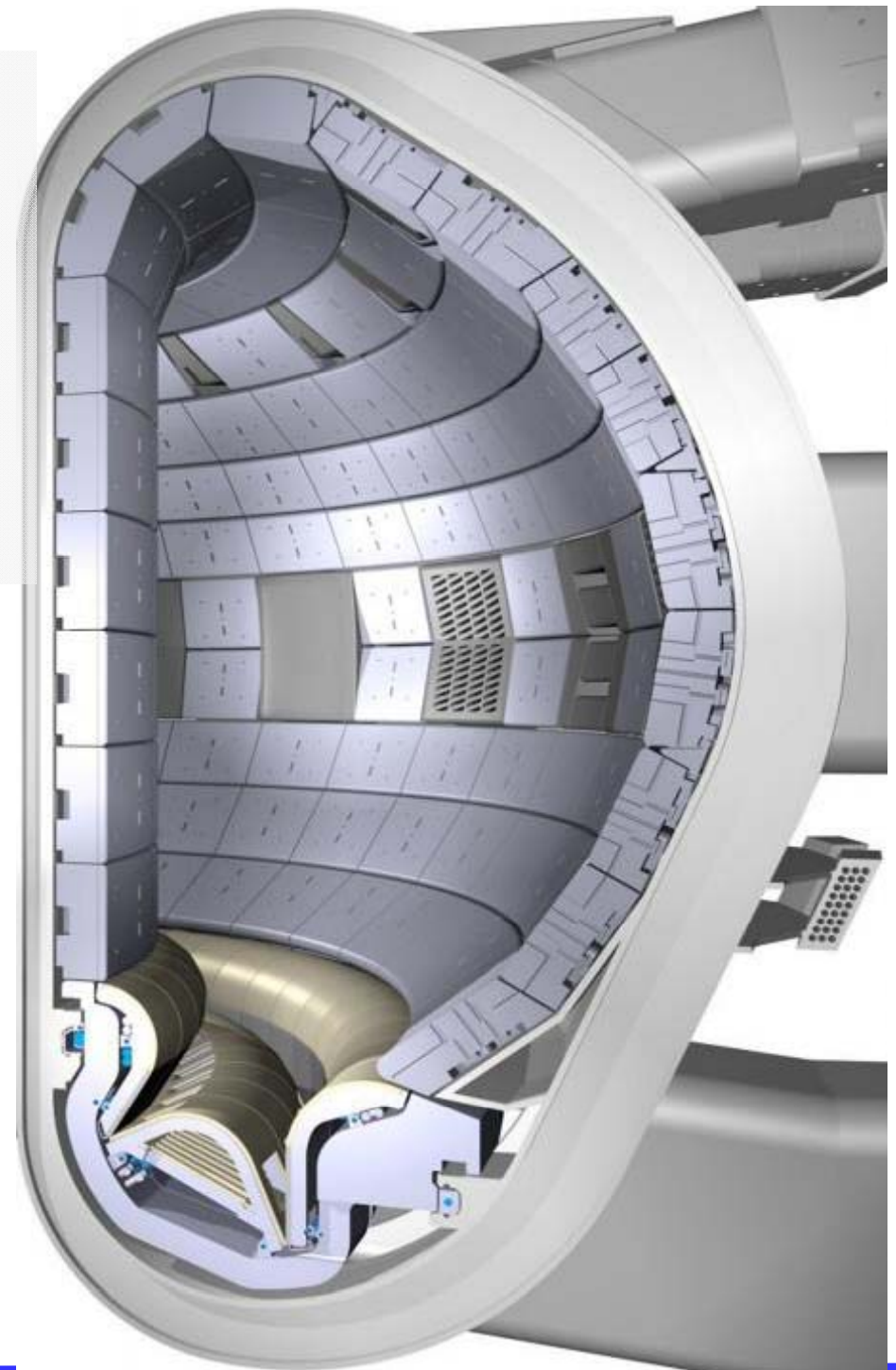
ITER

VACUUM VESSEL

A hermetically-sealed steel container inside the cryostat that houses the fusion reaction and acts as a first safety containment barrier



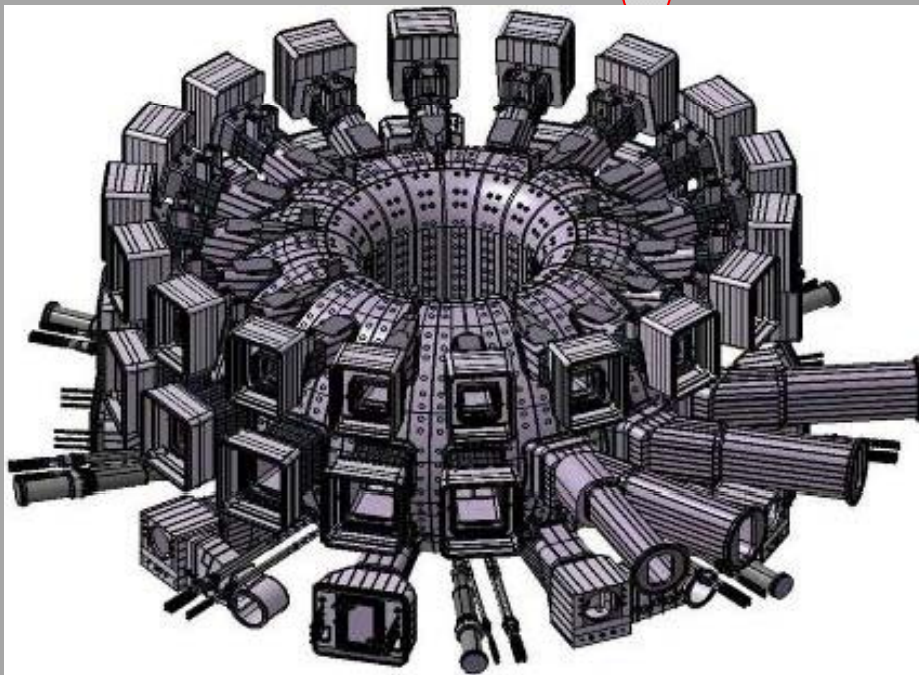
Cut-away of the ITER vacuum vessel showing the blanket modules attached to its inner wall and the divertor at the bottom.



~ 7300t
324m

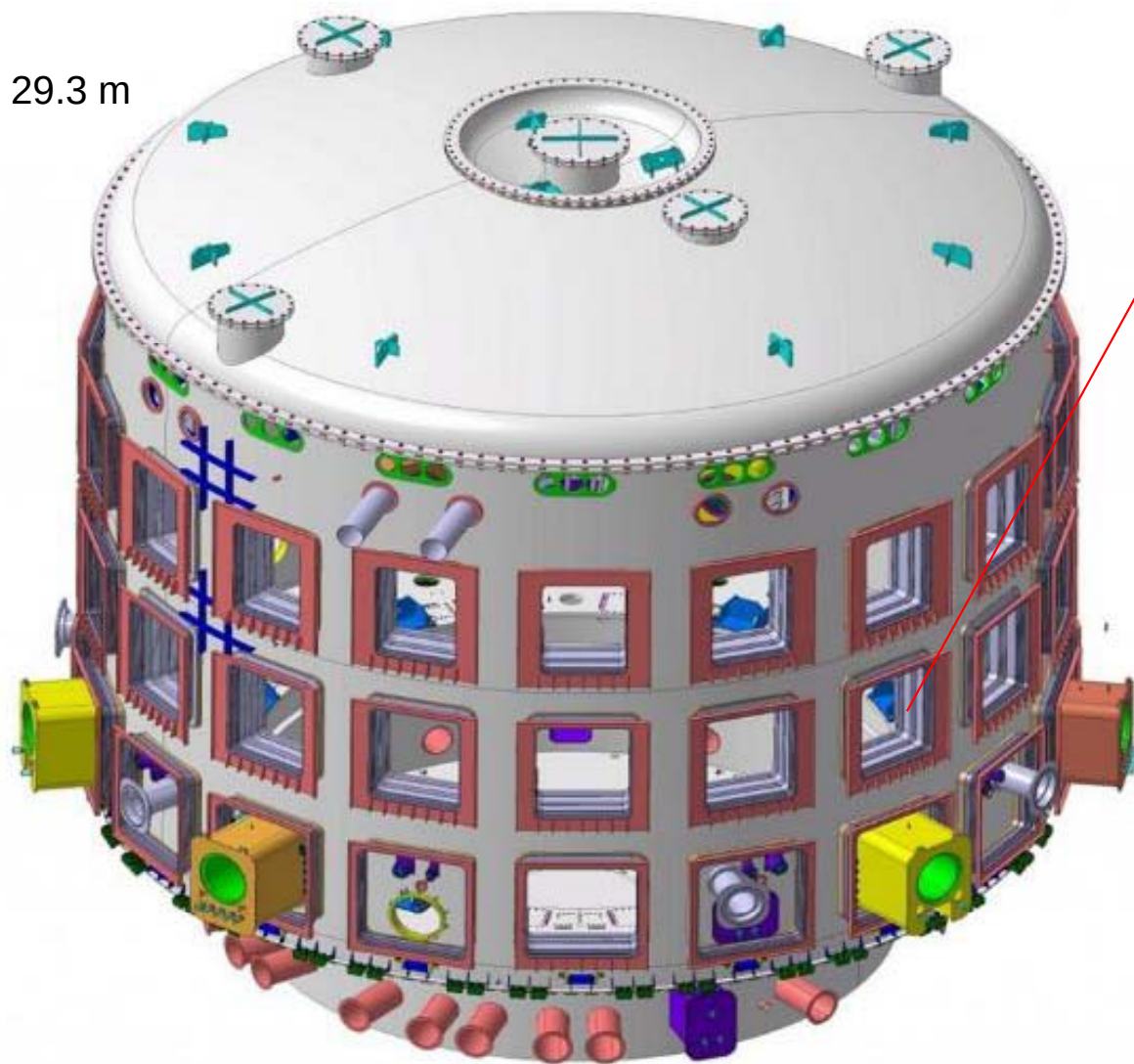


~ 8000t
11,3 m
d=19,4m



Double steel walls, with passages for cooling water to circulate between them. The inner surfaces of the vessel will be covered with blanket modules that will provide shielding from the high-energy neutrons produced by the fusion reactions. Forty-four ports will provide access to the vacuum vessel for remote handling operations, diagnostic systems, heating, and vacuum systems: 18 upper ports, 17 equatorial ports, and 9 lower ports.

Ports allow access to the vacuum vessel for cooling systems, magnet feeders, auxiliary heating, diagnostics, and the removal of blanket and divertor parts.



CRYOSTAT

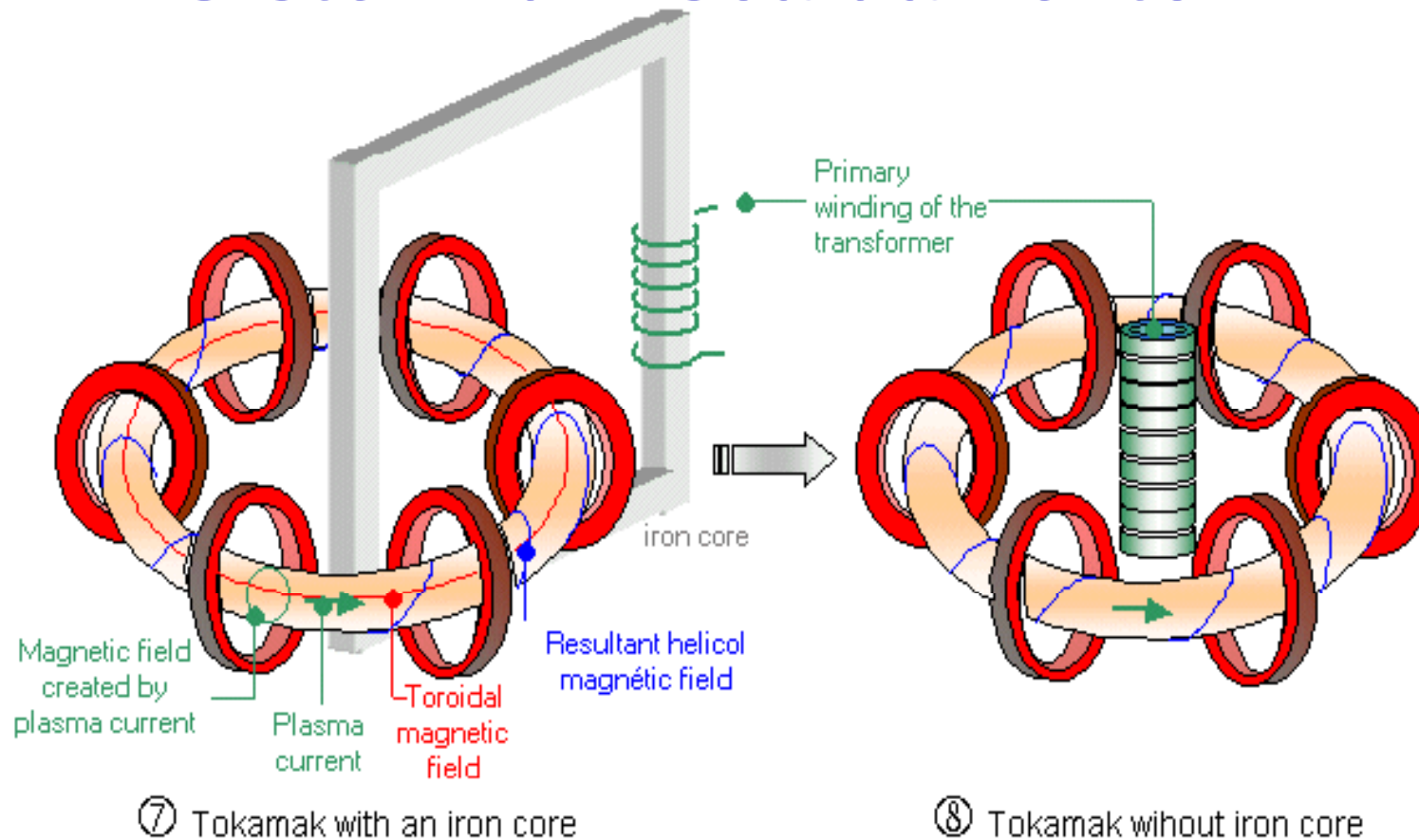
a large, stainless steel structure surrounding the vacuum vessel and superconducting magnets, providing a super-cool, vacuum environment.

It is made up of a single wall cylindrical construction, reinforced by horizontal and vertical ribs.

Large bellows are used between the cryostat and the vacuum vessel to allow for thermal contraction and expansion in the structures.

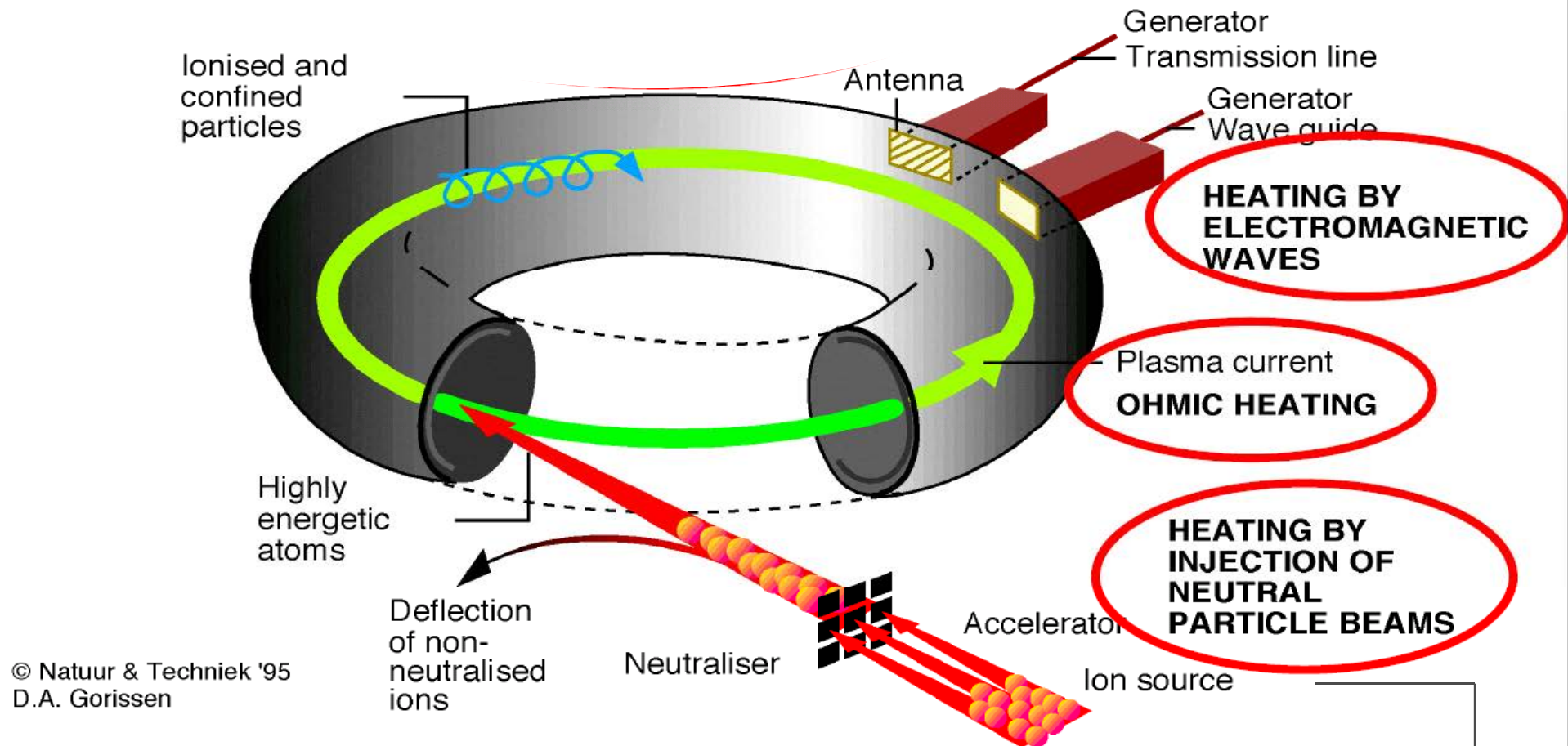
The cryostat is completely surrounded by a concrete layer known as the bioshield. Above the cryostat, the bioshield is two metres thick.

Sistemi di riscaldamento



All'accensione il tokamak viene scaldato con l'induzione elettromagnetica; ma non e' sufficiente per ITER

Sistemi di riscaldamento aggiuntivi



ITER Construction Site / AIF about 0.8 km²

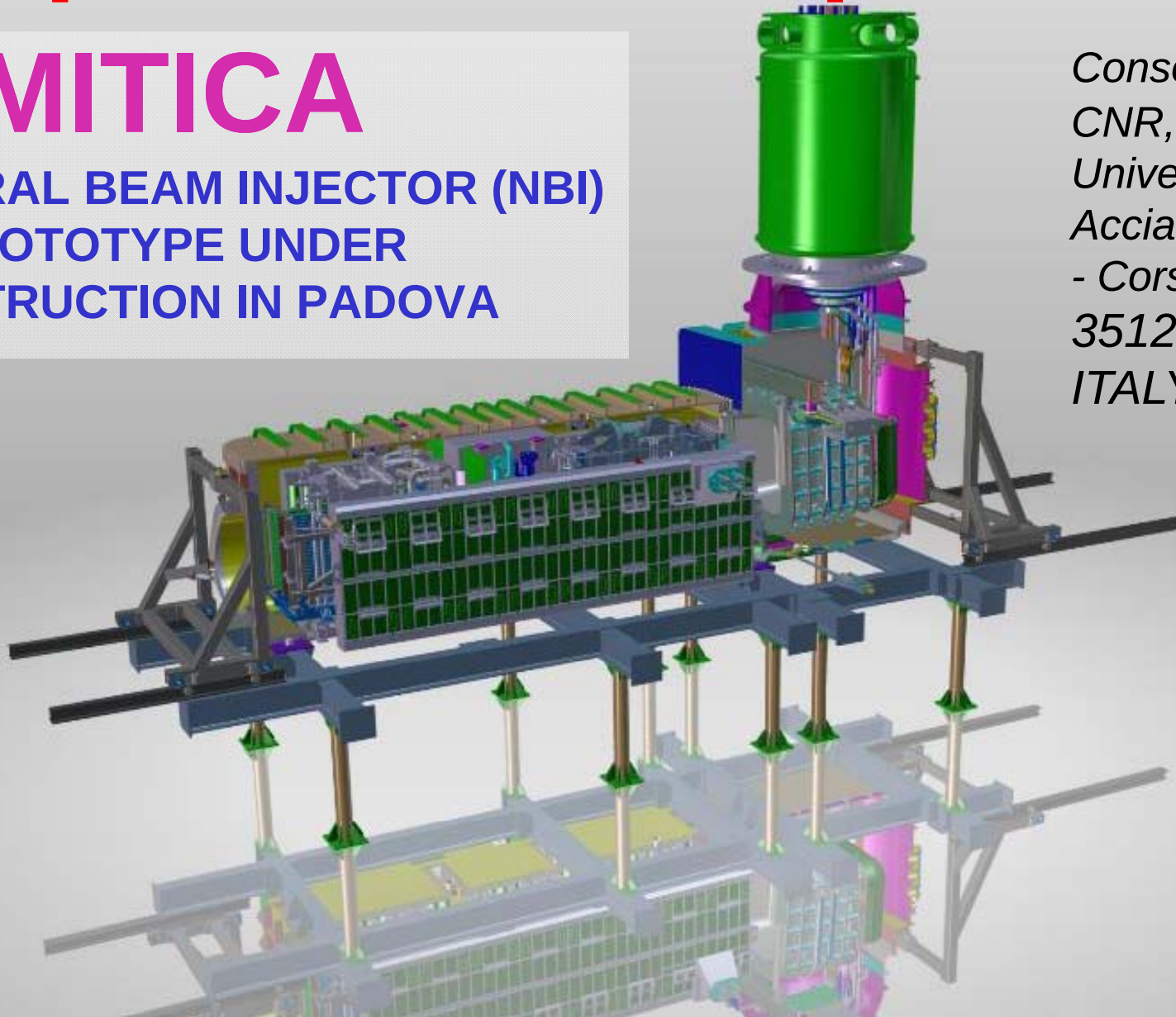


2) esperimenti NBI presso RFX

MITICA

THE NEUTRAL BEAM INJECTOR (NBI)
PROTOTYPE UNDER
CONSTRUCTION IN PADOVA

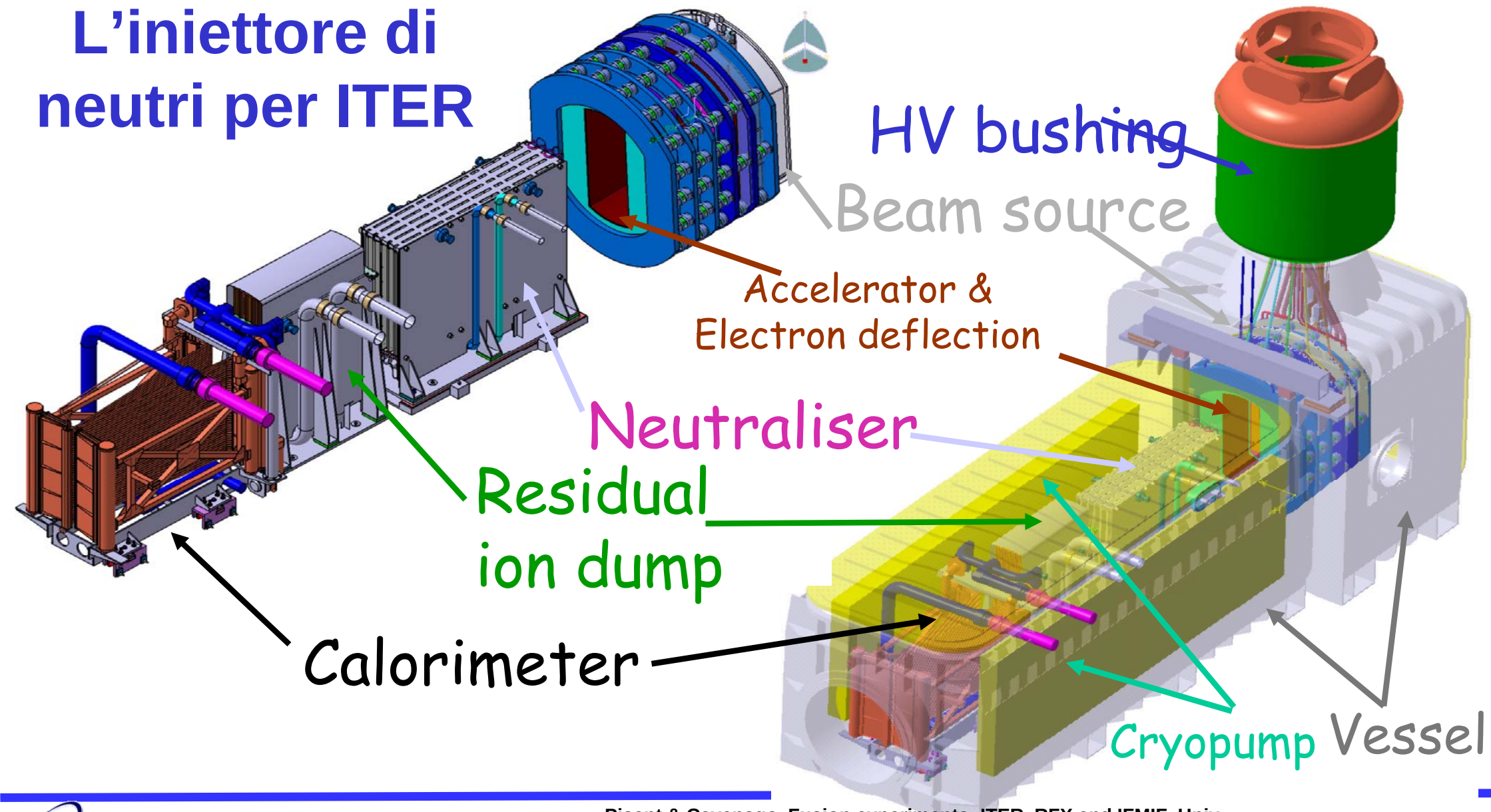
Consorzio **RFX**=
CNR, ENEA, INFN,
Università di Padova,
Acciaierie Venete SpA
- Corso Stati Uniti, 4
35127 Padova -
ITALY



MITICA

THE NEUTRAL BEAM INJECTOR (NBI) PROTOTYPE
UNDER CONSTRUCTION IN PADOVA

L'iniettore di neutri per ITER



Neutral Beam Injection



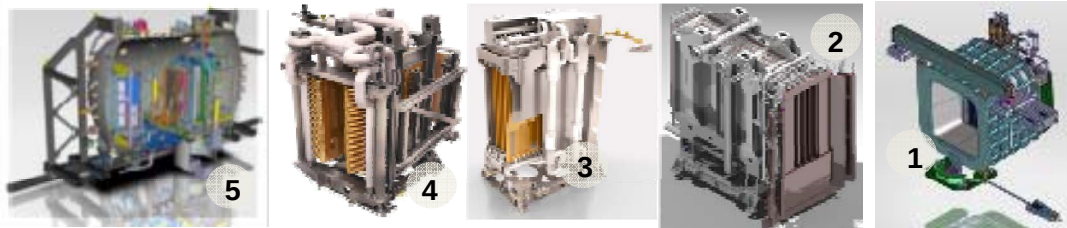
Neutral Beam Injection System

Design parameters requested by ITER

- deuterium beam of 18 MW
- particle energy of 1 MeV
- pulses up to 3600 s

The accelerator prototype

- negative ion beam
- 15 m x 9 m x 5 m (L x H x W)
- Fuel: H_2 & D_2



SPIDER

Calorimeter

RID

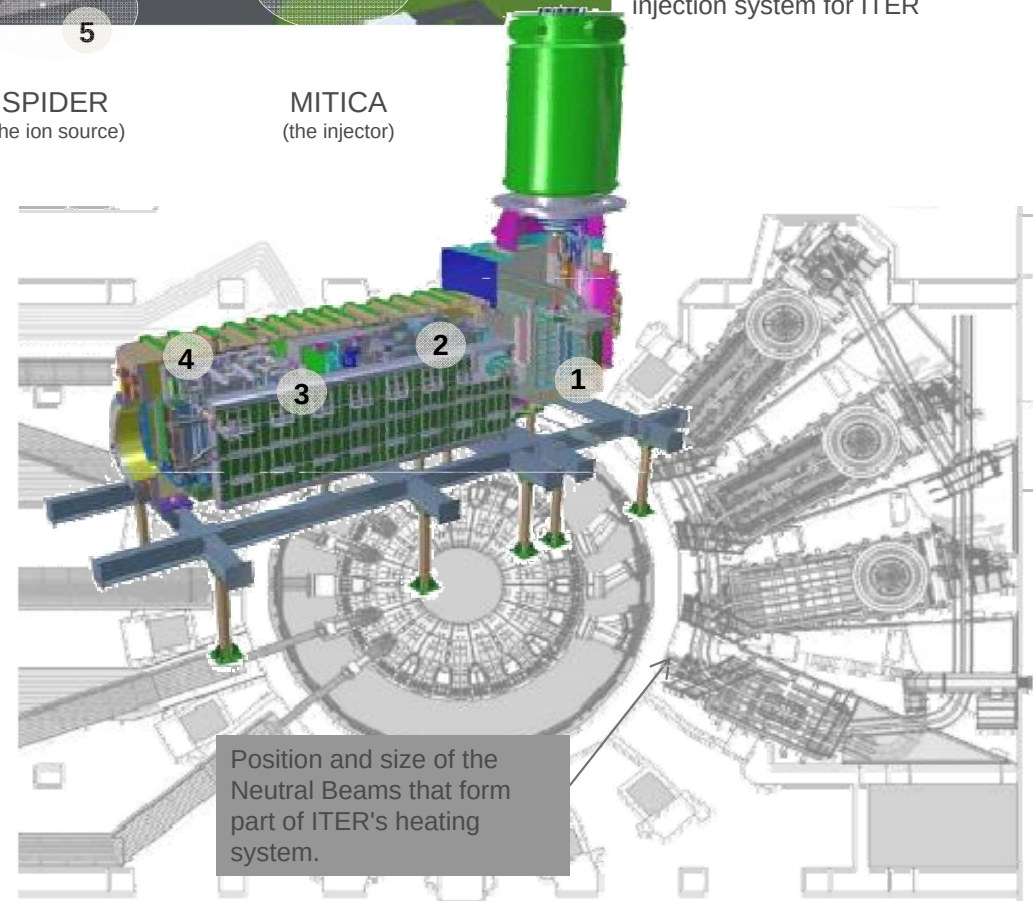
Neutraliser

Beam source



SPIDER
(the ion source)

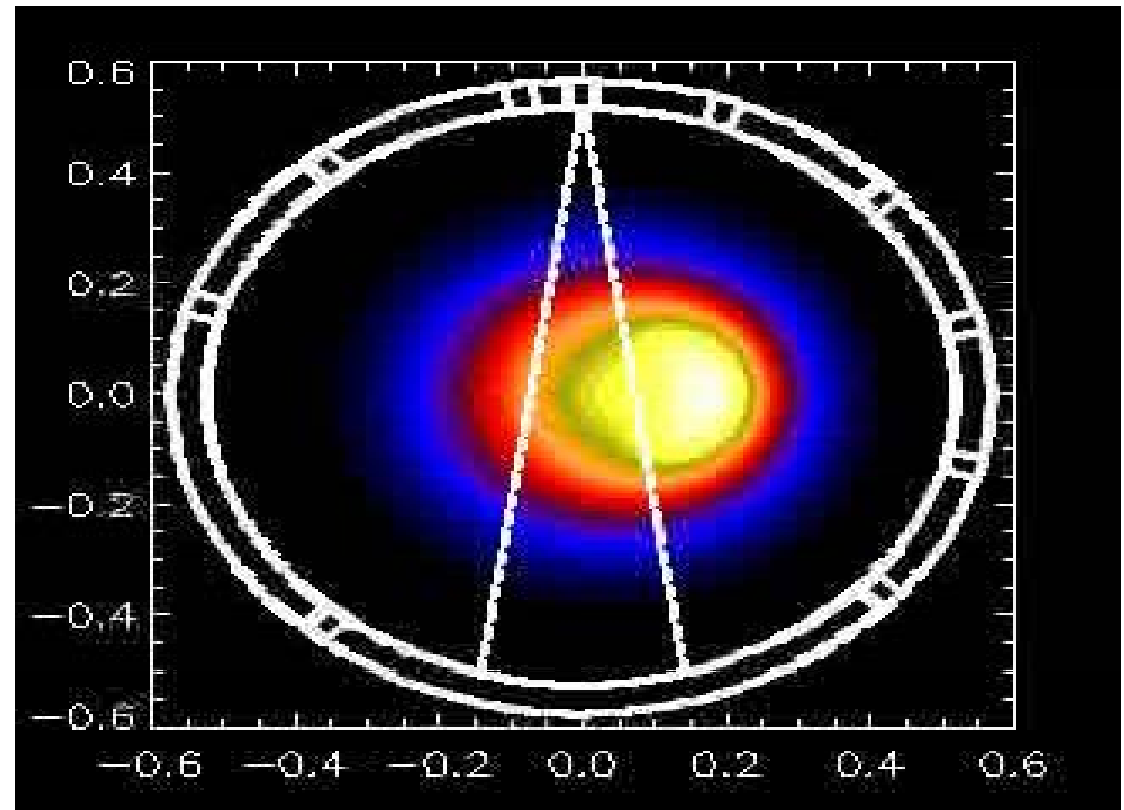
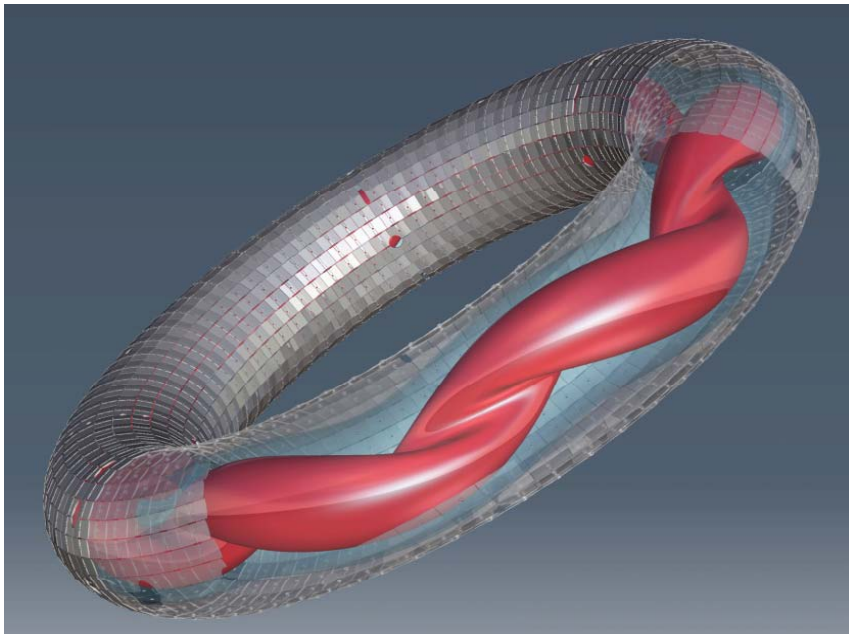
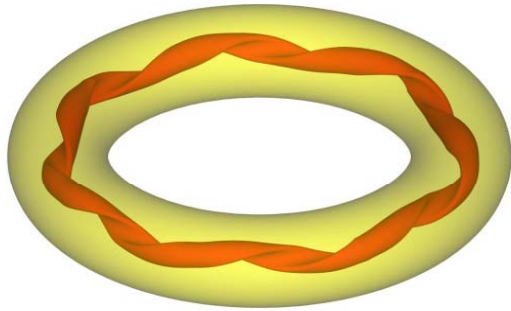
MITICA
(the injector)



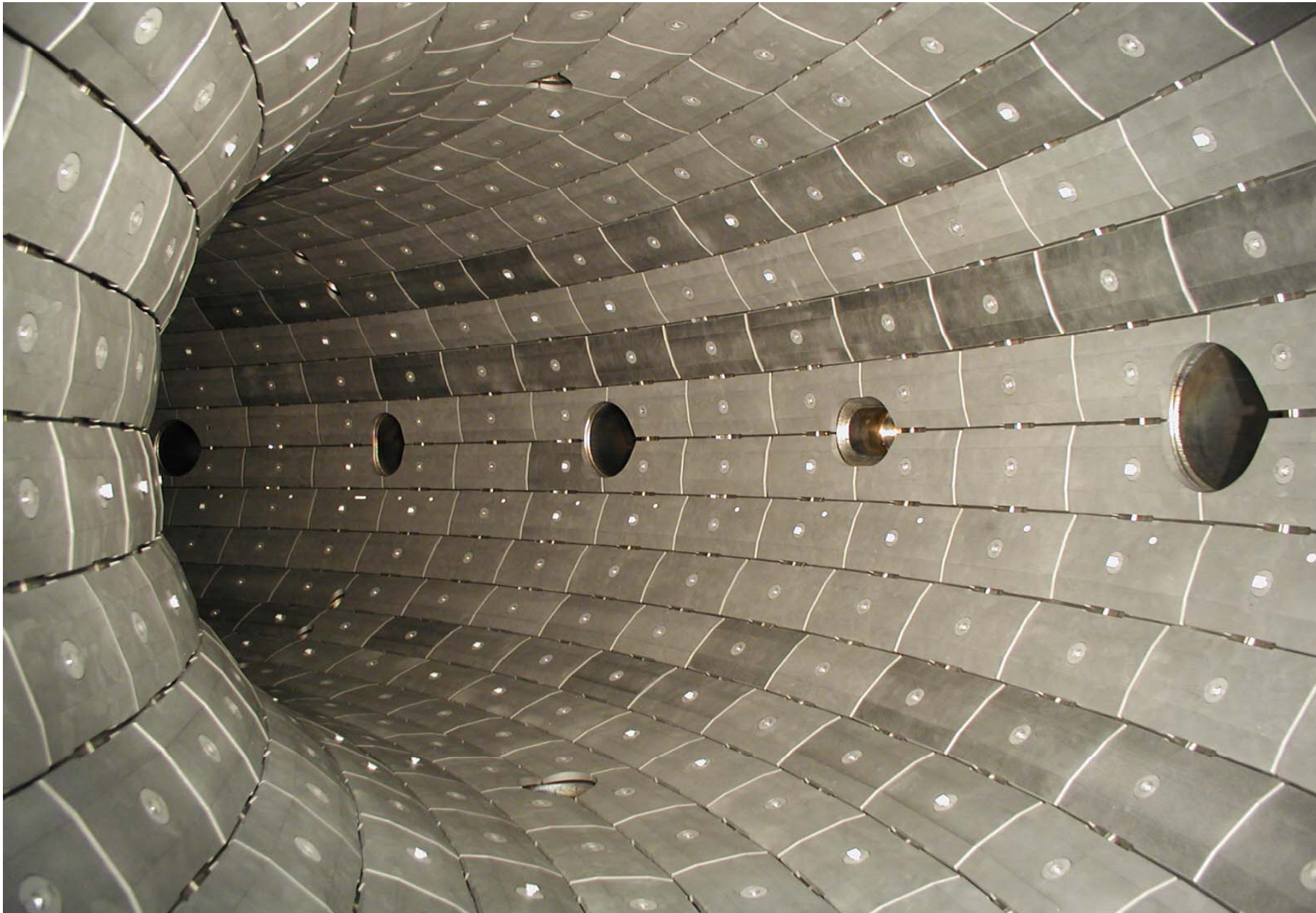
Position and size of the Neutral Beams that form part of ITER's heating system.

2.2) Principali risultati ottenuti su RFX

- Strutture magnetiche elicoidali con confinamento migliorato
- Esperimenti di controllo attivo dei modi magnetoidrodinamici



Vista interna di RFX



Padova: Area della Ricerca del CNR

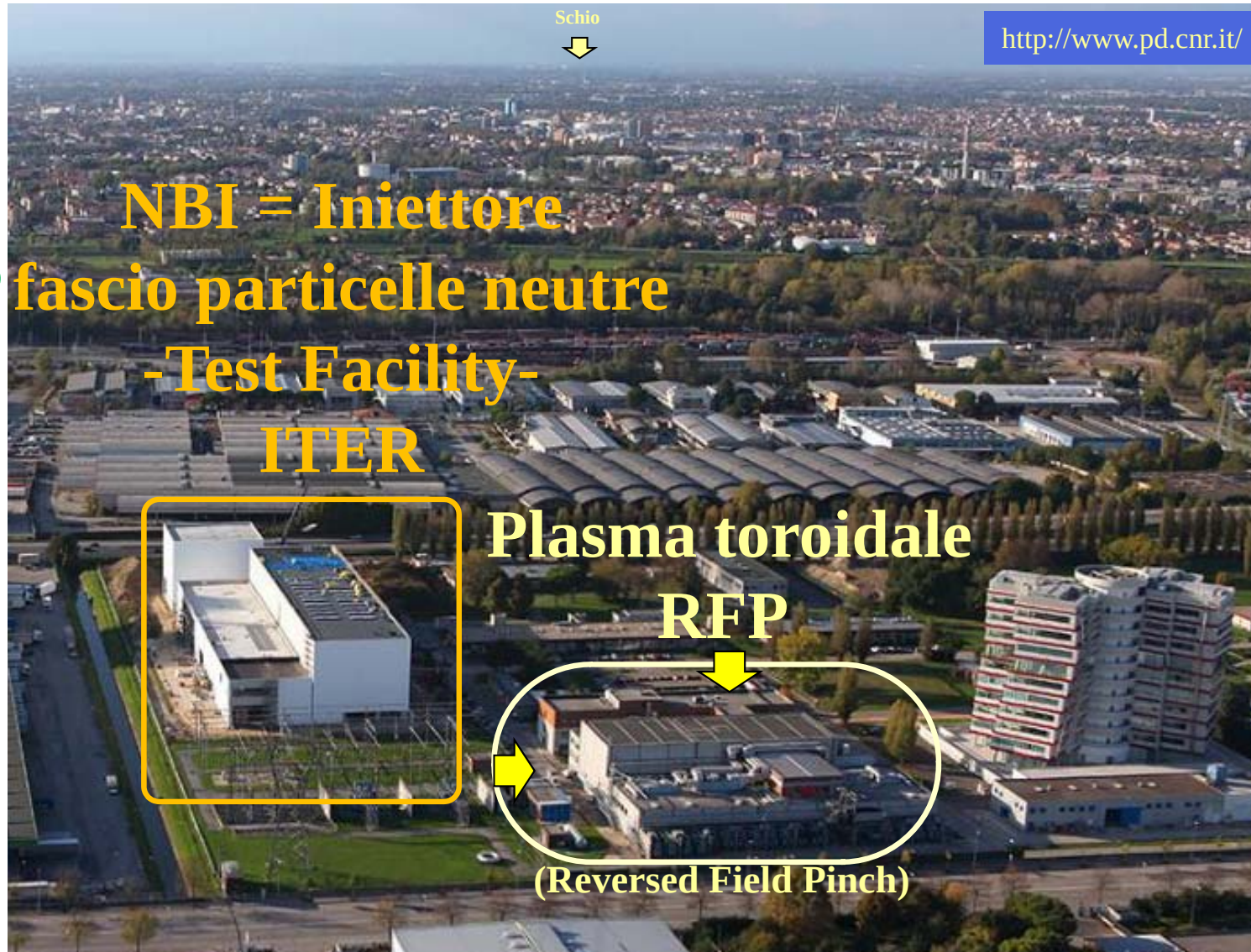
Consorzio RFX:

1) NBI

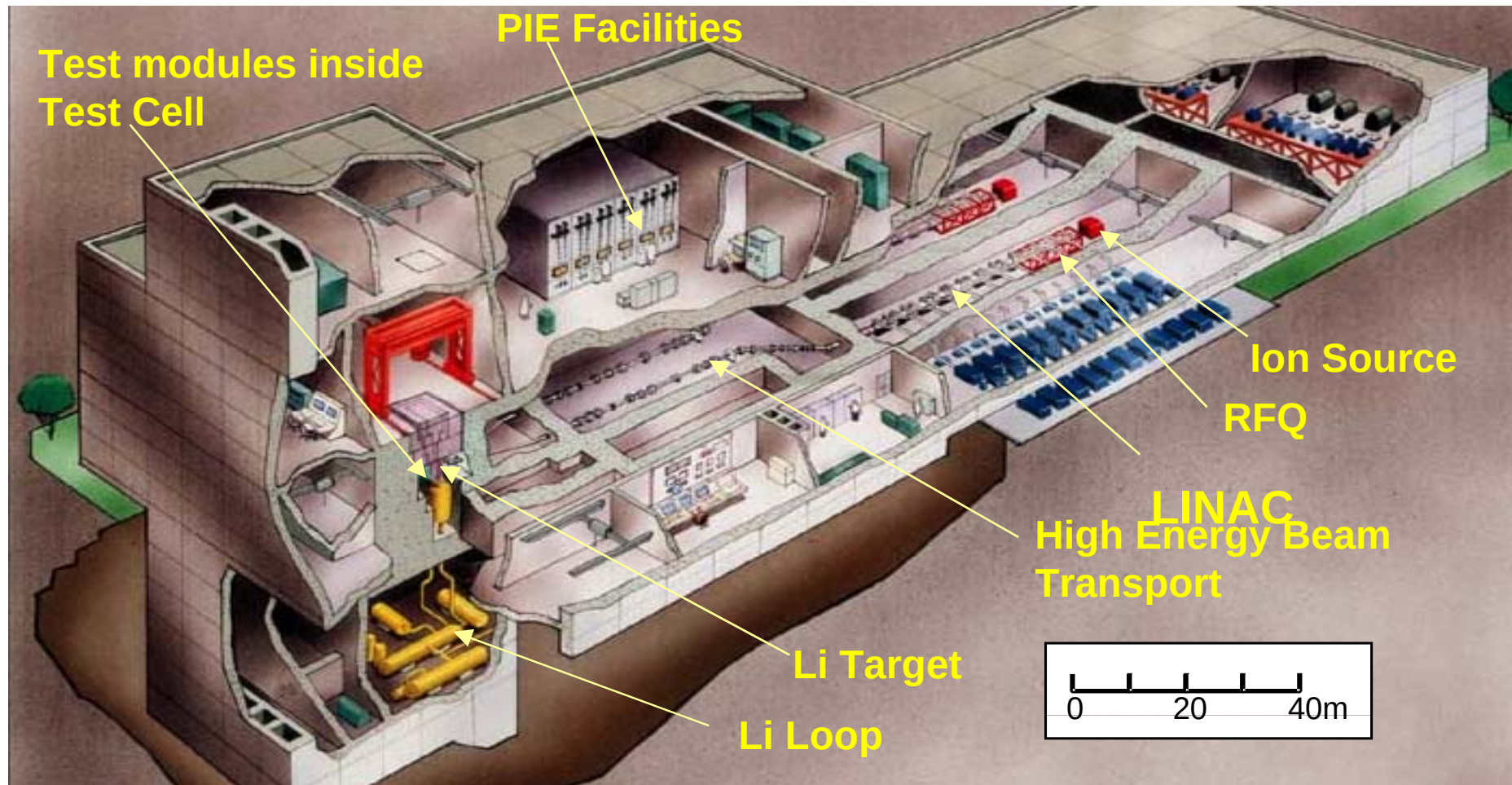
Impianto di riscaldamento ausiliario per il plasma prodotto in ITER

2) RFX - RFP

Impianto per produrre plasma caldo toroidale

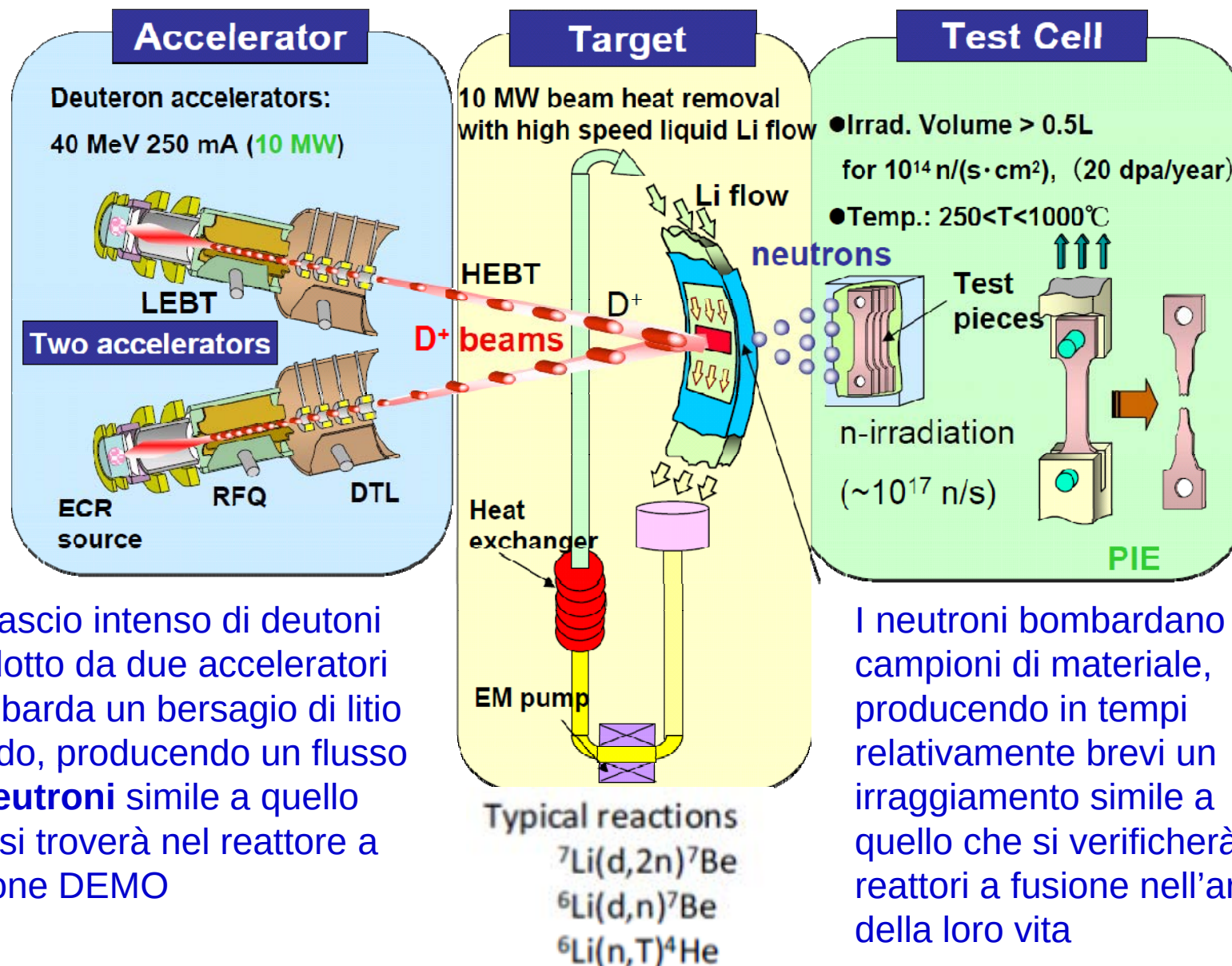


3) Il progetto IFMIF (International Fusion Material Irradiation Facility)



Vista tridimensionale di IFMIF con le sue componenti principali

Principio di funzionamento di IFMIF

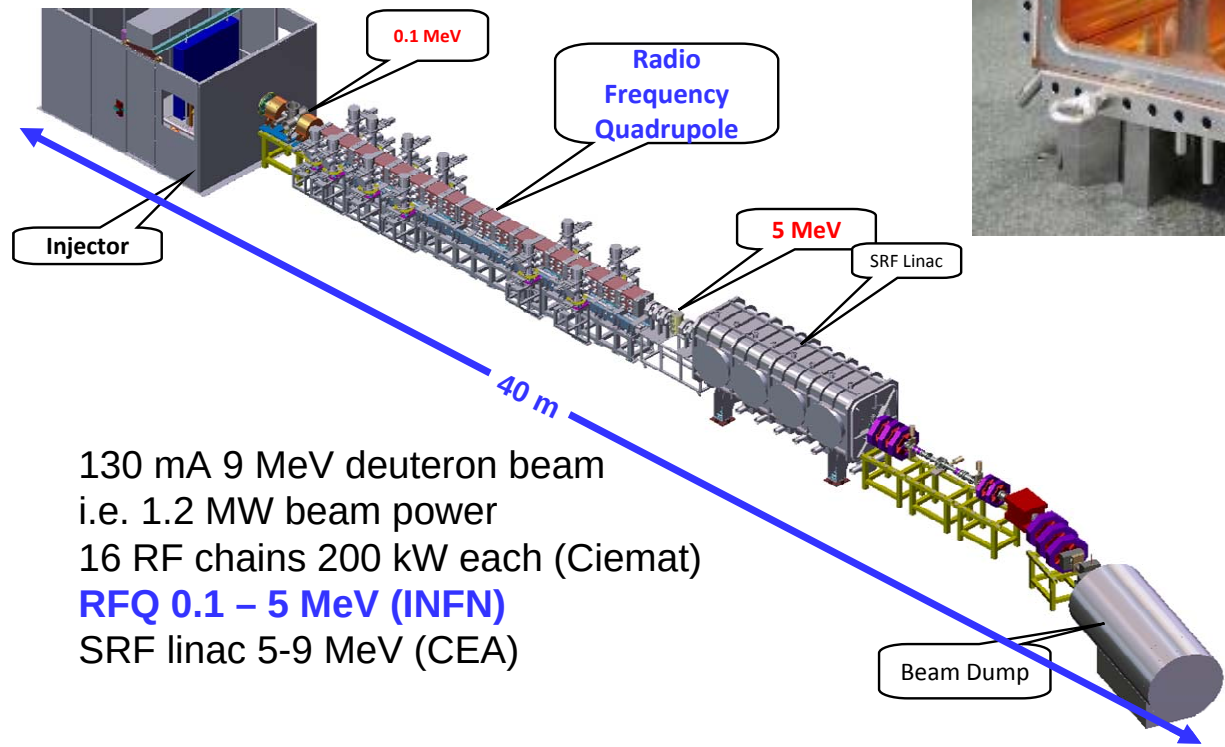


Un fascio intenso di deutoni prodotto da due acceleratori bombarda un bersaglio di litio liquido, producendo un flusso di **neutroni** simile a quello che si troverà nel reattore a fusione DEMO

I neutroni bombardano i campioni di materiale, producendo in tempi relativamente brevi un irraggiamento simile a quello che si verificherà nei reattori a fusione nell'arco della loro vita

IFMIF prototype accelerator

- Very high intensity, 25 times SPIRAL2 and 250 times SPES cyclotron.



130 mA 9 MeV deuteron beam
 i.e. 1.2 MW beam power
 16 RF chains 200 kW each (Ciemat)
RFQ 0.1 – 5 MeV (INFN)
 SRF linac 5-9 MeV (CEA)

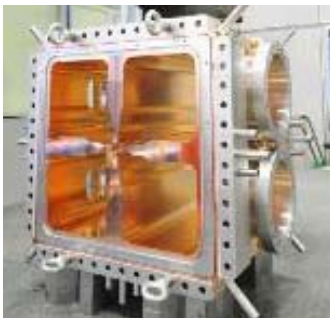


**IFMIF/EVEDA
 Accelerator building
 by JAEA
 In Rokkasho (Aomori)**



- 2007 start Broader Approach
- 2008 PDR
- 2010 DDR and start of production
- 2014 coupler test
- 2014 RFQ high power test
- 2015 RFQ delivery to Rokkasho
- 2016 beam commissionin

**Budget INFN (ext.)
 Approx 25 M€**



IFMIF EVEDA RFQ system organization

- Contact Person: A. Facco
- Responsible A. Pisent
 - Responsible for Padova: A. Pepato
 - Responsible for Torino: P. Mereu
 - Responsible for Bologna: A. Margotti

About 30 persons involved, 20 FTE, 10 dedicated contracts

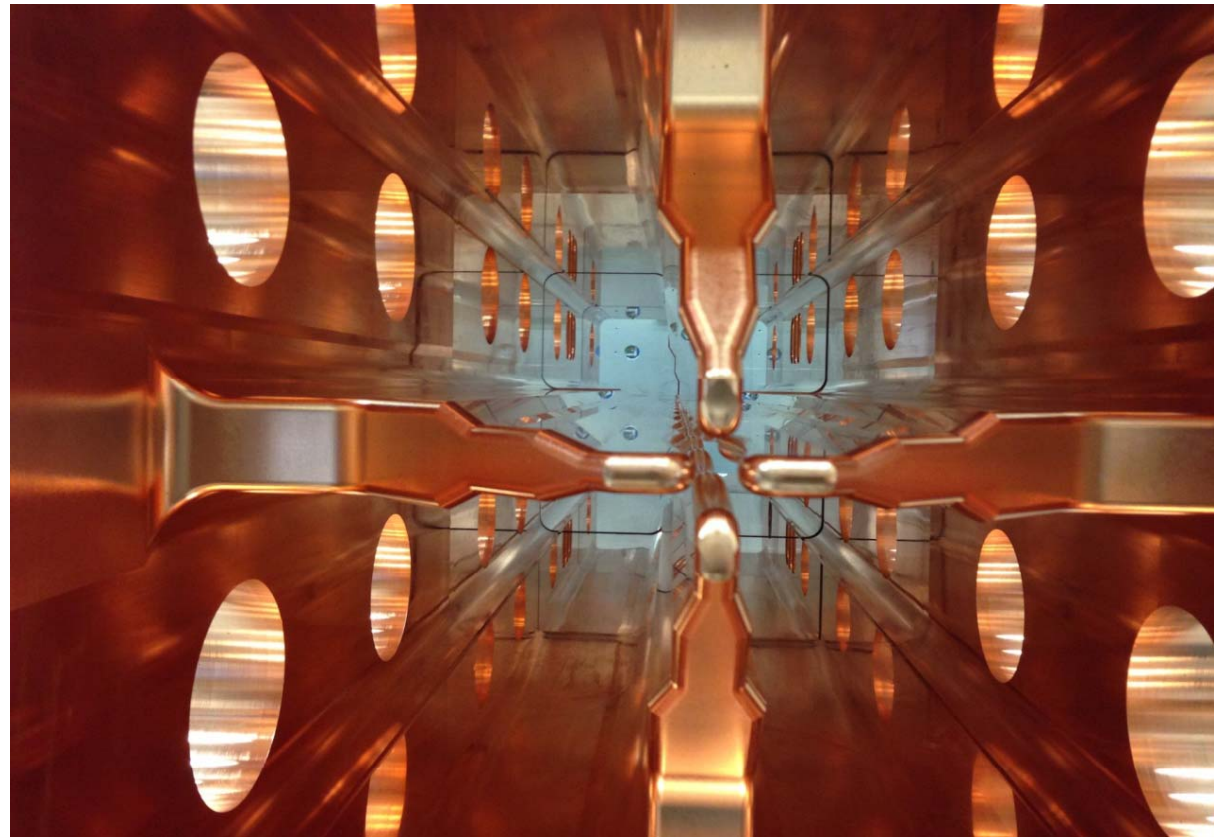
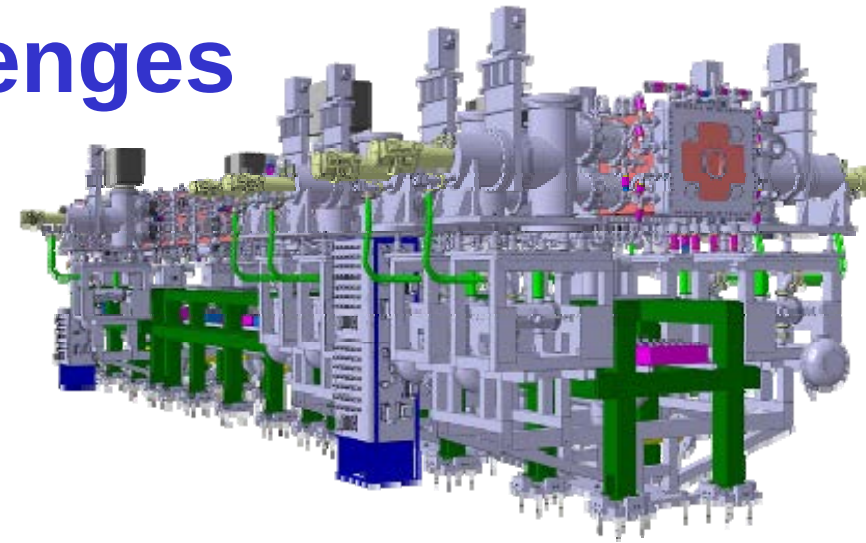
The participation of INFN to IFMIF-EVEDA includes

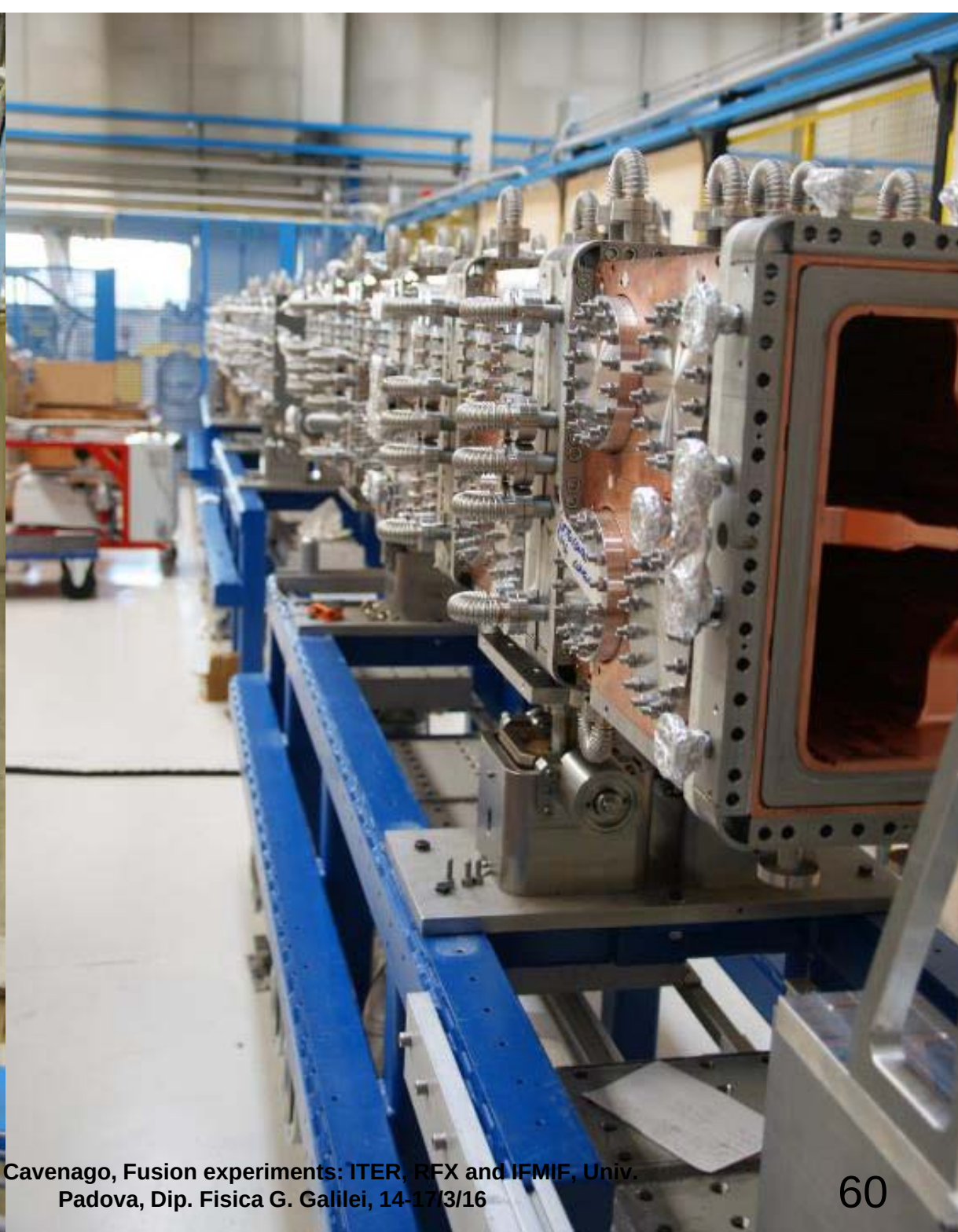
- RFQ construction
- Participation to final IFMIF design activity
- Participation to the man power of the project team in Japan
- Participation to beam commissioning in Japan



IFMIF EVEDA RFQ challenges

- **650 kW beam** should be accelerated with **low beam losses and activation** of the structure so as to allow hands-on maintenance of the structure itself (**Beam losses** < 10 mA and < 0.1 mA between 4 MeV and 5 MeV). (Tolerances of the order of 10-50 μ m)
- **600 kW RF dissipated** on copper surface: necessity to keep geometrical tolerances, to manage hot spots and counteract potential instability.





Pisent & Cavenago, Fusion experiments: ITER, RFX and IFMIF, Univ. Padova, Dip. Fisica G. Galilei, 14-17/3/16

Gennaio 2016 partenza dell'RFQ per il Giappone



Components of INFN RFQ team (LNL, Padova, Torino, Bologna):
A. Pisent (coordinator), E. Fagotti (integration and high power tests),
A. Pepato (module production), P. Mereu (engineering integration),
L. Antoniazzi, D. Agugliaro, L. Bellan, P. Bottin, A. Conte, M.
Comunian, D. Dattola, R. Dima, J. Esposito, A. Facco, E. Fagotti, L.
Ferrari, M. Giacchini, G. Giraudo, F. Grespan, A. Macrì, A. Margotti,
M. Montis, A. Palmieri, M. Poggi, A. Prevedello, L. Ramina, M.
Domenato, G. D'Amico

Conclusioni

- La fusione termonucleare controllata può dare un contributo fondamentale al fabbisogno energetico umano (sulla scala dei 50 anni).
- I problemi tecnologici e scientifici sono determinati e sono in atto programmi di ricerca mirati a risolverli.
- Lavorare su più generazioni (e con delle importanti incognite) è difficile, ma è già avvenuto per altri sogni umani.
- le realizzazioni intermedie (scala di tempi interessante per il ricercatore singolo e per il politico) hanno comunque un grande valore di accrescimento delle conoscenze, sviluppo tecnologico ed economico.



**Cattedrale di Reims Inizio costruzione 1211
Completamento 1475**

- **Thanks to profs G. Rostagni, M. Lontano, F. Gnesotto, G. Serianni, G. Zollino and to M.T. Orlando for help in the preparation of this review**