

LA FUSIONE IN LABORATORIO

Nei laboratori si cerca di ottenere la fusione tra i nuclei di due isotopi pesanti dell'idrogeno, deuterio (D: 1 protone ed 1 neutrone) e trizio (T: 1 protone e 2 neutroni). I due nuclei, dotati di carica positiva, si respingono elettricamente.



Perché la fusione possa avvenire, i nuclei devono avvicinarsi a sufficienza perché la forza nucleare attrattiva possa prevalere, legandoli strettamente.

Più è forte il legame che si crea, maggiore è l'energia che viene rilasciata nel processo.

Per realizzare la fusione tra un gran numero di nuclei, è conveniente utilizzare un gas ad altissima temperatura chiamato plasma, nel quale gli elettroni si separano dai nuclei e i nuclei stessi si muovono a velocità sufficiente ad avvicinarsi tra loro nonostante la repulsione elettrica.

Questo avvicinamento è facilitato dall'effetto tunnel quantistico, che aumenta la probabilità degli eventi di fusione.

Per rendere possibile la fusione, quindi, occorre aumentare la temperatura del gas, (nuclei più veloci) e la sua densità (numero di nuclei in un dato volume).

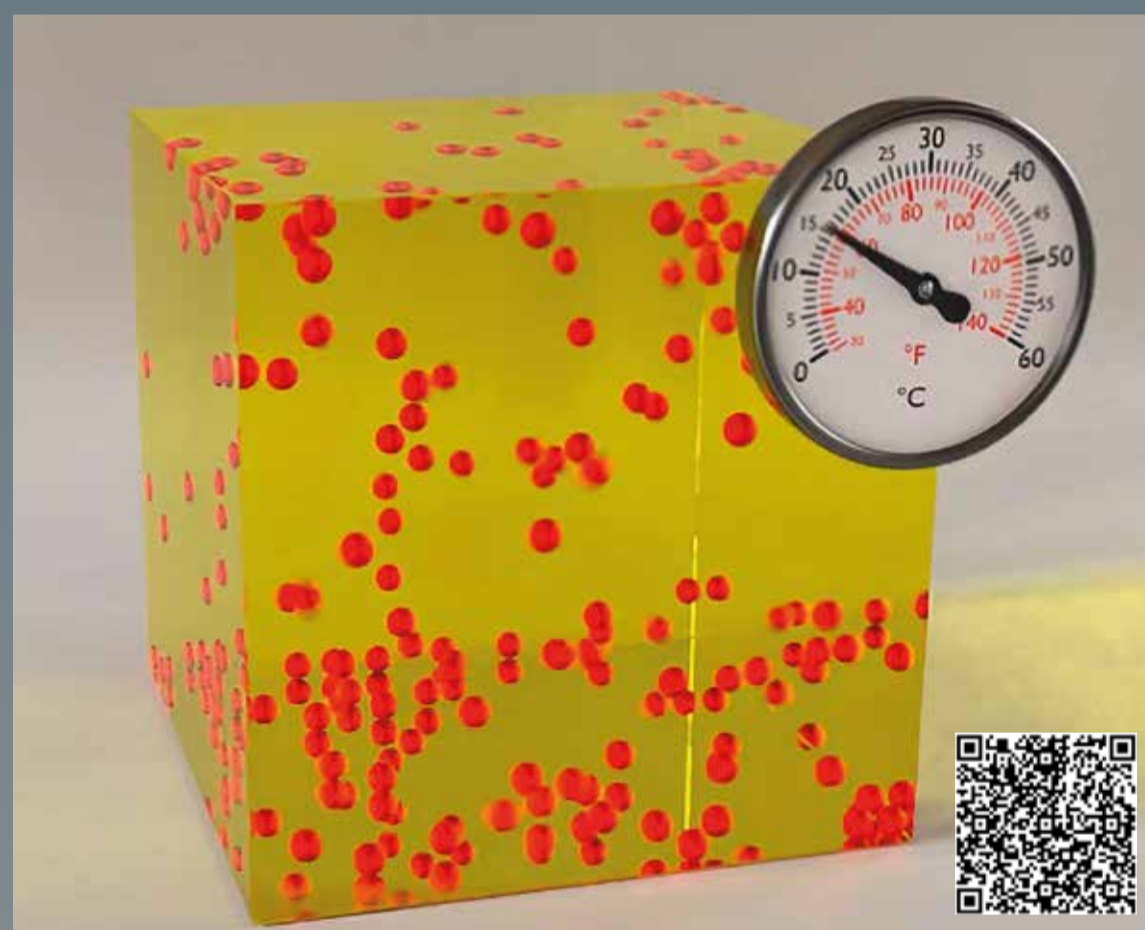
Condizioni per la fusione

Si può rappresentare un analogo dell'interazione che produce la reazione di fusione come una buca. Per avvicinarsi a sufficienza i nuclei di D e T devono risalire la china (repulsiva) della forza elettrica, "sospinti" dall'energia cinetica determinata dalla loro temperatura.

$$E_r = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r} - g^2 \frac{e^{-r/r_0}}{r}$$

$r_0 \cong 0.8 \cdot 10^{-13} m$

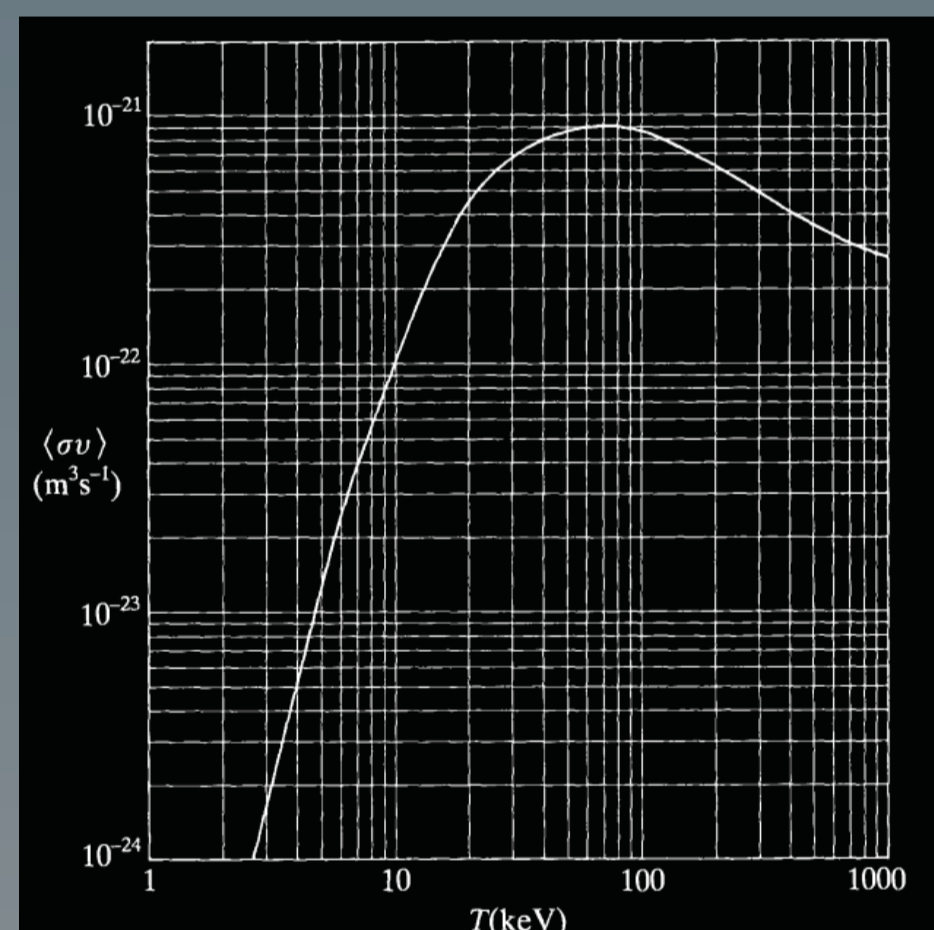
Quando si trovano a distanza sufficientemente ravvicinata (r_0), protoni e neutroni nei nuclei si attraggono intensamente e "precipitano" in una buca "profonda". La profondità della buca rappresenta l'energia rilasciata nella fusione. Il processo è facilitato dall'effetto tunnel quantistico che "taglia" in parte la china della repulsione elettrica.

$$E = \frac{3}{2} k_B T = \frac{1}{2} m v_{th}^2 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r}$$


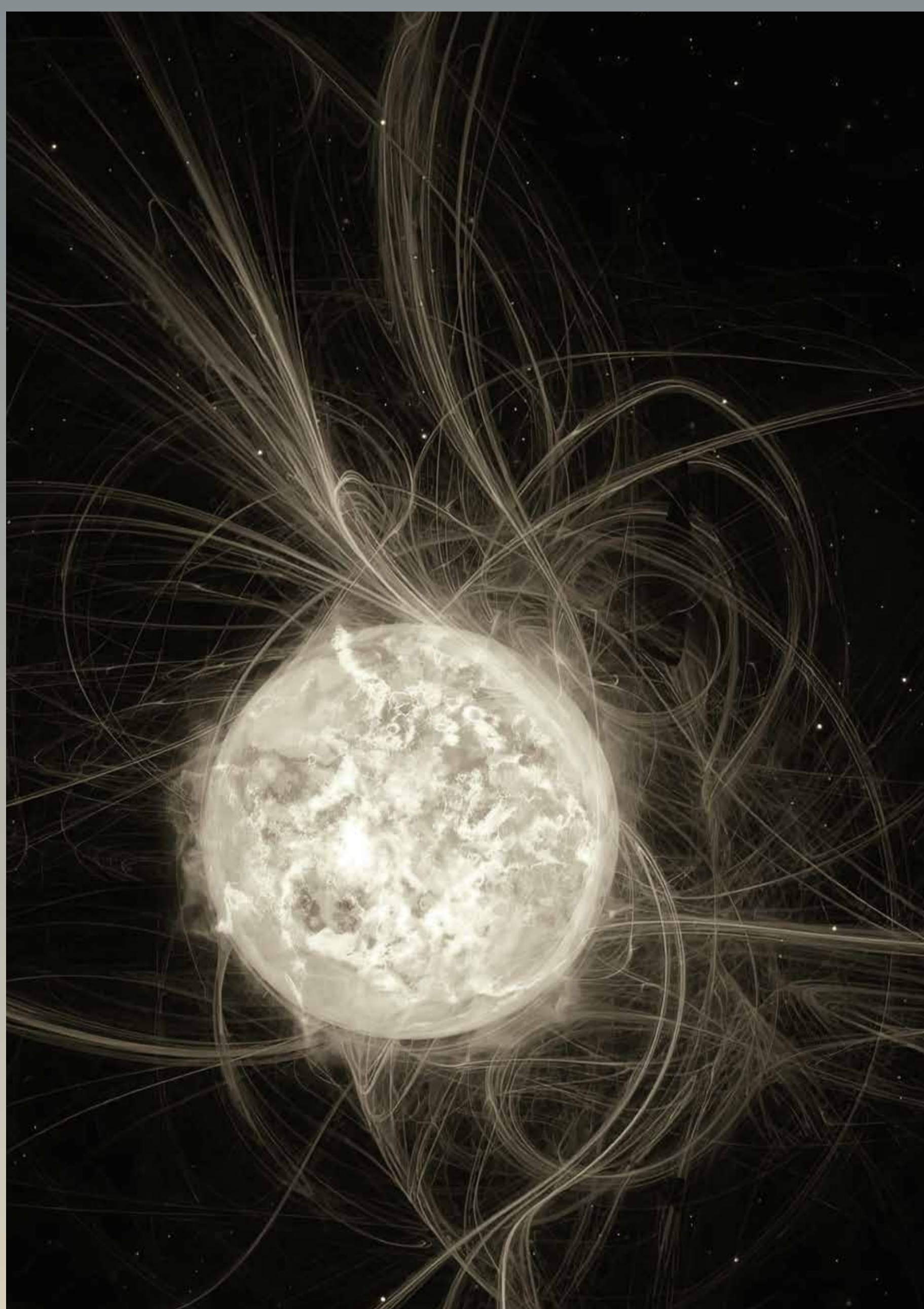
Incrementare la temperatura di un gas significa incrementare la velocità media delle particelle che lo compongono

Il numero di reazioni che avvengono dipende perciò dalla velocità degli ioni (che a sua volta dipende dalla loro temperatura) e dalla probabilità di fusione (determinata dal bilancio delle forze repulsive e attrattive e dall'effetto tunnel quantistico).

Per la reazione deuterio-trizio la temperatura di funzionamento del reattore che garantisce il numero di reazioni necessarie è approssimativamente di 100 milioni di gradi.



La quantità in figura rappresenta la probabilità delle reazioni di fusione DT e il suo andamento con la temperatura del plasma. Si utilizza come unità di misura il keV (kilo-elettronvolt). 1keV corrisponde approssimativamente a 11,6 milioni di gradi



Credits: <http://www.begann.de> Markus Gann

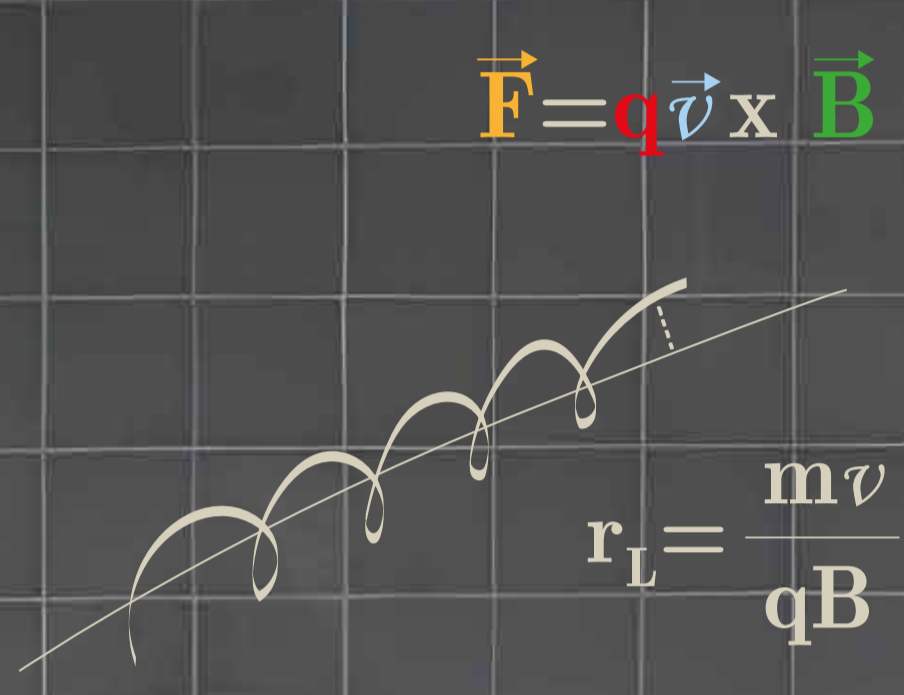
IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



CONFINARE IL PLASMA

Alla temperatura a cui può avvenire la fusione, le particelle si muovono a grande velocità. Senza un efficace meccanismo di contenimento delle particelle che compongono il plasma, esse sfuggirebbero dal reattore in pochi milionesimi di secondo.

Confinamento magnetico

$$\vec{F} = q\vec{v} \times \vec{B}$$


$$r_L = \frac{mv}{qB}$$

Confinamento inerziale

$$\frac{d(m_d \vec{v}_d)}{dt} = - \frac{d(m_c \vec{v}_c)}{dt}$$

a) Irradiazione

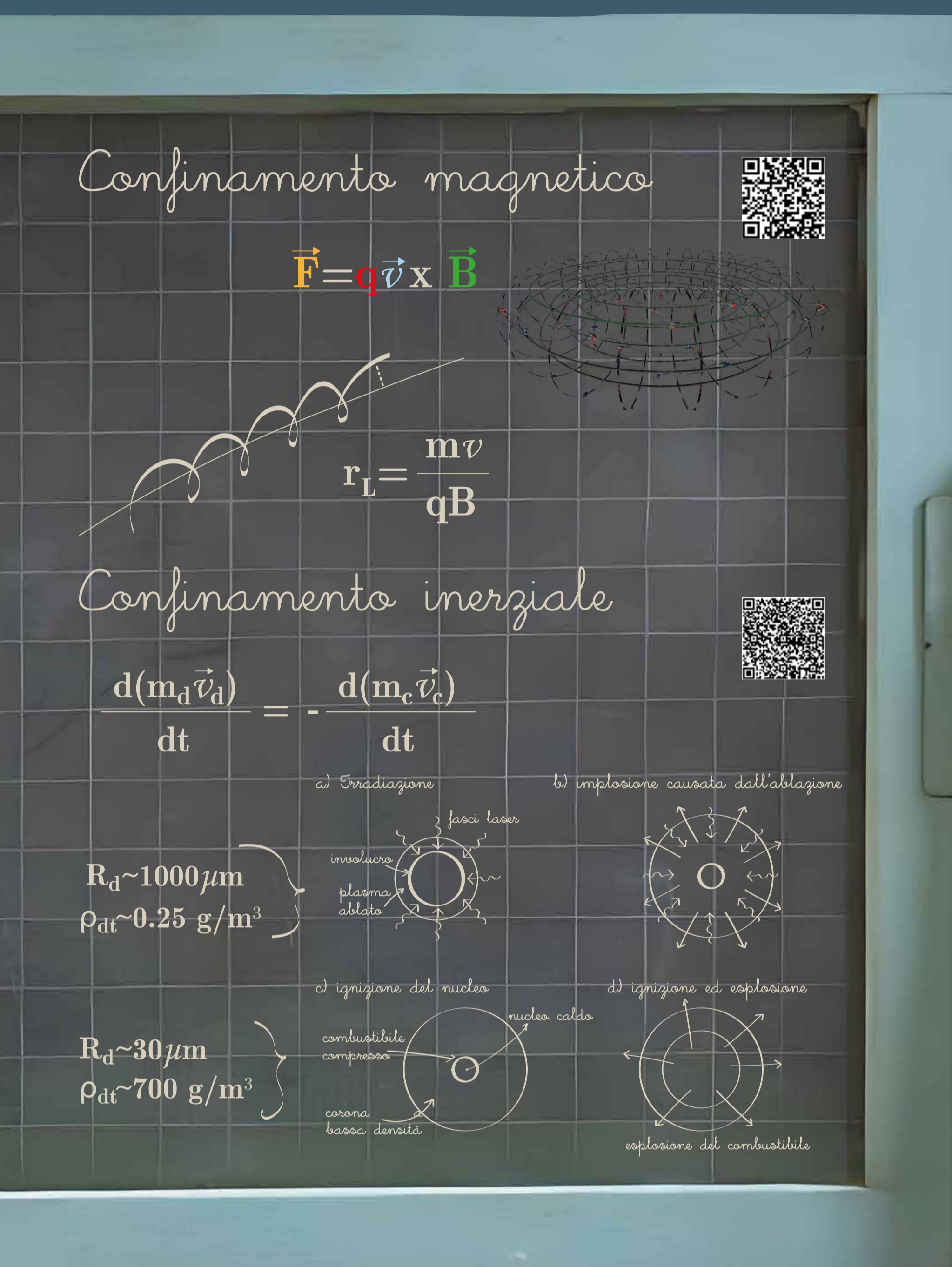
b) Implosione causata dall'ablazione

$R_d \sim 1000 \mu\text{m}$
 $\rho_{dt} \sim 0.25 \text{ g/m}^3$

c) Ignizione del nucleo

d) Ignizione ed esplosione

$R_d \sim 30 \mu\text{m}$
 $\rho_{dt} \sim 700 \text{ g/m}^3$



Nel linguaggio della fusione si parla di “confinamento”.

Nelle stelle è la forza di gravità a fornire il confinamento necessario a permettere le reazioni di fusione.

In laboratorio si utilizzano due tecniche: il confinamento magnetico e quello inerziale.

Il primo consegue dal fatto che le particelle cariche sono vincolate a seguire orbite elicoidali intorno alle linee di un campo magnetico. Se le linee di campo si richiudono su loro stesse, il campo magnetico delimita il volume entro cui il plasma esiste.

Il secondo impiega intensi fasci laser concentrati simmetricamente contro un piccolo bersaglio sferico di deuterio e trizio.

Quando viene investito dal laser, lo strato esterno si vaporizza molto velocemente e per reazione il volume interno viene compresso e riscaldato fino a raggiungere le condizioni per innescare le reazioni DT.

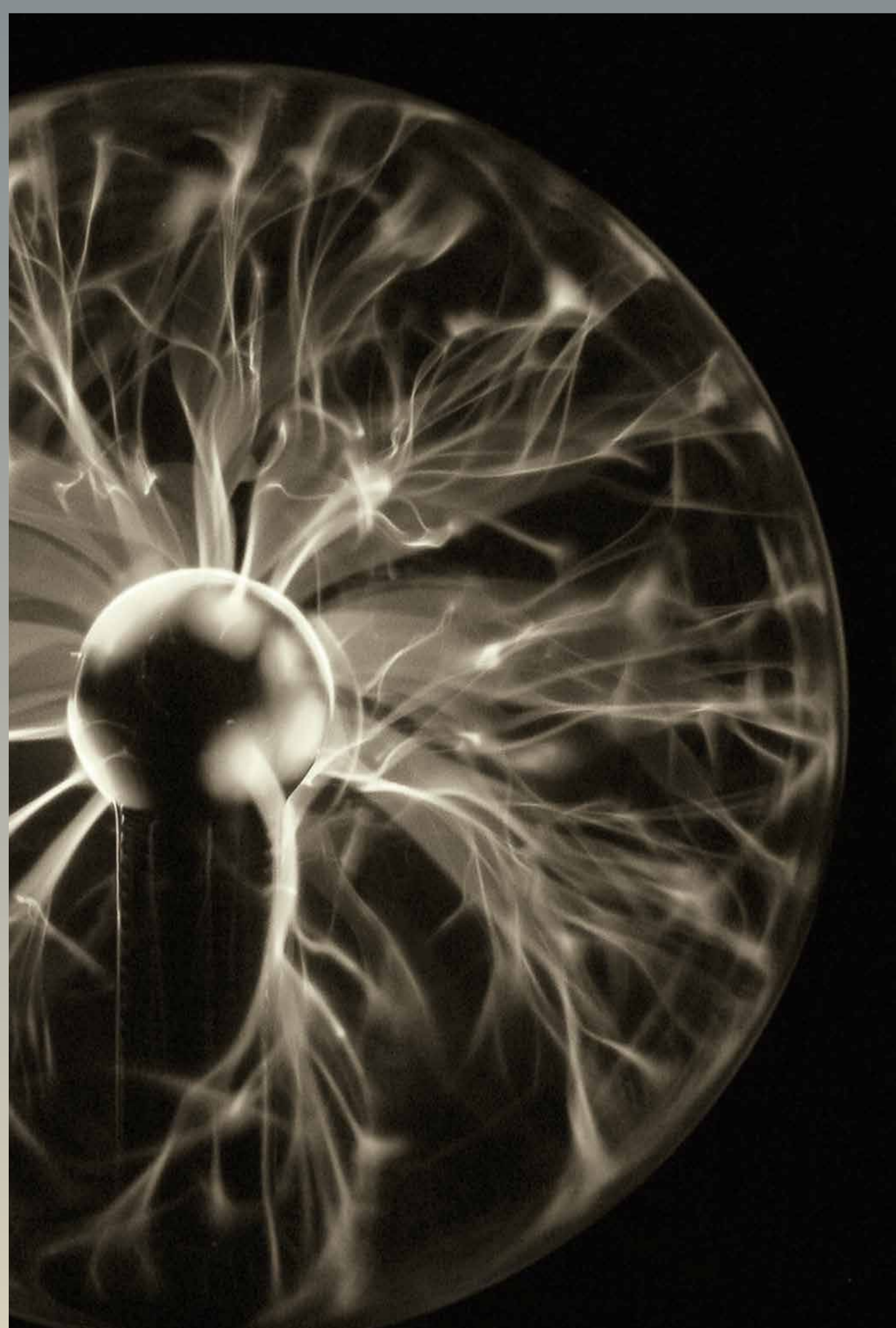


Un reattore a fusione

Trizio + Deuterio → Elio + Neutrone + Energia

Nuclei di Deuterio e Trizio si fondono originando un nucleo di Elio (2 protoni + 2 neutroni) ed un neutrone + l'energia da fusione in forma di energia cinetica

Nella fusione deuterio-trizio, l'energia di fusione rilasciata è trasportata per il 20% da nuclei di Elio (2 protoni e 2 neutroni) e per l'80% da neutroni. I nuclei di Elio sono particelle cariche che, pertanto, interagiscono con il plasma cedendogli l'energia derivata dalla reazione di fusione e riscaldando il plasma. I neutroni, privi di carica elettrica, sfuggono dal plasma trasportando all'esterno del reattore energia termica e generano nuovo combustibile interagendo con i nuclei di Litio contenuti nel mantello del reattore.



IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



LA FORMULA MAGICA DI LAWSON

Per ottenere più energia di quanta se ne consuma, data l'efficienza dell'impianto, le reazioni di fusione devono produrre il decuplo della potenza fornita al plasma.

John D. Lawson nel 1955 formulò il cosiddetto "triplo prodotto" (nel caso di fusione di deuterio (D) e trizio (T)) come indice per raggiungere un certo "guadagno", ovvero il bilancio fra la potenza di fusione e quella ausiliaria fornita al plasma, $Q = P_{fus}/P_{aux}$

$$\text{DENS} * \text{TEMP} * \tau_E = C_{gain} 10^{28} \text{ } ^\circ\text{C s m}^{-3}$$

densità di particelle nel plasma temperatura tempo di confinamento dell'energia, ovvero il tempo che occorre per "svuotare" tutta l'energia del plasma procedendo a un certo ritmo, come la sabbia in una clessidra

$$\tau_E = \frac{E}{P_{out}}$$

perdite di calore energia termica delle particelle nel plasma

$C_{gain} =$ 0,6 \rightarrow $Q = 1$ (già ottenuto)
 2,3 \rightarrow $Q = 10$ (obiettivo di ITER)
 3,5 \rightarrow $Q = \infty$ (reattore auto-sostenuto)

COSA SIGNIFICA LA FORMULA DI LAWSON?

a) La probabilità delle reazioni di fusione cresce rapidamente con la temperatura, perché i nuclei di D e T devono essere abbastanza veloci per avvicinarsi nonostante la repulsione fra cariche "+" "+". Servono circa 100 milioni di gradi.

b) Il numero di reazioni di fusione è proporzionale alle densità di D e T.

Analogia a) + b): la probabilità di ottenere "7" tirando due dadi è la più alta fra tutti i numeri possibili (equivalente di "fusione più probabile ad alta temperatura"). Poi però si ottiene "7" tante più volte quanto più spesso si tirano i dadi (equivalente di "alta densità").

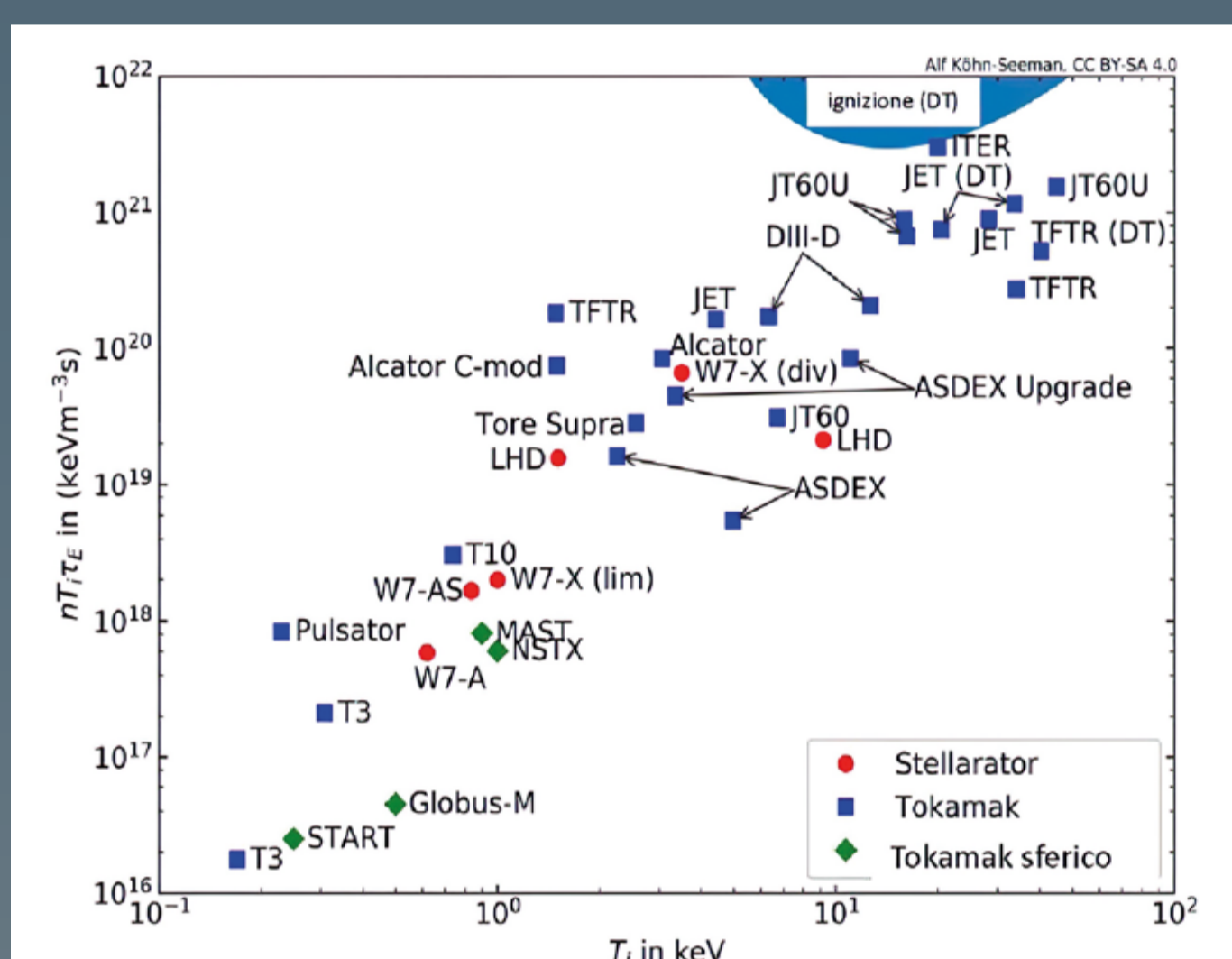
c) Serve meno riscaldamento se l'isolamento termico è buono (τ_E alto).

Per esempio i valori previsti per l'esperimento ITER sono:

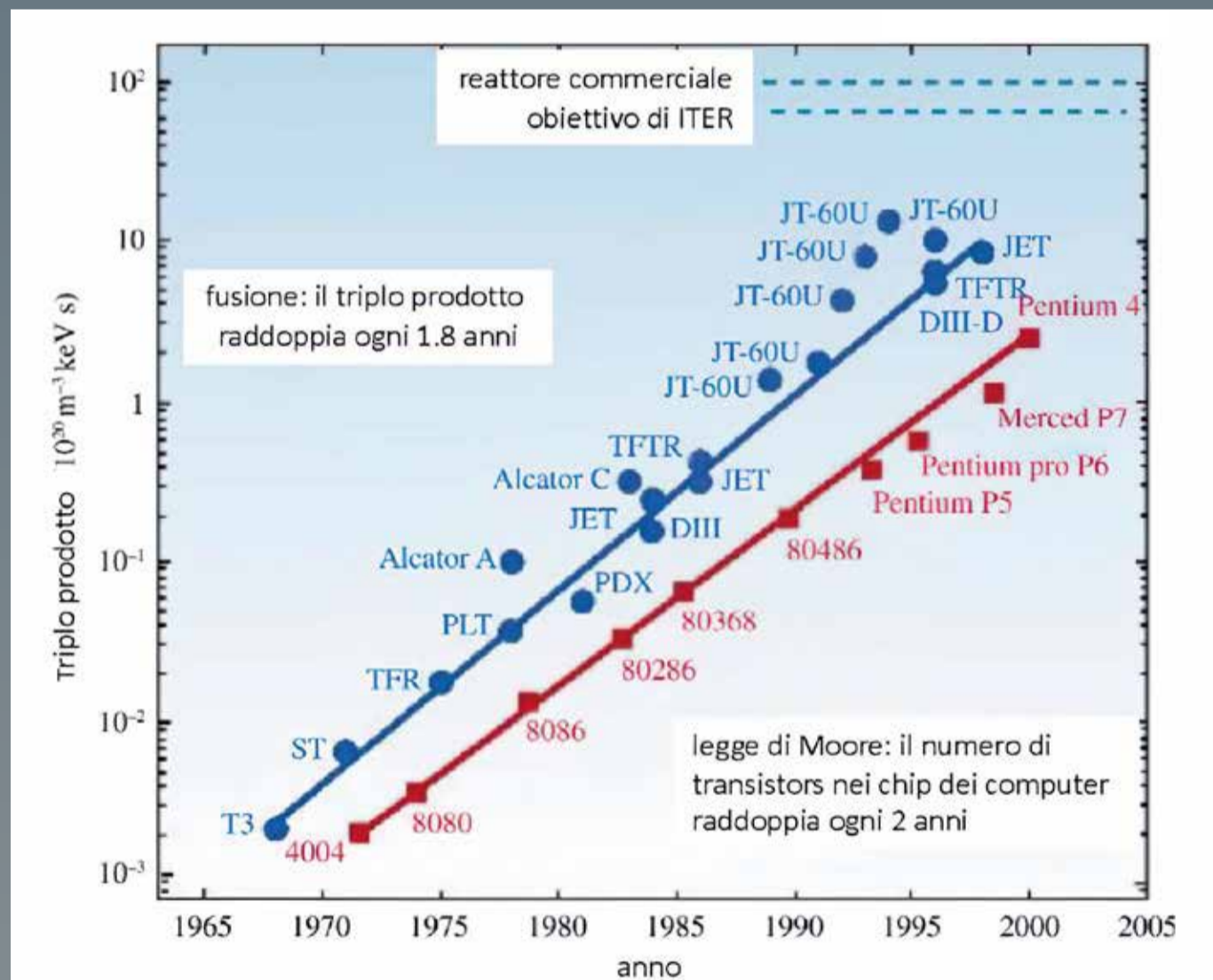
$$\text{DENS} = 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$\text{TEMP} = 2,3 \cdot 10^8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$\tau_E = 1 \text{ s}$$



Triplo prodotto (Lawson) per diversi impianti di fusione a confinamento magnetico



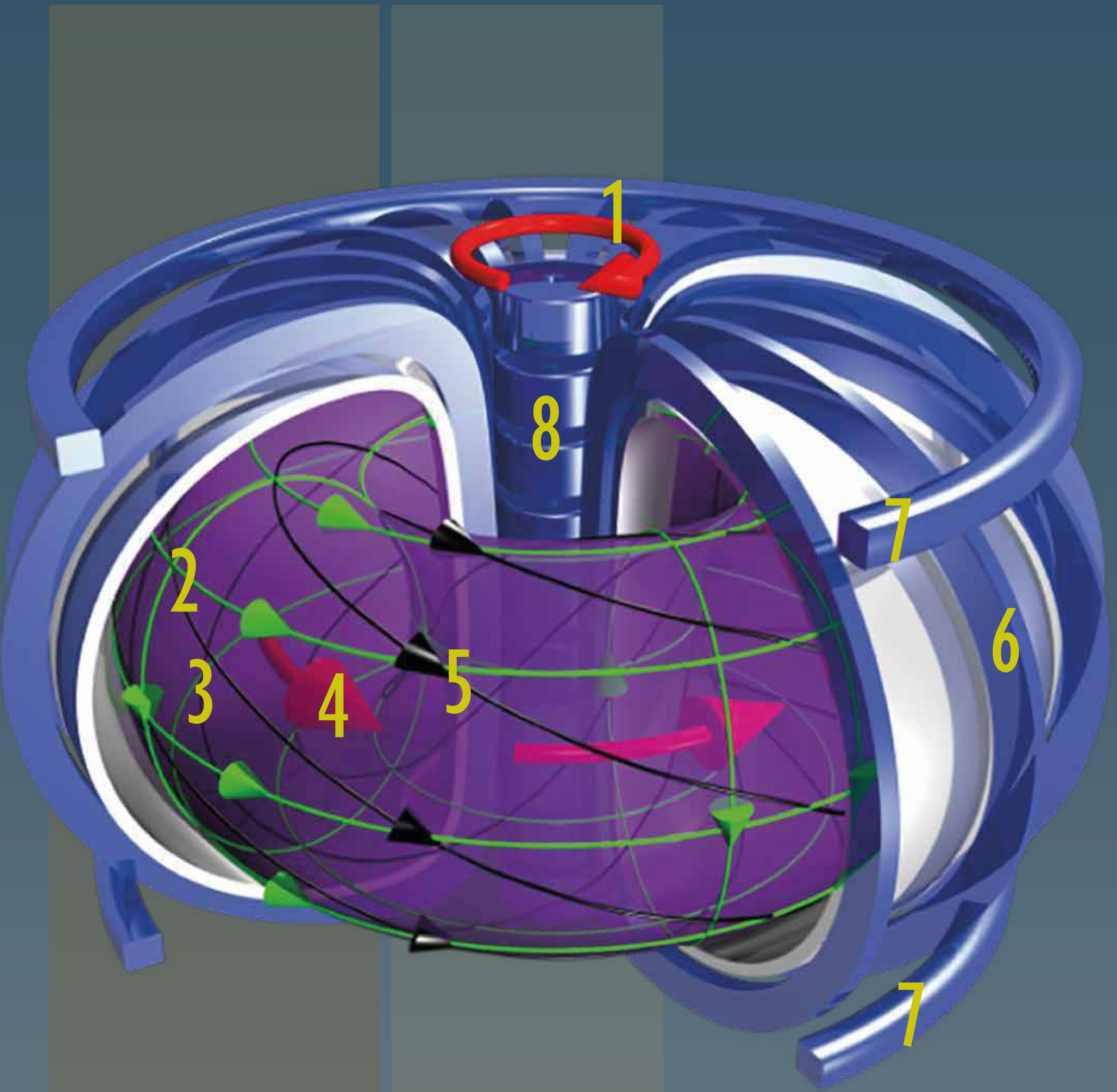
Progresso del valore del triplo prodotto (Lawson) nel corso degli anni, confrontato con la famosa Legge di Moore sul tempo di raddoppiamento del numero di transistor nel chip (2 anni)



IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



IL TOKAMAK



1 CORRENTE GENERATA
DALLA BOBINA CENTRALE

2 CAMPO MAGNETICO
TOROIDALE

3 CAMPO MAGNETICO
POLOIDALE

4 CORRENTE ELETTRICA DI
PLASMA

5 CAMPO MAGNETICO
RISULTANTE

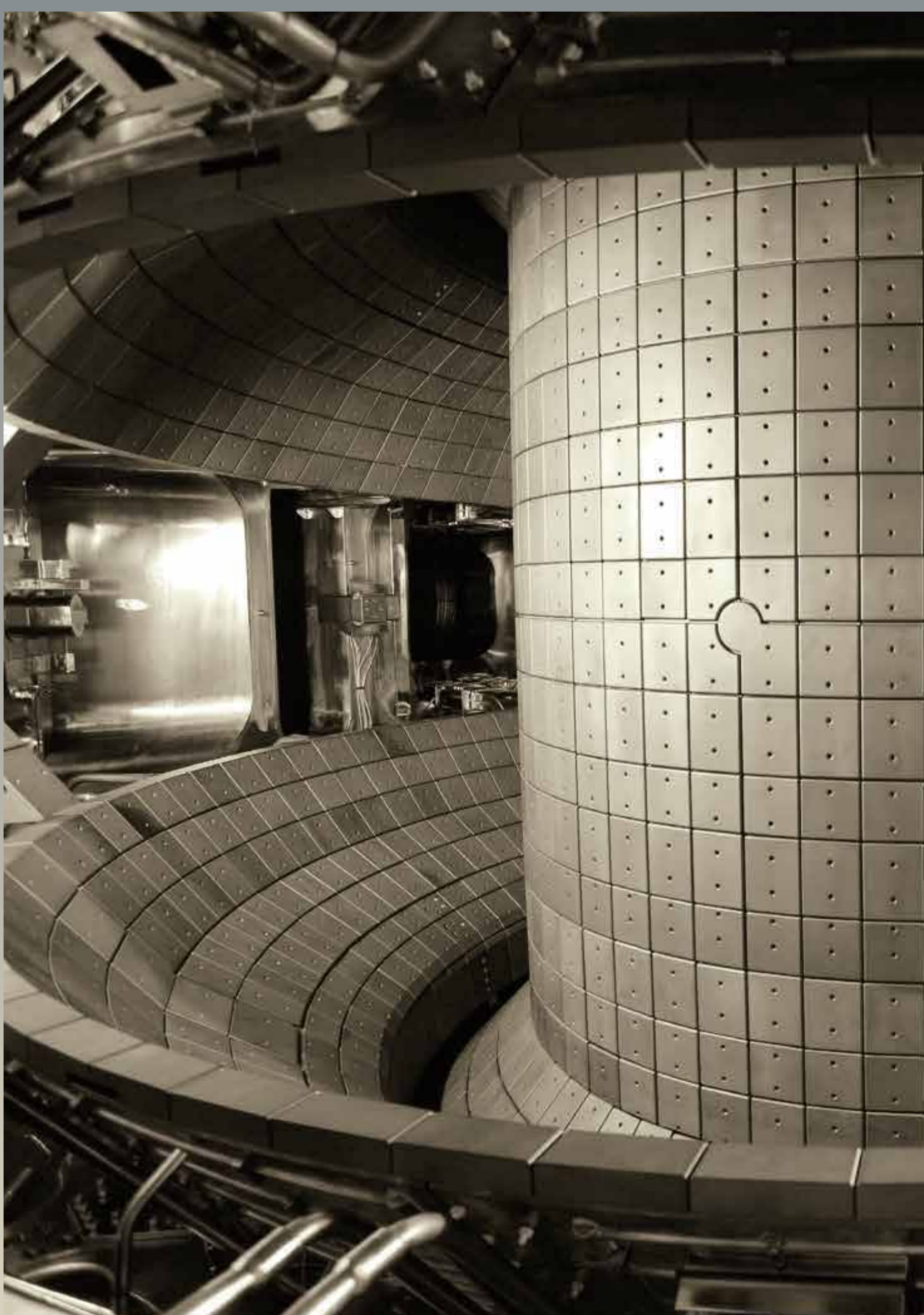
6 BOBINE
TOROIDALI

7 BOBINE
POLOIDALI

8 SOLENOIDE
CENTRALE



Attorcigliando i magneti, si può produrre una forma elicoidale delle linee di forza senza la necessità del trasformatore; questa configurazione si chiama stellarator. Per approfondire inquadra il qr code.



IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



4.5

PIÙ CALDO DEL SOLE

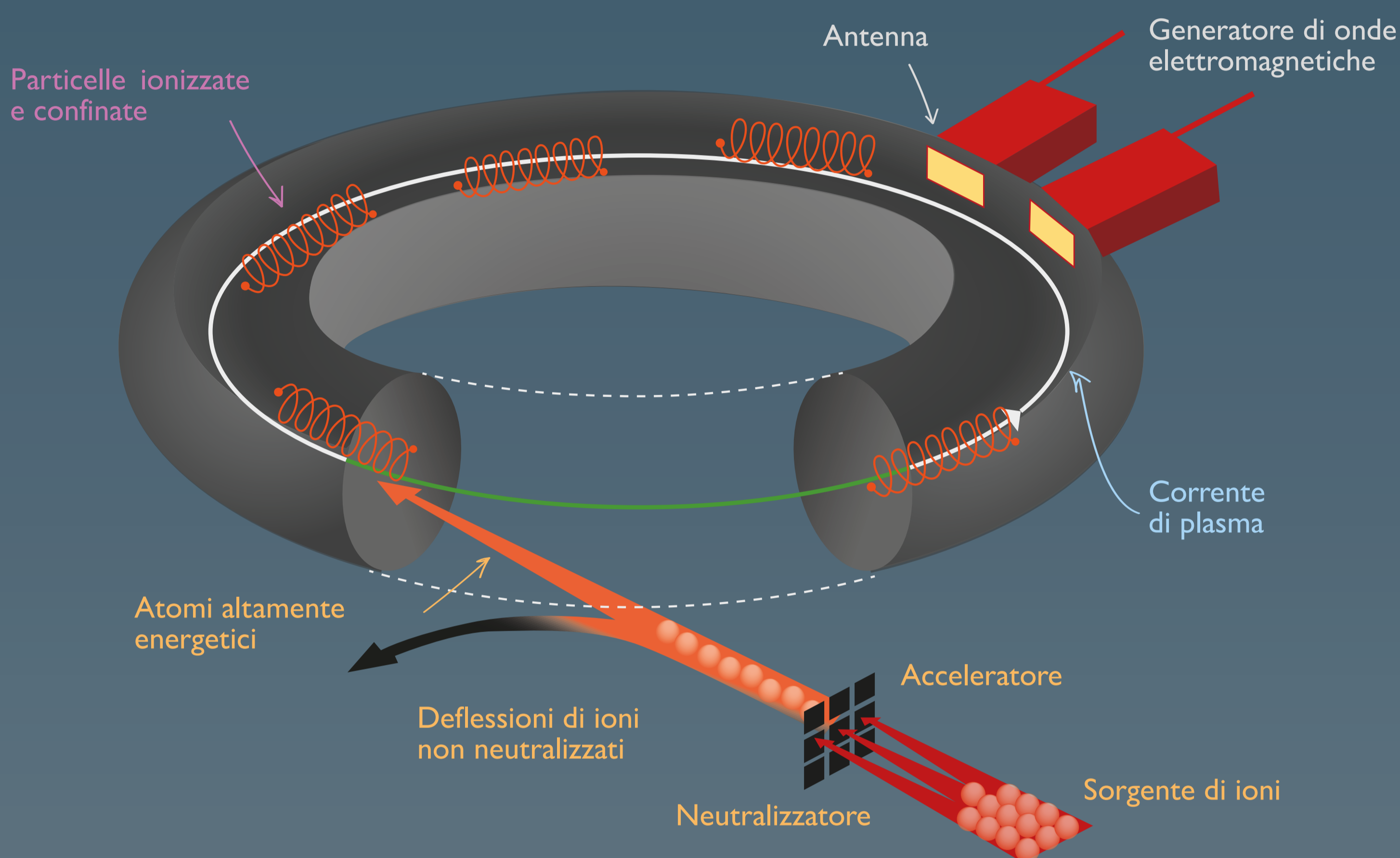
Per raggiungere le condizioni di fusione, il plasma deve essere caldo, molto caldo. Quanto? Circa 100 milioni di gradi.

Come è possibile scaldarlo a tal punto? Essenzialmente in 3 modi

RISCALDAMENTO CON ONDE ELETTROMAGNETICHE

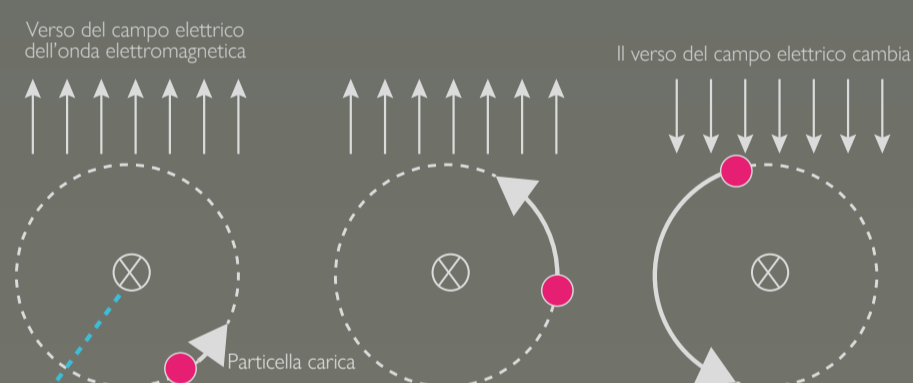
EFFETTO JOULE

RISCALDAMENTO CON INIEZIONE DI ATOMI CALDI



RISCALDAMENTO CON ONDE ELETTROMAGNETICHE

Le onde elettromagnetiche interagiscono con le particelle del plasma trasferendo la loro energia, esattamente come succede dentro ad un forno a microonde.



Immaginiamo di guardare dall'alto una particella carica che gira attorno alla linea del campo magnetico. Investito dall'onda, il moto della particella viene forzato, accelerato quando la particella si trova in basso. Quando la particella si trova in alto il verso del campo elettrico dell'onda elettromagnetica cambia e accelera la particella verso il basso (SONO BEN COORDINATI!).

Le particelle così accelerate aumentano la loro temperatura.

Allo stesso modo, visti da sopra, i due bambini spingono la giostra uno verso l'alto e uno il basso. Entrambi contribuiscono all'accelerazione della giostra.



EFFETTO JOULE

Un campo magnetico variabile che attraversa il centro del tokamak produce una corrente all'interno del plasma, che mette in moto, in versi opposti, elettroni e ioni.

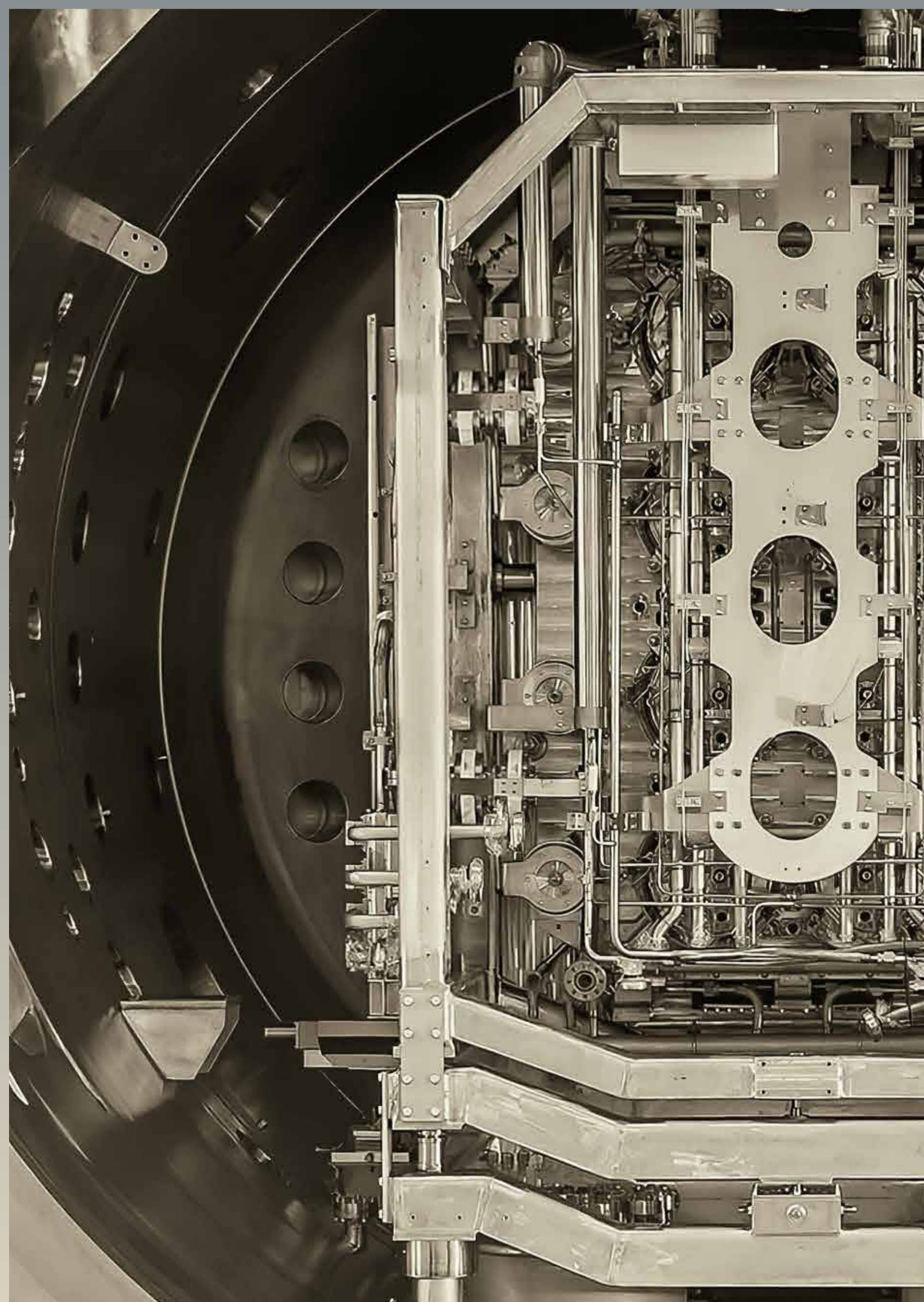
Urtandosi tra loro questi contribuiscono a riscaldare il plasma. È un fenomeno analogo a quello che fa scaldare una lampadina a filamento.



RISCALDAMENTO CON INIEZIONE DI PARTICELLE CALDE

Come il getto di vapore scalda il latte del cappuccino, allo stesso modo nel tokamak si iniettano atomi neutri caldi per aumentare la temperatura del plasma.

Perché atomi neutri? Perché non risentono dei campi magnetici e possono così raggiungere le parti centrali del plasma e trasferire la loro energia alle particelle del plasma attraverso le collisioni.



Un componente dell'iniettore di atomi neutri per l'esperimento ITER

IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



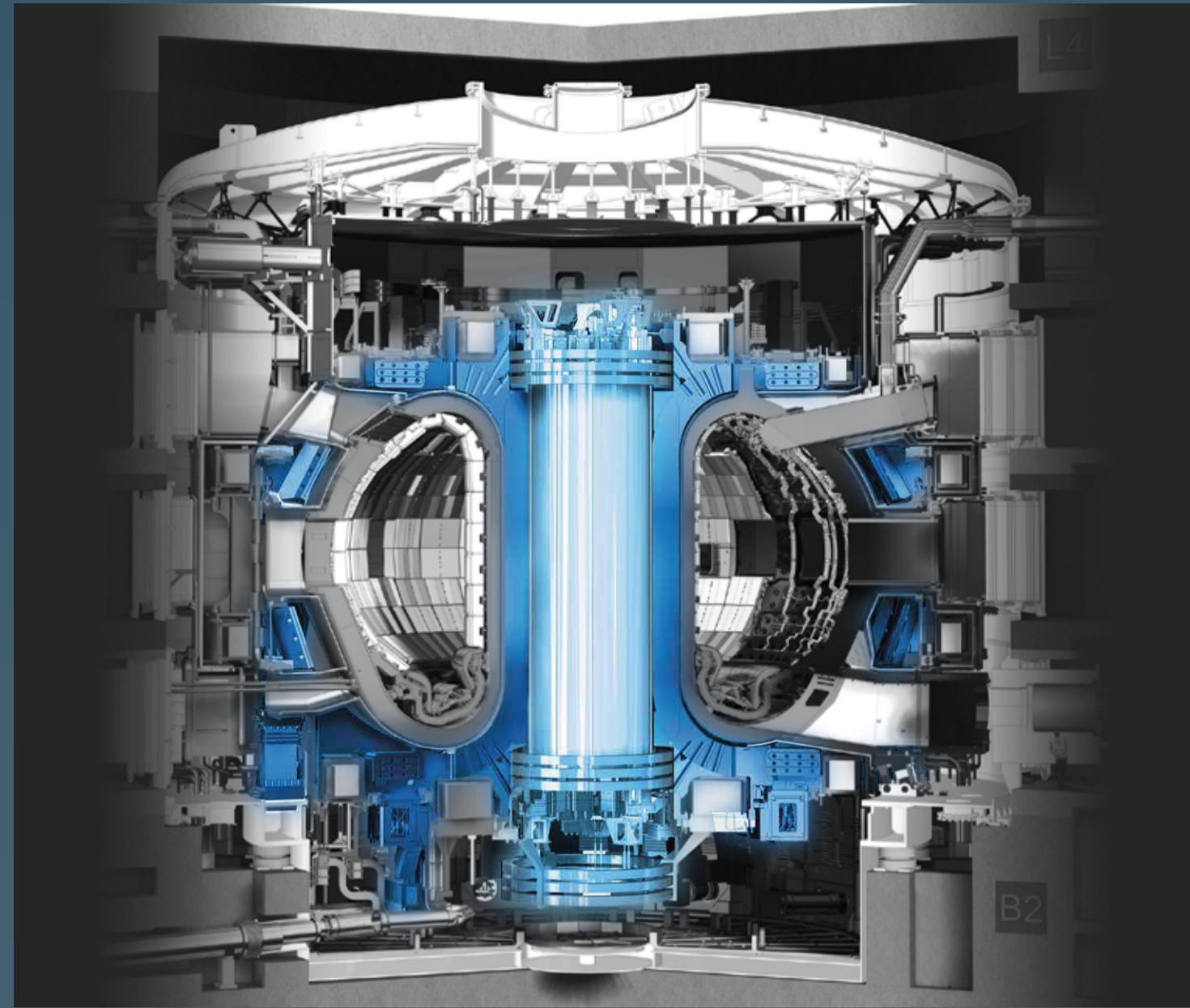
4.6

ITER, IL GIGANTE

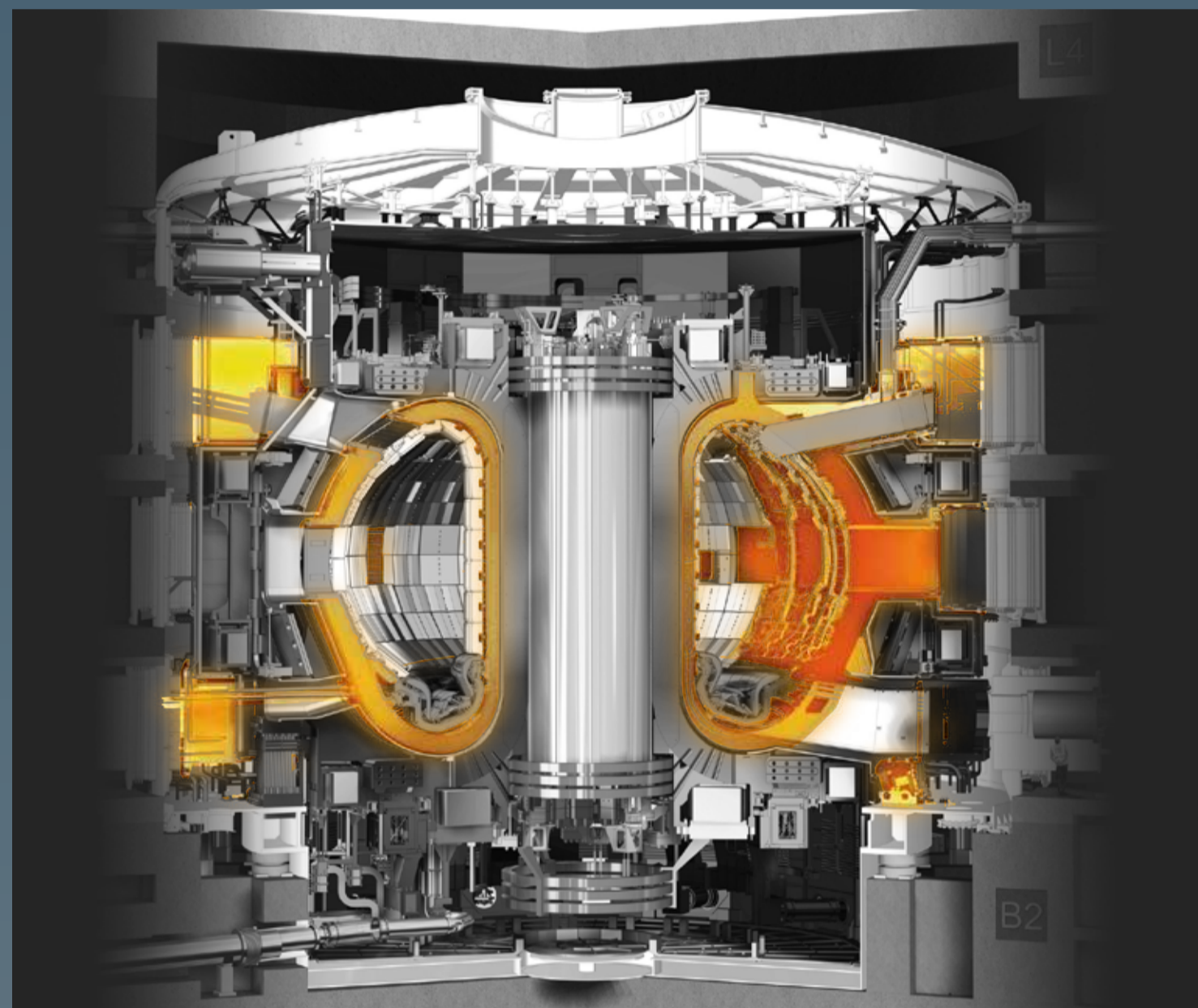
ITER (in latino "La via") è un esperimento scientifico che ha lo scopo di verificare la fattibilità della fusione nucleare come fonte di energia.

È frutto di una collaborazione internazionale di sette partner (Cina, Corea, Giappone, India, Russia, Stati Uniti, Unione Europea) ed è attualmente in costruzione a Cadarache nel Sud della Francia.

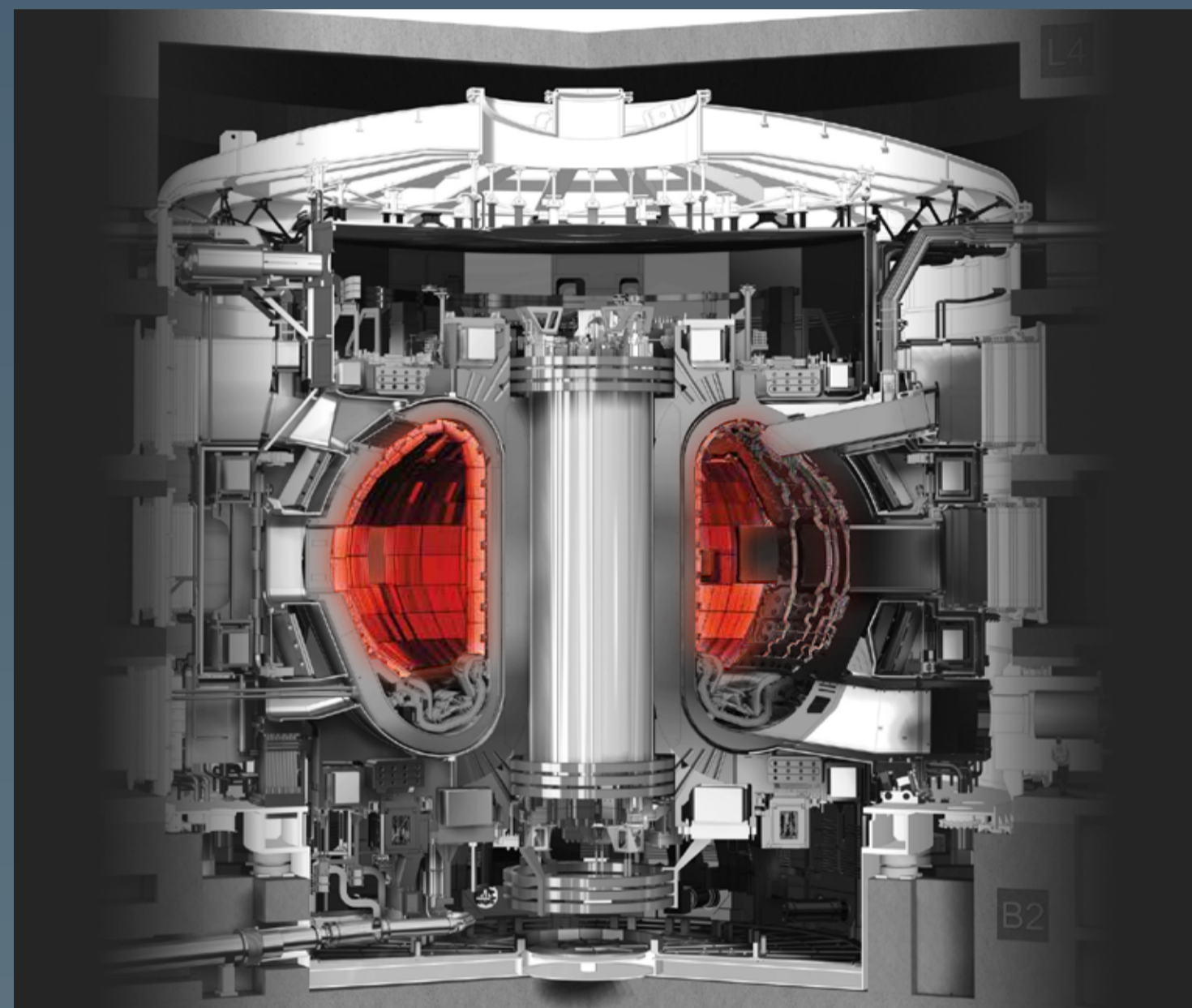
- Peso 23 000 tonnellate
- Temperatura del nucleo 150 milioni di gradi
- Potenza in uscita 500MW



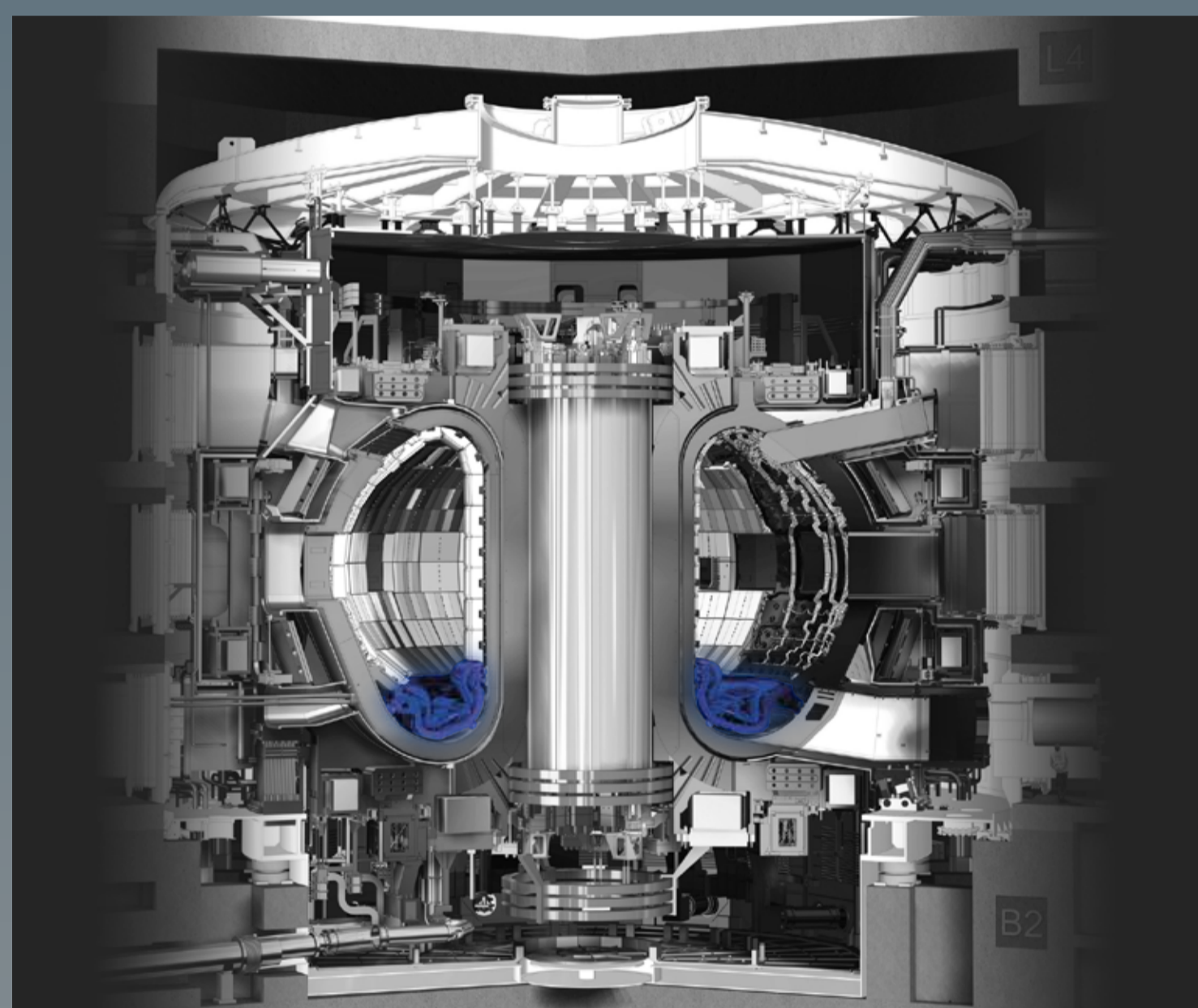
MAGNETI
10 mila tonnellate di magneti superconduttori produrranno il campo magnetico per innescare, confinare, dare forma e controllare il plasma.



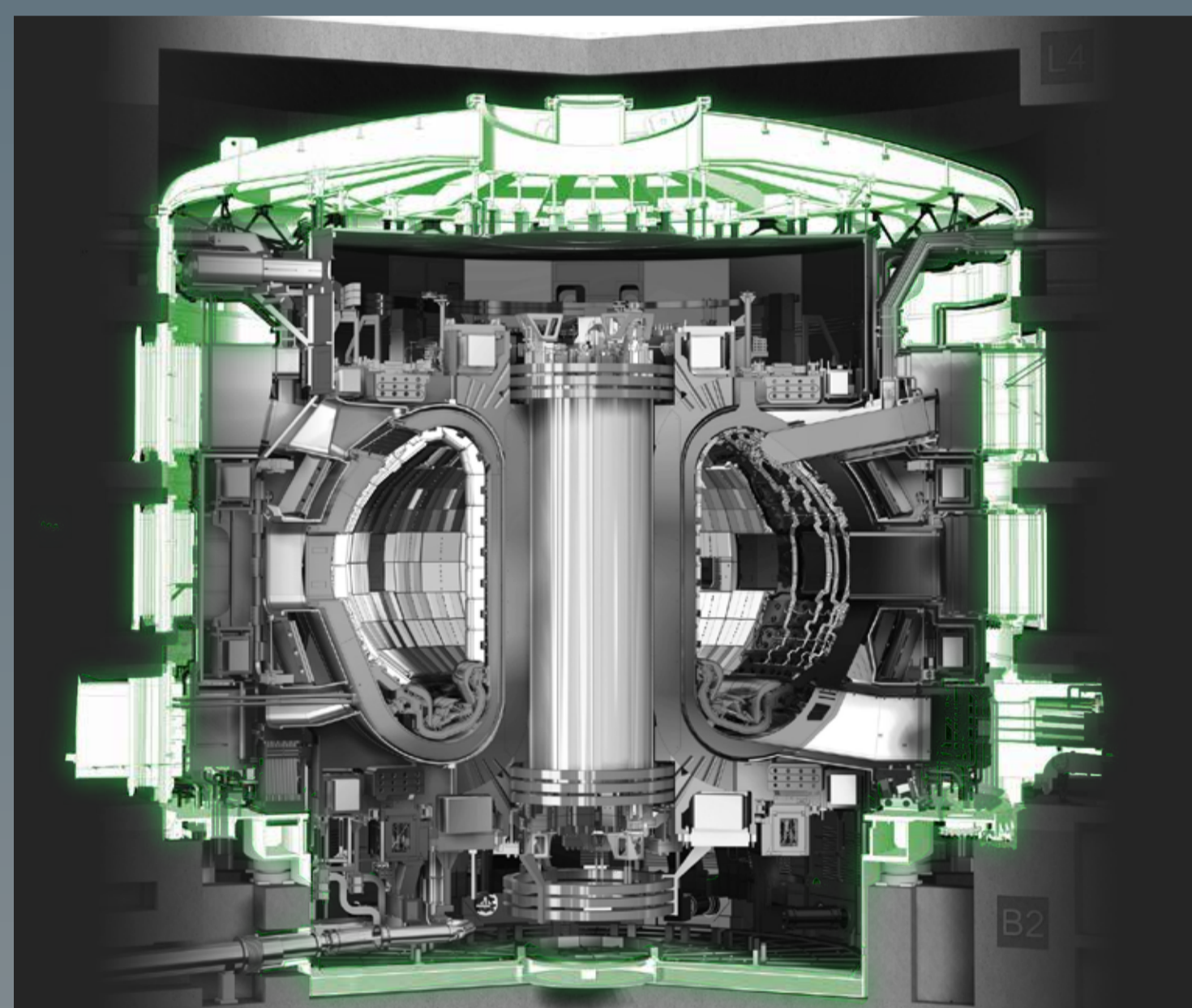
CAMERA DA VUOTO
La camera da vuoto di acciaio inossidabile ospiterà le reazioni di fusione e sarà una prima barriera di sicurezza.



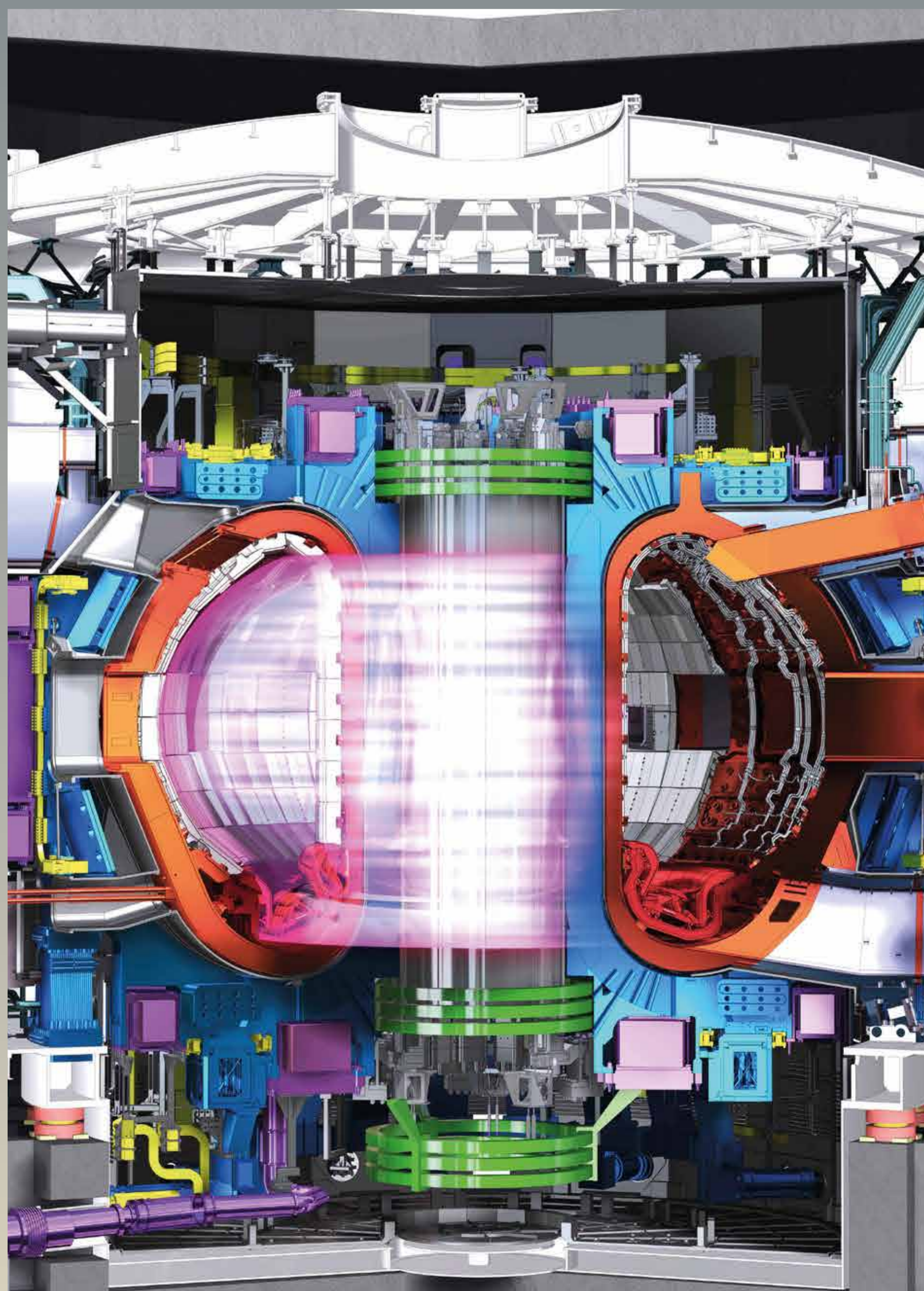
BLANKET
Il blanket schermo la camera da vuoto e i componenti esterni della macchina dai neutroni ad alta energia prodotti durante le reazioni di fusione. Inoltre è la sede dove vengono generati i nuclei di Trizio - parte del combustibile della fusione - a partire dalle interazioni dei neutroni con nuclei di Litio



DIVERTORE
Posizionato sul fondo della camera da vuoto, il divertore controlla lo smaltimento del gas di scarico e delle impurezze del reattore e sopporta gli altissimi carichi termici superficiali di ITER.

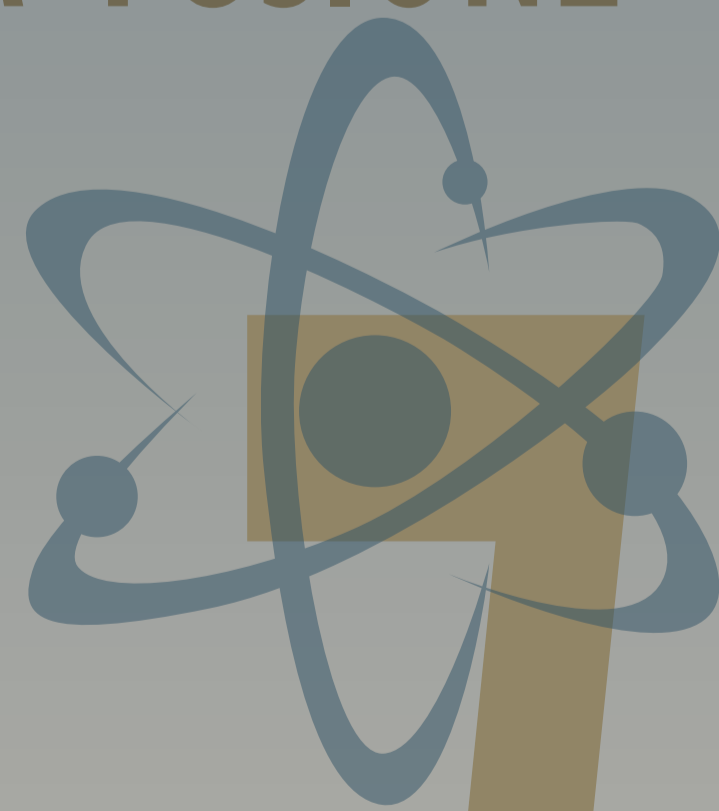


CRIOSTATO
Il criostato di acciaio inossidabile (29 x 29 m) circonda la camera da vuoto e i magneti superconduttori e assicura un ambiente di vuoto ultra-freddo



ITER, il gigante

IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



401

LA FUSIONE INERZIALE

Il processo di fusione a confinamento inerziale è innescato da fasci di particelle accelerate o da fasci di raggi laser focalizzati su un target di combustibile della dimensione di alcuni mm.

INGREDIENTI



Una capsula di plastica cava e sferica di circa due millimetri di diametro riempita di una miscela di deuterio e trizio



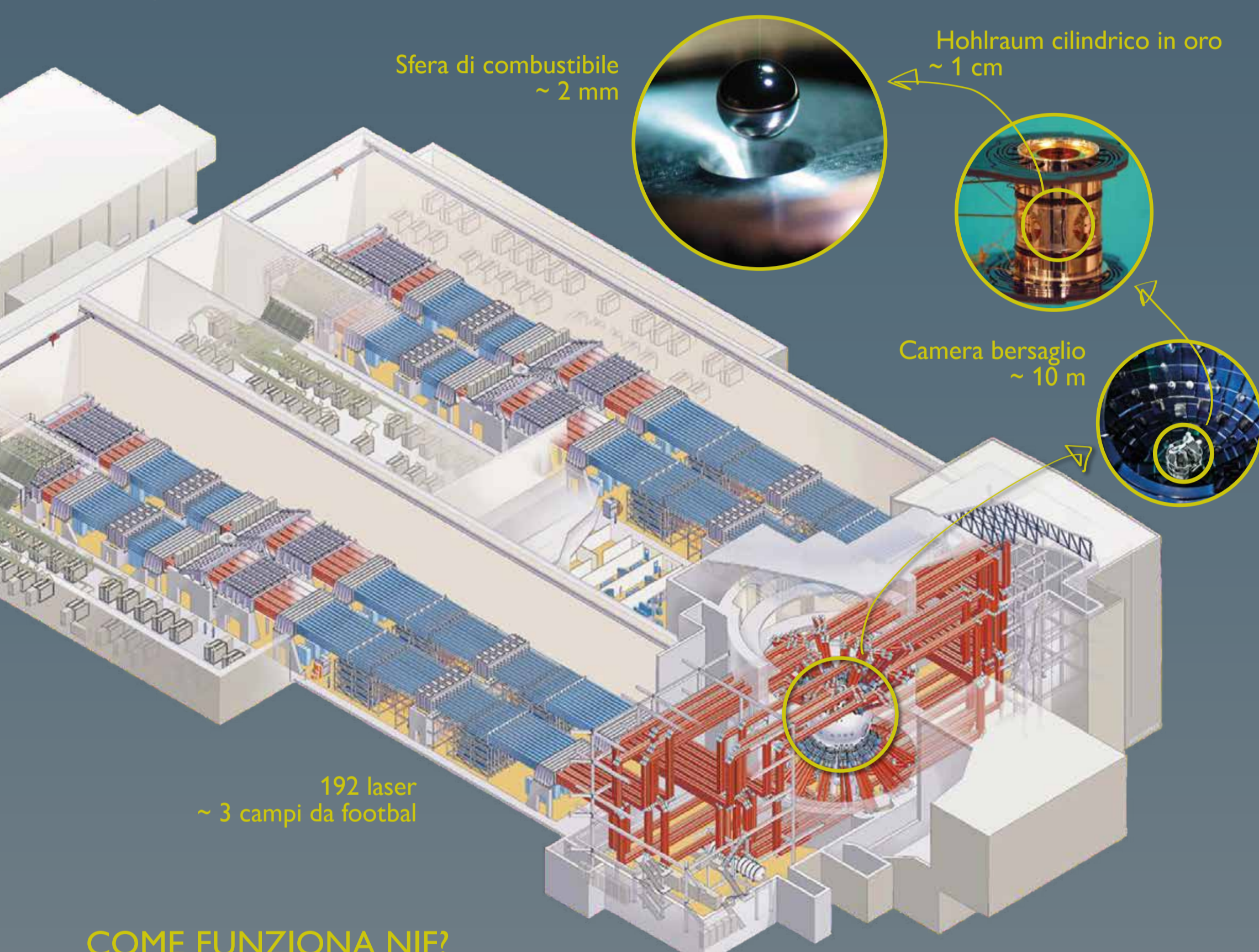
Un grande numero di fasci laser energetici che generano per una frazione di secondo una potenza equivalente a quella di qualche milione di lampadine

RICETTA



Usare tutta la potenza dei laser per creare raggi X che riscaldano la superficie della capsula e «aspettare» 0,000000001 secondi

Il 5 dicembre 2022 NIF ha realizzato, per la prima volta al mondo, un esperimento di fusione inerziale nel quale l'energia generata dalla reazione di fusione (3.15 MJ) ha superato l'energia assorbita dalla capsula (2.05MJ) generata dai 192 fasci laser in un tempo di circa 1 nanosecondo.



GLI ESPERIMENTI DI FUSIONE INERZIALE NEL MONDO



OMEGA EP – Università di Rochester, NY, USA
4 fasci laser capaci di generare energia dell'ordine dei kJ per impulsi fino a ~10 ns



Laser Megajoule – CEA, Bordeaux, France
Entrato in funzione nel 2014 presso i laboratori del CEA a Bordeaux, è dotato di 176 fasci laser in grado di fornire oltre 1 MJ di energia totale

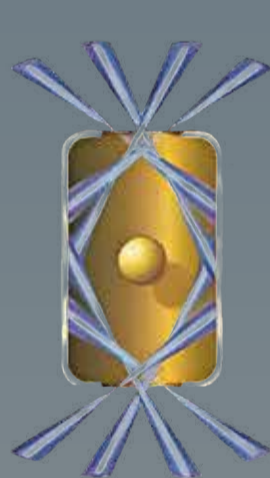


GEKKO XII – Osaka University, Japan
Completato nel 1983 presso la Osaka University, dispone di 2 diverse camere da vuoto per gli esperimenti e 12 fasci laser con un'energia di ~10 kJ per impulso di 1-2 ns



NIF, Lawrence Livermore National Laboratory, USA
La National Ignition Facility presso il Lawrence Livermore National Laboratory (USA), con i suoi 192 fasci laser in grado di generare fino a 2MJ di energia, è il più grande e potente esperimento al mondo

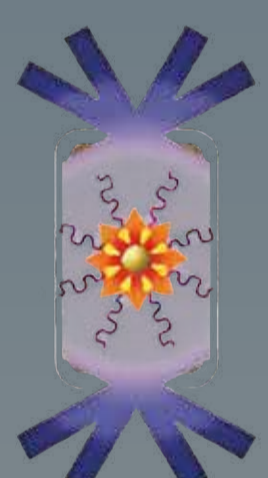
COME FUNZIONA NIF?



I fasci laser vengono focalizzati all'interno dell'hohlraum



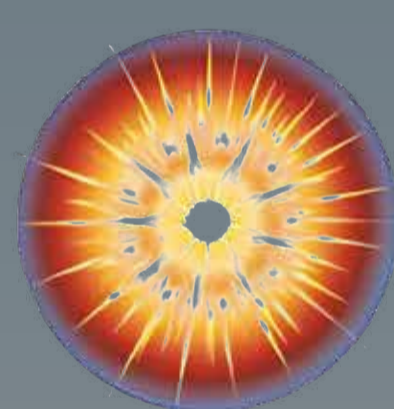
Le pareti interne del hohlraum vengono riscaldate ed emettono raggi X



Il bersaglio viene compresso



Il nucleo del combustibile raggiunge una densità di 100-1000 volte superiore a quello del piombo e temperatura di 100 milioni di gradi Celsius



Avviene la fusione termonucleare producendo una quantità di energia maggiore di quella assorbita



Se vuoi saperne di più, inquadra il QR CODE



IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE

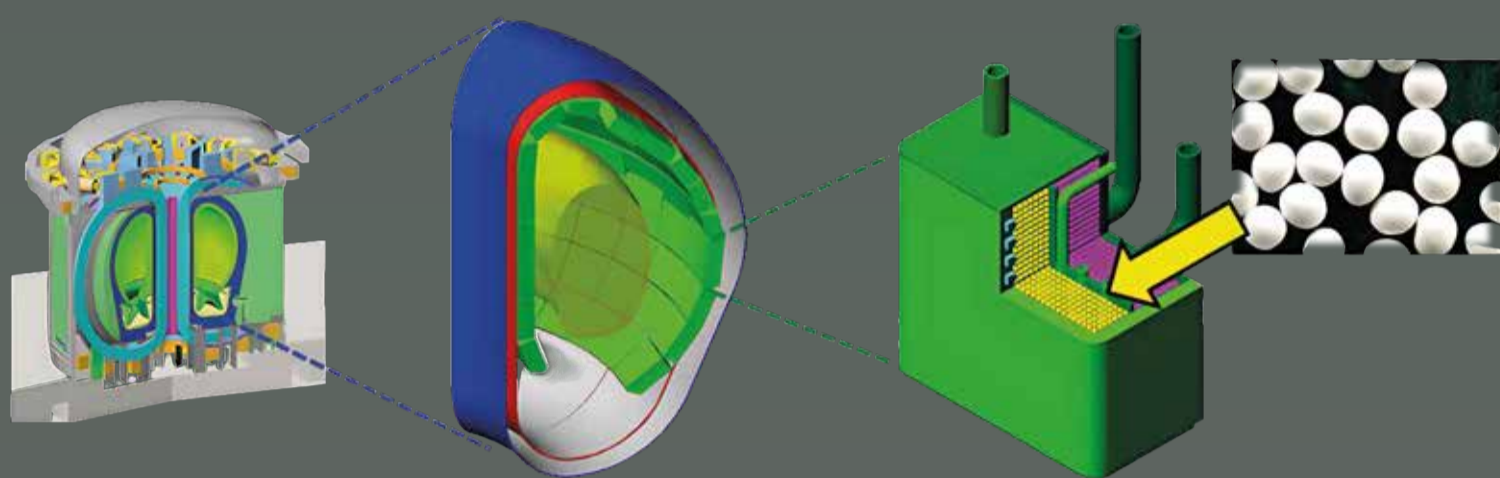


TECNOLOGIE DA SVILUPPARE...

"Non sapevano che fosse impossibile, allora l'hanno fatto"
M. Twain

- Tecnologie molto complesse perciò sviluppo lento
- Auto-fertilizzazione: produzione del trizio nel reattore

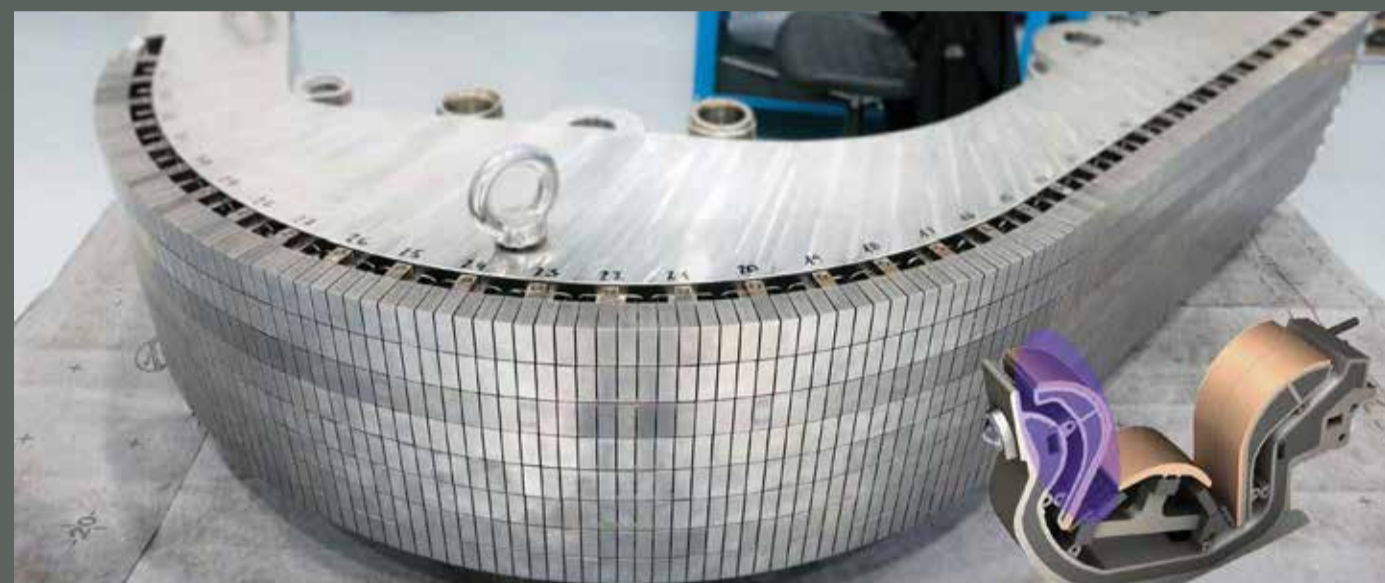
- Il trizio deve essere prodotto all'interno del reattore stesso dalla reazione del litio con i neutroni prodotti dalle reazioni di fusione



Il sistema di fertilizzazione è costituito da moduli affacciati al plasma investiti dal flusso di neutroni. Nei moduli in un fluido sono sospese delle sfere che contengono il Litio. La reazione tra Litio e neutroni produce il trizio che viene poi separato dal fluido e immagazzinato per essere poi immesso nella camera toroidale

- Flussi termici dieci volte più elevati rispetto alle applicazioni più avanzate

- Sono necessari materiali e tecnologie avanzate di gestione di altissimi flussi termici. L'esperimento DTT, in costruzione in Italia, ha questo come uno degli scopi principali



Elemento di divertore per assorbimento del carico termico e convogliamento delle particelle (principalmente elio, impurezze, deuterio e trizio). È costituito da blocchetti di tungsteno che al centro sono attraversati da tubi di rame in cui circola acqua di raffreddamento per mantenere il tungsteno alla temperatura di lavoro

- Materiali avanzati resistenti a flussi di neutroni ad alta energia

- Da oltre 15 anni, Europa e Giappone collaborano per realizzare un laboratorio di prova per lo sviluppo di materiali compatibili con l'ambiente dove si realizzano le reazioni di fusione.



Immagine dell'acceleratore di particelle multistadio a 40 MeV che colpiscono un bersaglio di Litio producendo così i neutroni a 40 MeV per collaudare i nuovi materiali che dovranno essere utilizzati nella camera toroidale del reattore.

...MA NE VALE LA PENA!

✓ NO REAZIONI INCONTROLLABILI

Se viene introdotto qualche elemento di disturbo, il plasma perde energia e la reazione finisce

✓ NO SCORIE RADIOATTIVE

Solo i materiali che costituiscono le pareti della camera della macchina diventano radioattivi ma con una radioattività limitata che decade in alcune decine di anni

✓ COMBUSTIBILE ABBONDANTE

Il deuterio è estratto dall'acqua. Il litio, che serve per produrre il trizio all'interno della macchina, è disponibile in riserve terrestri e marine molto abbondanti

✓ NO CO₂

Non ci sono emissioni di CO₂ o altri gas serra

✓ ALTA EFFICIENZA

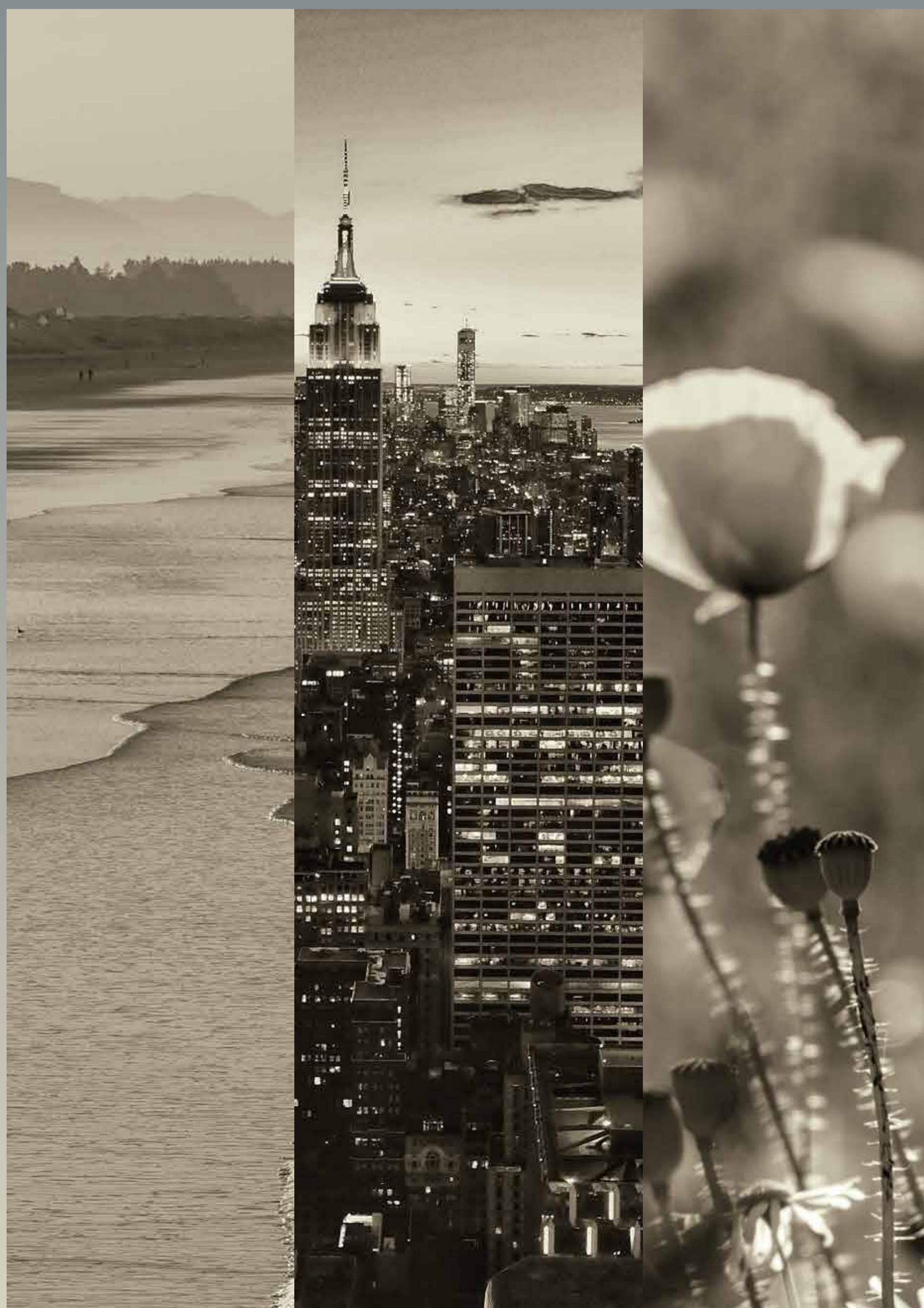
A parità di quantità di combustibile, la fusione produce 4 milioni di volte più energia della combustione di petrolio, gas o carbone

✓ LIMITATO RISCHIO DI PROLIFERAZIONE

In una macchina a fusione non si usano materiali che possano essere utilizzati in armi nucleari (uranio, plutonio, ...). Lo sviluppo di reattori a confinamento magnetico non ha rilevanza bellica

✓ ENERGIA PER TUTTI

Il combustibile è distribuito sul pianeta, utilizzabile da tutti i popoli del mondo. Una forma di energia stabile può aiutare a ridurre le disuguaglianze e le tensioni geopolitiche



IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



LA FUSIONE E LA PACE

La ricerca sulla fusione come fonte di energia è stata caratterizzata fin dai suoi inizi negli anni 50 da ispirazioni che possiamo riassumere nei seguenti quattro principi:

- La più ampia collaborazione internazionale
- L'uso pacifico dell'energia nucleare
- Per il beneficio di tutta l'umanità
- Costituendo un paradigma per altre iniziative di collaborazione scientifica aventi rilevanza planetaria



Le bandiere dei sette membri (Cina, Unione Europea, India, Giappone, Corea del Sud, Russia, Stati Uniti) sventolano davanti al sito di costruzione di ITER

Novembre 1985 Summit bilaterale a Ginevra, Reagan - Gorbačëv¹³
punto della dichiarazione congiunta stabilisce:

“ *L'obiettivo di utilizzare la fusione termonucleare controllata per scopi pacifici richiama il più ampio sviluppo della collaborazione internazionale per rendere disponibile questa fonte di energia ... per il beneficio di tutta l'umanità* ”

“ *ITER è nato in un contesto politico ed è stato sostenuto non soltanto per ragioni scientifiche, ma anche per ragioni diplomatiche e strategiche* ”

Michel Claessens
“ITER: The Giant Fusion Reactor”

“ *...Il progetto ITER costituisce un affascinante paradigma di intersezione tra scienza e diplomazia che potrebbe ispirare i promotori di altri grandi progetti internazionali* ”

Raymond Orbach
Sottosegretario di Stato
USA dal 2002 al 2009
per la ricerca scientifica
del Dipartimento per l'Energia

Il presidente degli Stati Uniti Ronald Reagan e il leader dell'Unione Sovietica Michail Gorbačëv si incontrarono al Vertice di Ginevra (1985) per discutere la limitazione degli armamenti nucleari



IL CAMMINO VERSO LA FUSIONE



40

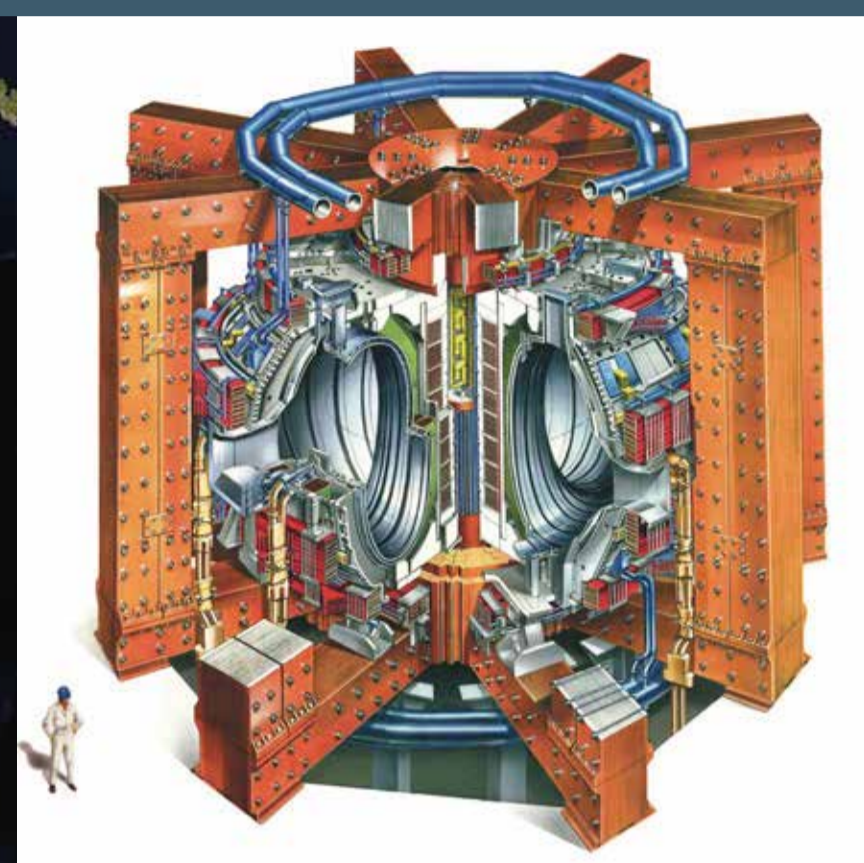
DOVE SIAMO:

la roadmap della ricerca sulla fusione a confinamento magnetico

2020

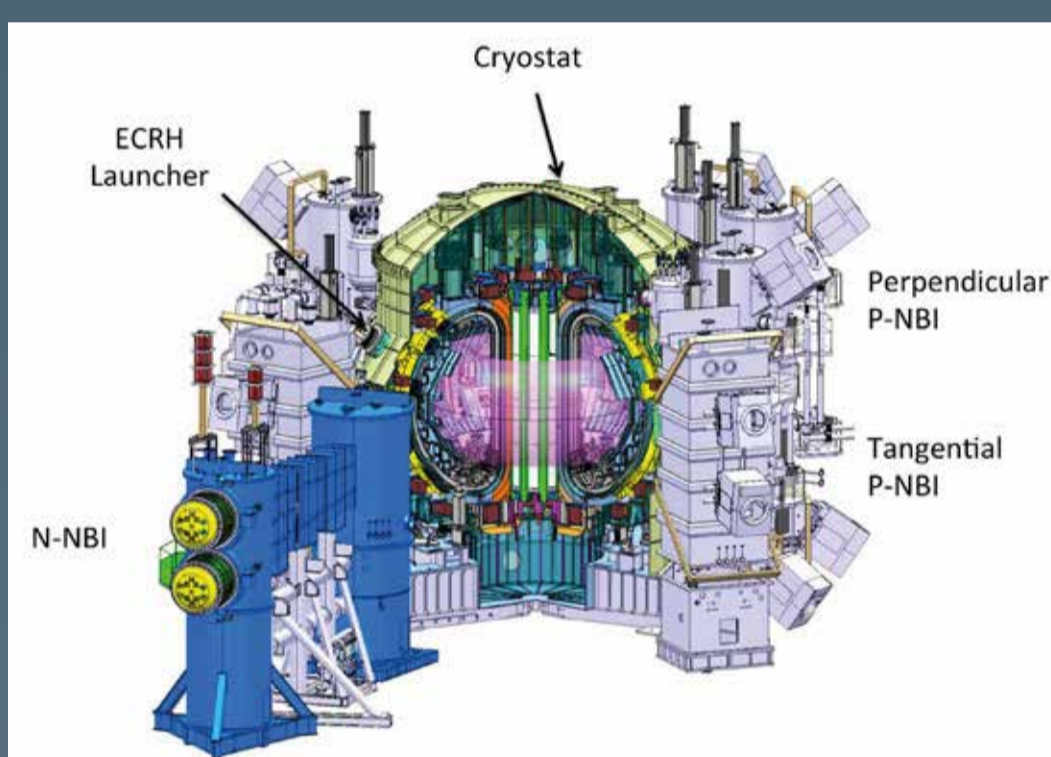
LA FUSIONE È POSSIBILE

Oltre 130 esperimenti in tutto il mondo

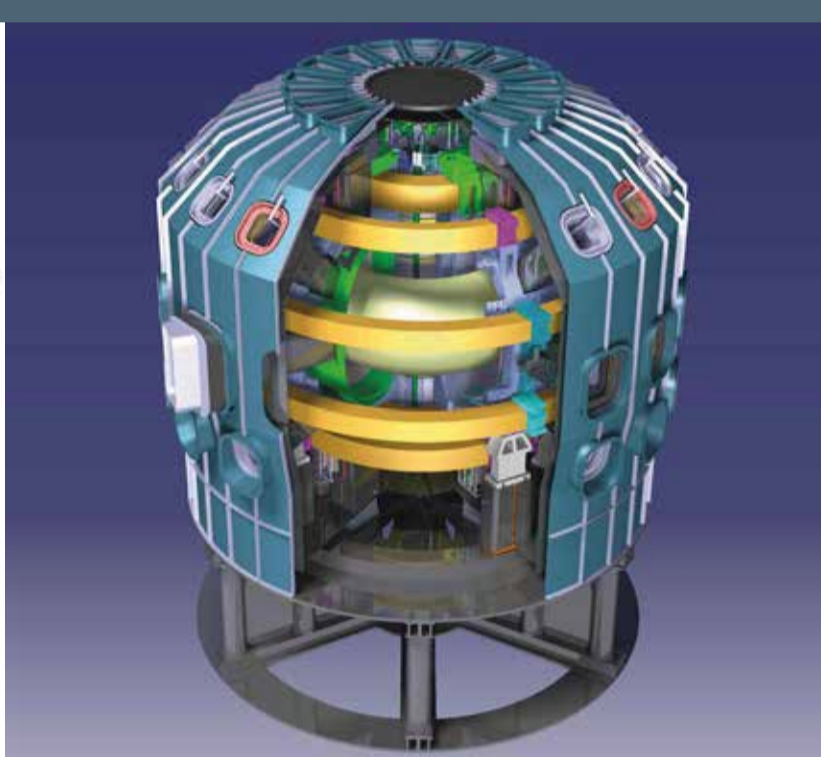


2030

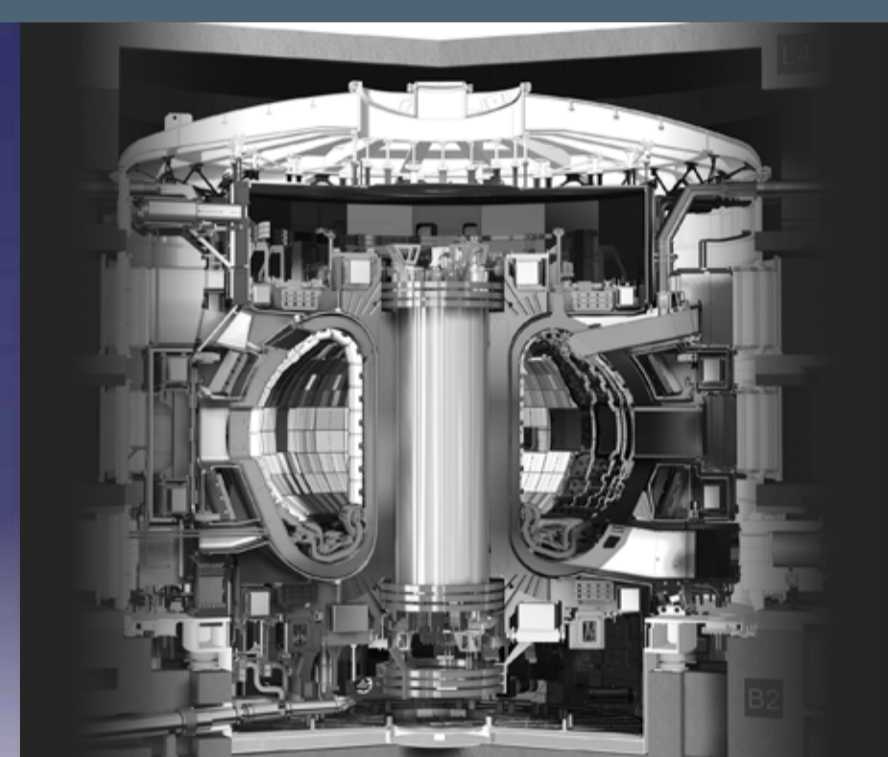
LA FUSIONE È FATTIBILE



JT-60SA

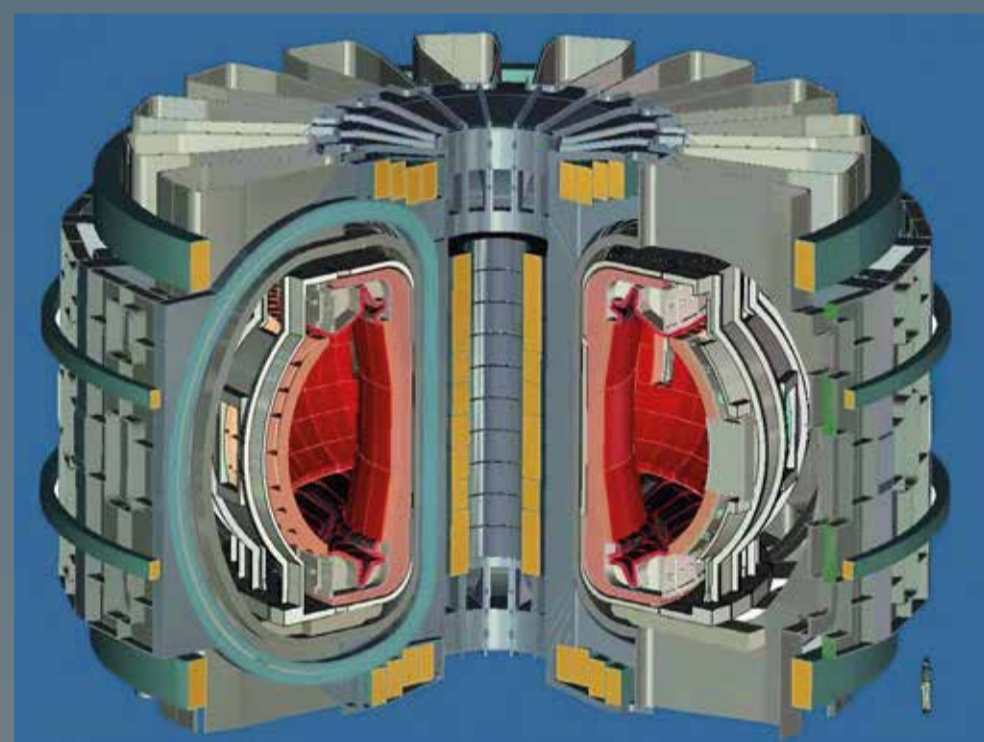


DTT



ITER

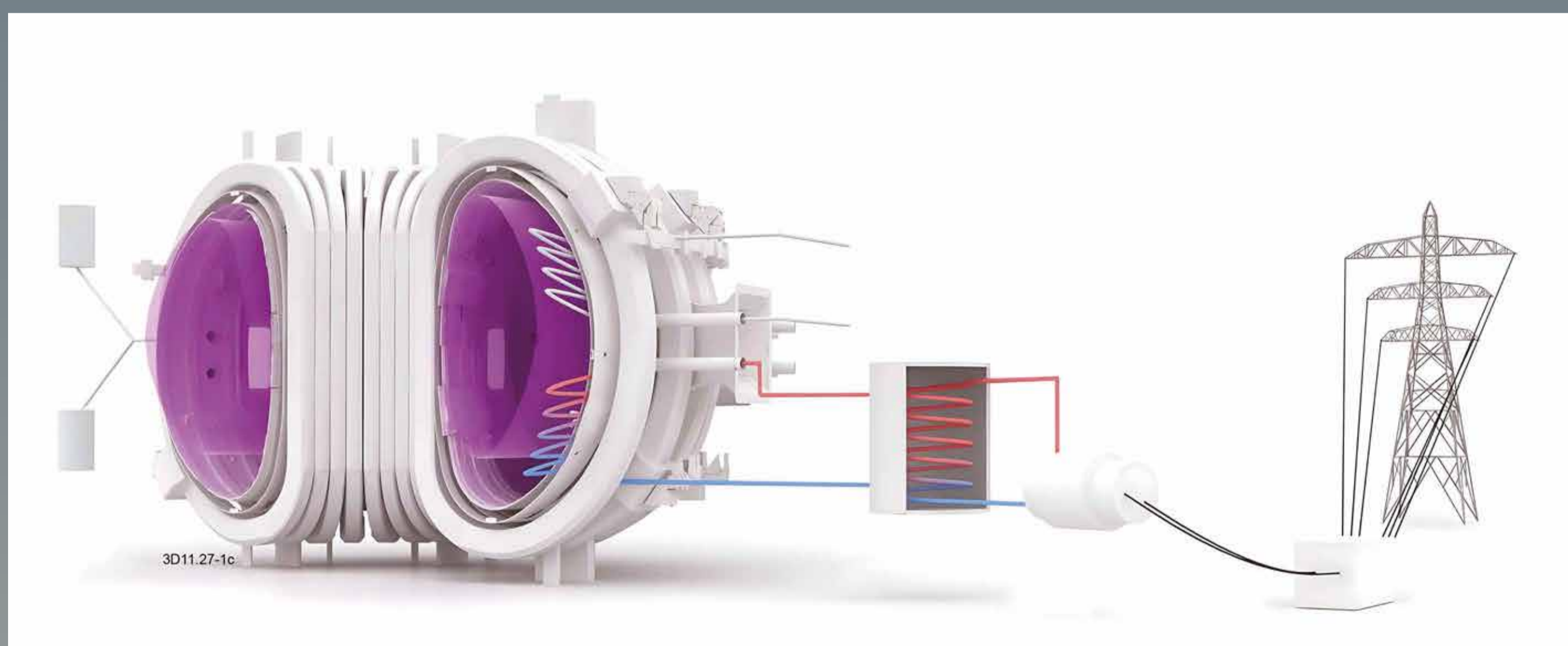
LA FUSIONE È SFRUTTABILE E ATTRAENTE



Reattori dimostrativi

2050

L'ENERGIA DA FUSIONE DIVENTA COMMERCIALE



4



0