



Italian National Agency for New Technologies,
Energy and Sustainable Economic Development

Ingegneria e Sostenibilità: fissione e fusione nucleare, decommissioning e gestione dei rifiuti radioattivi. Analisi e prospettive

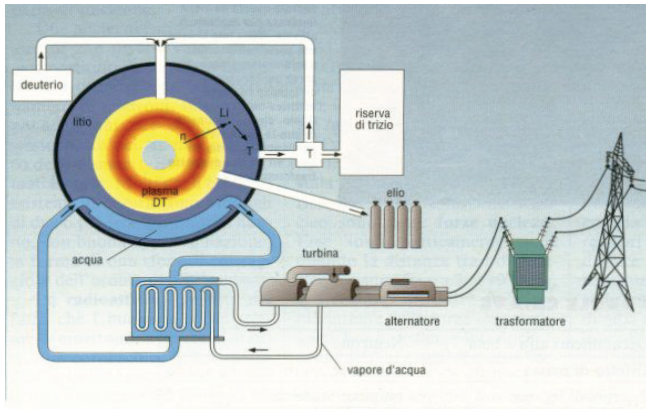
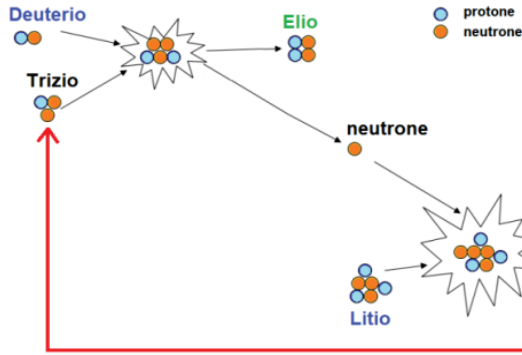
Fondazione CNI - Consiglio Nazionale Ingegneri
Piattaforma Gotowebinar, 8 luglio 2022

Alessandro Dodaro - Direttore Dipartimento Fusione e tecnologie per la Sicurezza Nucleare (FSN@enea.it)

La fusione nucleare



Fusione nucleare: la rinnovabile fra le rinnovabili (cit.)



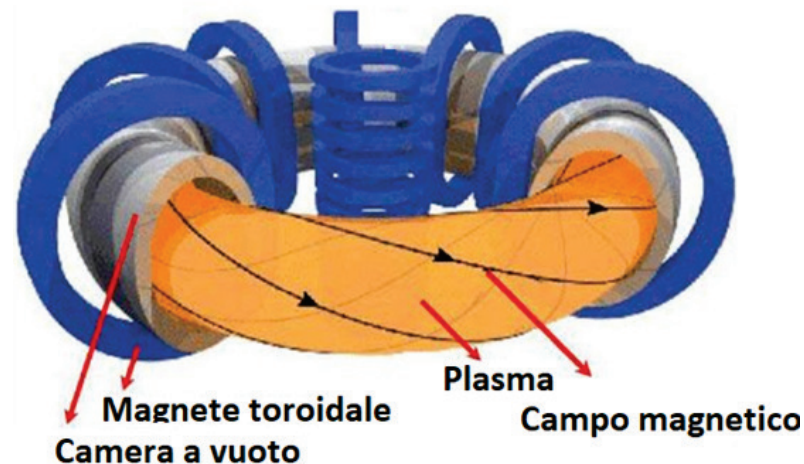
- **Combustibile** (deuterio, isotopi dell'idrogeno, e litio) illimitato e disponibile in tutte le aree geografiche
- **Trascurabile produzione di rifiuti radioattivi a lunga vita** (rifiuti prodotti analoghi a quelli generati, anche in Italia, da attività non correlate alla produzione di energia elettrica)
- **Intrinsecamente sicura** (un eventuale incidente avrebbe impatto trascurabile sull'ambiente e sulla popolazione)
- **Assenza di emissioni di gas serra**

Cos'è la fusione nucleare

- La fusione nucleare è il processo attraverso il quale si producono nuclei di elementi più pesanti a partire dalla fusione di nuclei di elementi più leggeri
- È certamente la principale fonte energetica dell'universo, visto che «tiene accesi» il sole e le stelle, al cui interno avvengono regolarmente reazioni di diverso tipo (ciclo del protone, predominante sul sole, le varie combinazioni degli isotopi dell'idrogeno, deuterio e trizio, fino alle cosiddette fusioni aneutroniche, che vedono protagonisti anche He, Li e B)
- Replicarla sulla terra, però, è molto complicato: per fondersi i nuclei devono superare la «barriera Coulombiana» cioè la repulsione fra due cariche elettriche di segno uguale, senza l'aiuto della forza di gravità, fortissima sul sole vista l'enorme massa della stella...

La strada più seguita nel panorama internazionale è basata sul **confinamento magnetico**: occorre riscaldare con opportuni sistemi i reagenti **a temperature di circa 150 milioni di gradi** - circa 10 volte superiori a quelle che si incontrano al centro del Sole - ma a densità molti ordini di grandezza più basse

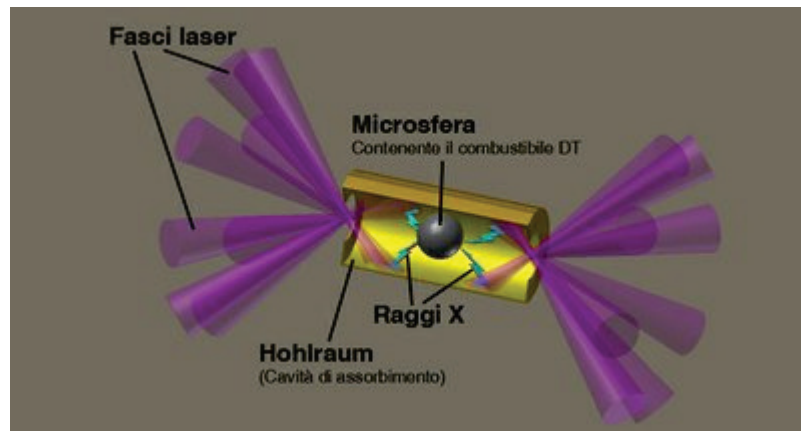
A temperature così elevate la miscela di reagenti si trova nella forma di gas ionizzato (plasma) ed è confinata mediante intensi campi magnetici in opportune configurazioni che rendono possibile il processo di fusione.



Un'altra opzione è basata sul **confinamento inerziale**: che consiste nell'ottenere in laboratorio una serie di micro-esplosioni bombardando sferette contenenti una miscela di deuterio-trizio con fasci di luce laser di alta energia. L'energia dei fasci laser è trasferita uniformemente alla superficie della sferetta che evapora, il combustibile viene compresso e riscaldato.

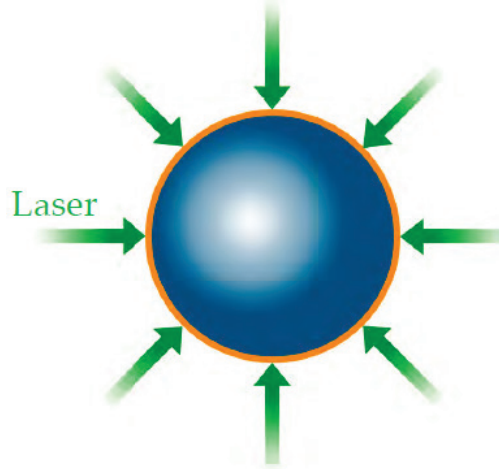
Si realizza così la condizione di altissima densità del plasma anche se per tempi di confinamento molto brevi.

Al momento l'energia necessaria per indurre la fusione è estremamente più grande di quella prodotta.

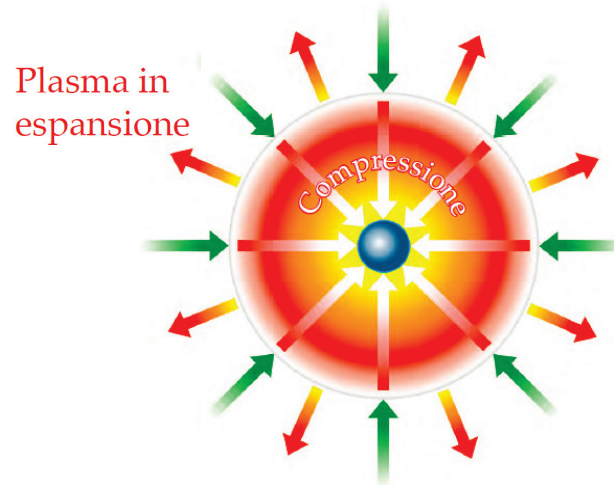


Fusione Nucleare a Confinamento Inerziale

- Una capsula sferica di combustibile ($D+T$), massa frazioni di mg e diametro di qualche millimetro, viene irraggiata uniformemente lungo la superficie da radiazione ad alta intensità.
- Diversi approcci possibili. Irraggiamento da laser, particelle, raggi X
- Ne segue ablazione della superficie della capsula e, per conservazione quantità di moto, conseguente compressione, con successivo innesco e trasformazione del combustibile.



**1) Irraggiamento
Plasma in espansione**



**2) Plasma in espansione e
compressione del combustibile**

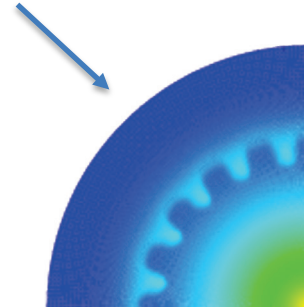
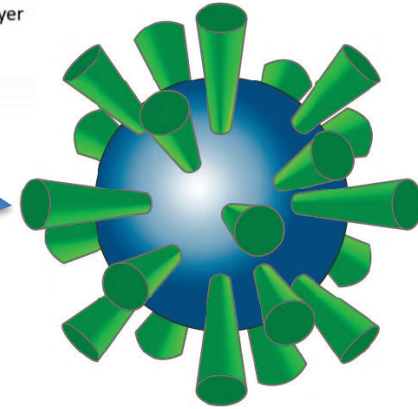
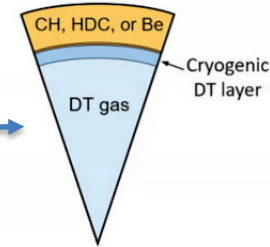


**3) Innesco processi di fusione e
trasformazione del combustibile**

S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn: *The Physics of Inertial Fusion*, Oxford (2009)

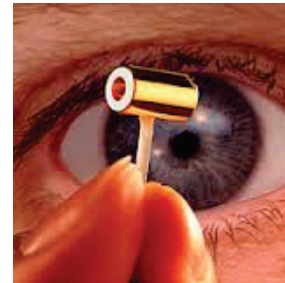
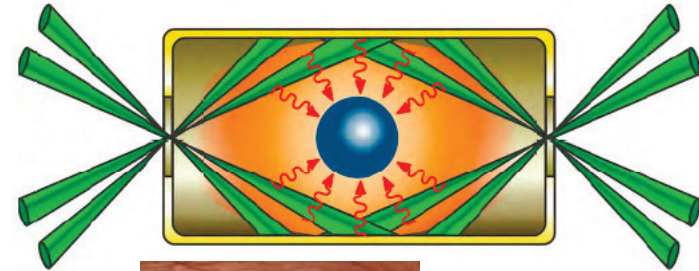
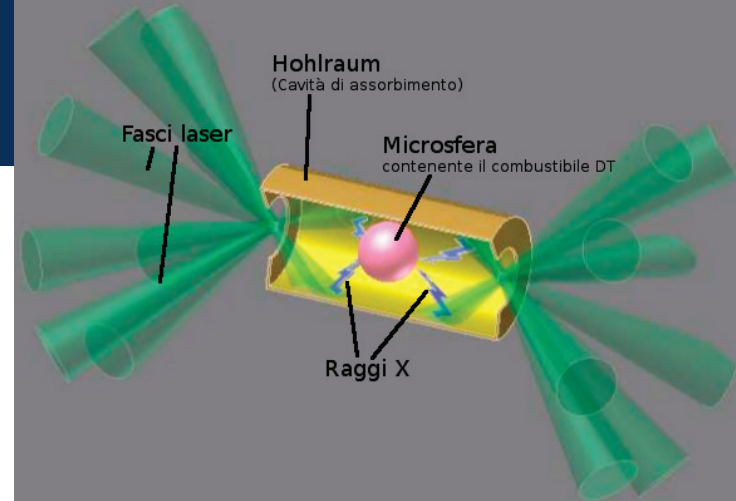
Fusione Nucleare a Confinamento Inerziale

- A fine compressione, combustibile a centro capsula con densità oltre 1000 volte quella del solido e temperatura $\sim 10^8$ K.
- Capsula: ablatore che circonda DT ghiacciato e DT gas
- Schema di interazione ideale: quello diretto laser su capsula
- Richiesta massima uniformità.
- Minime disomogeneità nell'illuminazione superficiale o nel bersaglio
→ instabilità idrodinamiche (Rayleigh-Taylor,...)
- Conseguente riduzione della simmetria e dell'efficienza di compressione della capsula.
→ Grosso ostacolo all'innesco
- Possibile soluzione: schema di irraggiamento indiretto



Irraggiamento indiretto

- Interazione laser con la parete interna di un cilindro d'oro (o materiale ad alto Z) «Hohlraum», passando attraverso due fori sulle basi del cilindro.
- Ciascuna interazione produce emissione di raggi X termici.
- I raggi X interagiscono con la capsula di combustibile, ablandolo, generando compressione e quindi innesco del combustibile.
- Distribuzione termica dei fotoni X, che riempiono la cavità agendo in modo omogeneo sul bersaglio
 - elevata simmetria di irraggiamento
 - grossa riduzione innesco instabilità idrodinamiche
 - ma bassa efficienza del processo completo

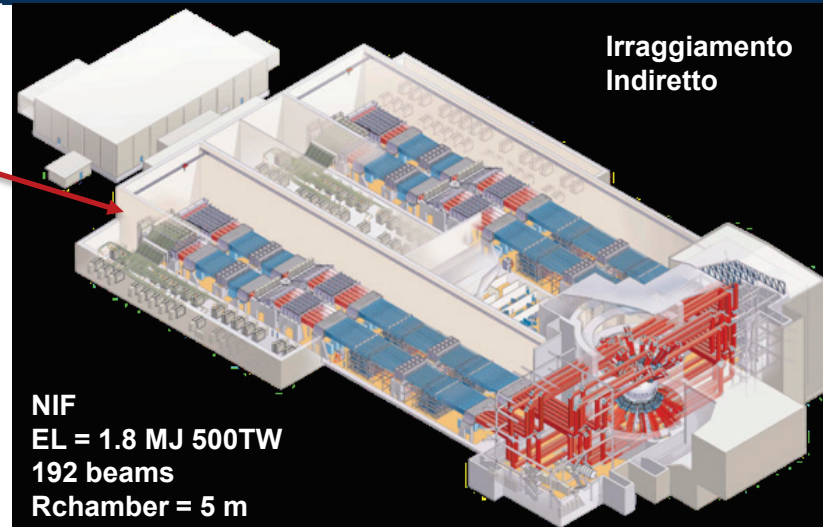
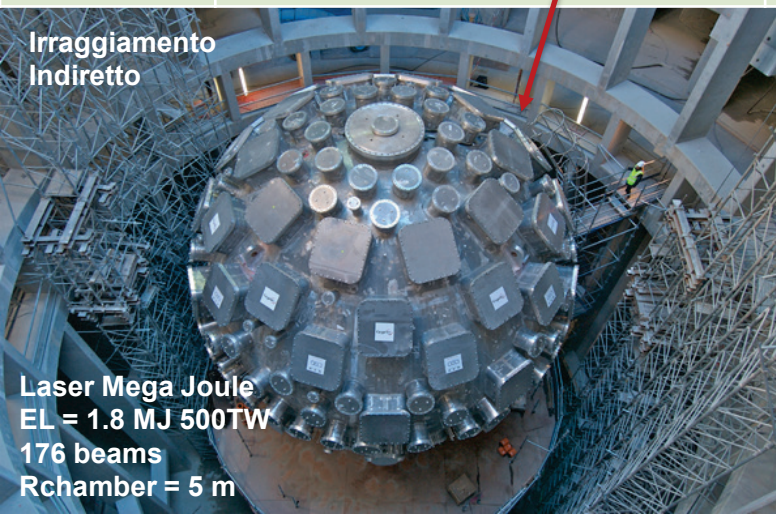


Grandi Impianti laser per Fusione Inerziale



List of Facilities

Nazione	Facility	Fasci
USA	National Ignition Facility (NIF)	192 – MJ facility
France	Laser Mega Joule (LMJ)	176 – MJ facility
Russia	UFL-2M	192 – MJ facility
China	Shengguang 3	48 fasci – 180 kJ



Typical laser

Active medium	Energy Max (J)	Power Max (W)	Pulse duration (ns)	λ (μm)	Intensity (W/cm^2)
Nd:Glass KrF, Iodine	2×10^6	5×10^8	0.005 - 60	0.25 - 1.3	$10^{14} - 10^{21}$

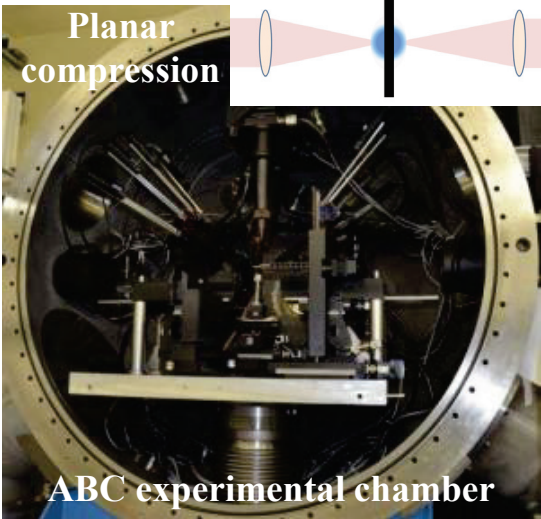
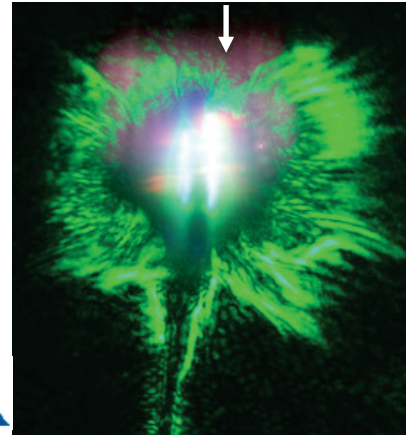
Laser ABC dell'ENEA



ABC: two-beam neodymium-phosphate glass laser

- Laser con la maggiore energia-per-impulso in Italia: 100 J x 2 fasci
- Neodimio vetro fosfato:
 - lunghezza d'onda 1054/527 nm
 - durata 3 ns
 - potenza 30 GW
 - Intensità $2 \times 10^{15} \text{ Wcm}^{-2}$
- Notevole numero di diagnostiche operative
- Regime classico intensità Fusione Inerziale
- Studi di fisica di base in compressione planare
- Plasmi e radiazioni generati mediante laser, anche per test su materiali di prima parete di Tokamak
- Radiazioni secondarie generate mediante laser per applicazioni fusionistiche

Time-resolved shadowgraphic image of laser-plasma by green light



Planar compression

ABC experimental chamber

Principali pro e contro dell'approccio inerziale

- Combustibile completamente esaurito ad ogni interazione. In vista di un reattore per energia elettrica, necessità di un processo intrinsecamente impulsato, a frequenze dell'Hertz: 0.1-10 Hz.
- Necessità di grandi quantità di target
 - da inserire con affidabilità in camera di interazione: caduta libera/vincolata/forzata
 - a basso prezzo: potenzialmente risolvibile con produzione di massa
- Necessità di laser di alta energia e ad alta frequenza di ripetizione
- Si eliminano le problematiche associate al confinamento del plasma, in quanto non coinvolge nessun tipo di reale confinamento, ma si affida completamente all'inerzia
 - prima parete della camera di interazione con constraint più rilassati
- Struttura del futuro reattore altamente modulare (laser, ...)

Stato attuale delle ricerche

- **NIF** Agosto 2021: Energia da fusione **1.3 MJ**; con energia laser necessaria 1.8 MJ! **Gain ~ 1**.

- Notevole parte del combustibile trasformato (3-4 μg DT)

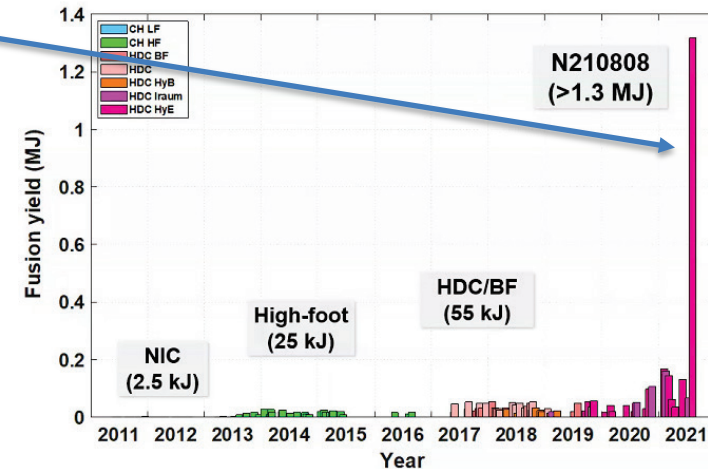
- Regime già confermato da ulteriori misure

- Per reattore serve almeno Gain 100, processo fortemente nonlineare, possibile grande incremento
 - Serve più energia laser: approccio indiretto inefficiente
 - Studi su approccio diretto avanzato:
 - Shock Ignition & Fast Ignition
 - Progetto EUROfusion Enabling Research IFE
 - Grossa partecipazione ENEA ed italiana

- Ricerche su laser ad alta ripetizione: 1-10 Hz. Prototipi 100 J già esistenti.
 - Moduli base per laser di alta energia a 1-10 Hz

- Grossa spinta in avanti negli investimenti USA pubblici e privati, triggerata dai risultati. In Europa proposta per il progetto «Hiper Plus» e interesse di aziende private

- Ricerca su impiego di combustibili alternativi a DT, quali $\text{H}+^{11}\text{B}$



II TOKAMAK

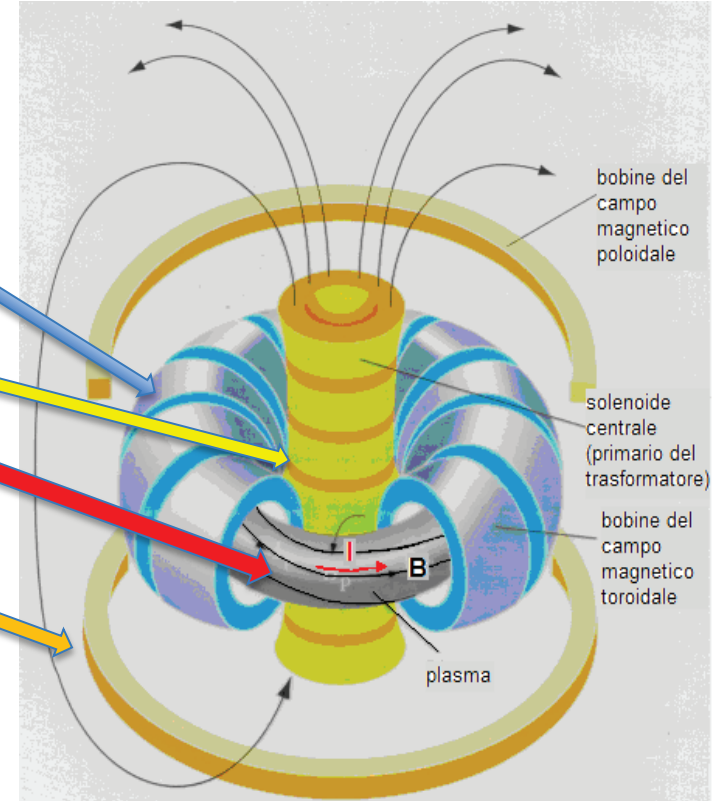
Il Tokamak (1953): una creatura Sovietica

Igor Yevgenyevich Tamm (1895-1971)

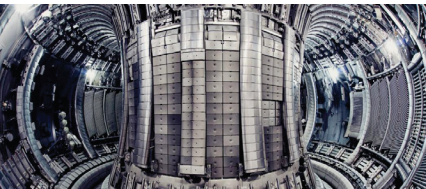
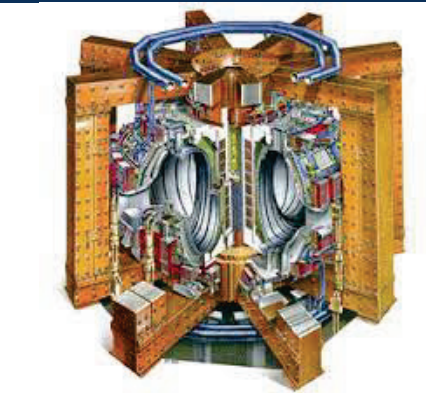
Dmitri Ivanovich Sakharov (1921-1989)

- La componente toroidale del campo magnetico è prodotta da bobine avvolte attorno all'anello di plasma.
- Il solenoide centrale induce una corrente che genera il plasma (*break-down*) e lo scalda.
- (riscaldamento ohmico, come l'Effetto Joule in una stufa elettrica! **potenza ohmica P_{OH}**).
- Altre bobine controllano la posizione del plasma.

$$\beta = \frac{\text{pressione del plasma}}{\text{pressione magnetica}} = \frac{p}{B^2/2\mu_0}$$



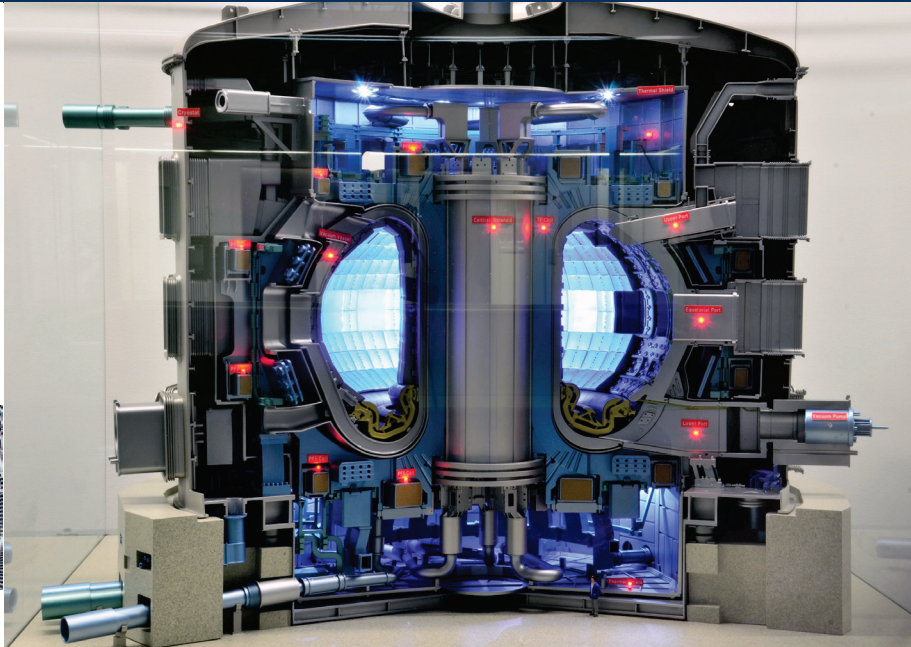
TOKAMAK Tradizionali: JET-ITER-DTT



JET

Culham, UK

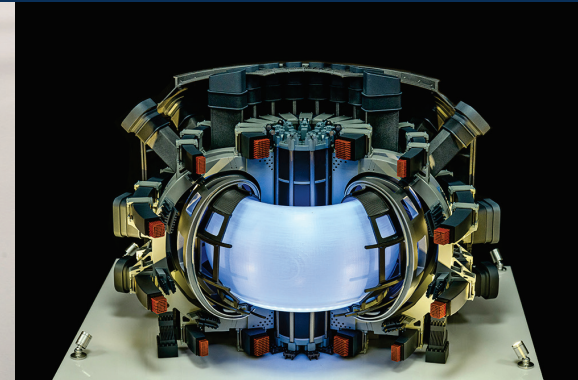
$R=3\text{ m}$ $a=1\text{ m}$
 $I_p=4\text{ MA}$ $B_T=3.5\text{ T}$
 $Q_{D-T}=P_{\text{fus}}/P_{\text{in}}=0.2$



ITER

Cadarache, Francia (in costruzione)

$R=6\text{ m}$ $a=2\text{ m}$
 $I_p=15\text{ MA}$ $B_T=5.3\text{ T}$
 $Q_{D-T}=P_{\text{fus}}/P_{\text{in}}=10$



DTT

Frascati, Italia (in costruzione)

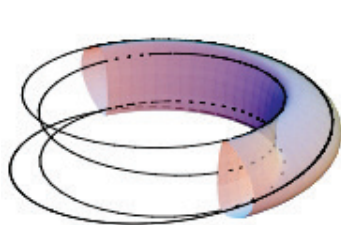
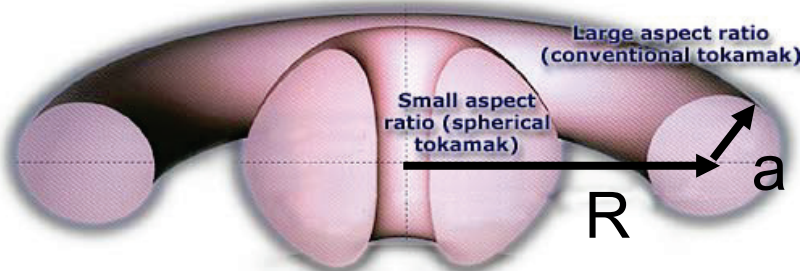
$R=2.11\text{ m}$ $a=0.64\text{ m}$
 $I_p=5.5\text{ MA}$ $B_T=6\text{ T}$

Operazioni in Deuterio

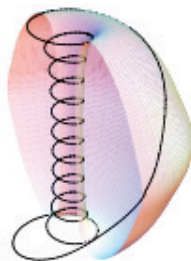
Studio del divertore
per reattore dimostrativo
DEMO

TOKAMAK tradizionali e sferici

Tokamak Sferici a Culham e Princeton

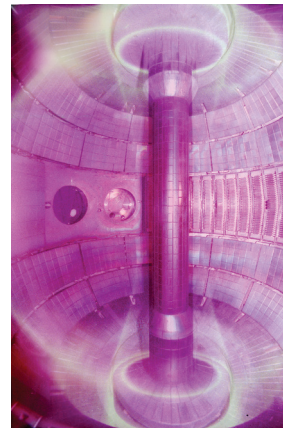


Tokamak
Convenzionale



Tokamak
Sferico

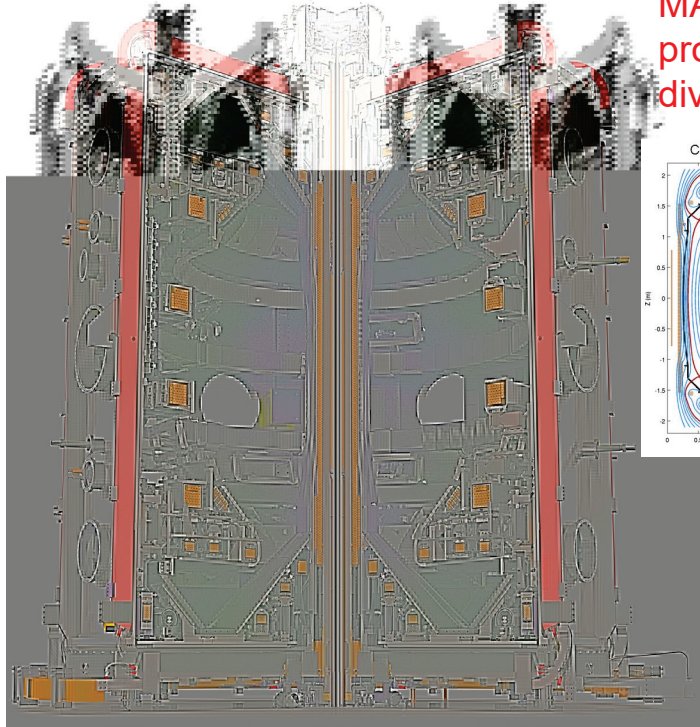
Le proprietà favorevoli dei tokamak sferici sono dovute alle linee di forza del campo magnetico che sono concentrate nella zona di miglior confinamento.



Questa proprietà ha permesso al primo tokamak sferico (START di Culham) di raggiungere un rapporto tra pressione di plasma e pressione magnetica (β) del 40% rispetto al 12% raggiunto sui tokamak convenzionali.

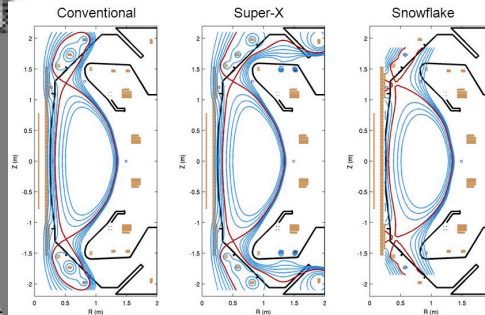
Alla fine degli '90 due tori sferici di maggiori dimensioni erano *MAST a Culham e NSTX a Princeton.*

TOKAMAK Sferici: MAST Upgrade – NSTX Upgrade



MAST Upgrade

MAST-U è una macchina progettata per lo studio dei divertori.

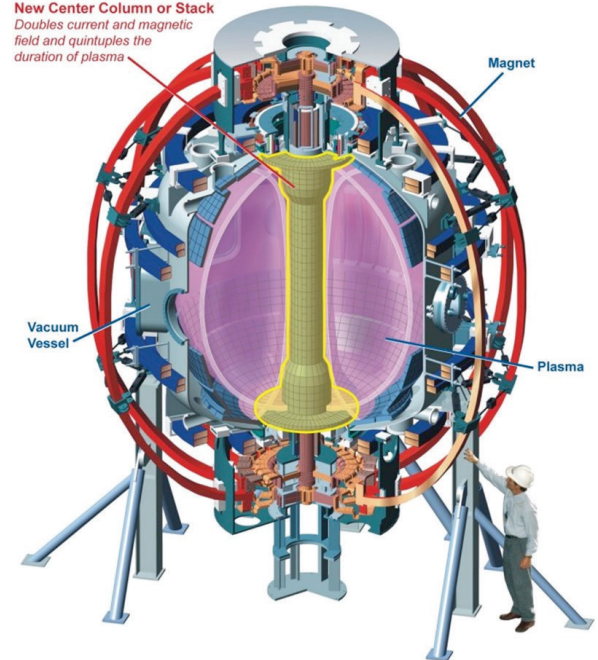


NSTX-U è progettato per massimizzare il beta ed ottenere un plasma completamente non-induttivo.

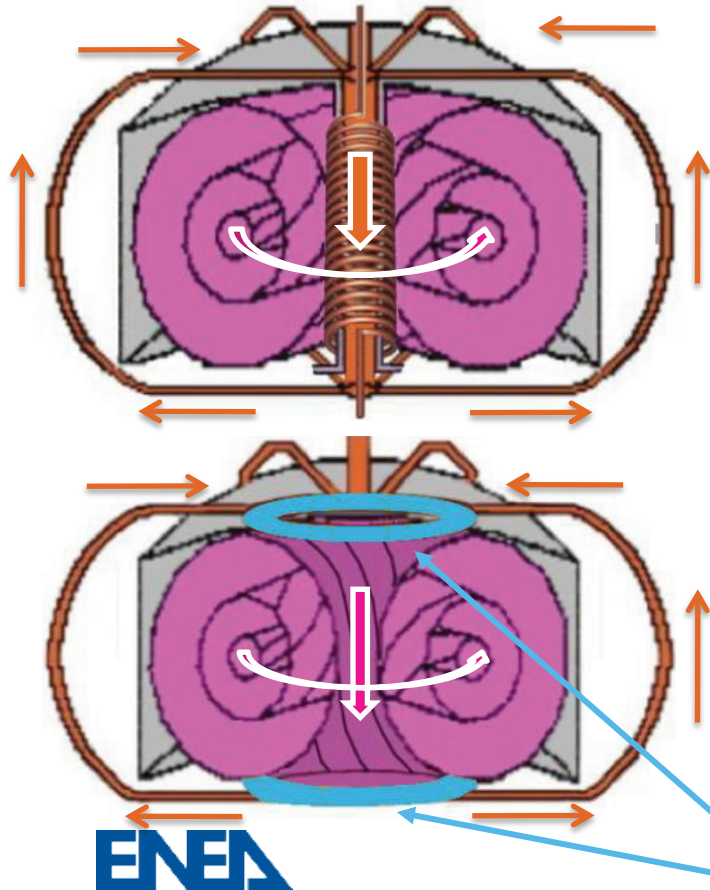
NSTX Upgrade

National Spherical Torus Experiment - Upgrade (NSTX-U)

New Center Column or Stack
Doubles current and magnetic field and quintuples the duration of plasma



PROTO-SPHERA e il TOKAMAK



Tokamak convenzionale :

Le superfici magnetiche del plasma toroidale circondano un **palo centrale metallico che contiene il magnete toroidale.**
La camera da vuoto ha una geometria toroidale.

PROTO-SPHERA :

Le superfici magnetiche del plasma toroidale circondano un **“palo centrale di plasma”.** **La corrente elettrica si richiude attraverso conduttori esterni.** *La camera da vuoto ha una simmetria cilindrica che semplifica ogni aspetto costruttivo, di manutenzione e di messa a punto durante l'attività sperimentale.*

La configurazione di PROTO-SPHERA consente l'autosostentamento indefinito della configurazione con corrente toroidale introdotta dai bursts di riconnessione magnetica che contribuiscono anche al riscaldamento del plasma nel toro.

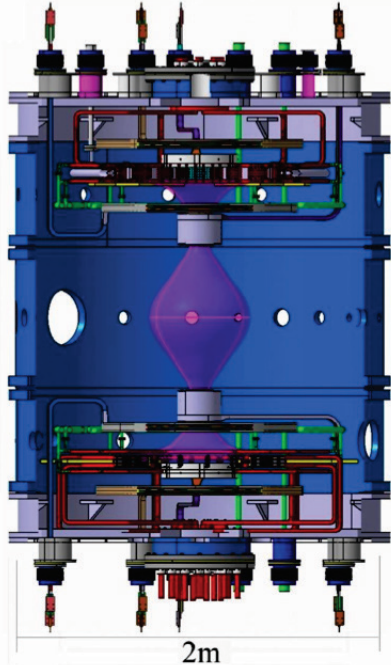
Elettrodi entro la camera da vuoto

PROTO-SPHERA: la macchina

Fase-1:

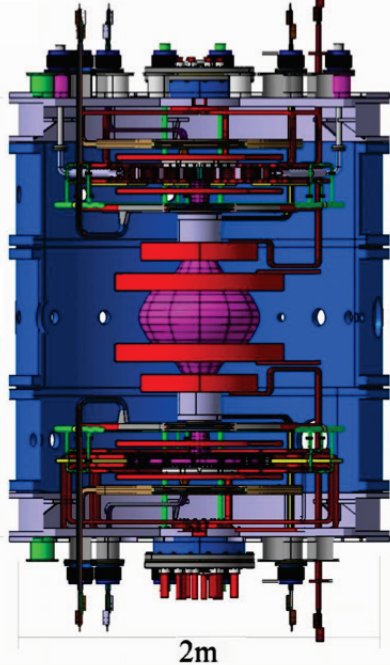
8 PF coils Gruppo-B (shaping)

Fase-2: 8 PF coils + 6 PF Gruppo-A (compressione)



Pinch $I_e = 10$ kA

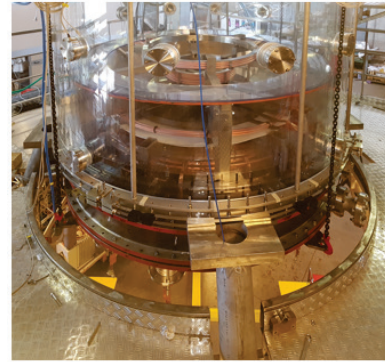
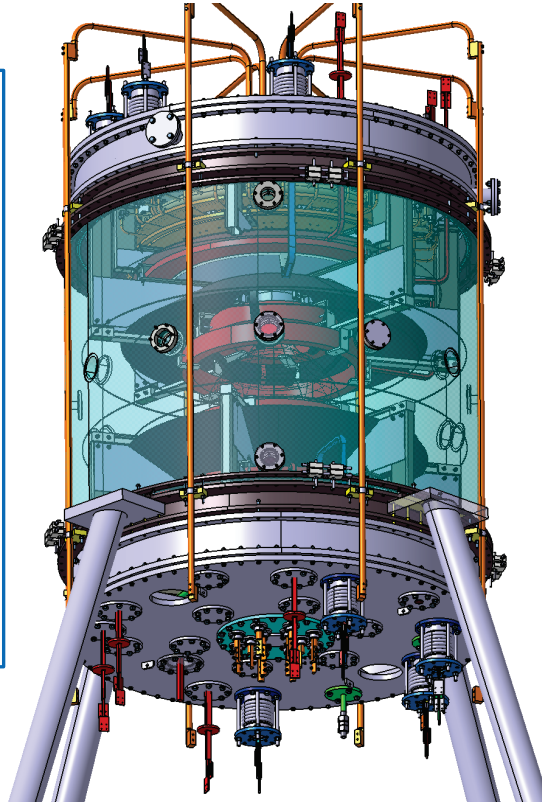
Spherical Torus $I_{ST} = 7$ kA...!



Pinch $I_e = 70$ kA

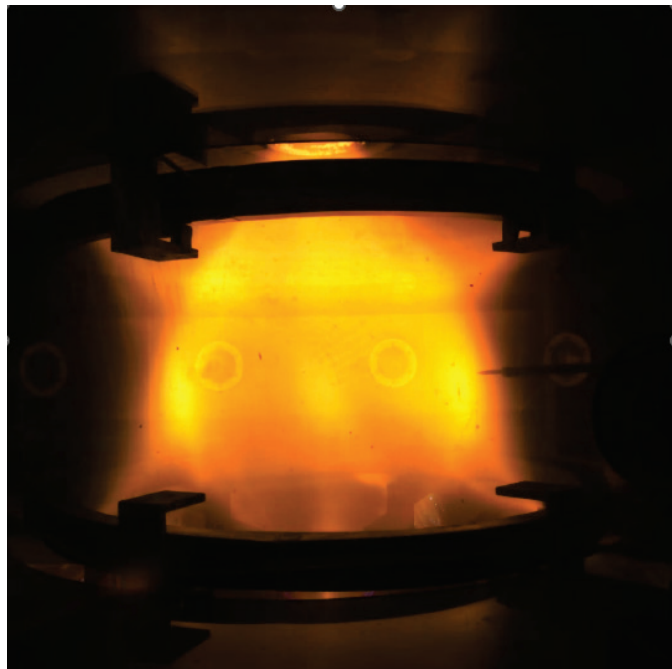
Spherical Torus $I_{ST} = 280$ kA

Camera da vuoto di START (Culham)

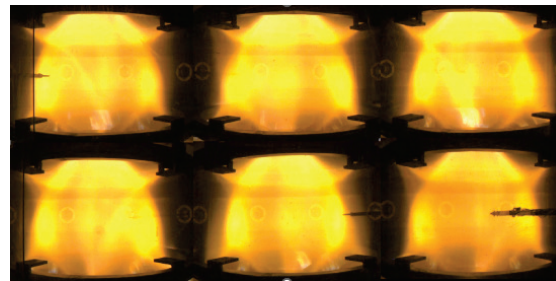


Camera da vuoto isolante in PMMA (Acrilico) 18

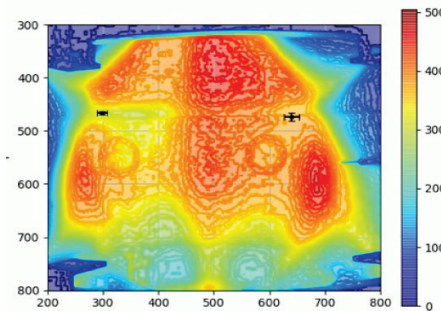
PROTO-SPHERA: risultati sperimentali campagna 2020



#2141 **Elio**: t.v. (3600 fps)



#2141 **Elio**: 6 t.v. (600 fps)
rotazione toroidale & riconessioni 3D



Curve di brillantezza chiuse e annidate l'una dentro l'altra in prossimità del toroide.
Oscillazione della posizione dei punti a X

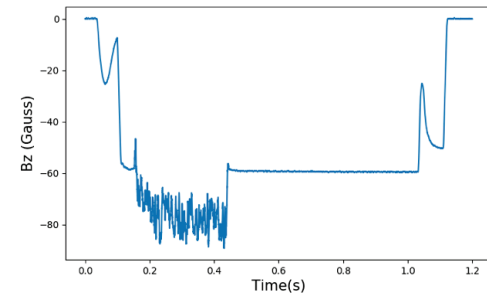
Dimensioni: H=2.5 m, D=2 m
Durata dell'impulso: 1 secondo

Fase 1-1.5:

$I_e = 10$ kA, $I_{ST} \approx 5$ kA
 $T_e \approx 20$ eV, $n_e \approx 5 \cdot 10^{19}$ m⁻³

Fase 2:

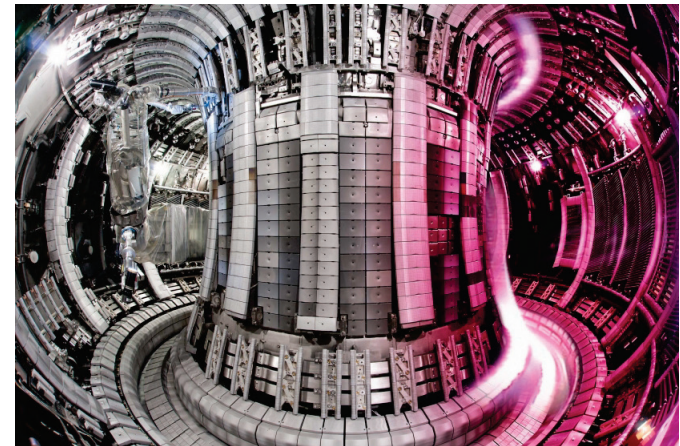
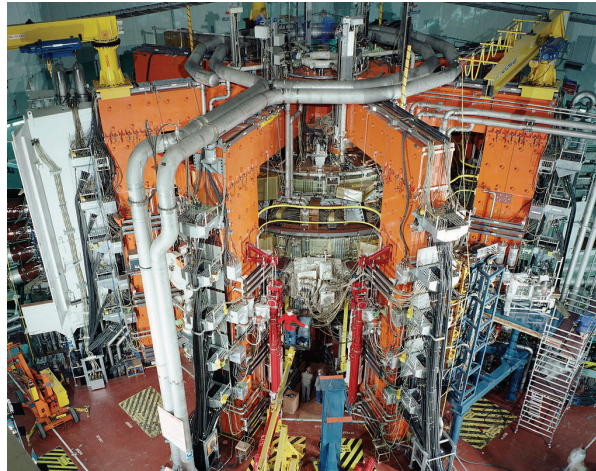
$I_e = 70$ kA, $I_{ST} \approx 300$ kA
 $T_e \approx 200$ eV, $n_e \approx 1 \cdot 10^{20}$ m⁻³



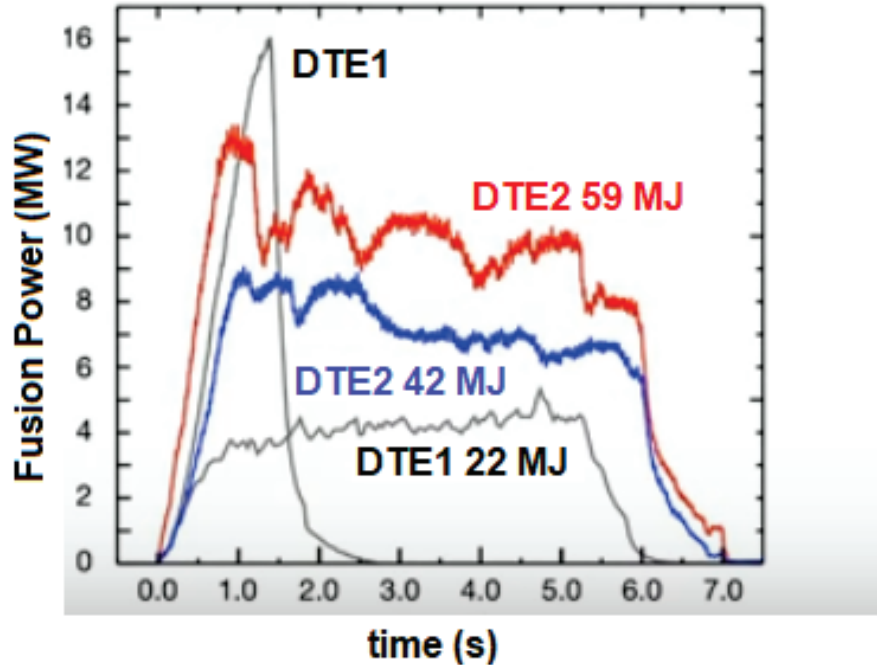
Sonde Hall (Bv) il valore del campo magnetico nel toroide durante la scarica di un 0.3 sec.

Dove siamo?

- Negli esperimenti attuali sono già raggiunti valori di densità e temperatura del plasma richiesti in un reattore a fusione.
- **Si è vicini al pareggio (break-even) tra potenza iniettata nella camera di reazione e quella prodotta dalle reazioni di fusione.**
- Il record di **16MW** di potenza di fusione è stato ottenuto sulla **facility europea JET** a fronte di **25MW** di potenza iniettata
 $P_{\text{fus}}/P_{\text{in}} = 0.65.$



Il nuovo record del JET (Dic. 2021)



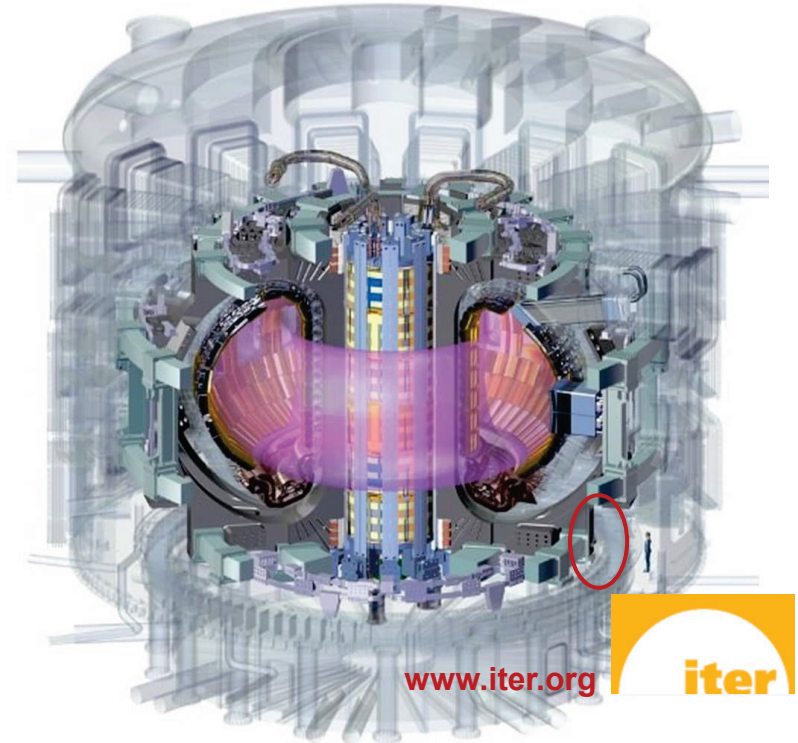
- Si sono ottenute le condizioni di fusione e si è riusciti a sostenerle per tempi lunghi rispetto ai tempi caratteristici di raffreddamento del plasma
- **Record di energia prodotta (59 MJ)**
- $P_{\text{fus}}/P_{\text{in}} = 11 \text{ MW} / 33 \text{ MW} = 0.3$.
- **Validazione delle previsioni delle performance attese in ITER**

Il prossimo passo: il reattore ITER

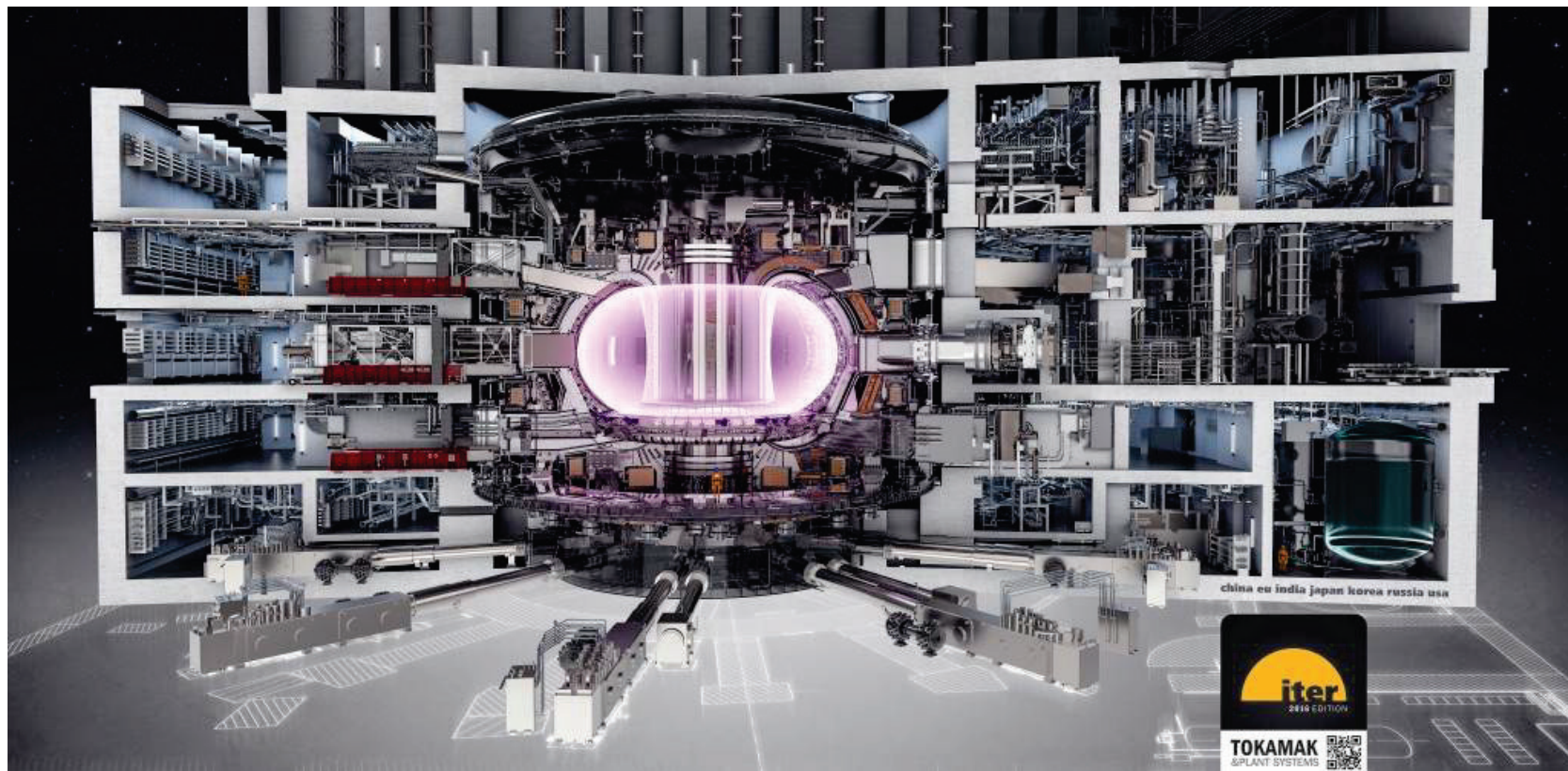
In costruzione a Cadarache (Francia) nell'ambito di una collaborazione tra
Europa, Giappone, Russia, Stati Uniti, Cina, Corea del Sud, India

Obiettivi:

- **dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione**
- **500MW** di potenza di fusione a fronte di **50MW** di potenza iniettata nella camera di reazione per impulsi della durata di alcune centinaia di secondi fino a circa un'ora
- $Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{in}} = 10$



ITER: l'edificio Tokamak



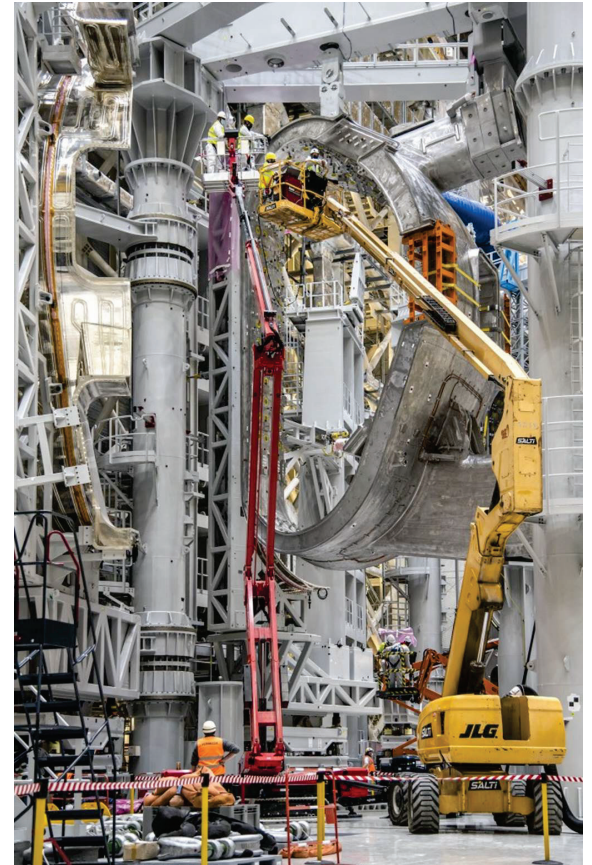
ITER: il sito (Cadarache, Francia)



ITER: l'assemblaggio del reattore



L'interno del criostato in cui viene assemblato il reattore



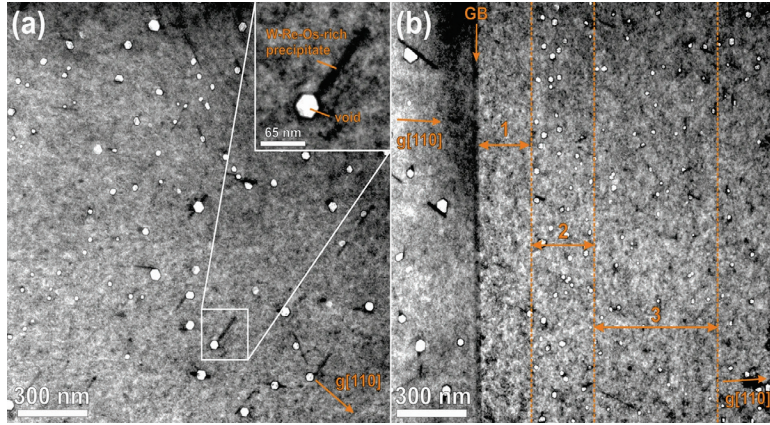
Le sfide scientifiche e tecnologiche

Dimostrazione dell'energia da fusione: operazioni con «burning plasma» ad alto Q in ITER

- Buon confinamento dell'energia
- Buon confinamento delle particelle di plasma
- Controllo delle impurità
- Controllo della stabilità del plasma
- Controllo dello smaltimento della potenza
- Protezione delle pareti interne attivamente raffreddate

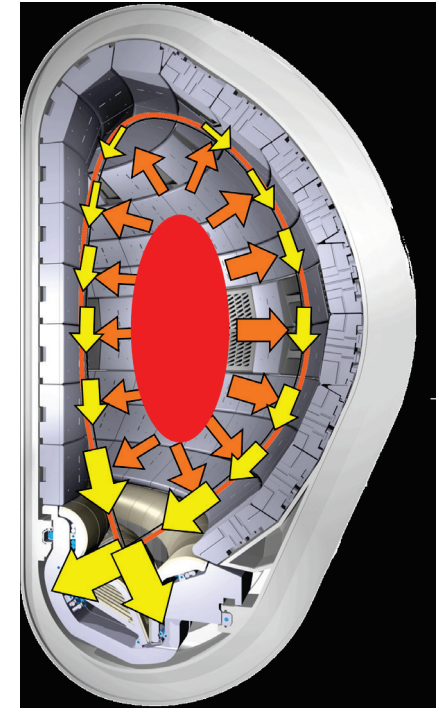


Le sfide sui materiali



- Lo sviluppo e la qualificazione di materiali strutturali e funzionali ad attivazione ridotta e che mantengano le proprietà fisiche e termomeccaniche sotto irraggiamento neutronico

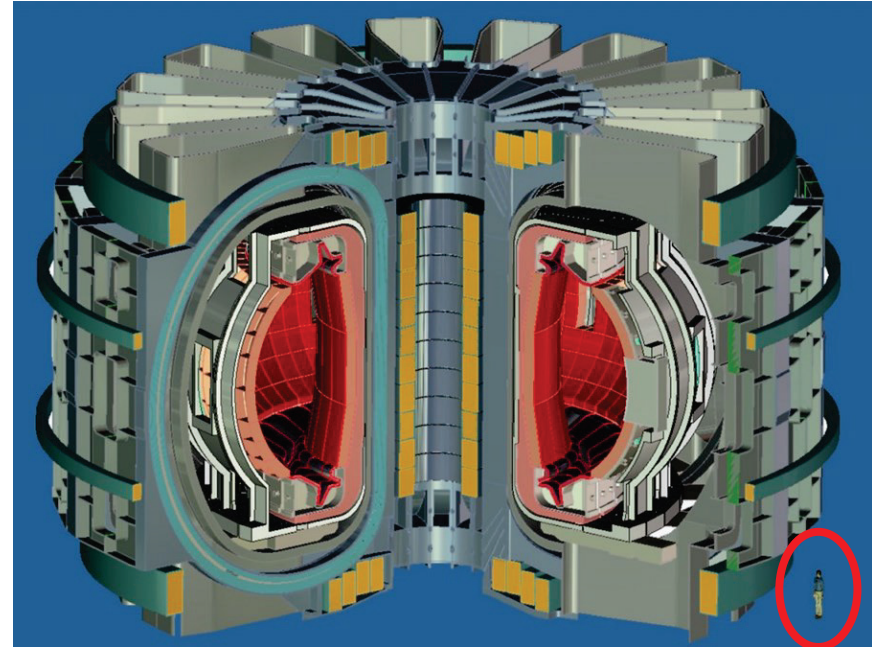
- Lo sviluppo e la dimostrazione di tecnologie che garantiscano l'autosufficienza nella produzione di trizio
- Lo sviluppo e la dimostrazione di soluzioni per lo smaltimento di parte della potenza all'interno del reattore



Il reattore dimostrativo DEMO

Il reattore dimostrativo DEMO, il passo successivo a ITER, oltre a produrre una potenza in quantità molto superiore a quella di ITER (dell'ordine di 2 GW), dovrà dimostrare:

- la generazione netta di energia elettrica (alcune centinaia di MW)
- l'autosufficienza nella produzione di trizio a partire dal litio in un ciclo chiuso all'interno del reattore stesso.
- che è possibile costruire un reattore a fusione con costi economicamente sostenibili
- e di operarlo in sicurezza.



La roadmap europea

Obiettivi: completare in tempo utile tutti gli sviluppi che consentano l'inizio della costruzione di DEMO nel momento in cui ITER consegua $P_{\text{fus}}/P_{\text{in}} = 10$ (2035).

Iniziare le operazioni di DEMO intorno alla metà del secolo.

La Roadmap prevede di procedere prioritariamente a:

- Contribuire al raggiungimento degli obiettivi di ITER
- Consolidare il quadro di conoscenze dei meccanismi di base della fisica del plasma in condizioni reattoristiche.
- Affrontare e risolvere le sfide tecnologiche
- Finalizzare il progetto di DEMO

La Roadmap europea è attuata dal Consorzio Eurofusion

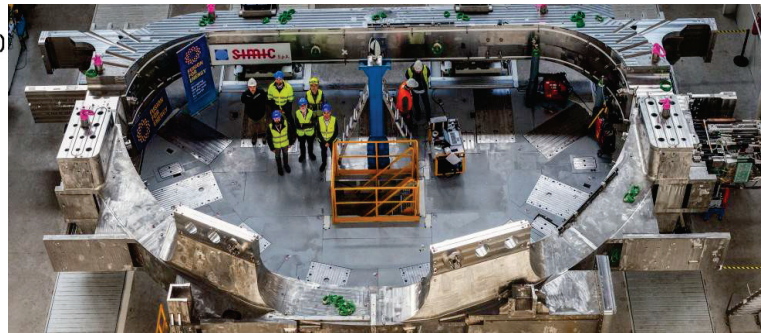
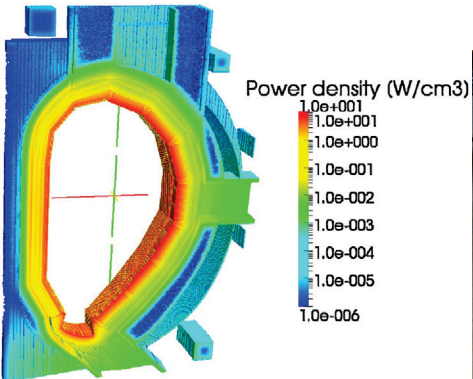
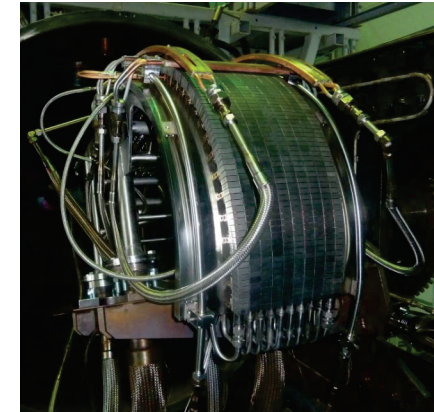
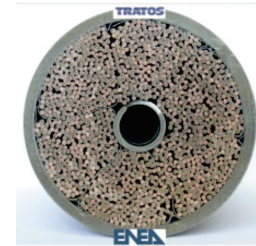
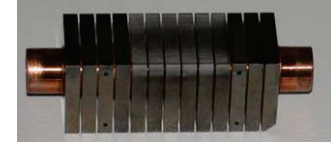
ENEA svolge il ruolo di Program Manager nazionale coordinando le attività degli oltre 20 partners nazionali



Il ruolo dell'Italia nel panorama fusionistico

Nell'ambito dello sforzo europeo, l'Italia ha dato contributi determinanti alla fisica e tecnologia della fusione, e alla realizzazione di ITER

Grazie anche alla lunga tradizione di stretta collaborazione tra i laboratori e l'industria, **le industrie italiane si sono aggiudicate commesse industriali per un valore totale di oltre 1,8 miliardi di €.**

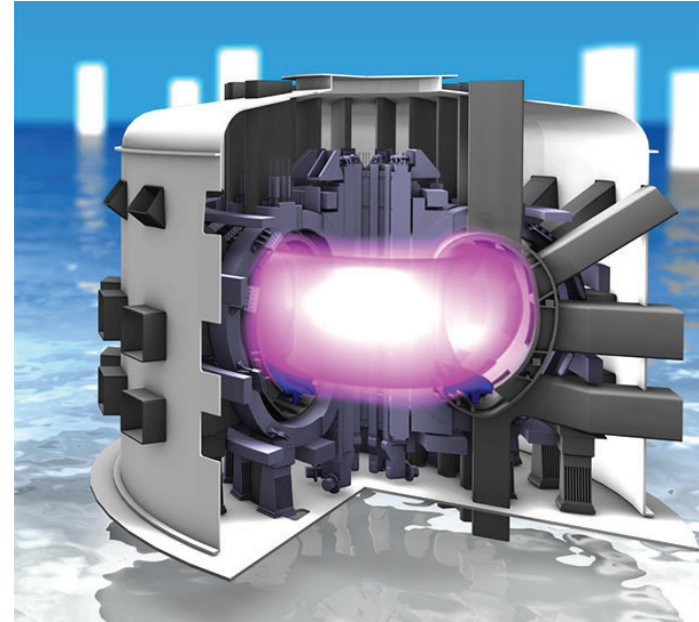


L'esperimento DTT

La macchina **DTT** è in via di costruzione presso il Centro ENEA di Frascati nell'ambito di un consorzio tra ENEA, ENI e vari istituti e università italiani, con un investimento complessivo di circa 600 M€, con il contributo europeo.

DTT studierà soluzioni alternative per lo smaltimento del calore di fusione, poiché la tecnologia adottata in ITER potrebbe non essere adeguata per DEMO dove si prevedono carichi termici di alcune decine di MW/m².

DTT rappresenta una grossa opportunità di crescita per il sistema ricerca italiano e sfrutterà al meglio le competenze conseguite dall'industria e dai laboratori di ricerca italiani.



Grazie per l'attenzione

Domande?