



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie,
l'energia e lo sviluppo economico sostenibile

La fusione nucleare

Paola Batistoni

**Responsabile Divisione Sviluppo Energia da Fusione
ENEA**

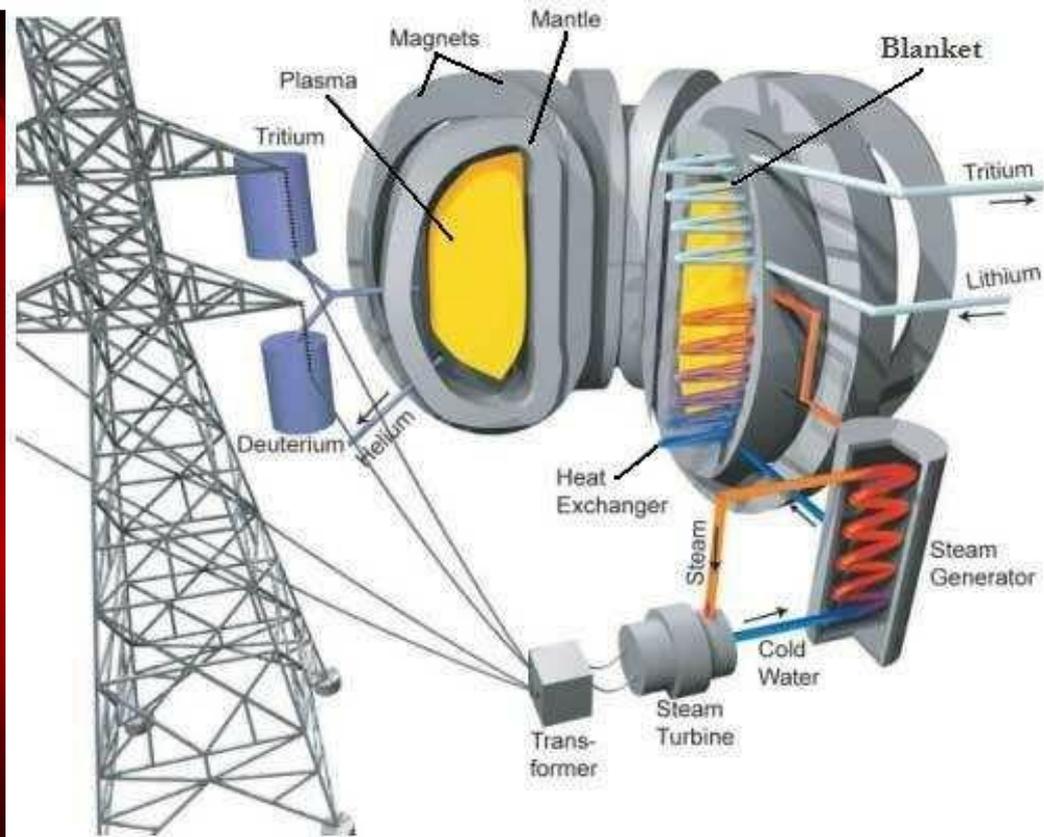
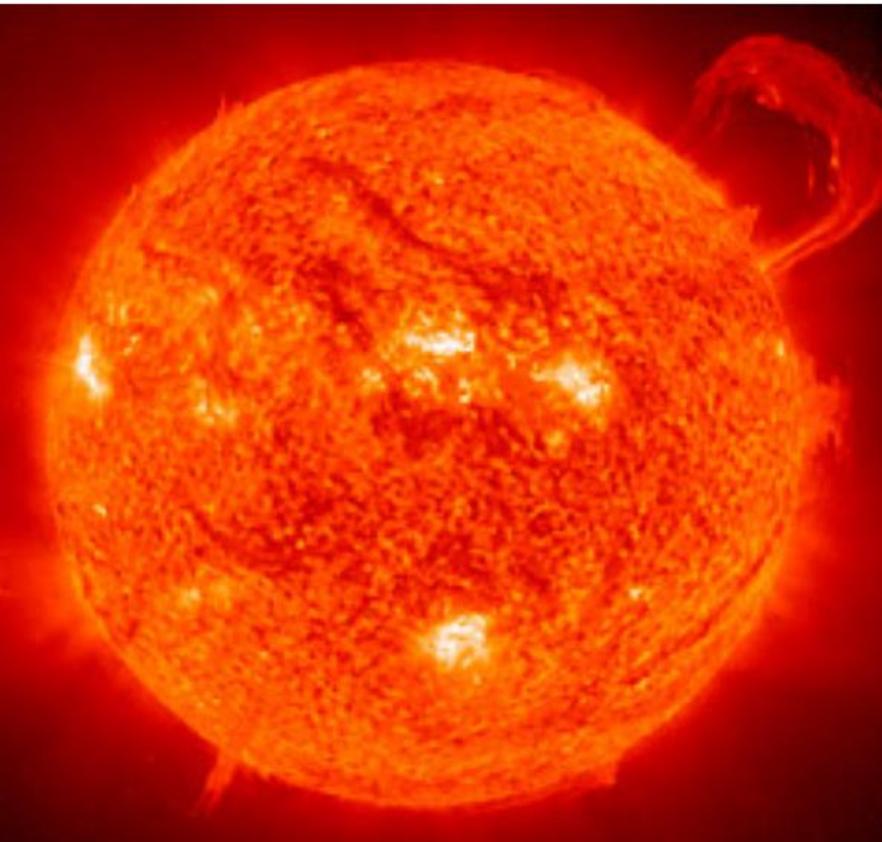
Nucleare Sostenibile, Sede ENEA, 28.2024



1101 0110 1100
0101 0010 1101
0001 0110 1110
1101 0010 1101
1111 1010 0000



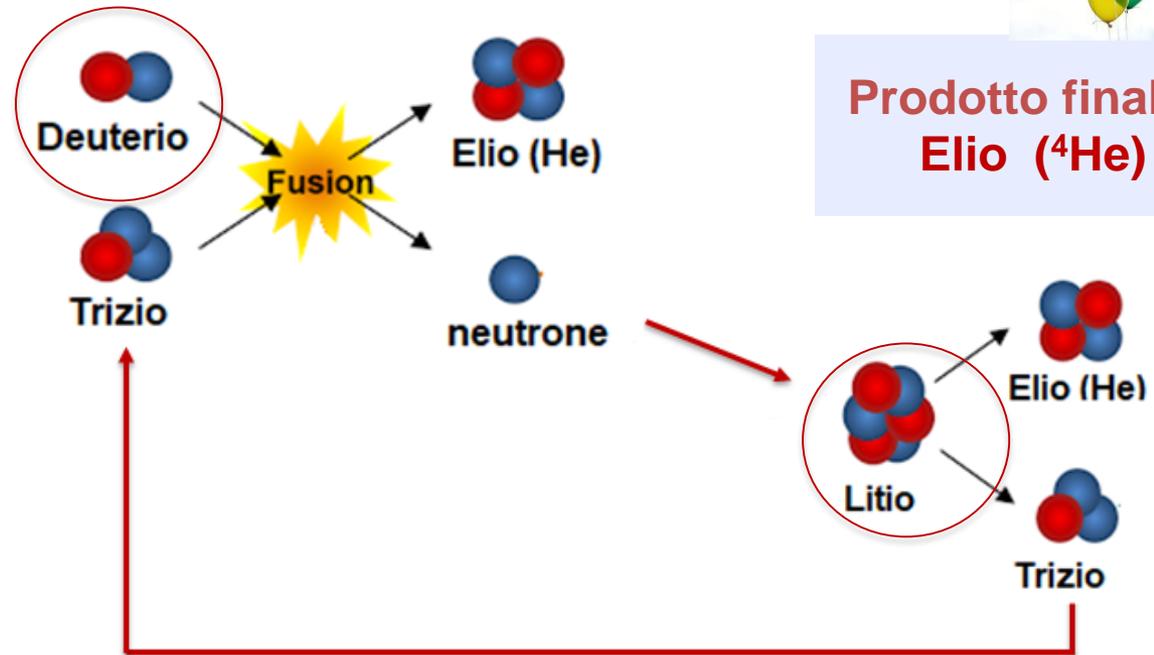
L'energia delle stelle ... e molto di più



Quali combustibili usa?

Deuterio: 1 g in
33 litri di acqua

Litio: 1 g in 5 m³
di acqua di mare

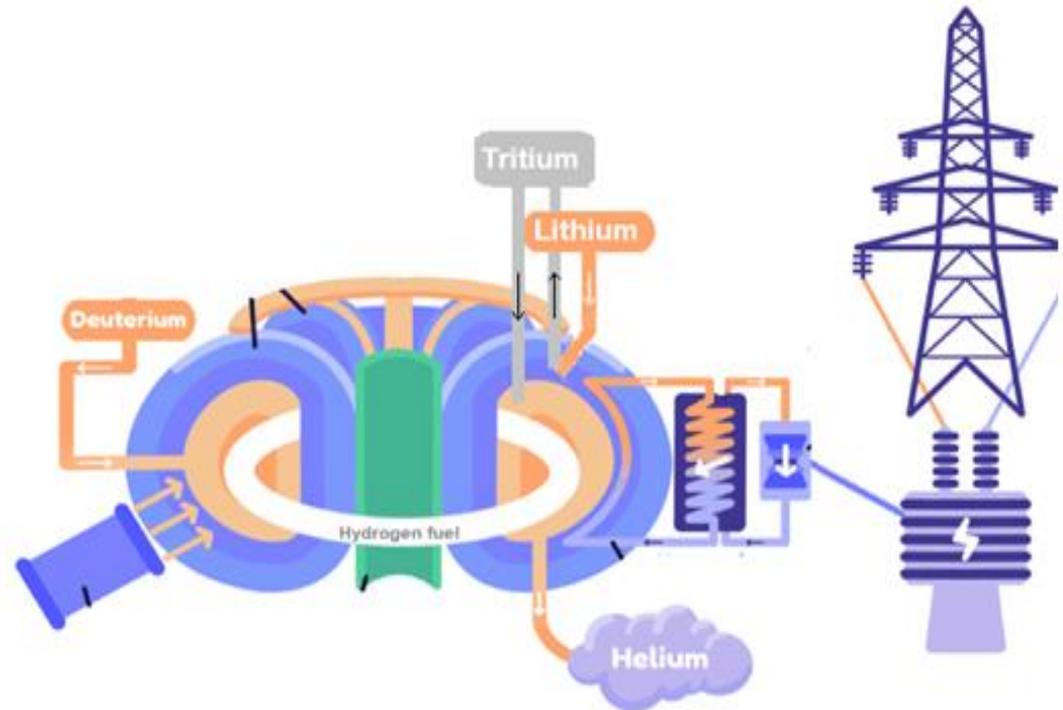


Prodotto finale:
Elio (⁴He)

- Il trizio viene prodotto e consumato in ciclo chiuso
- L'intero ciclo non produce CO₂

Quali vantaggi?

- No emissioni di gas serra
- Combustibile (D, Li) praticamente illimitato
- Nessuna produzione di scorie radioattive nel processo di fusione - attivazione dei materiali strutturali per ~100-200 anni
- Sicurezza intrinseca
- Nessun rischio di proliferazione nucleare non usa uranio né plutonio.
- Produzione programmabile

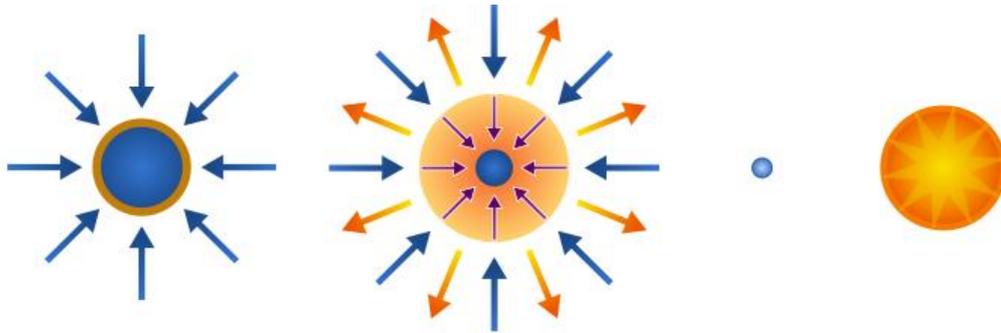


~ (100kg D + 300kg ⁶Li) /1GW_e/anno



~ 10 kg Litio in una tipica batteria per EV

Come si ottiene?

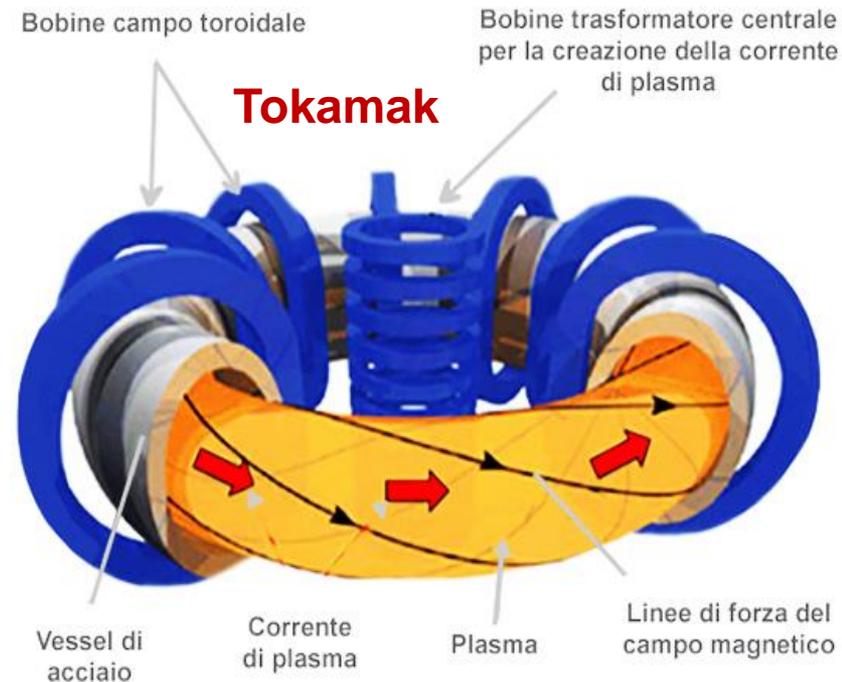


Fusione magnetica

Gas DT rarefatto (10^{14} cm^{-3}), riscaldato a ~ 150 milioni di $^{\circ}\text{C}$ e confinato in una camera a vuoto da una opportuna configurazione di campi magnetici, prodotti da magneti esterni e da correnti circolanti nel gas stesso.

Fusione inerziale

Microsfere di alcuni mg di DT compresse fino a densità di $\sim 1000 \text{ g/cm}^3$ e a temperature di ~ 100 milioni di $^{\circ}\text{C}$.

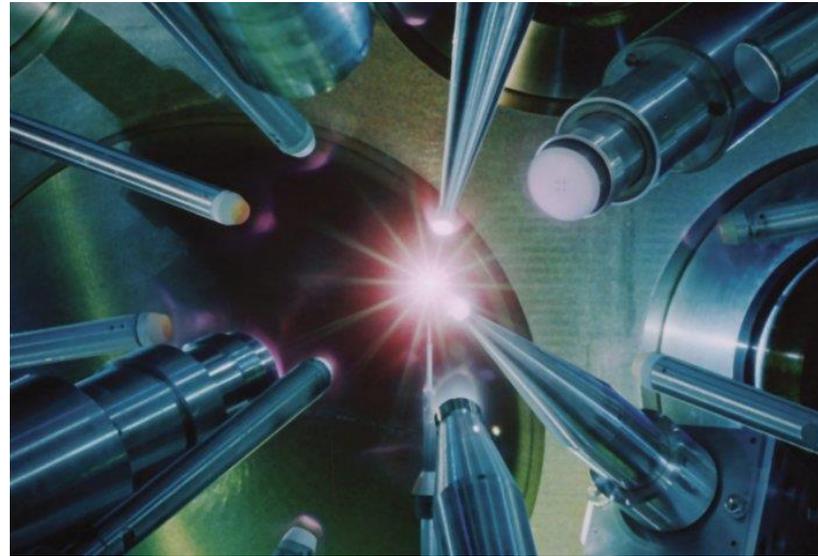


Dove siamo? Record NIF (2022)

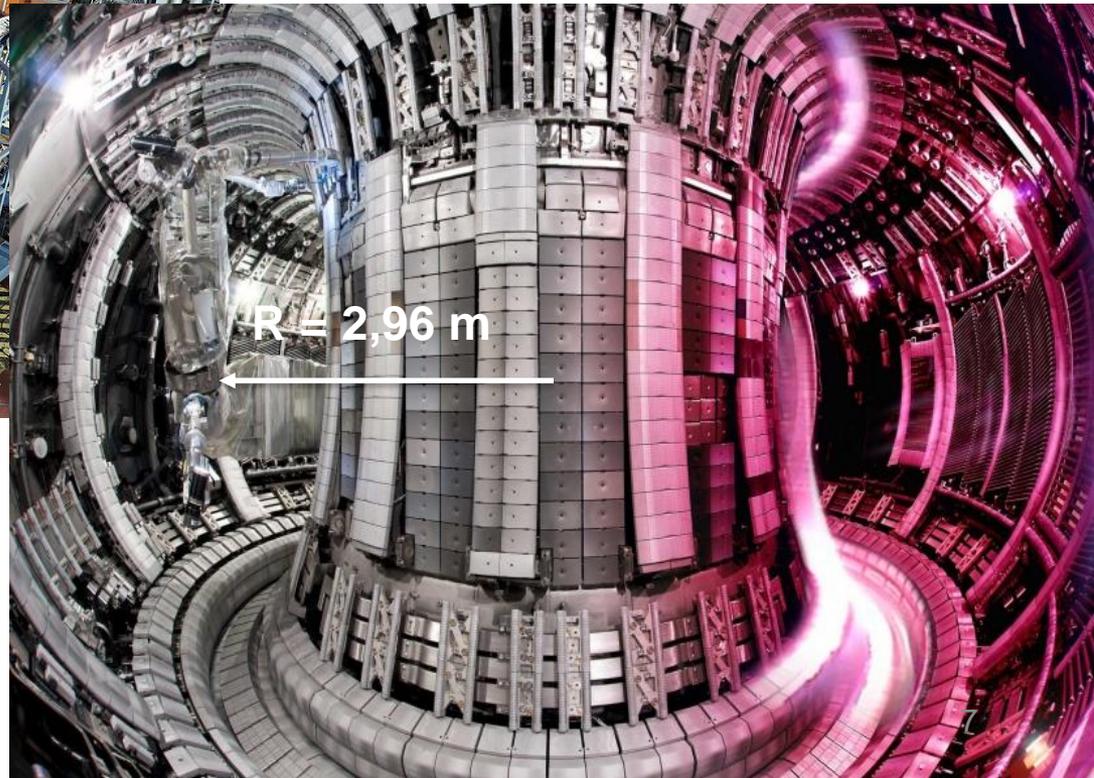
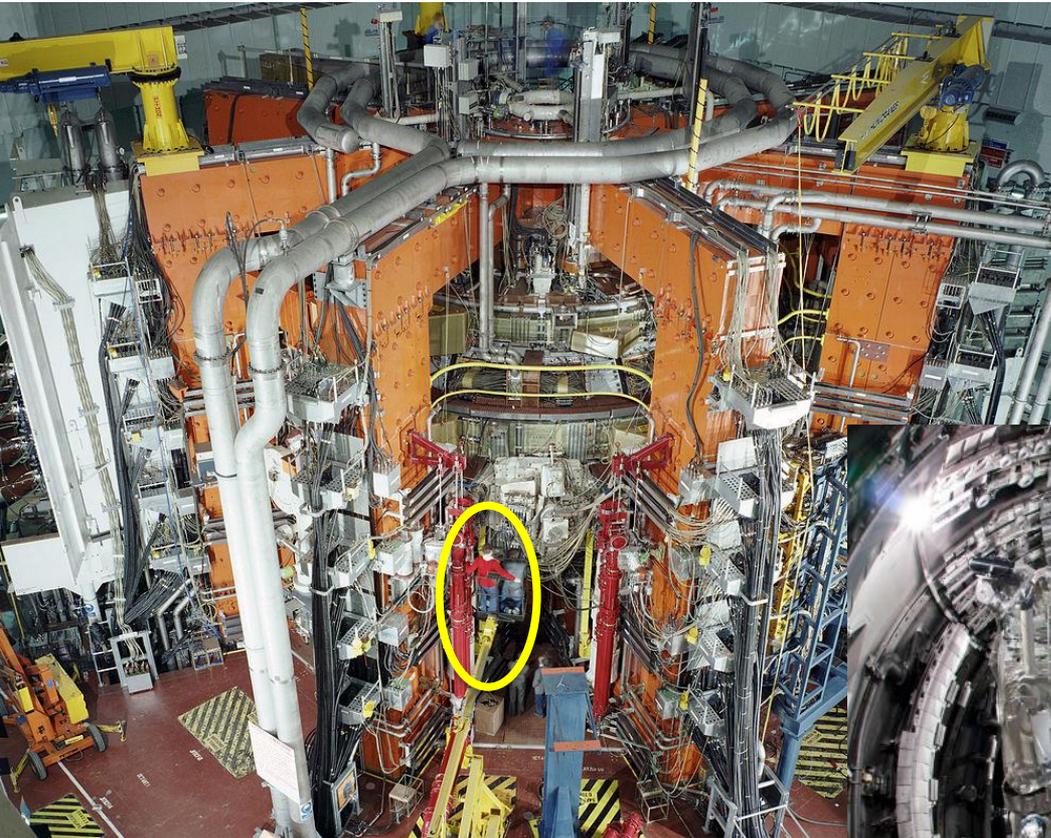
La **National Ignition Facility (NIF)**, Lawrence Livermore National Laboratory, CA, US) ha ottenuto per la prima volta un guadagno di energia

- energia ceduta al bersaglio DT dai laser 2.05 MJ
- energia di fusione prodotta 3.15 MJ

Guadagno = 150%



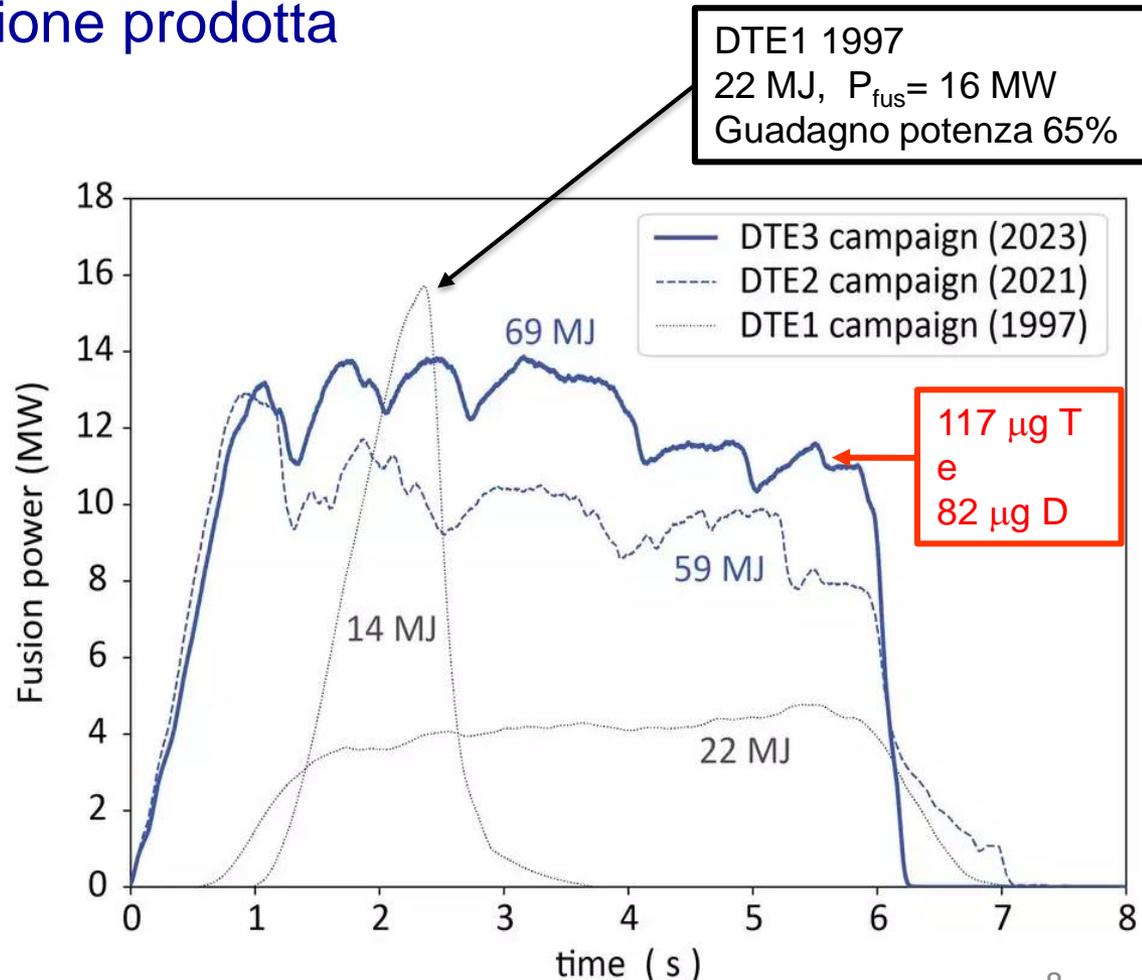
Dove siamo? Record di JET (2022,2033)



Dove siamo? Record di JET (2022,2023)

- Sostentamento della fusione a 11 MW
- Record di energia da fusione prodotta
- Guadagno potenza 30%

Per generare la stessa quantità di energia fossili servono 1.24 kg di gas naturale

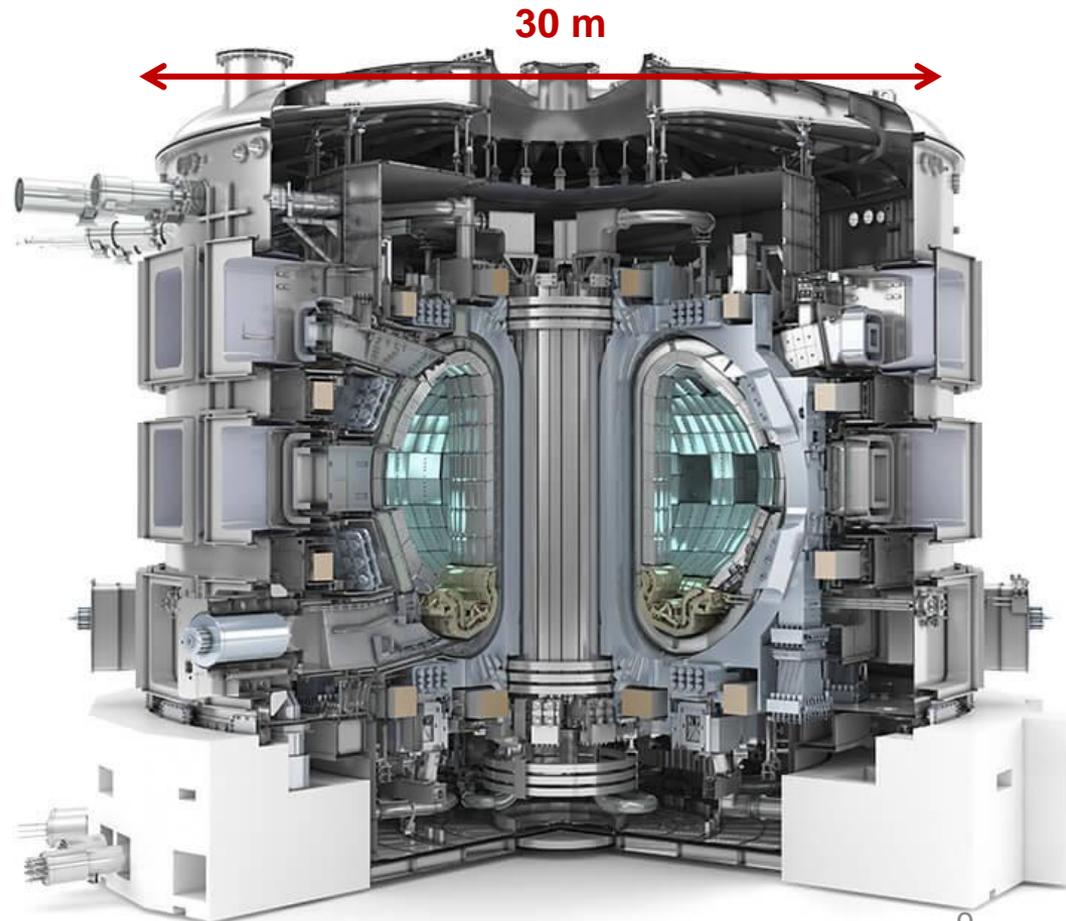


Il prossimo passo: ITER



Partner: Cina, Corea, Giappone, India, Russia, Stati Uniti, Unione Europea

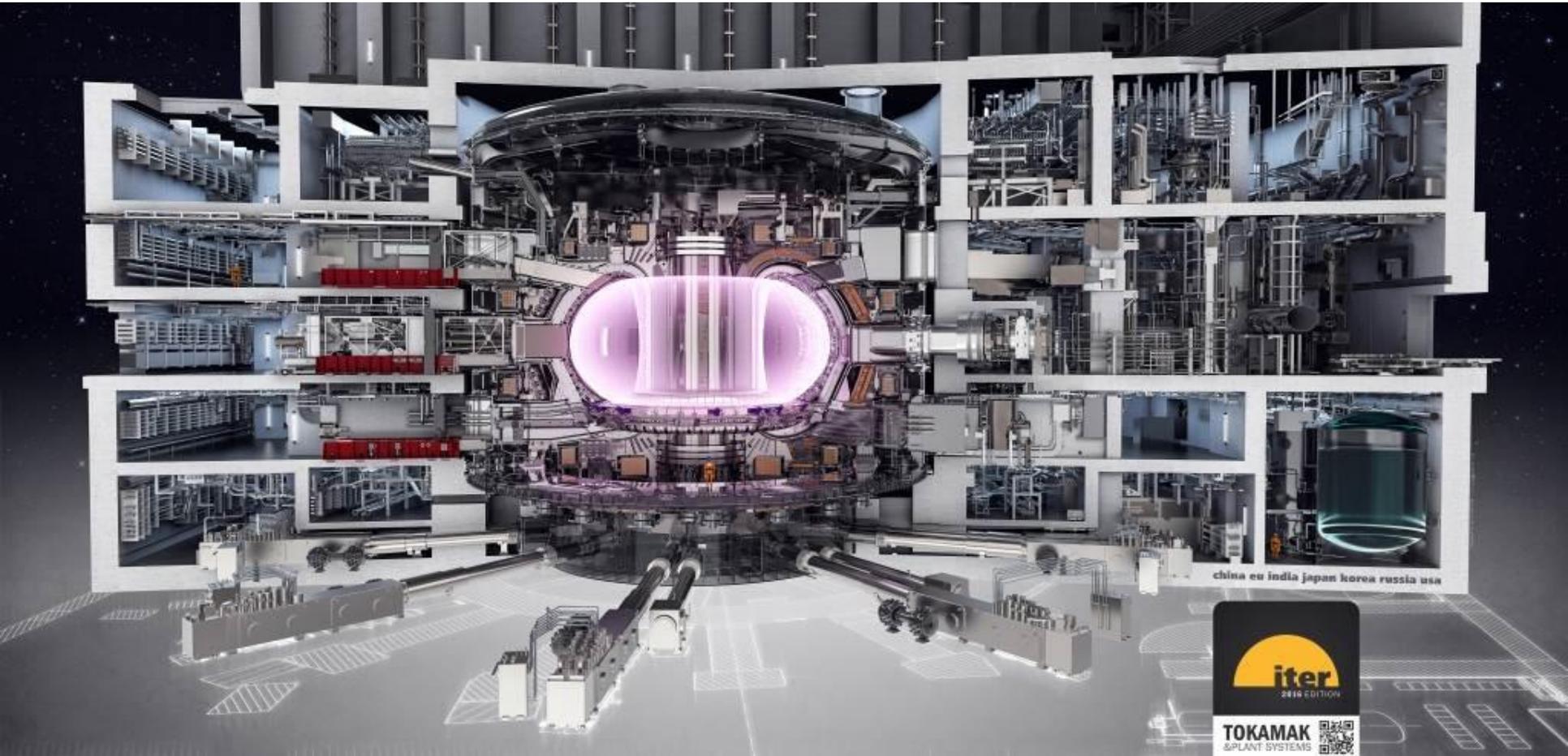
- **Guadagno di potenza=10**
500 MW di potenza di fusione
- Mantenimento della fusione per tempi lunghi
- Test delle tecnologie necessarie per operare una centrale elettrica a fusione



ITER: il sito (Cadarache, Francia)



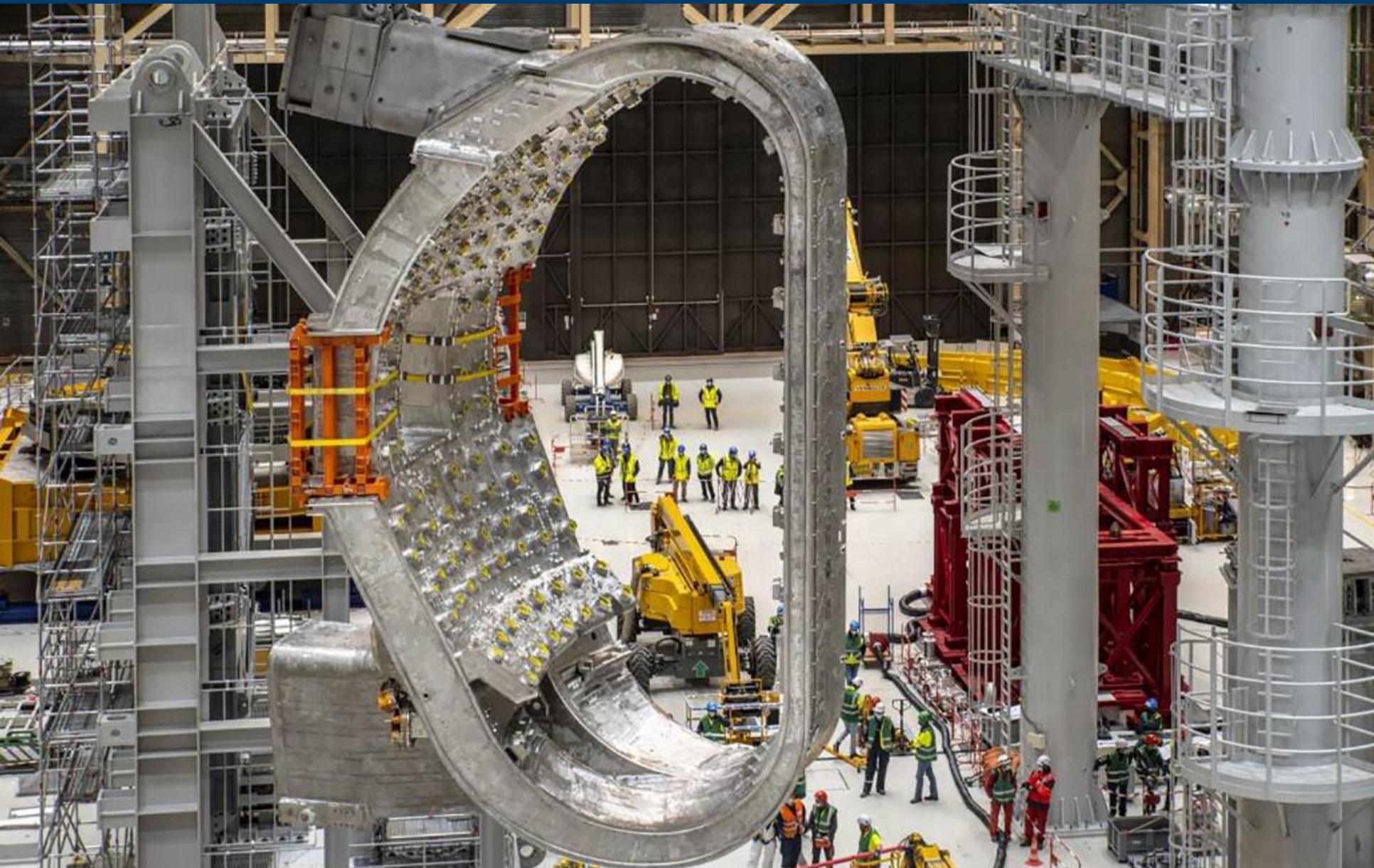
ITER: l'Edificio Tokamak



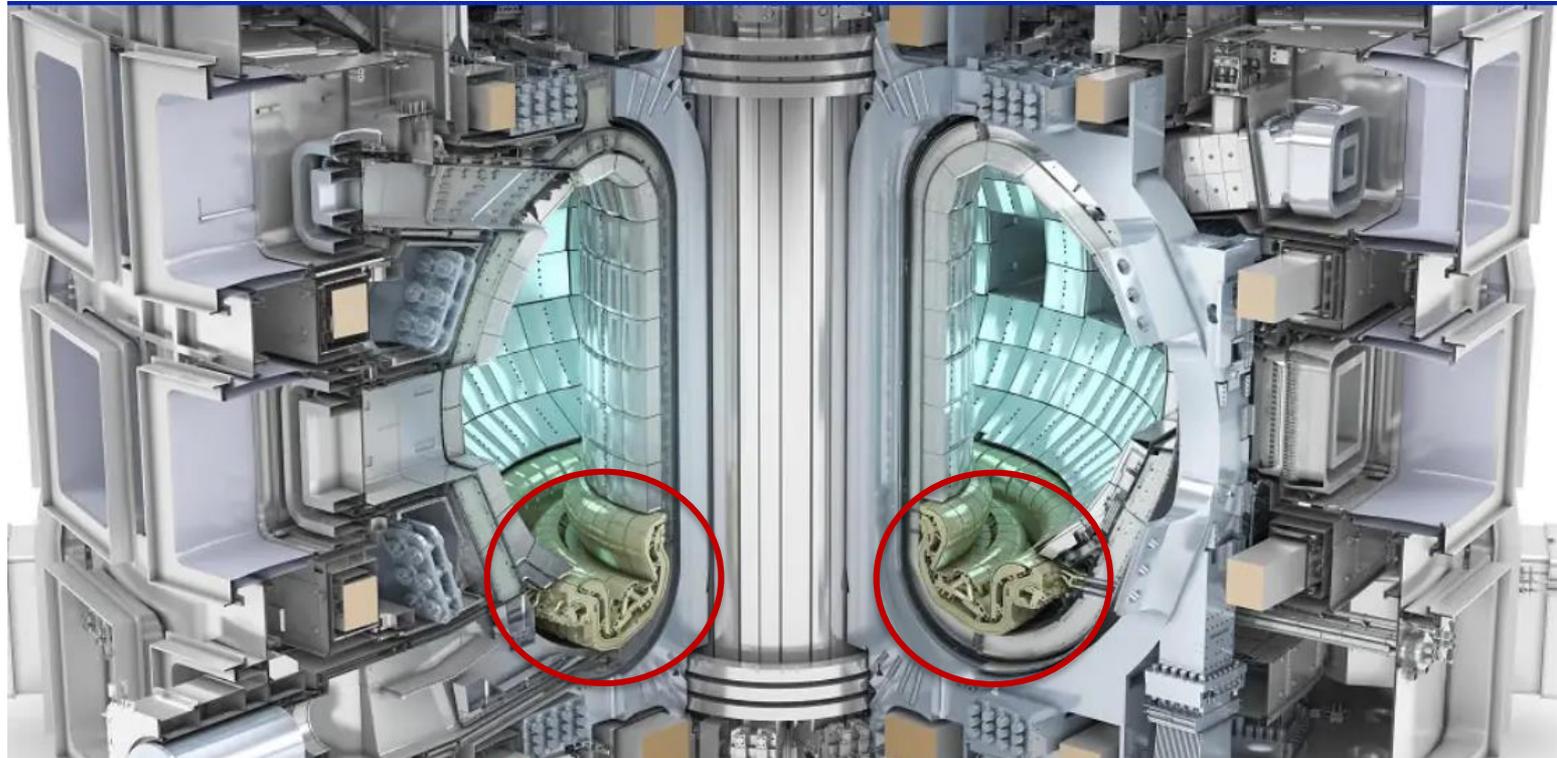
ITER: i magneti superconduttori



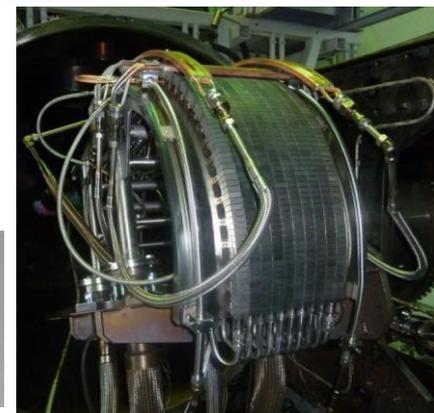
ITER: i settori della camera da vuoto



ITER: Il Divertore



Prototipo scala 1:1 realizzato da **Ansaldo Nucleare** con **ENEA** e testato con successo a 5 MW/m^2 per 5000 cicli e 20 MW/m^2 per 300 cicli di 10 s ciascuno

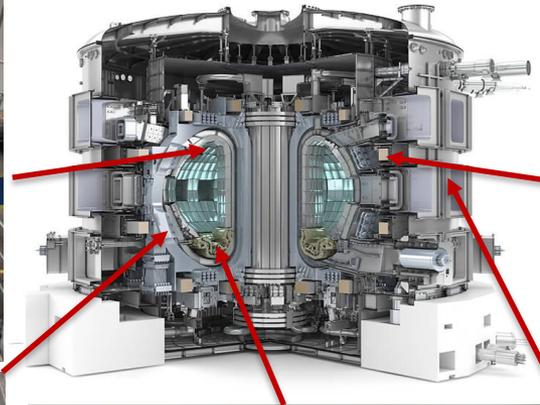


Il cuore italiano di ITER

5 su 9 settori della camera a vuoto
Consorzio Ansaldo Mangiarotti Walter Tosto



10 su 18 bobine dei magneti toroidali
ENEA/TRATOS/CRIOTEC cavi in Nb_3Sn
ASG avvolgimenti
SIMIC strutture di supporto e casse



4 su 6 bobine magneti poloidali
Consorzio europeo tra cui ASG
Sea Alp Criotec



54 "cassette" del divertore
Walter Tosto



**Neutral Beam
Test Facility**
Consorzio
RFX

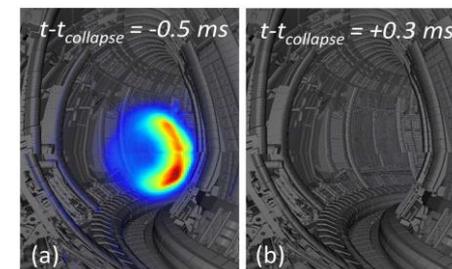
Le sfide

Programma in
parallelo a ITER

- Alto guadagno di potenza $Q > 30$
- Autosufficienza per il consumo di trizio
- Materiali resistenti per assicurare lunga vita operativa agli impianti
- Soluzioni avanzate per l'estrazione della potenza

Roadmap europea per l'energia da fusione

programma di attività verso l'obiettivo dell'energia elettrica da fusione ~ 2050
attuato dal **Consorzio Eurofusion**
e co-finanziato da Euratom per 550 M€ nel
2021-2025



Il ruolo dell' Italia

Rete italiana sulla fusione:

- 22 partner coordinati da ENEA (Programme Manager)
- 2° più importante contributore al programma europeo (dopo la Germania)
- Competenze su tutte le linee di ricerca scientifica e sviluppo tecnologico (fisica, tecnologia, ingegneria)
- Stretta e consolidata collaborazione con l'industria
- Attualmente sta realizzando il maggiore esperimento europeo - **Divertor Tokamak Test facility (DTT)**

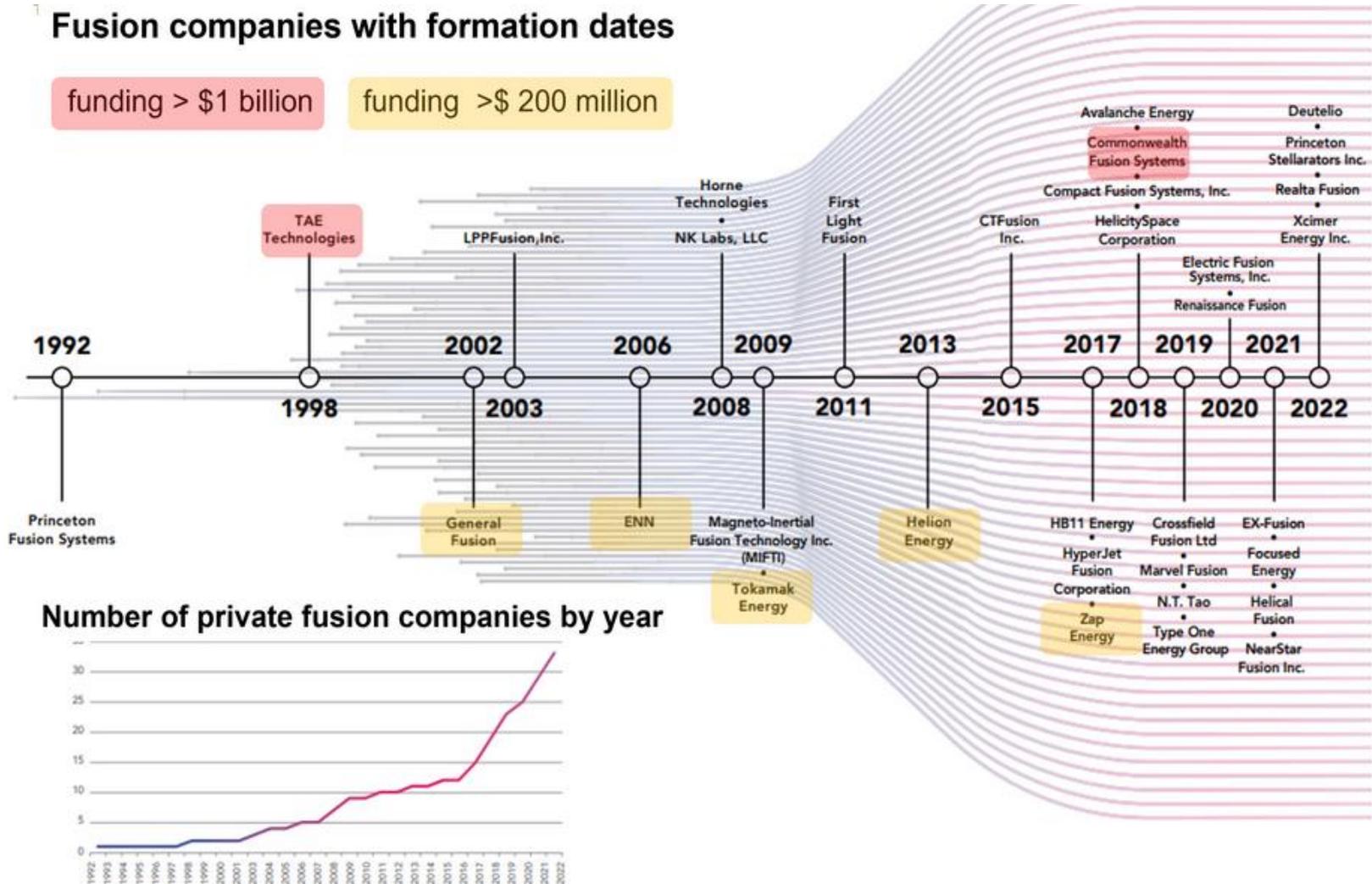


Verso la fusione commerciale

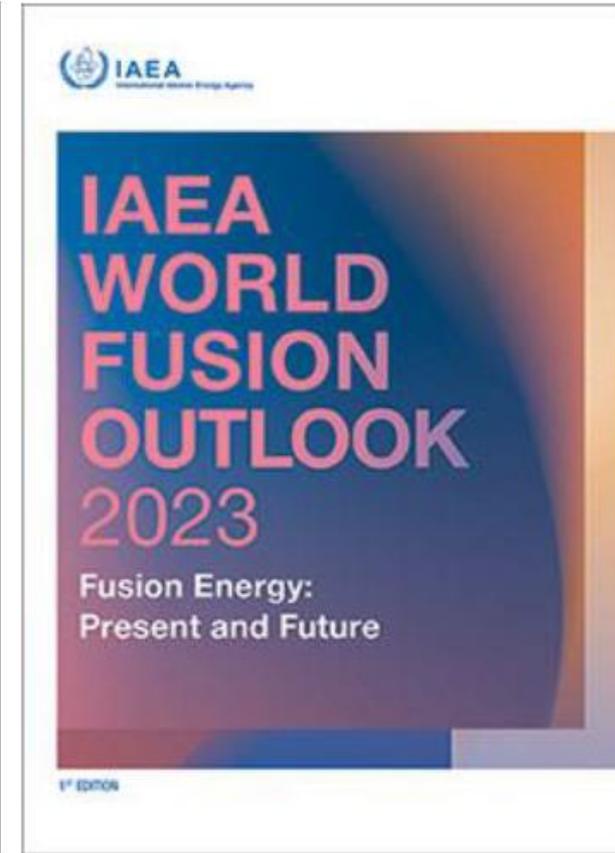
Fusion companies with formation dates

funding > \$1 billion

funding > \$200 million



Verso la fusione commerciale



paola.batistoni@enea.it



```
1101 0110 1100  
0101 0010 1101  
0001 0110 1110  
1101 0010 1101  
1111 1010 0000
```

