



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

Fusione nucleare: stato e prospettive

Paola Batistoni

Resp. Divisione Sviluppo Energia da Fusione

ENEA-FSN – Centro di Ricerca di Frascati

Università di Roma La Sapienza, 11 aprile 2022



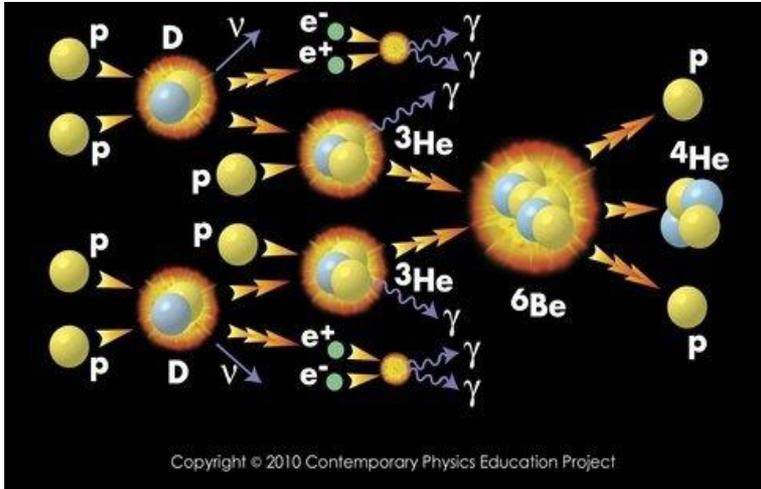
1101 0110 1100
0101 0010 1101
0001 0110 1110
1101 0010 1101
1111 1010 0000



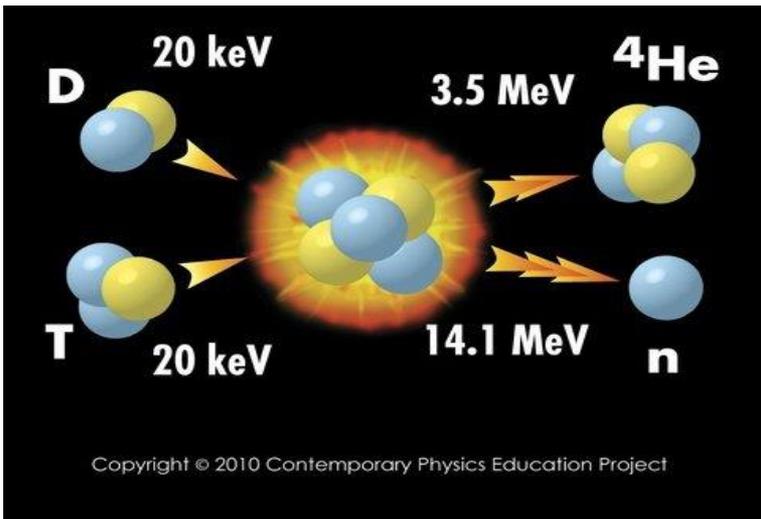
SOMMARIO

- 1. La fusione: cos'è e come si ottiene**
- 2. A che punto siamo**
- 3. I recenti risultati di JET**
- 4. Il reattore sperimentale ITER**
- 5. Cosa resta da fare – la Roadmap europea**
- 6. L'esperimento italiano DTT**

In cielo non come in terra

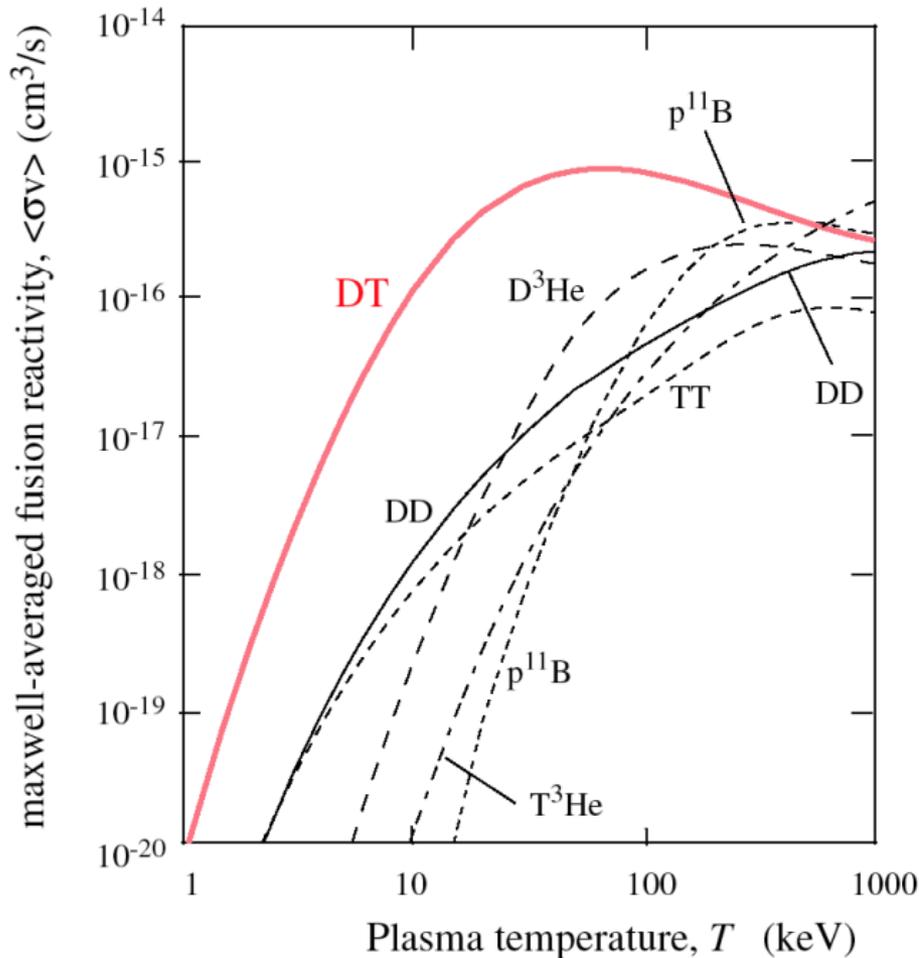


- Il processo p-p che alimenta il Sole è troppo lento
- 1 m³ nel Sole produce ≈ 30 W
- Il Sole funziona perché è grande



- La reazione di fusione Deuterio-Trizio è ordini di grandezza più veloce
- Con la D-T il Sole vivrebbe < 1s
- Servono temperature molto più alte che nel Sole (100-200 milioni K)

Come si ottiene la fusione

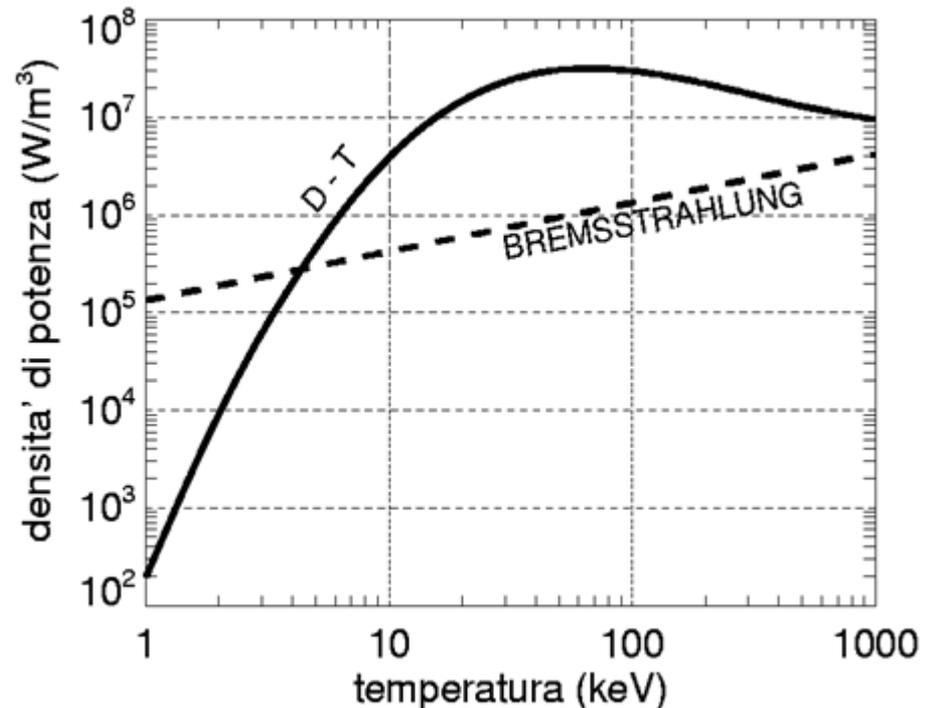
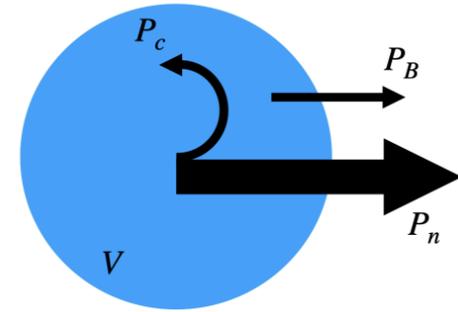


- Reazione D-T: sezione d'urto più alta a temperature più basse
- Temperatura $T \geq 10^8$ K (10 keV)
- Plasmi termonucleari (non funzionerebbe in sistemi fascio-bersaglio, fascio-fascio) «confinati»
- L'energia del plasma “confinata” per un intervallo di tempo tale che l'energia prodotta ecceda quella spesa per mantenere le condizioni di reazione

Ciclo DT: condizioni per il guadagno di energia (1/2)



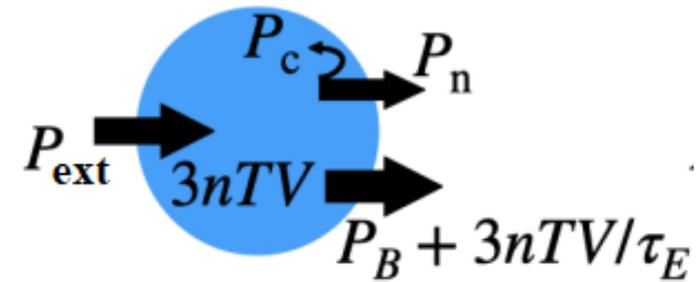
- I neutroni sfuggono dal plasma e portano fuori dal sistema l'energia (80% energia di fusione) che può essere trasformata in energia elettrica
- Le particelle alfa depositano la loro energia (20% energia di fusione) nel plasma e così ne sostengono la temperatura
- In un plasma DT, perché la potenza delle alfa sia maggiore di quella persa per irraggiamento (bremsstrahlung) serve $T > 4.3 \text{ keV}$



Ciclo DT: Condizioni per il guadagno di energia (2/2)

Potenza in uscita:

- per radiazione (bremsstrahlung), $P_B \propto n^2 T^{1/2}$, dove n è la densità elettronica
- per trasporto, $P_T = 3nTV/\tau_E$, dove τ_E è il tempo caratteristico di confinamento dell'energia



Potenza in entrata:

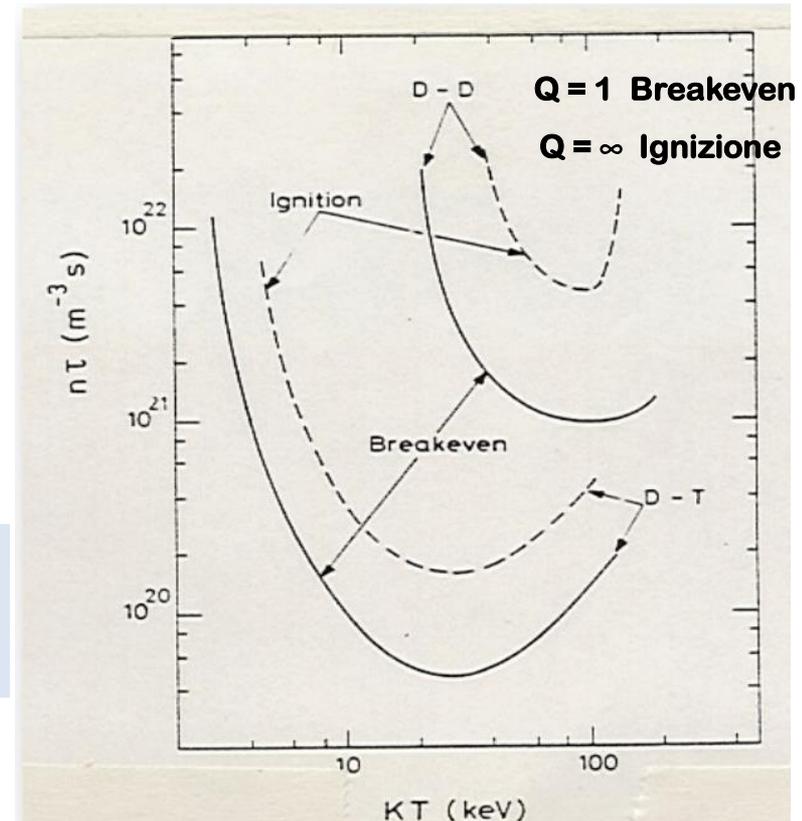
- potenza delle α , $P_c = 1/5 P_{fus} \propto n^2 F(T)$
- riscaldamento ausiliario fornito dall'esterno P_{ext}

$Q = P_{fus} / P_{ext}$ guadagno di potenza

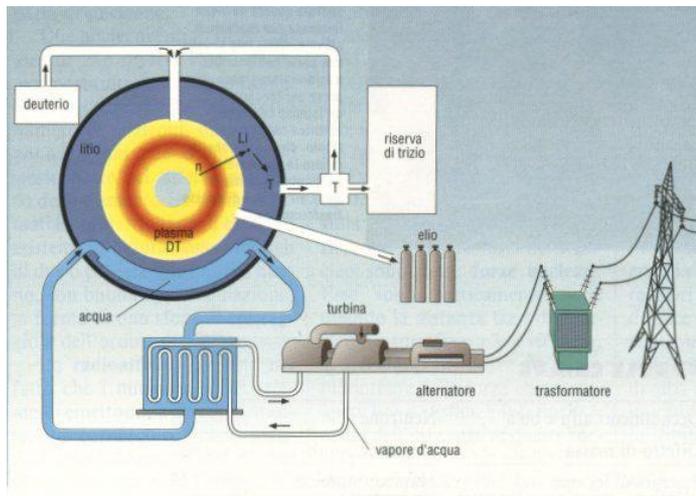
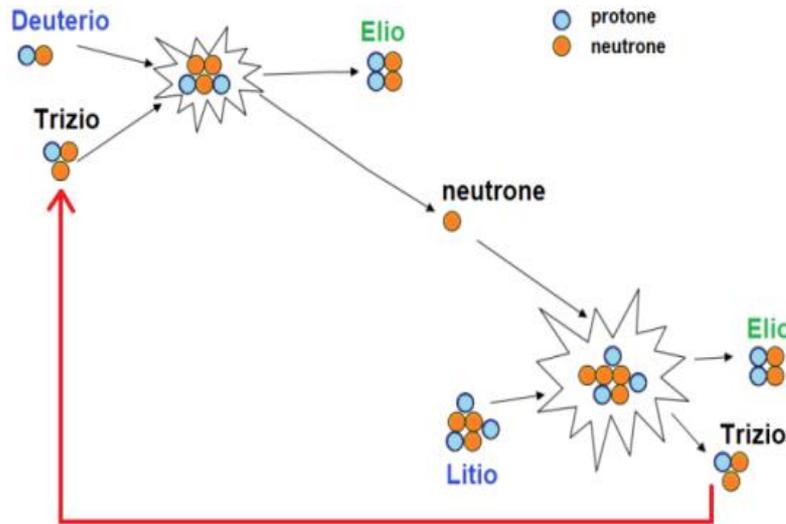
$Q = 1$ Breakeven

$$Q \geq 1 \rightarrow n\tau_E \geq 6 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}\text{s}, T \approx 20 \text{ keV}$$

$$nT\tau_E \geq 1.2 \times 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s al minimo della curva}$$



I vantaggi della fusione



- Il combustibile è virtualmente illimitato - nell'acqua di mare c'è abbastanza **deuterio** e **litio** per coprire gli attuali consumi per alcune decine di milioni di anni;
1g D equivale 300 t carbone
- il combustibile è uniformemente distribuito sulla Terra, non genera quindi tensioni geopolitiche;
- la reazione su cui si basa non produce gas climalteranti;
- è intrinsecamente sicura (in ogni momento nella camera di reazione si trova circa un grammo di idrogeno);
- la reazione di fusione non produce scorie radioattive – i neutroni di fusione inducono radioattività nelle pareti della camera di reazione, che con un'opportuna scelta dei materiali decade in ca.1 secolo.

Come si ottiene

Confinamento magnetico

Plasma a bassa densità, in condizioni quasi stazionarie, confinato da campi magnetici opportunamente configurati (pressione cinetica del plasma < pressione magnetica)

$$\begin{aligned}n &\approx 10^{20} \text{ m}^{-3} \\T &\approx 20 \text{ keV} \\B &\approx 5 - 10 \text{ T} \\ \tau_E &\approx 1 \text{ s}\end{aligned}$$

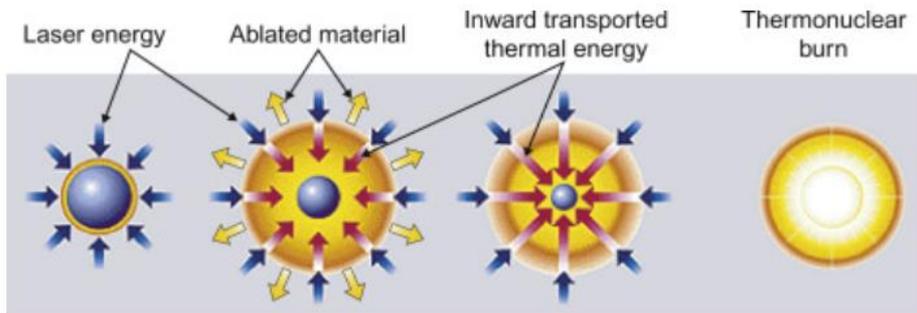
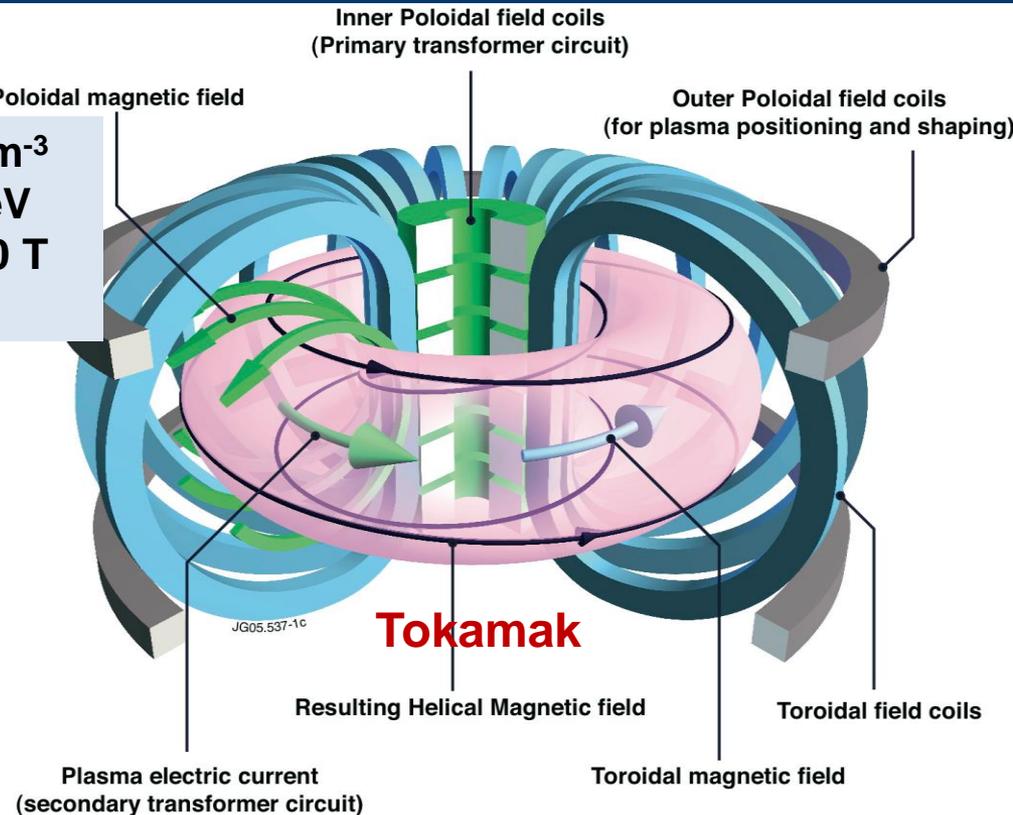
Confinamento inerziale

Microesplosione di materia fortemente compressa con fasci laser o di particelle, "confinata" dalla sua sola inerzia

$$\tau \approx R/c_s,$$

c_s è la velocità del suono

$$\begin{aligned}\rho_{\text{picco}} &\approx 1000 \text{ g/cm}^3 \\T &\approx 20 \text{ keV} \\ \tau &\approx 10 - 20 \text{ ns} \\ R &\approx 1 - 2 \text{ mm}\end{aligned}$$



Dove siamo

- Negli esperimenti attualmente in funzione sono già raggiunti valori di densità e temperatura del plasma simili a quelli richiesti in un reattore a fusione.
- Si è andati vicini al pareggio (breakeven) tra potenza iniettata nella camera di reazione e quella prodotta dalla fusione.

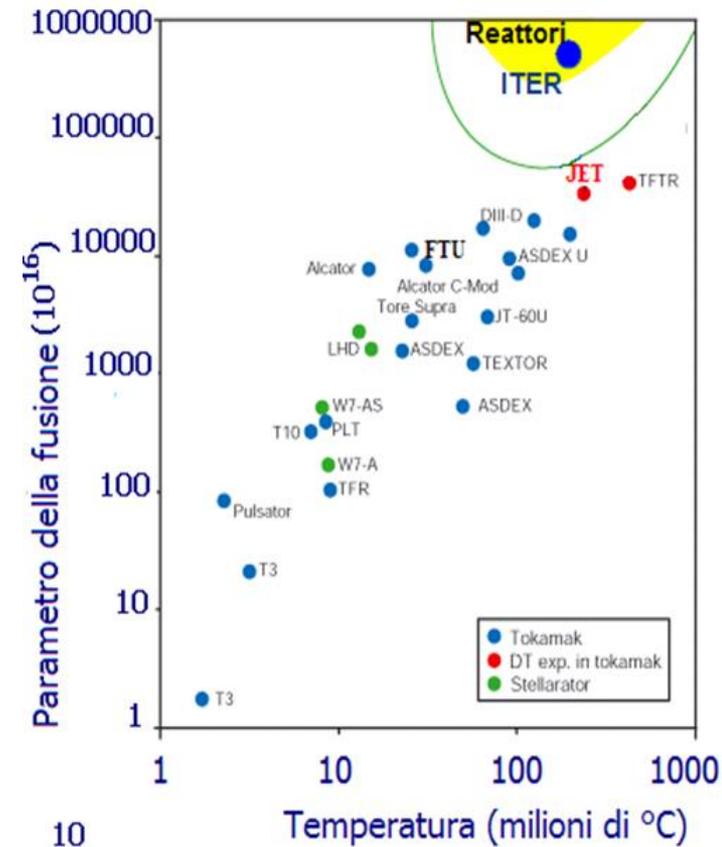
- JET (EU, UK)

✓ 1997 $E_{\text{fus}} = 22 \text{ MJ}$, $P_{\text{fus}} = 16 \text{ MW}$ $P_{\text{fus}}/P_{\text{ext}} = 0.65$.
($P_{\text{ext}} = 25 \text{ MW}$)

✓ 2021 $E_{\text{fus}} = 59 \text{ MJ}$, $P_{\text{fus}} = 11 \text{ MW}$ $P_{\text{fus}}/P_{\text{ext}} = 0.3$
($P_{\text{ext}} = 33 \text{ MW}$)

- NIF (LLNL, US)

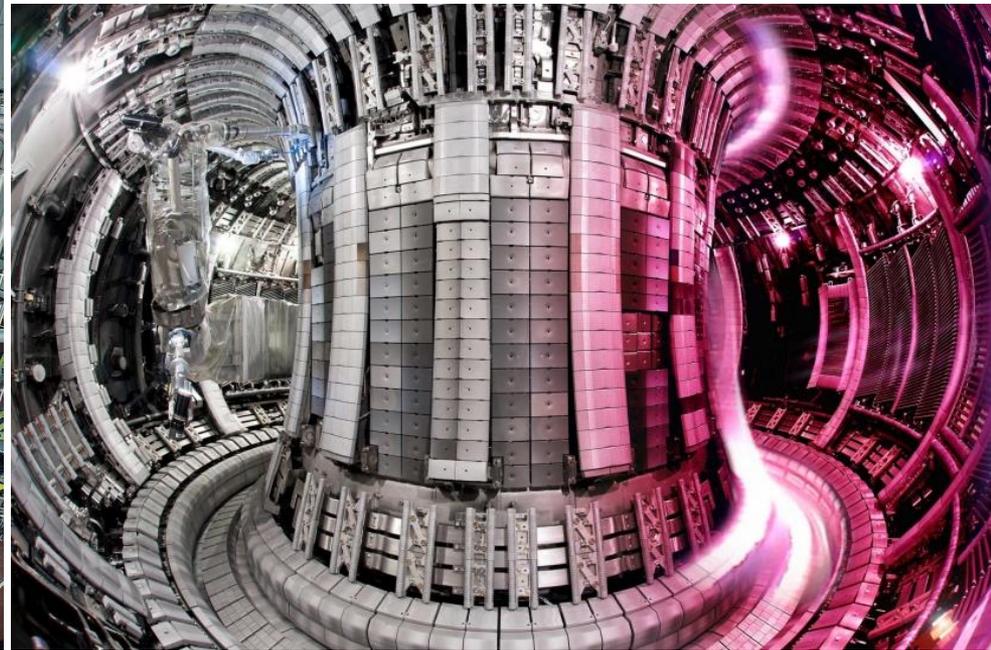
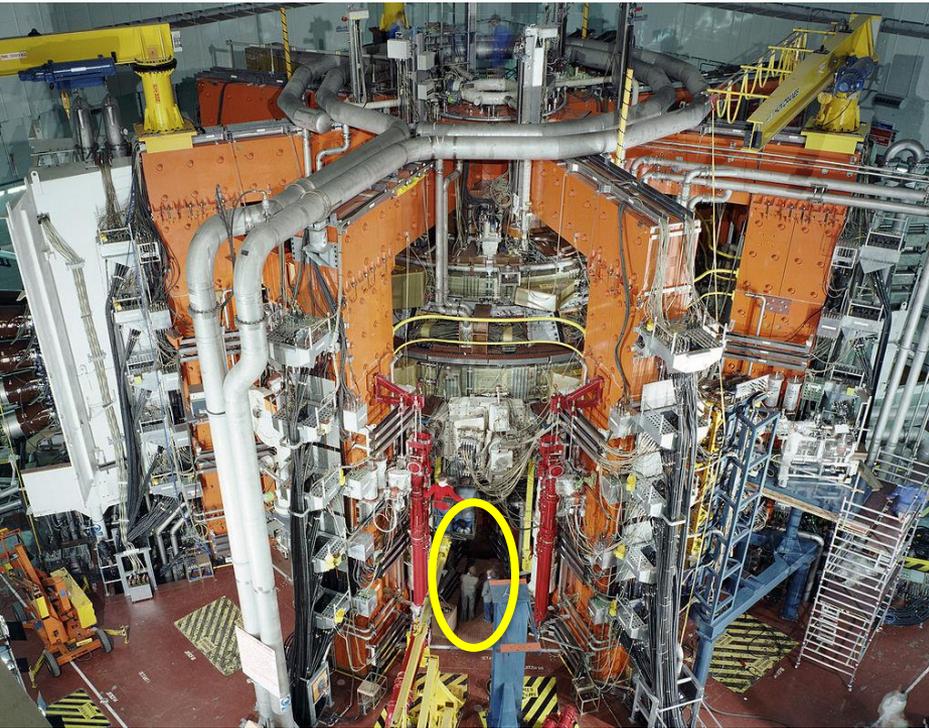
✓ 2021 $E_{\text{fus}} = 1.35 \text{ MJ}$. pari a 5 volte l'energia assorbita dal plasma, a fronte di **1.9 MJ** di energia laser impiegata.



JET – Joint European Tokamak

- Attualmente l'esperimento di fusione (tokamak) più grande al mondo
- L'unico in grado di operare in deuterio-trizio (DT)
- Due campagne sperimentali in DT nel 1997 e nel 2021

$R = 2,96 \text{ m}$, $a = 1,25 \text{ m}$
 $B < 3,45 \text{ T}$, $I < 4,8 \text{ A}$
 $P_{\text{aux}} = 38 \text{ MW}$, $V = 100 \text{ m}^3$

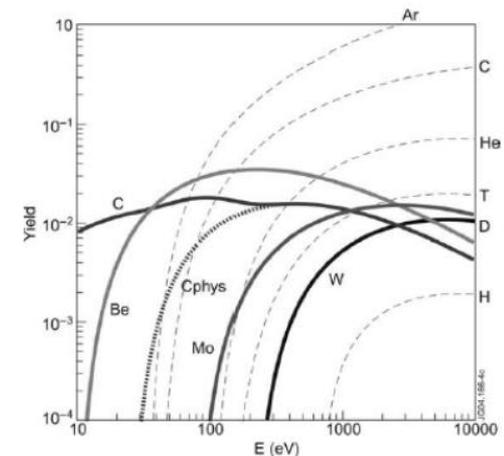
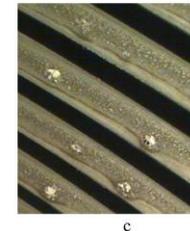
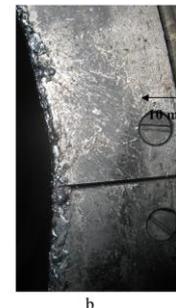
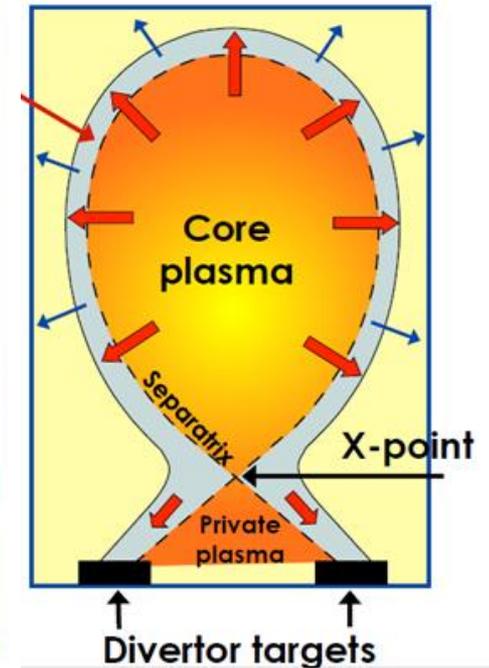
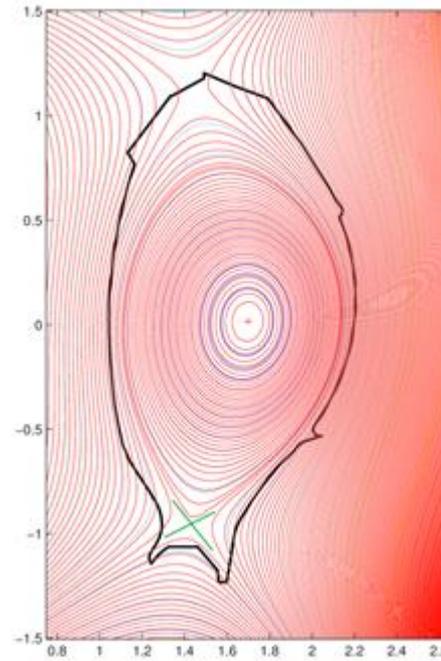


Il divertore

- La **separatrice** definisce il confine tra il plasma confinato e quello in contatto con la parete
- In un sottile strato subito fuori dalla separatrice, le particelle vengono convogliate verso **divertore**, un componente interno ma separato dalla camera principale
- Lo smaltimento del calore e delle alfa avviene in una superficie limitata sul divertore

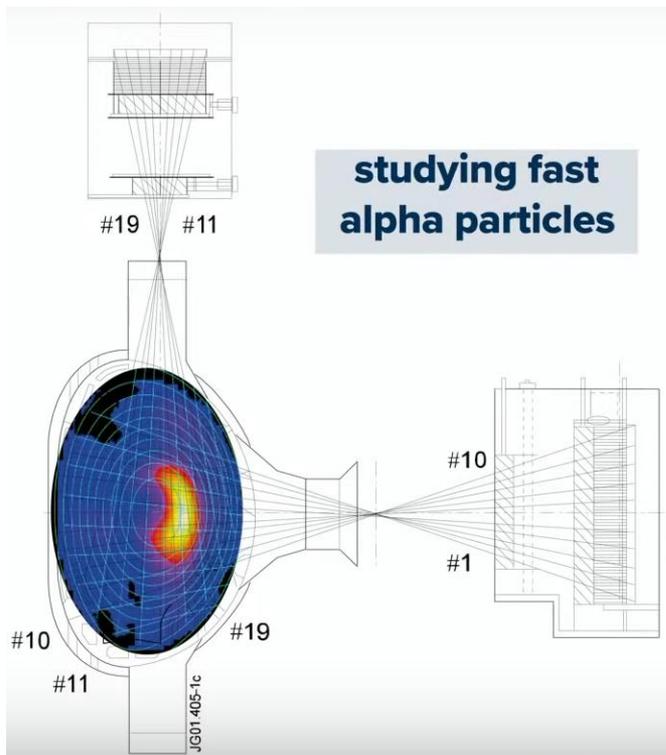
→ **decine MW/m²**.

- **Sputtering chimico e fisico**
- **Erosione / ri-deposizione**
- **Fusione**
- **Contaminazione del plasma**



Campagna in DT al JET - 2021

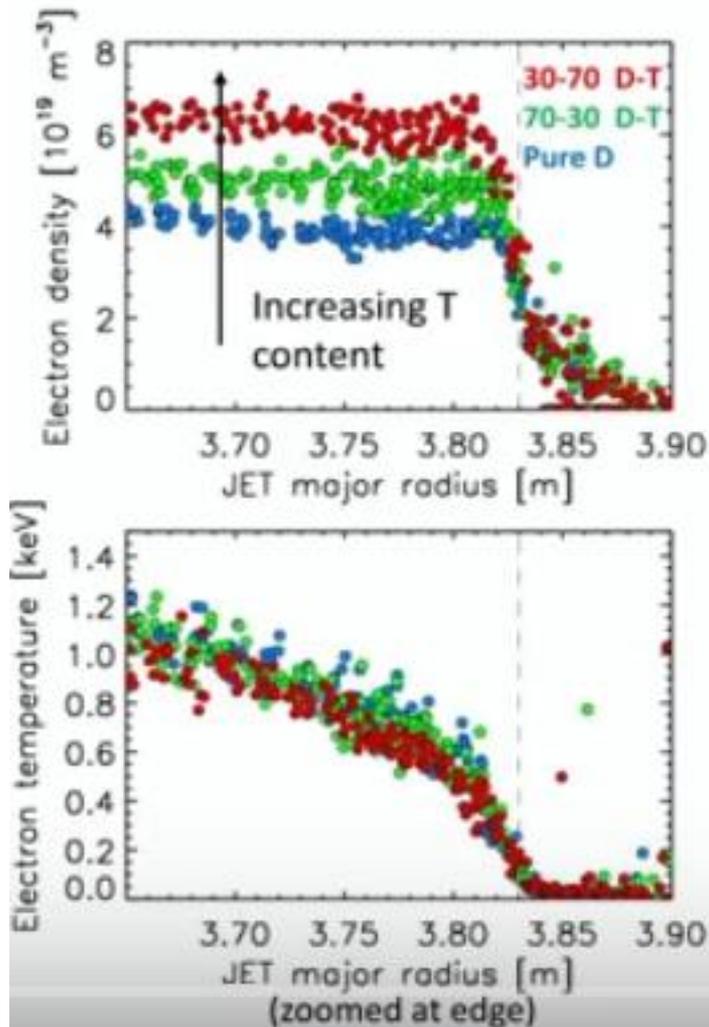
- Sostituzione della parete interna di carbonio con **Be per la prima parete e W per il divertore**, gli stessi materiali usati in ITER (2011)



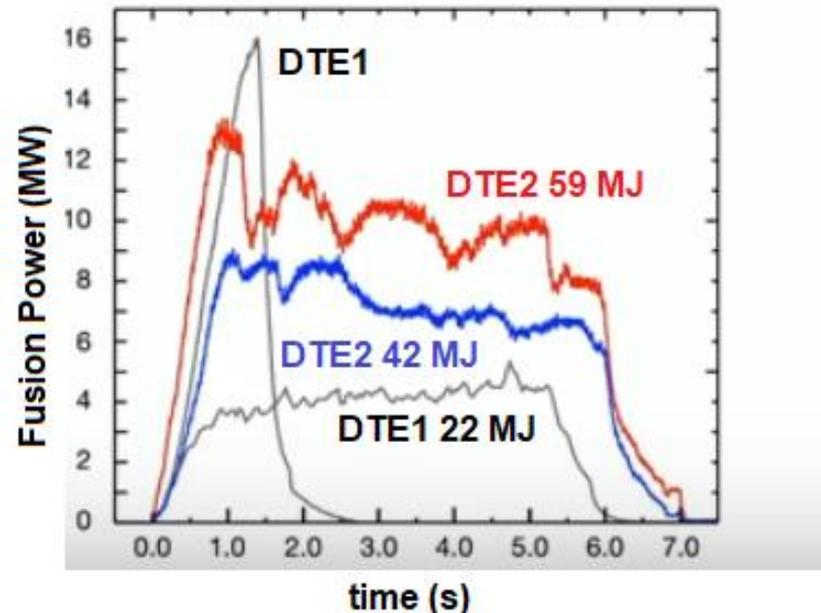
- Nuove diagnostiche, maggiore capacità di modeling per la preparazione degli scenari



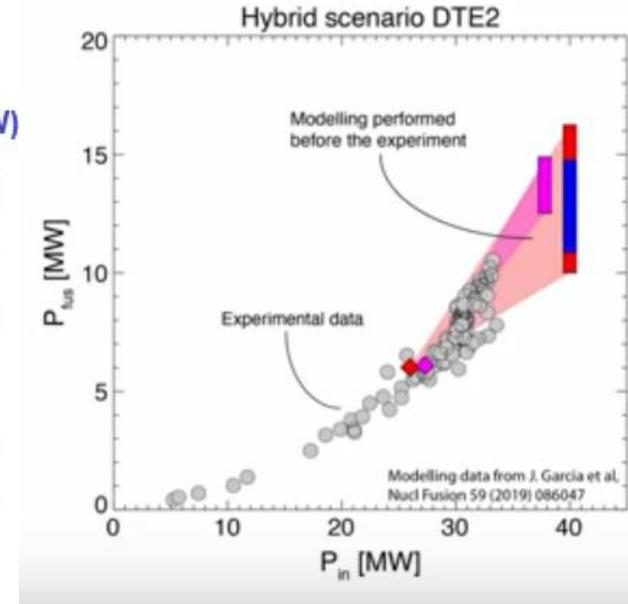
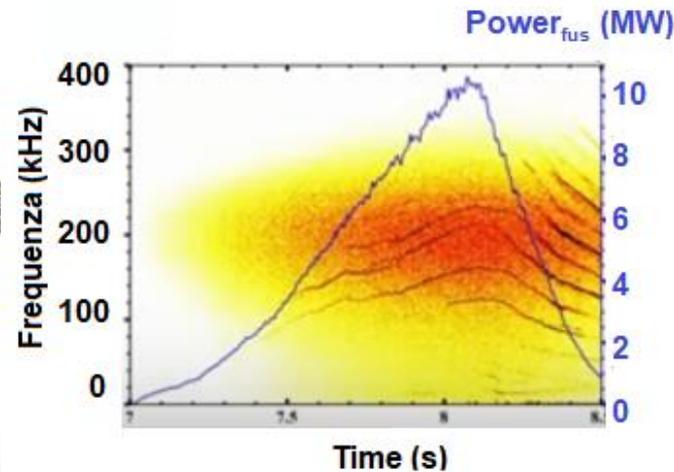
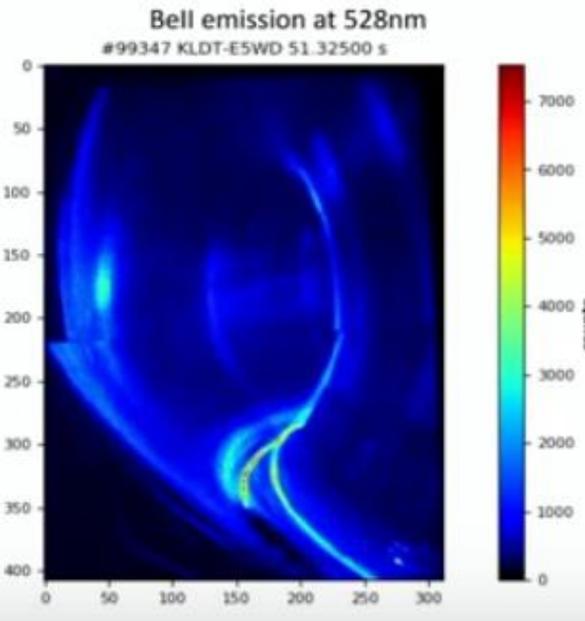
Risultati della nuova campagna DT al JET (2021)



- Studio dell'effetto isotopico – conferma dell'effetto positivo dell'aumento della massa sul confinamento anche con la ITER-like-Wall
- **Sostentamento della fusione per $t \gg \tau_E$**
- Record di energia da fusione prodotta



Risultati della nuova campagna DT al JET (2021)



- Effetto isotopico sull'erosione della prima parete: passando dal D al T aumenta il tasso di erosione sul W, ma entro limiti accettabili

- Effetto misurabile del riscaldamento delle alfa

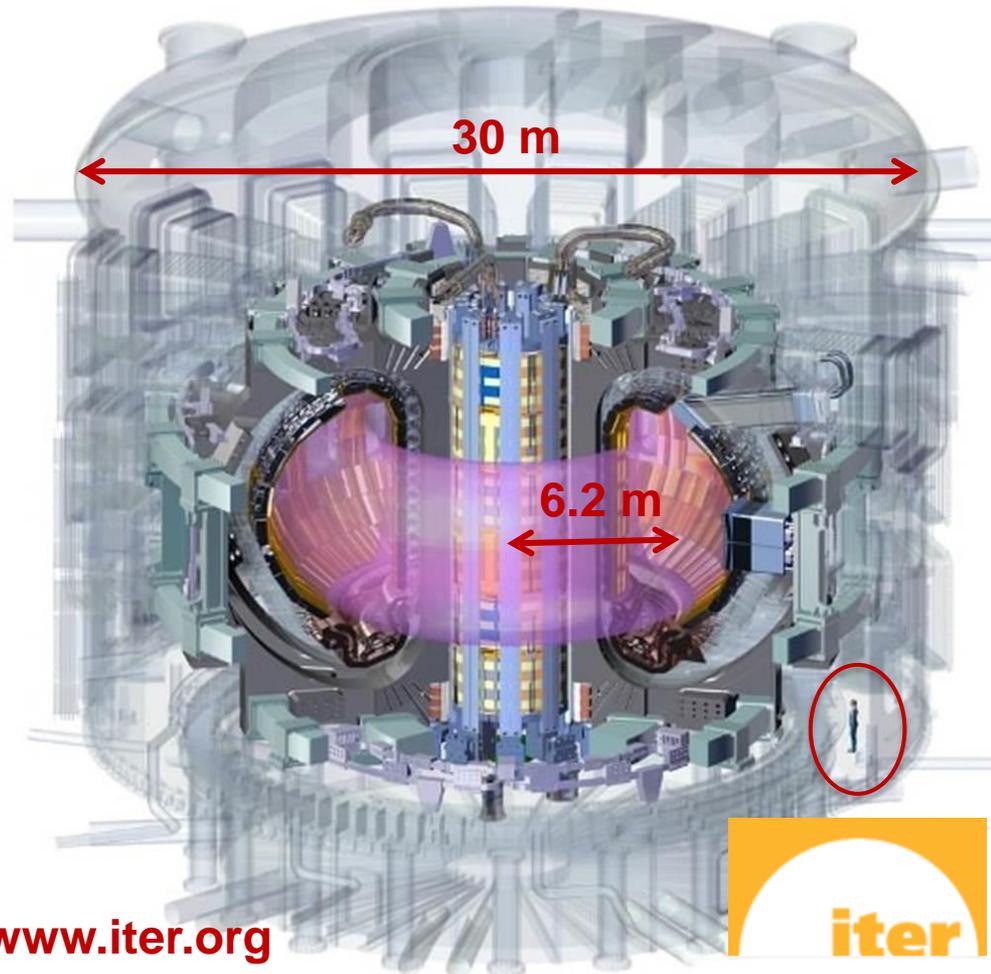
- La Potenza di fusione misurata conferma le predizioni teoriche
- **Validazione delle estrapolazioni per ITER**

ITER : il prossimo passo

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

Obiettivi:

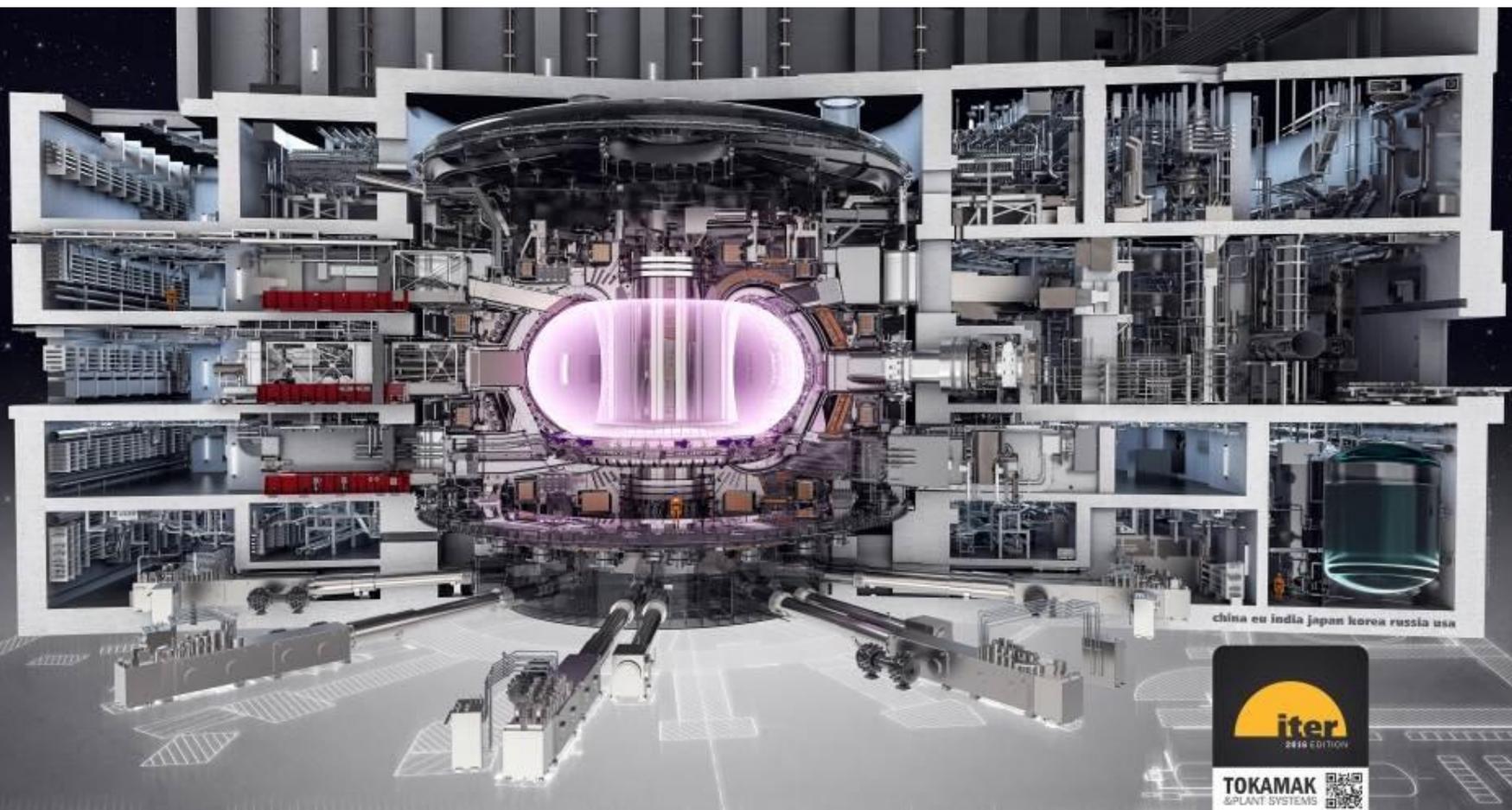
- **dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione**
- $Q = P_{\text{fus}}/P_{\text{in}} = 10$
- **500MW** di potenza di fusione a fronte di **50MW** di potenza iniettata nella camera di reazione per impulsi della durata di **alcune centinaia di secondi fino a circa un'ora**



ITER: il sito (Cadarache, Francia)



L'Edificio Tokamak



ITER: la base fisica

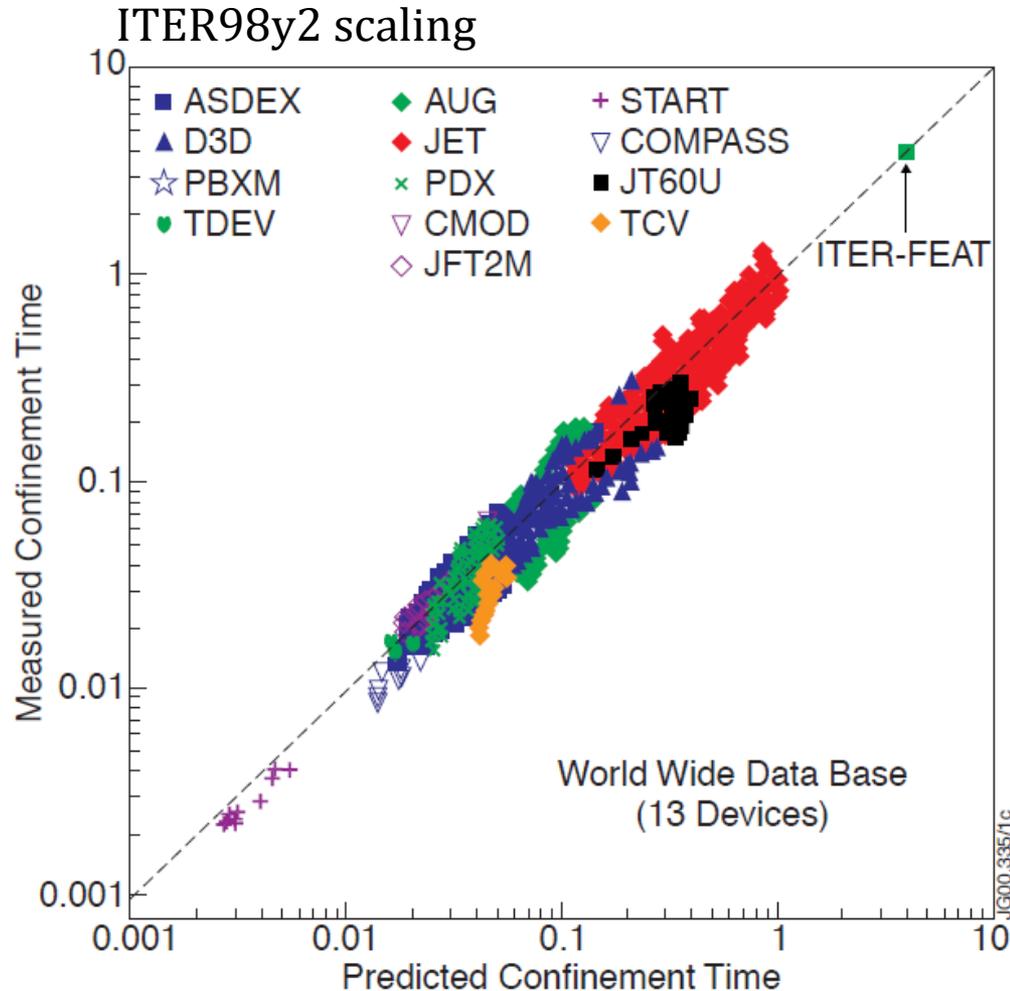
- La base fisica di ITER è solidamente fondata sui risultati ottenuti nei vari esperimenti sin qui condotti
- **Rispetto agli esperimenti attuali ITER rappresenta una estrapolazione sufficientemente piccola da renderci confidenti nel raggiungimento degli obiettivi ma al tempo stesso significativa per la dimostrazione della fusione**

$$\tau_{E, ITER} = 4.3s$$

$$nT \tau_{E, ITER} \sim 8.6 \times 10^{21} m^{-3} s \text{ keV}$$

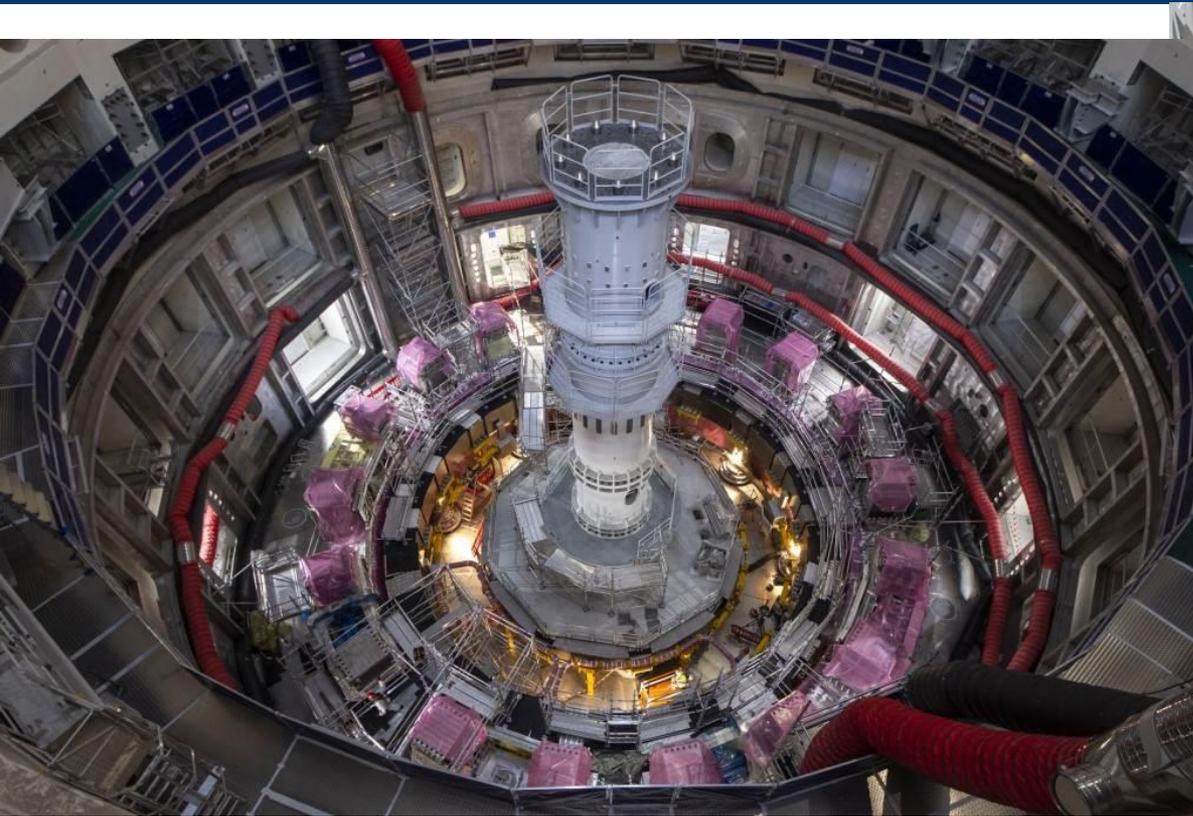
(con $n=10^{20} m^{-3}$ e $T=20 \text{ keV}$)

$$Q=10$$



$$\tau_{E,98y2} \propto I_p R_o^2 B^{0.15} P^{-0.69} n^{0.41}$$

ITER: l'assemblaggio in corso



1. L'interno del criostato con la bobina poloidale n.6 e dummy Solenoide Centrale



ITER: Vacuum vessel e blanket

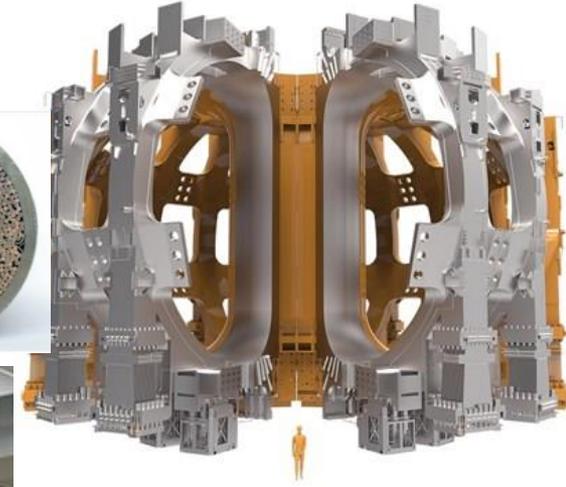
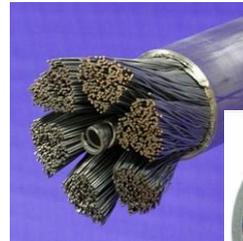
- 9 settori di Vacuum vessel di cui 5 costruiti in Italia dal Consorzio Ansaldo, Mangiarotti Walter Tosto



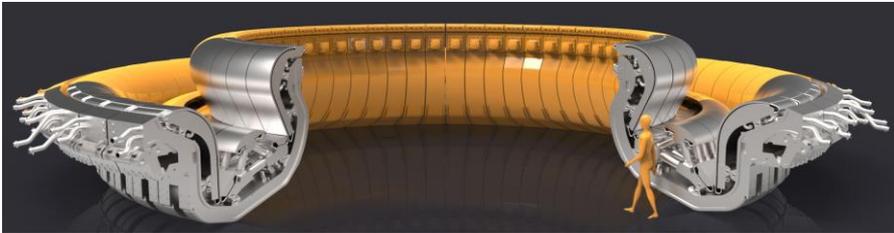
ITER: magneti superconduttori del campo toroidale

- **18 bobine superconduttrici**
 - Raffreddamento LHe (4 K, 0.6 MPa)
 - Corrente nominale 68 kA
 - Campo magnetico di picco 11.8 T
 - ~ 82 kms di Nb₃Sn Cable in Conduit Conductor (**sviluppato in ENEA**)

- **10 delle 18 bobine costruite in Italia**
 - ENEA/TRATOS/CRIOTEC parte dei cavi in Nb₃Sn
 - ASG gli avvolgimenti
 - SIMIC le strutture di supporto e le casse



ITER: il divertore (target e supporto)



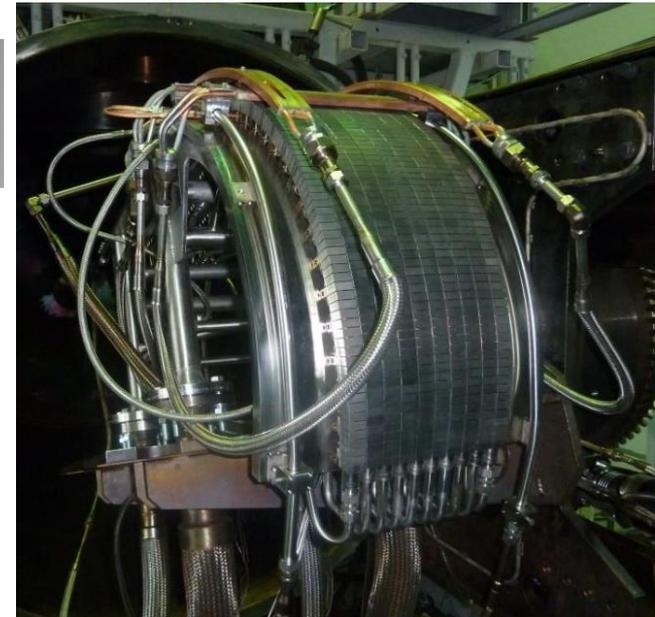
54 "cassette" che supportano 3 target
Flussi di calore : **< 10 MWm² (stazionario)**
< 20 MWm² (transienti).



Target di tipo monoblocco con tegole di tungsteno e tubi in CuCrZr
(**tecnologia sviluppata in ENEA**)



Prototipo scala 1:1 realizzato da Ansaldo Nucleare con ENEA e testato con successo a 5 MW/m² per 5000 cicli e 20 MW/m² per 300 cicli di 10 s ciascuno



ITER: 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 in presenza di sostanziale riscaldamento dalle alfa
 - Controllo dello smaltimento della potenza
 - Protezione delle pareti interne attivamente raffreddate
- Dimostrazione di alcune tecnologie ma ...
ITER non produrrà trizio, non produrrà energia elettrica



La Roadmap europea per la fusione

- **L'Europa ha adottato una Roadmap (2014, 2018)**

Che definisce il programma di attività verso l'obiettivo dell'energia elettrica da fusione

- **Il programma previsto dalla Roadmap è attuato dal Consorzio Eurofusion**

- 30 organizzazioni di ricerca
- 152 entità affiliate
- 25 Stati Membri
- Regno Unito, Svizzera e Ucraina come associati

- **Finanziamento tramite Grant FP9 Euratom per 550 M€ (2021-2025)**

Eurofusion Consortium ENEA Programme Manager	
RFX	UniCatania
DTT	PoliTo
CNR	UniPalermo
CREATE	UniCagliari
INFN	UniTuscia
UniTorVergata	CINECA
UniSapienza	
UniRomaTre	ENI
UniPisa	ANN-Ansaldo
UniMiBicocca	CSM-RINA
PoliMi	LT Calcoli



European Research Roadmap
to the Realisation of Fusion Energy

LONG VERSION

www.euro-fusion.org/eurofusion/roadmap/

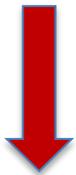
EUROfusion

La Roadmap europea per la fusione

- Roadmap della fusione ha l'obiettivo di **completare in tempo utile tutti gli sviluppi che consentano l'inizio della costruzione di un reattore dimostrativo (DEMO) nel momento in cui ITER consegua l'obiettivo di guadagno $P_{fus}/P_{in} = 10$ (2035), quindi l'inizio dell'operazione intorno alla metà del secolo.**

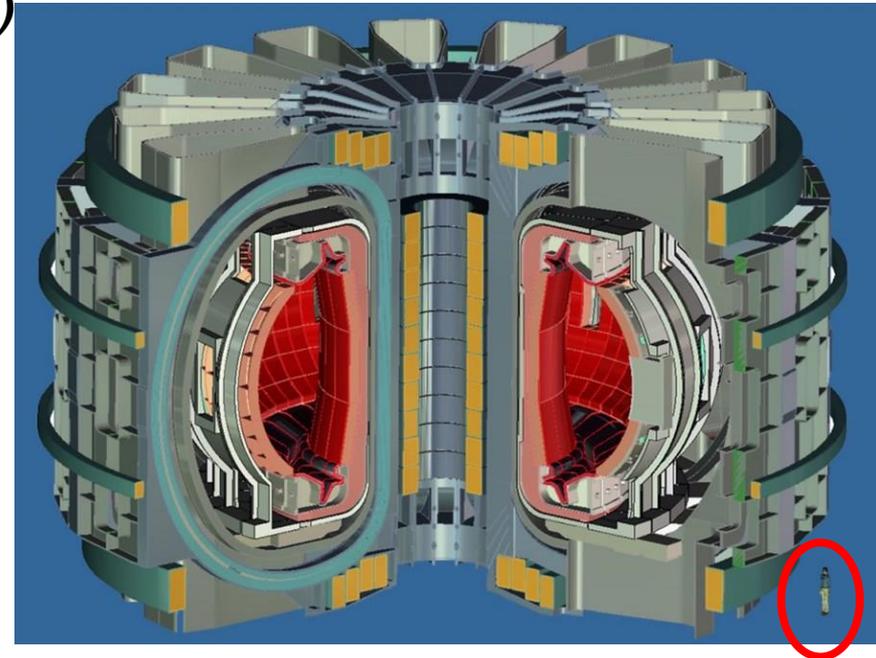
*Performance del plasma
Guadagno in energia ($Q > 30-40$)*

*Tecnologie
del reattore*

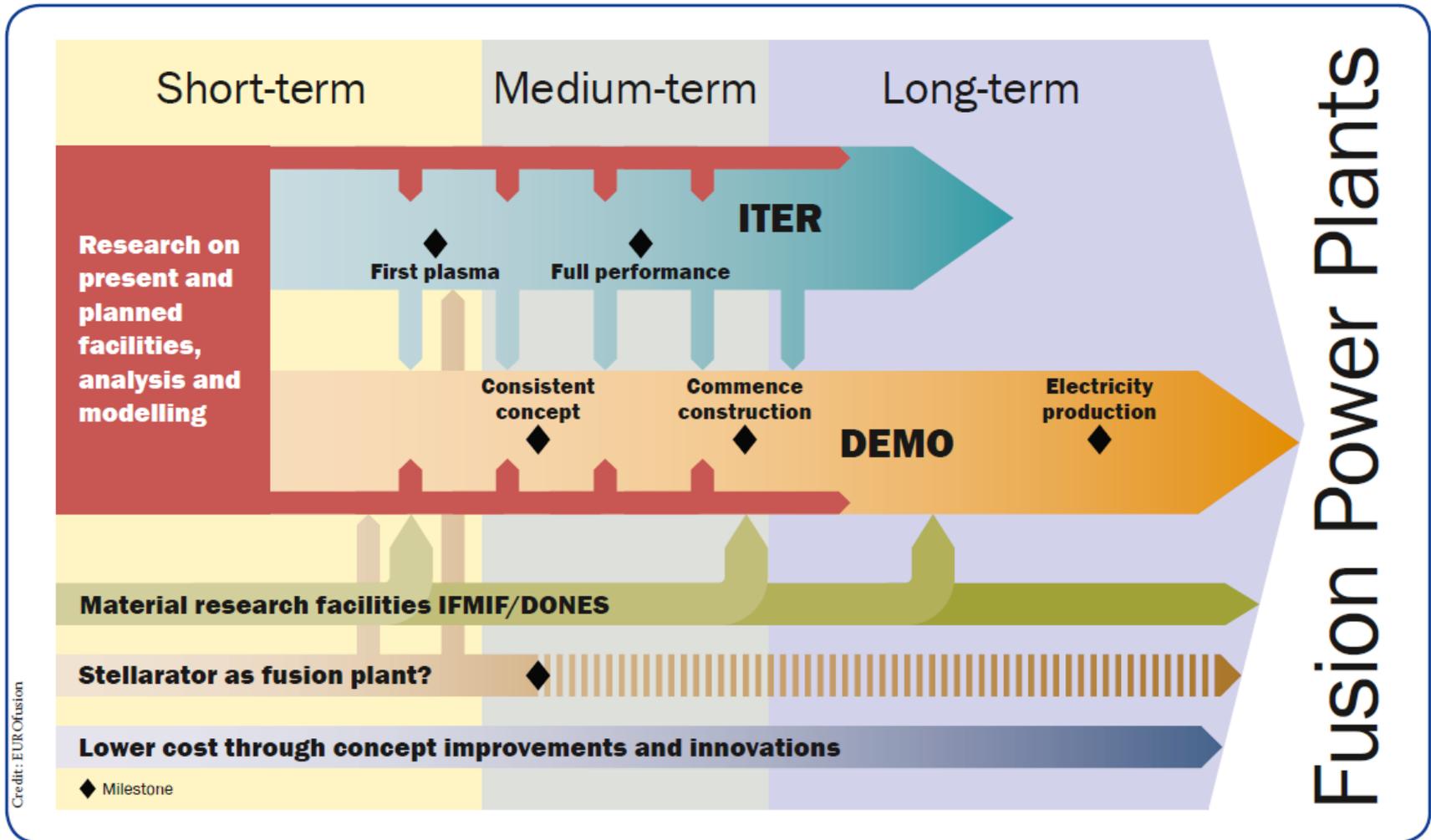


Materiali
Produzione di trizio
Smaltimento della potenza

*Sicurezza
Economicità*



La Roadmap europea per la fusione



Il mantello

Il mantello ricopre internamente la camera a vuoto ed ha tre principali funzioni:

- Conversione dell'energia dei neutroni in calore ed estrazione

→ *alta efficienza > 40%*

- Produzione ed estrazione di trizio

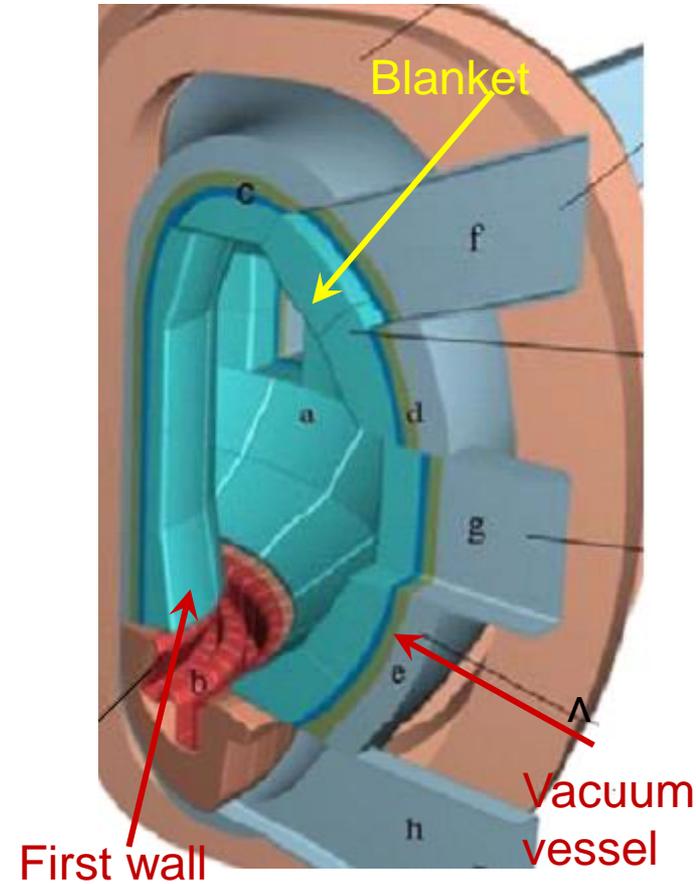
$\sim 55.6 \text{ kg} / \text{GW}_{\text{FUS}} / \text{y}$
($\sim 154 \text{ gT} / \text{GW}_{\text{FUS}} / \text{day}$)

→ *autosufficienza $T/n > 1.1$*

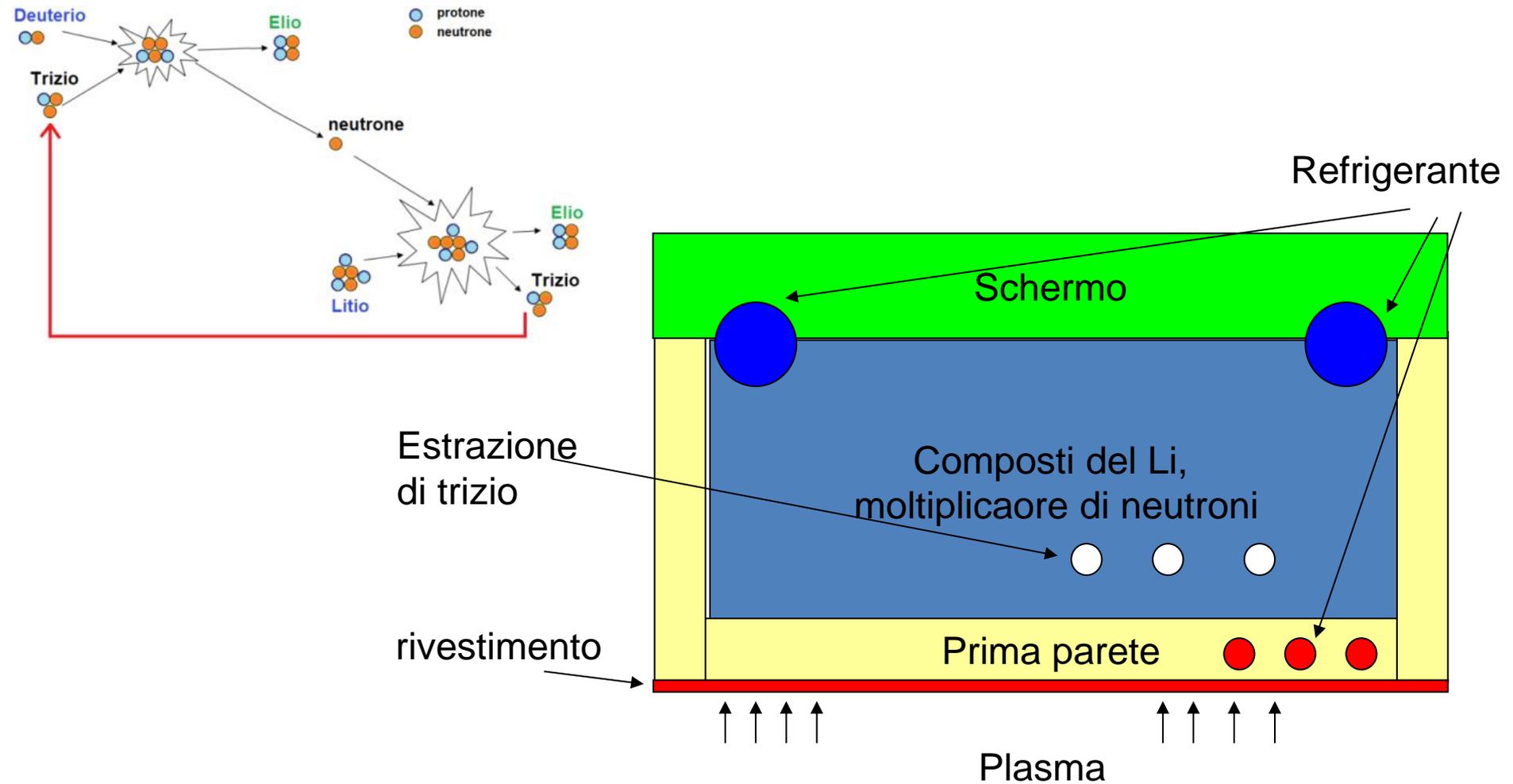
- Schermaggio della radiazione e protezione dei componenti permanenti (camera, magneti)

→ *proprietà di schermaggio*

→ *materiali resistenti alla radiazione*



Il mantello

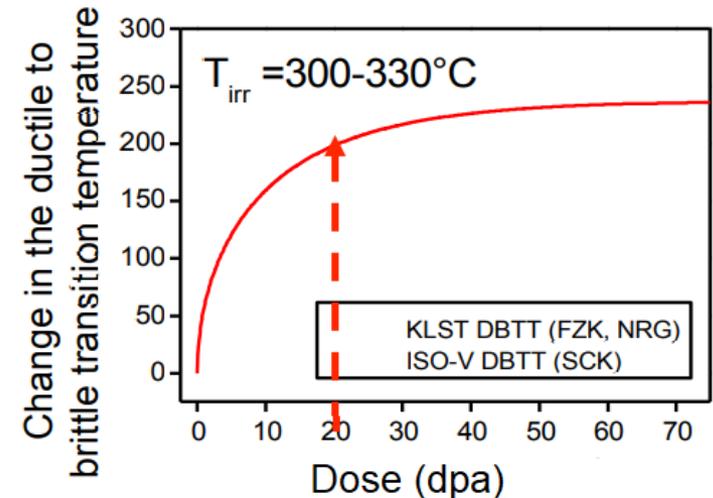
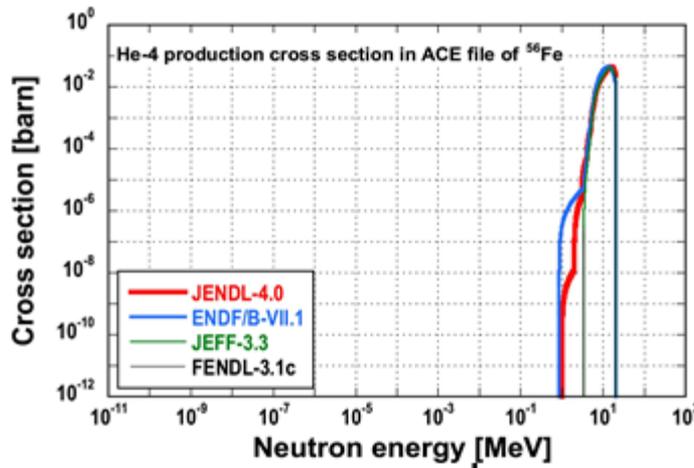
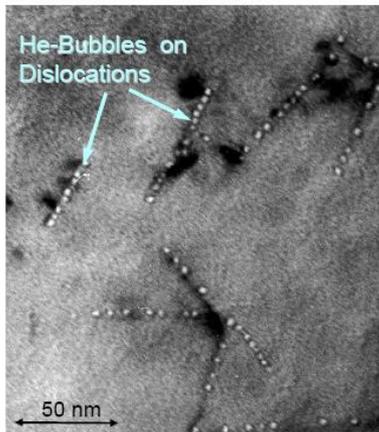
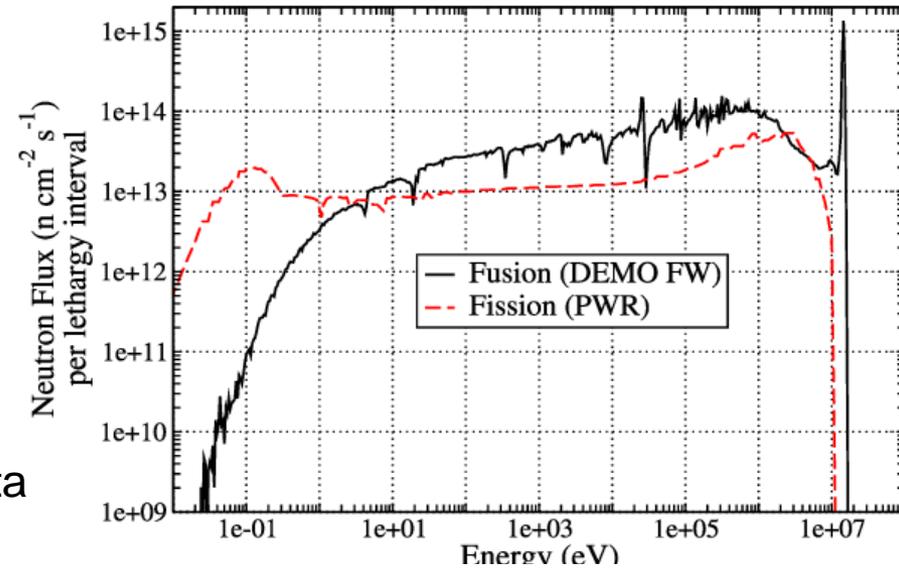


Materiali strutturali

Lo spettro in energia dei neutroni di fusione è più «duro» rispetto a quello di fissione

- He (appm) /dpa ~ 10
- indurimento, rigonfiamento ...
- Maggiore infragilimento ad alta temperatura dovuto alla produzione di He

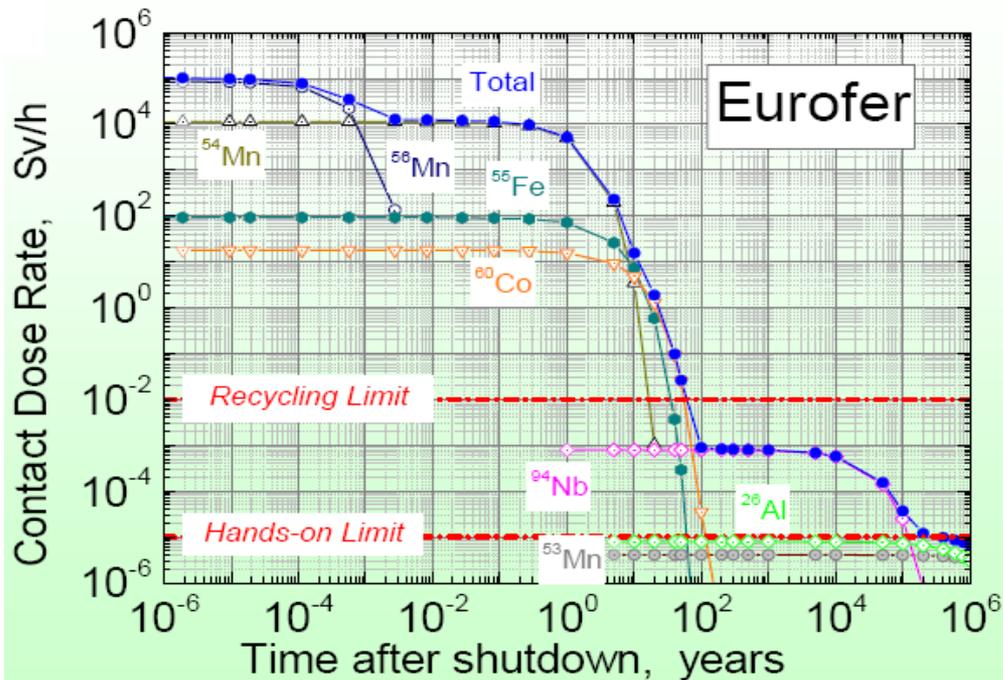
ITER: 2 displacements per atom (dpa) a fine vita
DEMO: 80 dpa dopo 4 anni full power



Materiali strutturali

Acciai Ferritici Martensitici ad attivazione ridotta (RAFM)

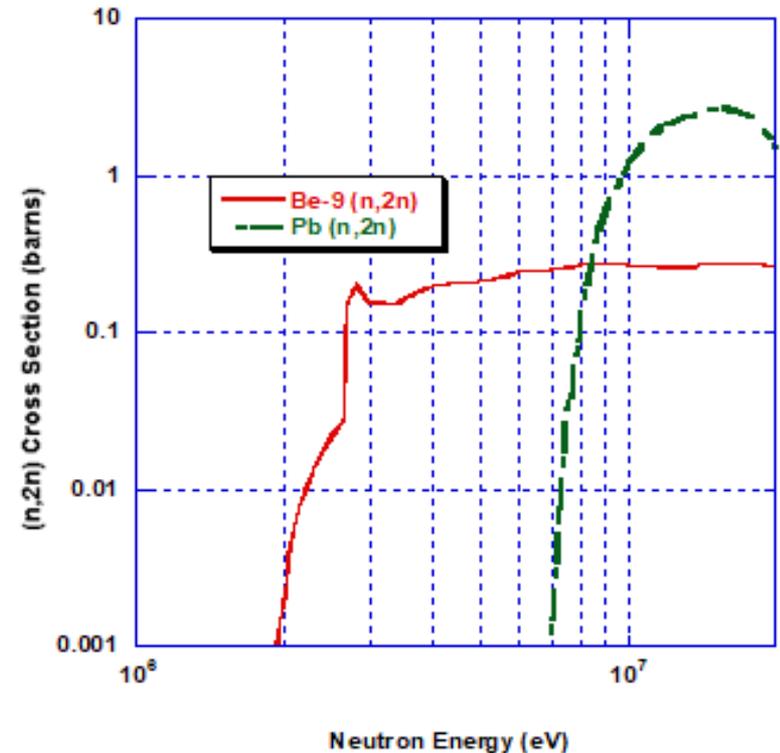
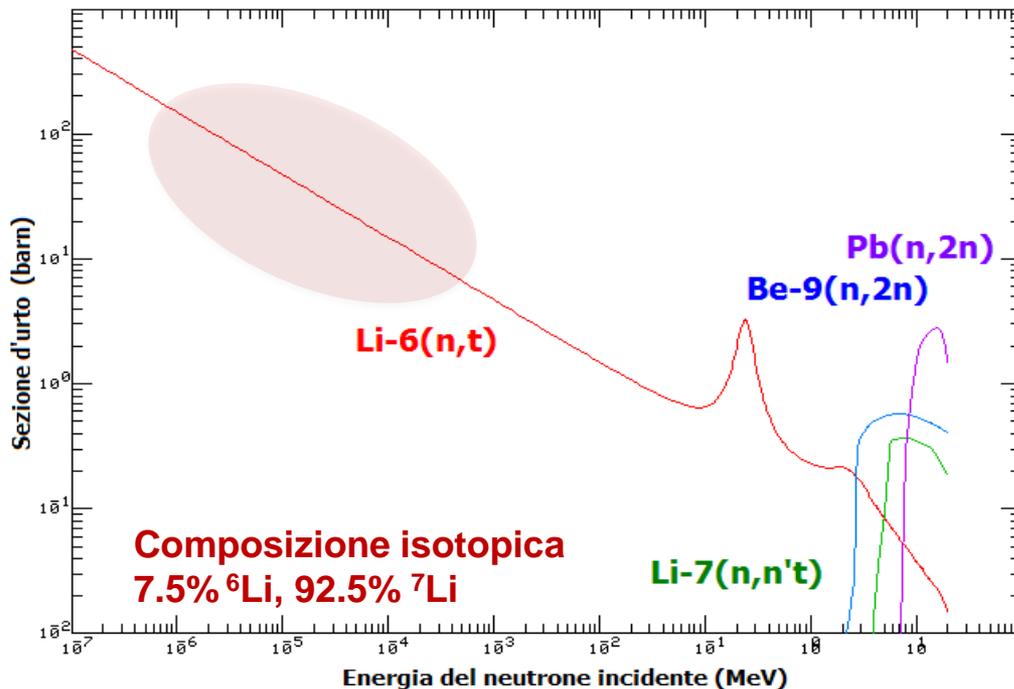
Mo, Nb, Co, Ni sostituiti con W, V and Ta
Eurofer97 (9CrWVTa) (350°C – 600°C) .



First Wall segment reconstruction (HIP- and EB process)

Produzione di trizio

- Parte dei neutroni di fusione sono catturati da altri materiali o persi attraverso le penetrazioni
- Per ottenere l'autosufficienza $T/n > 1$ occorre
 - usare Li arricchito in ${}^6\text{Li}$
 - usare materiali moltiplicatori di neutroni: **Pb o Be**



La produzione di trizio

Mantello “Water Cooled Lithium Lead (WCLL)”

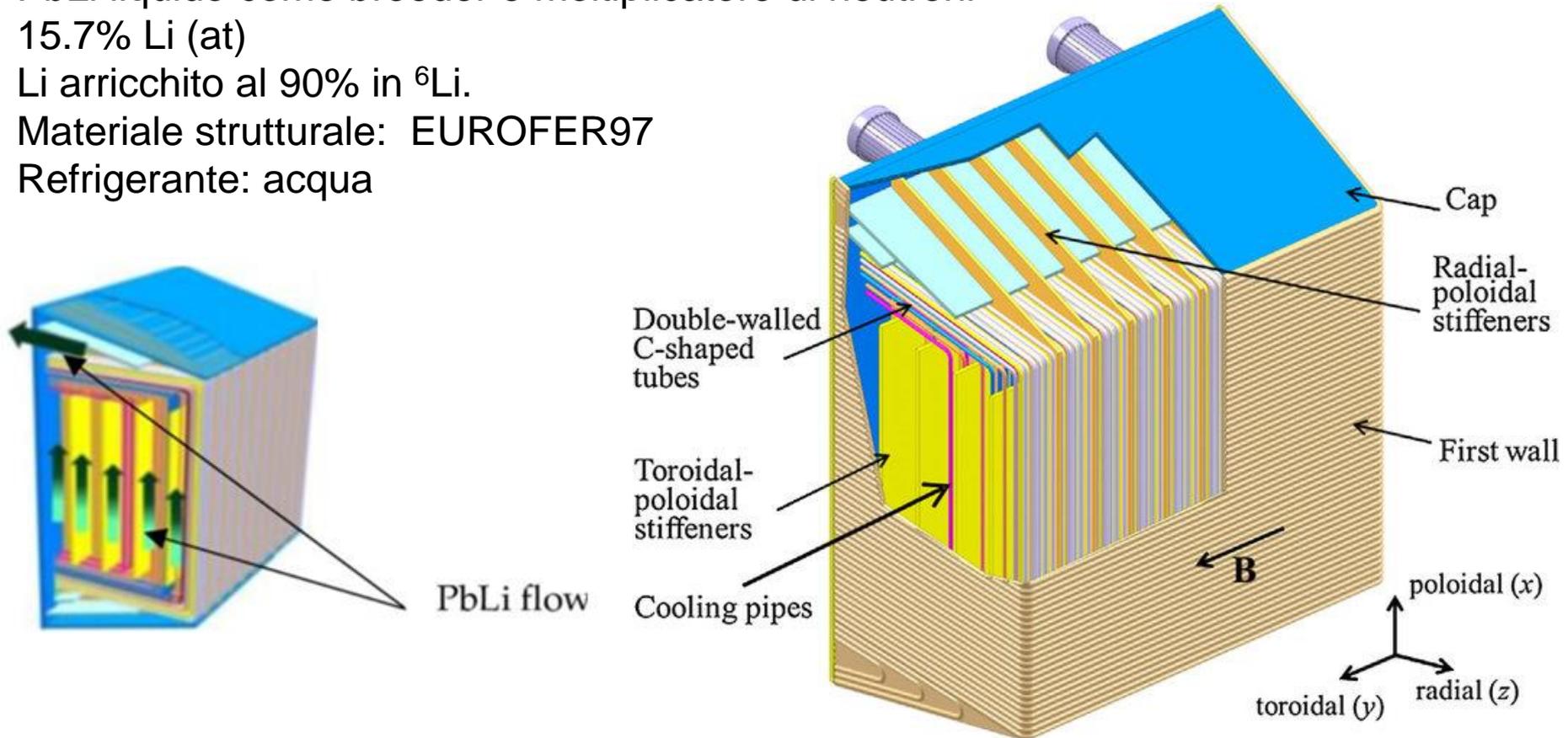
PbLi liquido come breeder e moltiplicatore di neutroni

15.7% Li (at)

Li arricchito al 90% in ${}^6\text{Li}$.

Materiale strutturale: EUROFER97

Refrigerante: acqua



La produzione di trizio

Mantello “Helim Cooled Pebble Bed (HCPB)”

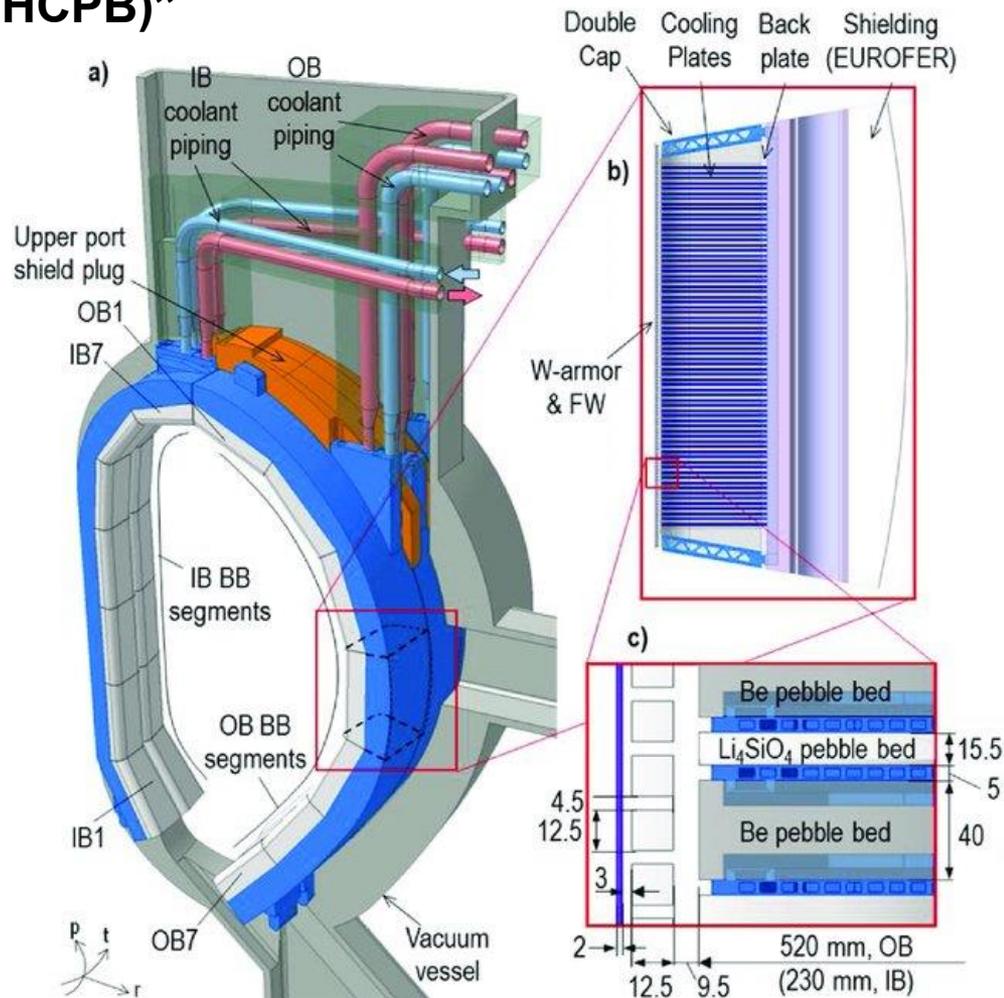
Li_4SiO_4 breeder

Be moltiplicatore di neutroni

Li arricchito al 40% in ^6Li .

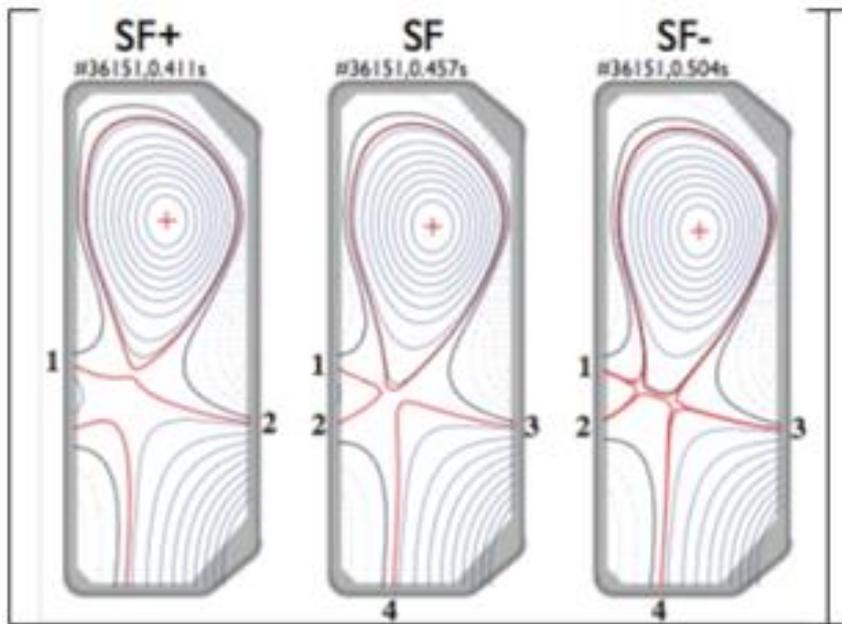
Materiale strutturale: EUROFER97

Refrigerante: He

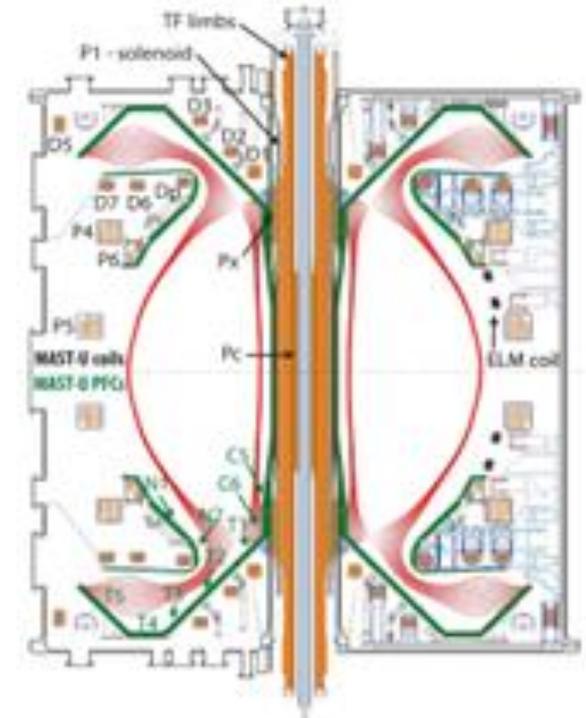


Smaltimento del calore

- Divertore di DEMO: fino a 60MW/m^2 (~ come sulla superficie del Sole)
- La soluzione adottata per ITER potrebbe non essere sufficiente per DEMO
 - ✓ sviluppo di regimi altamente radiativi → maggiore potenza persa per radiazione
 - ✓ Maggiore superficie “bagnata” sul divertore

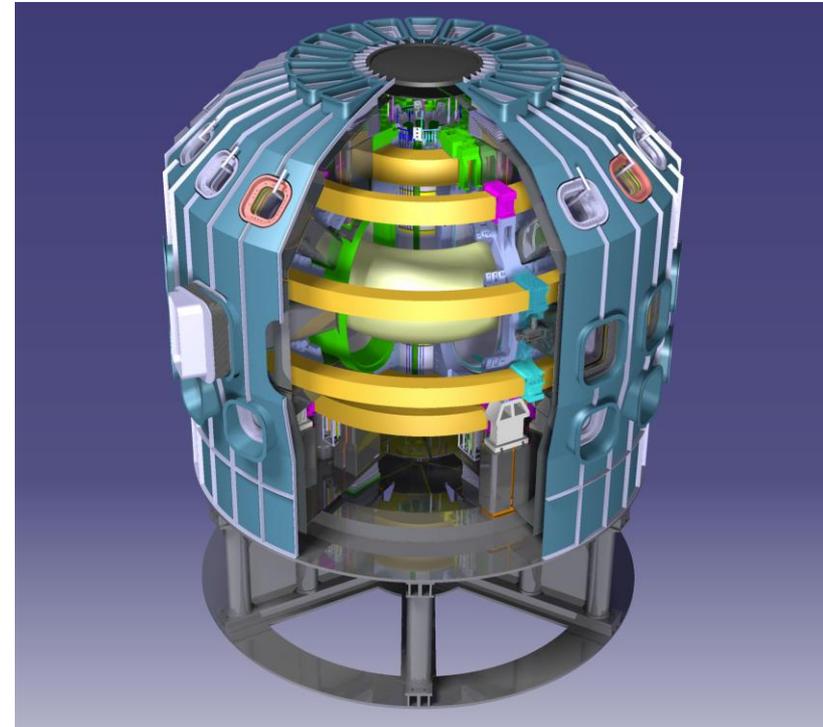


Configurazione Snowflake - TCV tokamak
EPFL Losanna - Svizzera



Configurazione Super-X - MAST-U tokamak
Culham UK

Divertor Tokamak Test facility



Sviluppo e dimostrazione di soluzioni alternative per il divertore di DEMO

	DTT	ITER	DEMO
R (m)	2.19	6.2	9.1
a (m)	0.7	2	2.93
A	3.1	3.1	3.1
I_p (MA)	5.5	15	19.6
B (T)	6	5.3	5.7
Heating P_{tot} (MW)	45	120	460
P_{sep}/R (MW/m)	15	14	17
Pulse length (s)	95	400	7600

Conclusioni

- L'Europa persegue l'energia da fusione come elemento importante del futuro mix energetico
- ITER è l'esperimento chiave della Roadmap
- In parallelo a ITER, stiamo sviluppando le tecnologie per costruire e operare un reattore dimostrativo DEMO: un'opportunità per i giovani fisici e ingegneri
- L'obiettivo è produrre elettricità da fusione intorno alla metà del secolo – e di avere le soluzioni disponibili tra 15 anni da oggi!

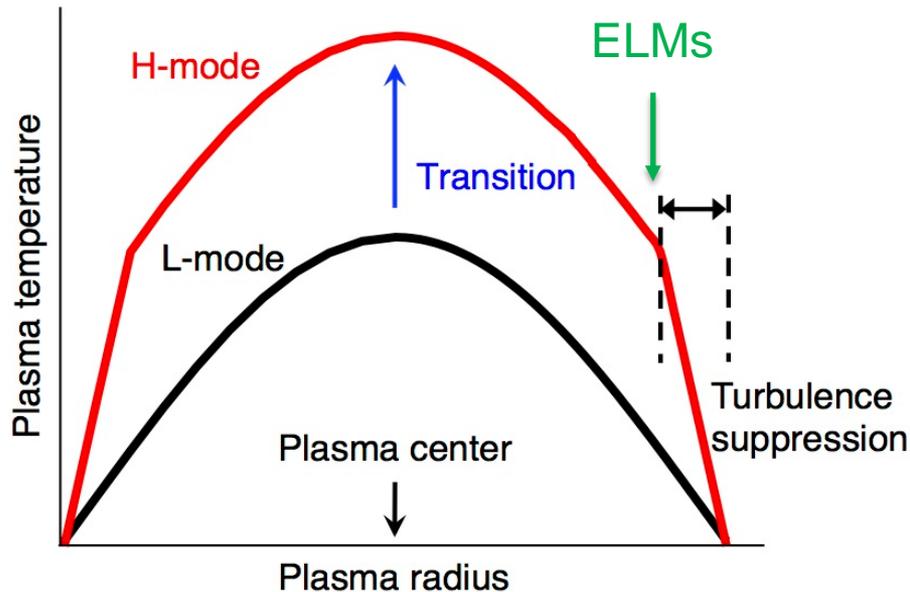
Paola Batistoni
Paola.batistoni@enea.it



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



High confinement mode (H-mode)

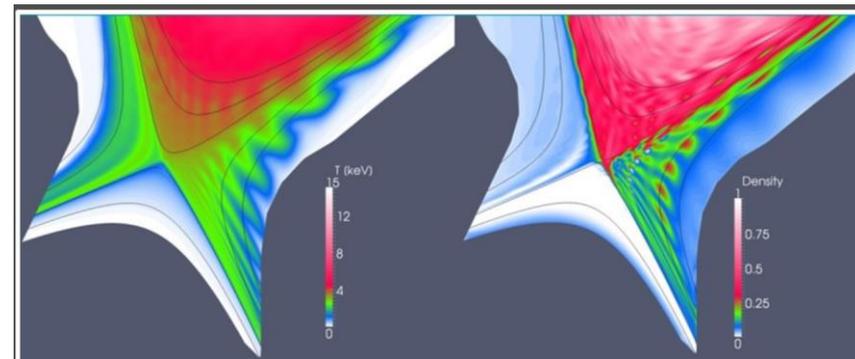


H- mode

- Stato di confinamento dell'energia migliorato grazie alla transizione verso stati auto-organizzati con la soppressione della turbolenza e la formazione di una "barriera di trasporto"

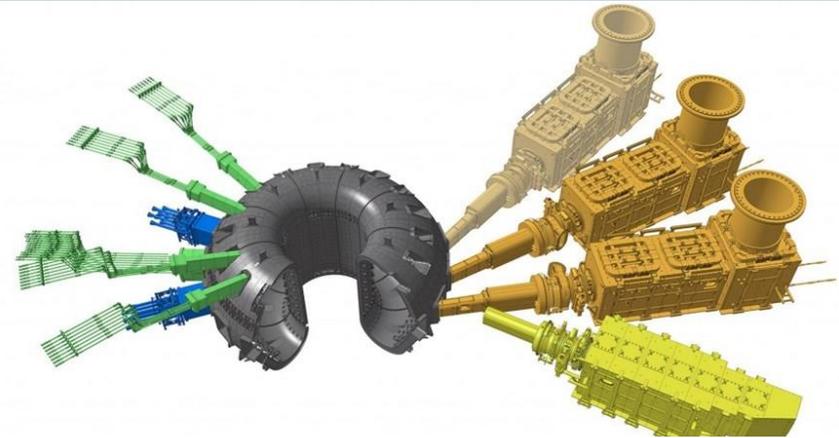
Instabilità localizzate al bordo (ELMs)

- rilassamenti periodici che causano la fuoriuscita di particelle e energia
- utili per facilitare l'espulsione delle impurità.
- benigni purché la loro ampiezza sia mantenuta sufficientemente piccola



Sistemi di riscaldamento

2 (3) Neutral beam injectors
16.5 MW each, $E_b = 1$ MeV



Ion resonance heating (ICRH)
2 antennas, 10 MW, 40 to 55 MHz

Electron resonance heating (ECRH)
20 MW, 170 GHz

