

La fusione nucleare: mito o realtà ?

Quando studiate qualsiasi argomento o considerate qualsiasi filosofia, chiedetevi solo quali siano i fatti e qual è la verità che i fatti dimostrano. Non lasciatevi mai distrarre da ciò che pensate avrebbe effetti sociali benefici se fosse creduto, ma guardate solo ed esclusivamente a quali sono i fatti.

Bertrand Russell

Il mondo delle favole

IAEA Director General, **Rafael Mariano Grossi**: la fusione è a portata di mano, non è più un'iniziativa utopica e lo si riscontra dall'interesse mostrato dal settore privato

U.S. Energy Secretary **Jennifer Granholm**: The Biden administration hopes to create a commercial nuclear fusion facility within 10 years as part of the nation's transition to clean energy.

Claudio De Scalzi (ENI): Ci vogliono almeno 4-5 anni di realizzazione per fare un reattore; sui costi per adesso è un po' arduo dirlo, però per 500 MW potrebbero volerci circa 2 miliardi per il primo, e se va tutto bene il 2027-2028. Un progetto completo è già stato definito [ARC]. Stiamo già investendo nell'impianto commerciale che potrà dar luogo a una serie nel 2031-2032...

«L'Italia è all'avanguardia sulla fusione nucleare» Lo ha detto **Giorgia Meloni** alla COP29: ma è una tecnologia che non si potrà usare prima del 2050, troppo tardi per il contrasto del riscaldamento globale

Ministro **Pichetto Fratin**: "Ipotesi fusione nucleare entro il 2045" (2 luglio 2024)

Venezia si candida a ospitare una centrale nucleare a fusione di nuova generazione pensata da Eni grazie al suo nuovissimo brevetto sui campi magnetici», ha detto il 21 marzo 2022 il sindaco di Venezia, **Luigi Brugnaro**.

Xi Jinping: "Our NEW Artificial Sun will DESTROY America and Saudi's Oil Empire" 25 mar 2025

Song Yuntao, vicedirettore dell'Istituto di Fisica del Plasma a Hefei: "Five years from now, we will start to build our fusion reactor, which will need another 10 years of construction. After that is built, we will construct the power generator and start generating power by around 2040".

Niente di più facile che fare dichiarazioni del genere, soprattutto di fronte a un sistema mediatico che non impara mai a prendere con le molle le millanterie di scienziati politicamente astuti ed esperti a imbonire i media con le loro notizie false, ma sempre entusiasmanti. Il mito della fusione nucleare come sorgente di energia abbondante, sicura, pulita, a basso costo imperversa da 70 anni nella narrazione mediatica, eppure continua a far presa.

La fusione su piccola scala: gl'inizi

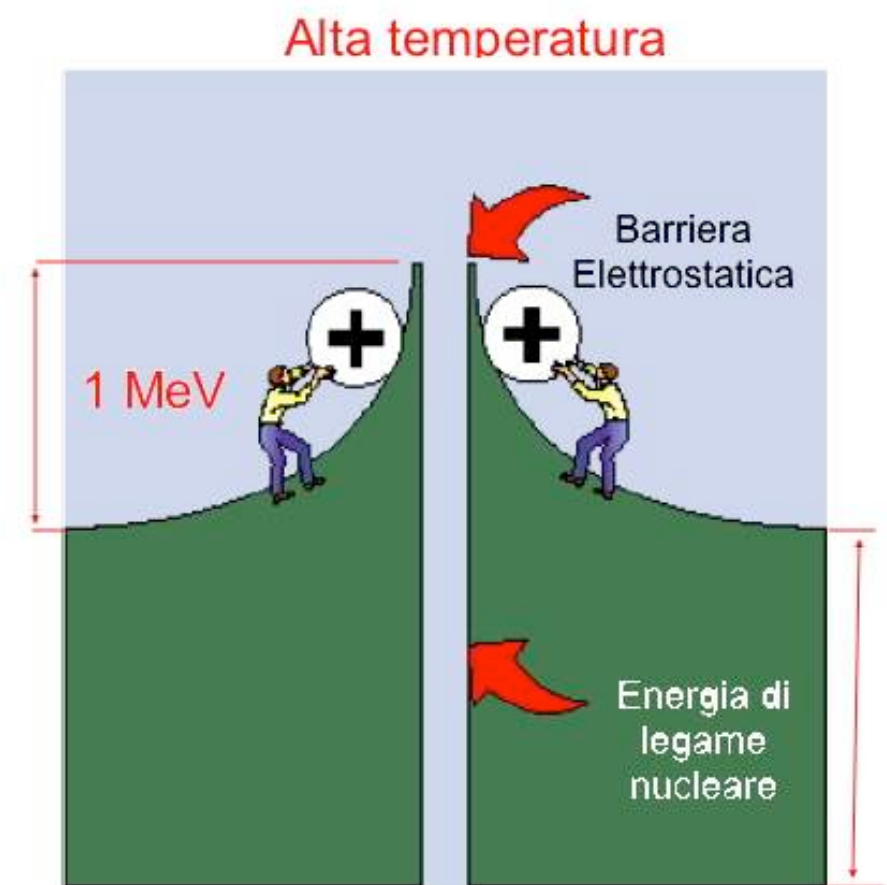
1920: le osservazioni astronomiche indicavano la fusione di nuclei d'idrogeno in un nucleo di elio come sorgente dell'energia solare.

Ma c'era un grosso problema:

Le cariche elettriche concordi dei nuclei si respingono creando una barriera che può essere superata solo da nuclei molto energetici, ossia molto caldi, fino a distanza così piccole che le forze nucleari prevalgono sulla repulsione elettrostatica

Nel caso della fusione dell'idrogeno, l'altezza della barriera equivale a 11.8 miliardi gradi °C, ma la temperatura al centro del sole è soltanto 15.7 milioni °C!

Nella fisica classica la fusione sarebbe semplicemente impossibile!



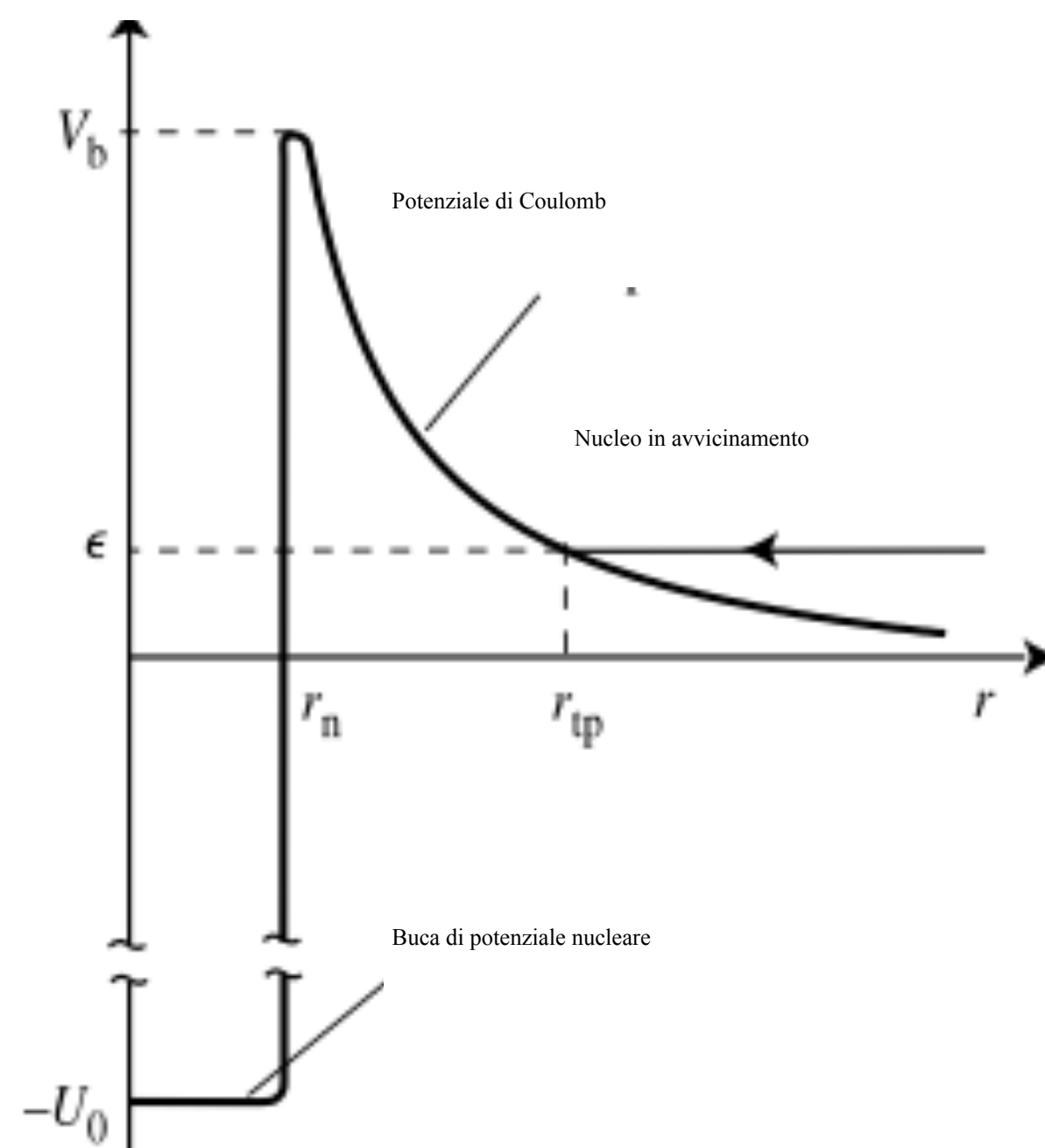
L'effetto tunnel quantistico (1928)

L'energia può fluttuare molto se il tempo di reazione è breve

$$\Delta\epsilon \approx \hbar/\Delta t$$



George Gamow (1904–1968)



La teoria fu verificata nel 1932 a Cambridge nella reazione $p + {}^7\text{Li} \rightarrow 2 {}^4\text{He}$

Ma successivi esperimenti (1935) dimostrarono che la fusione ottenuta bombardando un bersaglio con nuclei accelerati non era praticabile per produrre energia abbondante in modo efficiente, quasi tutta l'energia del fascio andava perduta eccitando gli atomi

Efficienza di fusione 10^{-6} %. $\sigma_n / \sigma_e \approx 10^{-8}$

La fissione partì dopo...ma arrivò prima

E. Fermi (1934): osservazione di trasmutazioni nucleari indotte da neutroni

Otto Hahn (1938): scoperta della fissione dell'uranio

Lise Meitner (1939): interpretazione corretta delle osservazioni di Hahn

E. Fermi (1942): prima realizzazione della fissione controllata (Chicago Pile-1)



Lise Meitner (1878-1968)



Otto Hahn (1879-1968)



Enrico Fermi (1901-1954)

La fusione su grande scala: le stelle

Le 4 forze fondamentali:

Gravità $\alpha_G \approx 10^{-45}$

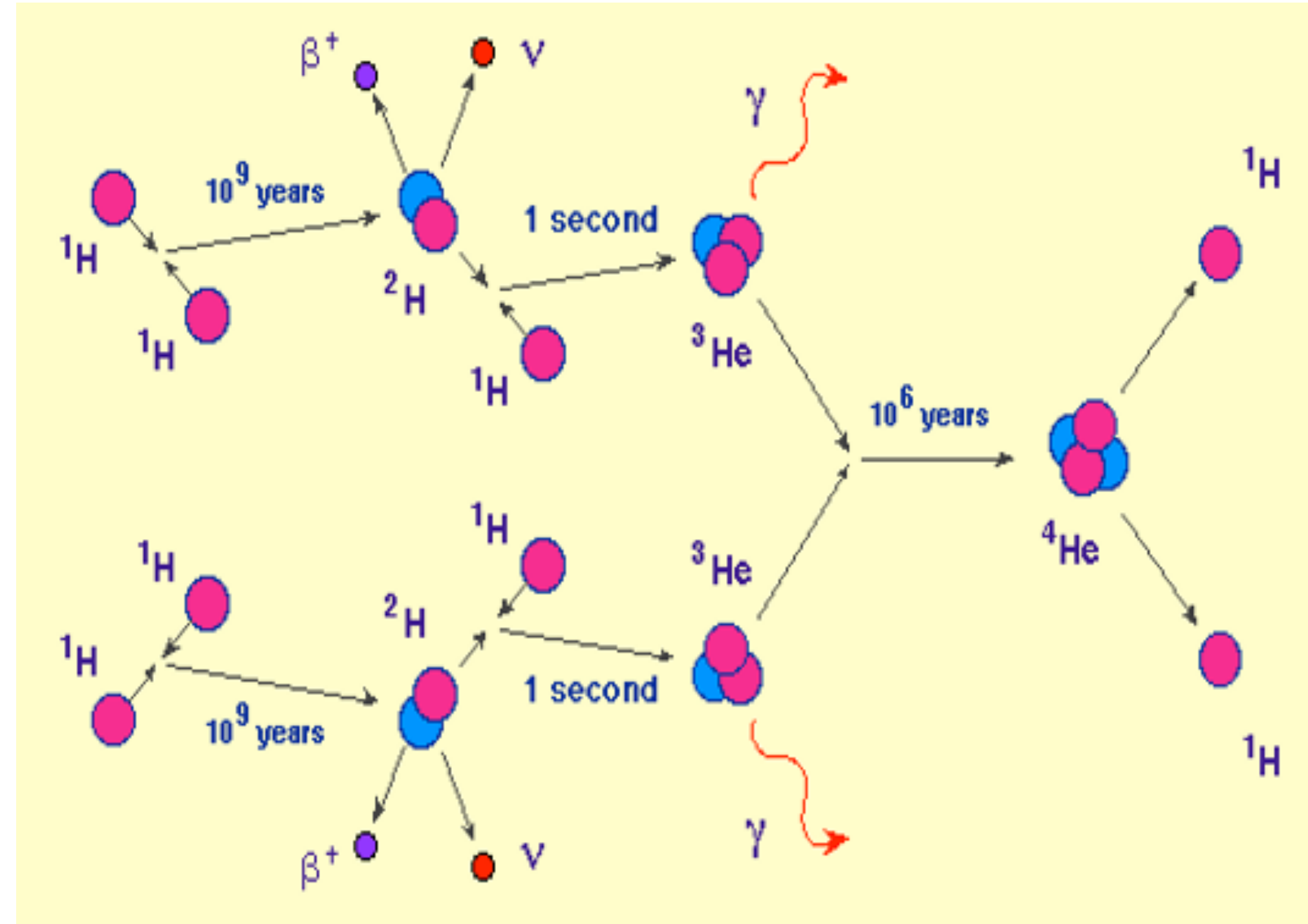
Nucleare debole $\alpha_W \approx 10^{-6}$

Elettromagnetica $\alpha_C \approx 1/137$

Nucleare Forte $\alpha_S \approx 1$



Hans Bethe



Il ciclo di Bethe (1938): $1\text{H} + 1\text{H} + 1\text{H} + 1\text{H} \rightarrow 4\text{He} + 26.7 \text{ MeV}$

Energia specifica prodotta nel nucleo del Sole = 0.018 W/Kg

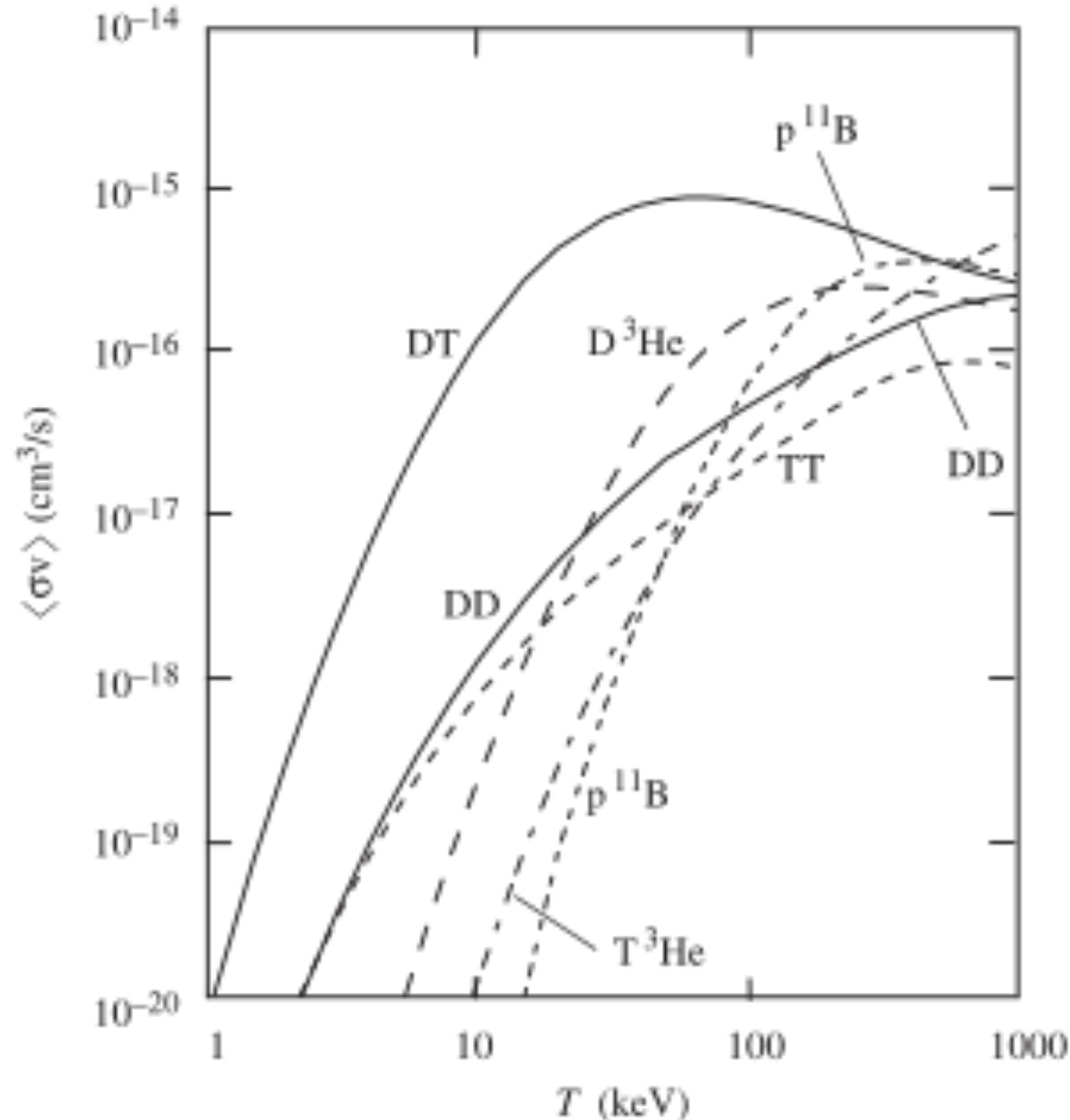
Energia prodotta dal corpo umano = 70 – 870 W

Siamo almeno 50 volte più energetici del Sole!

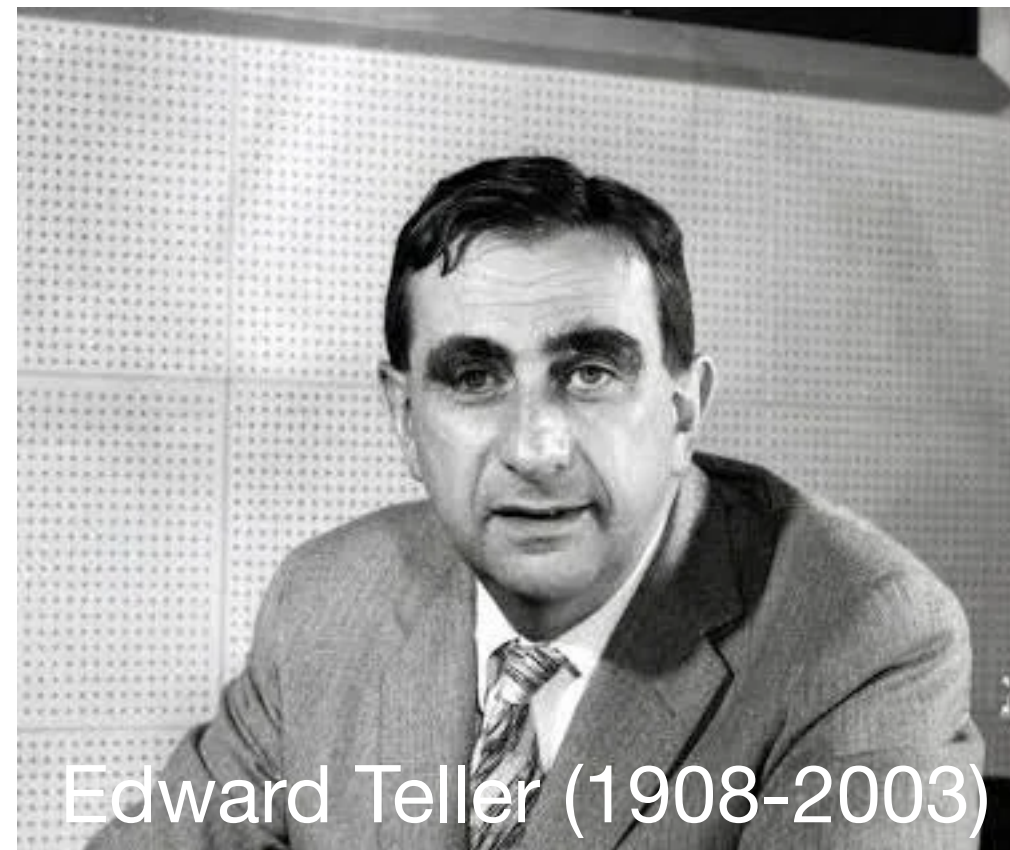
**Sulla terra è possibile solo usare le forze nucleari
“forti” per realizzare la fusione nucleare controllata**

La corsa agli armamenti del dopoguerra s'interessò anche alla fusione

**Deuterio-Trizio: $^2\text{H} + ^3\text{H}$
 $\rightarrow ^4\text{He} + n + 17.6 \text{ MeV}$
il combustibile migliore**



USA : Teller-Ulam design
Bomba mista fusione-fissione
Energia in gran parte da fusione
di U-238 da neutroni veloci
Atollo di Bikini (1954), 15 Mton



Edward Teller (1908-2003)

Progetto Matterhorn
Princeton (NJ): ricerca sulla fusione
a carattere militare; invenzione
dello Stellarator)

URSS: Tsar Bomba
Bomba a 3 stadi
Novaja Zemlja (1961), 50 Mton



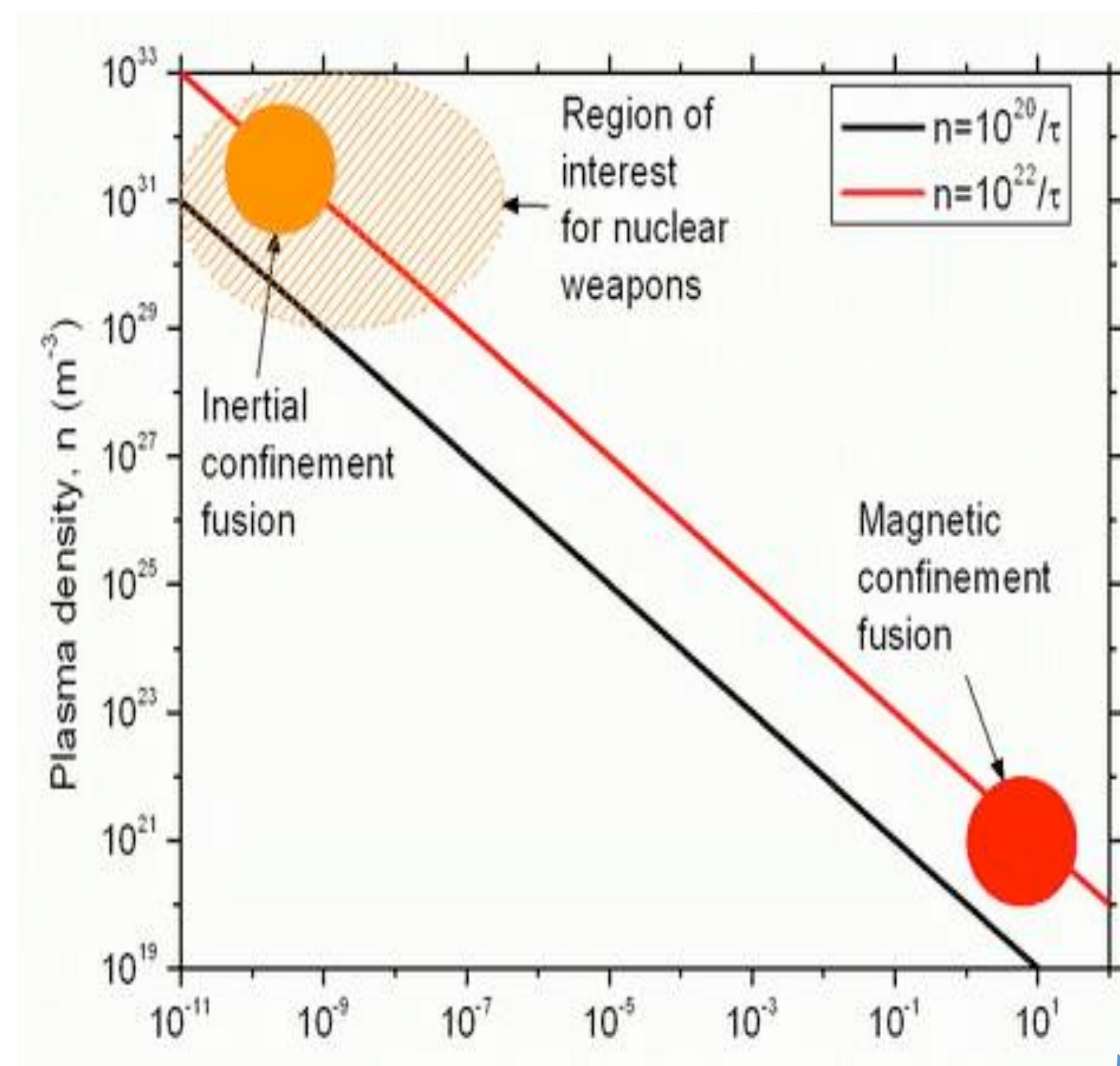
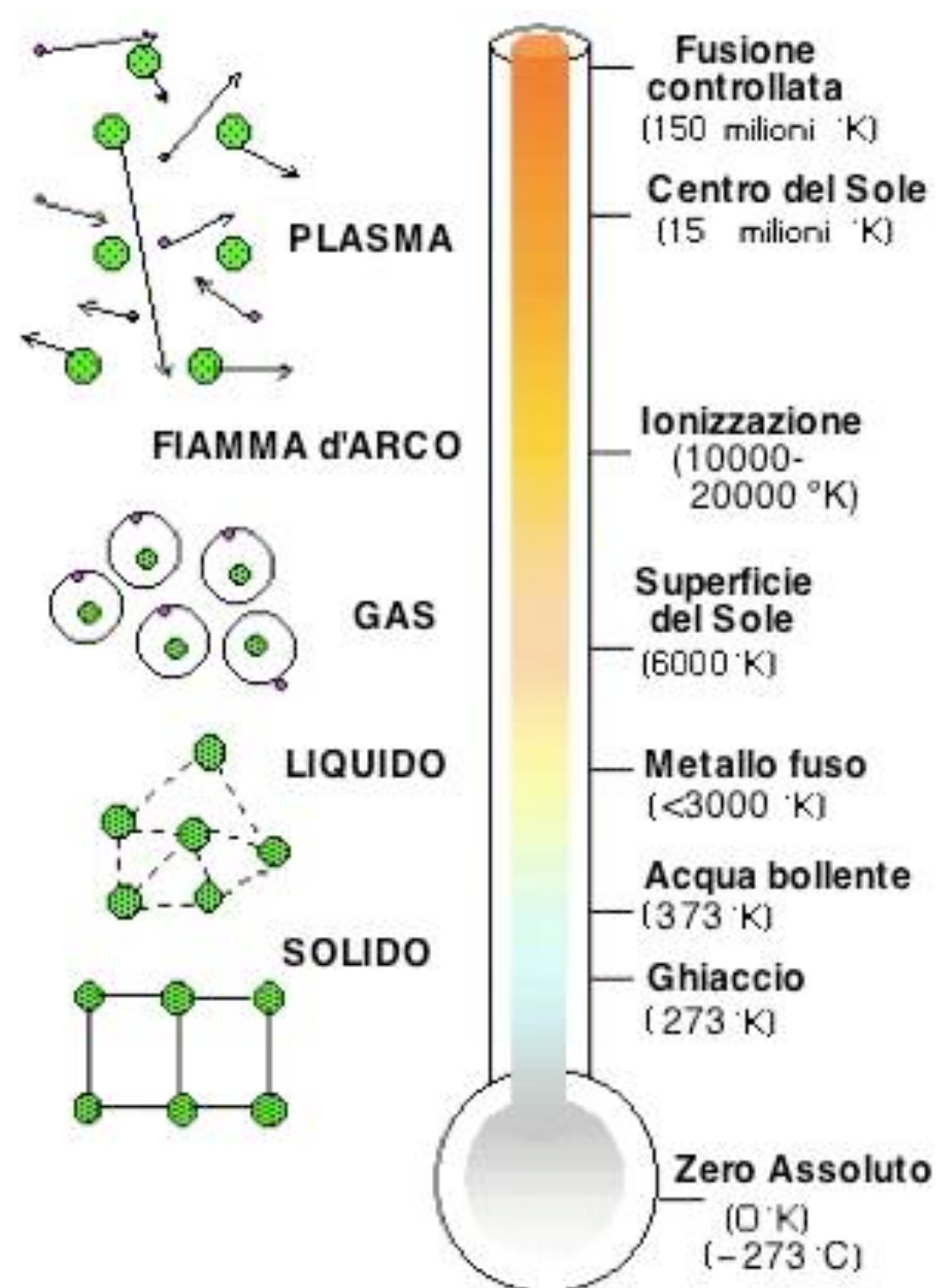
Andrej Sacharov
(1921-1989)

Invenzione del
Tokamak (1951)

Il plasma è la forma in cui si presenta il combustibile per la fusione nucleare

Sulle stelle: ok, ma sulla terra, come isolare una quantità di materiale caldissimo dall'ambiente?...

Un plasma è un gas quasi neutro formato da particelle cariche e neutre che mostra un comportamento collettivo.



CONFINAMENTO MAGNETICO

Plasmi a bassa densità

$\sim 2 \cdot 10^{14}$ nuclei/ cm^3 (1/100'000 rispetto alla densità dell'aria!)

confinati tramite campi magnetici per oltre 1 sec

CONFINAMENTO INERZIALE

Plasmi di altissima densità

~ 1000 g/ cm^3 (1000 volte la densità dell'acqua)

Per tempi dell'ordine del decimiliardesimo di secondo

La fusione a confinamento magnetico: il tokamak

1968: prime reazioni di fusione osservate in URSS

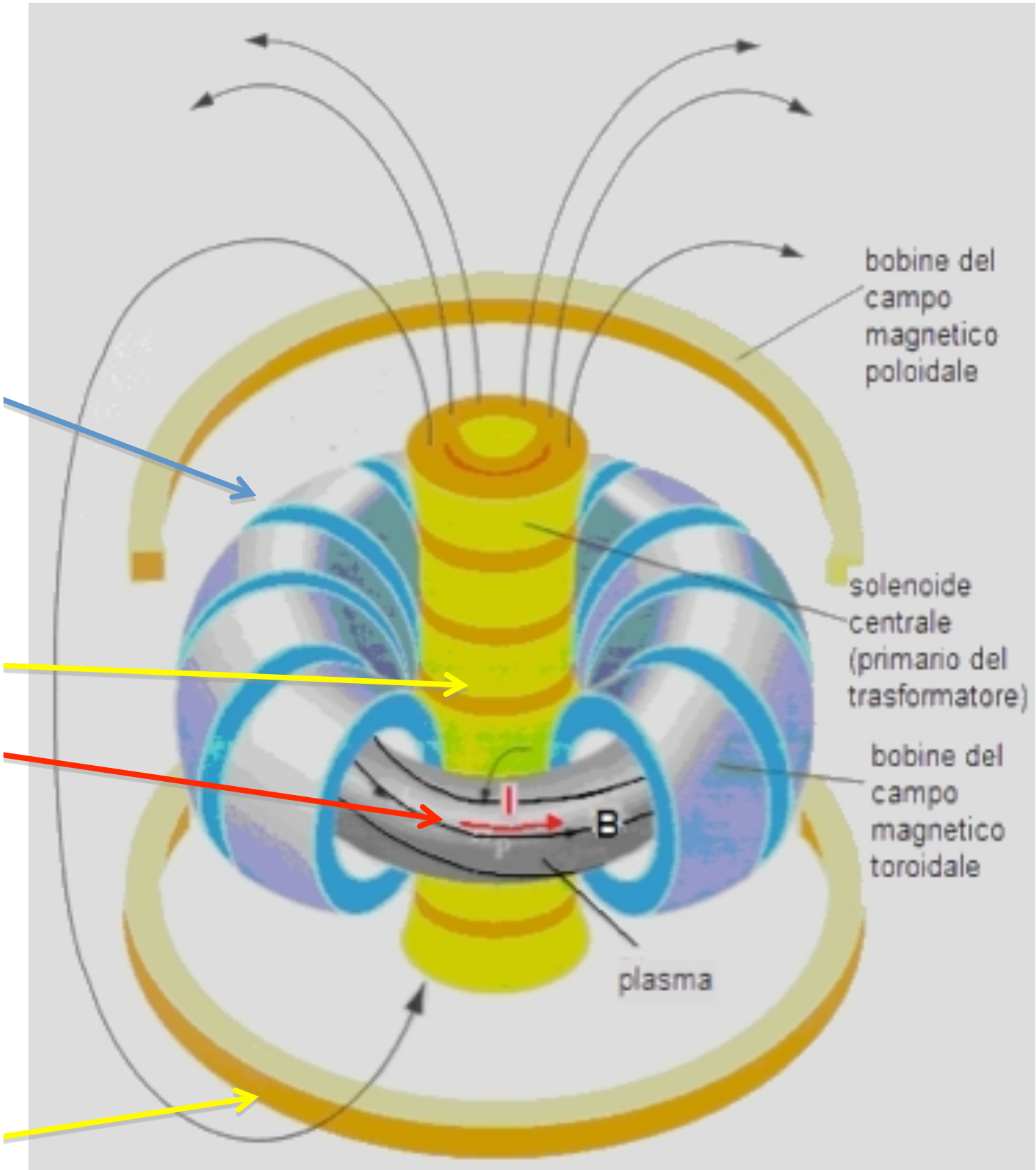
Il criterio di Lawson
 $nT \tau_E > 1.5 \times 10^{21} \text{ keV} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-3}$

Il tokamak funziona come un trasformatore

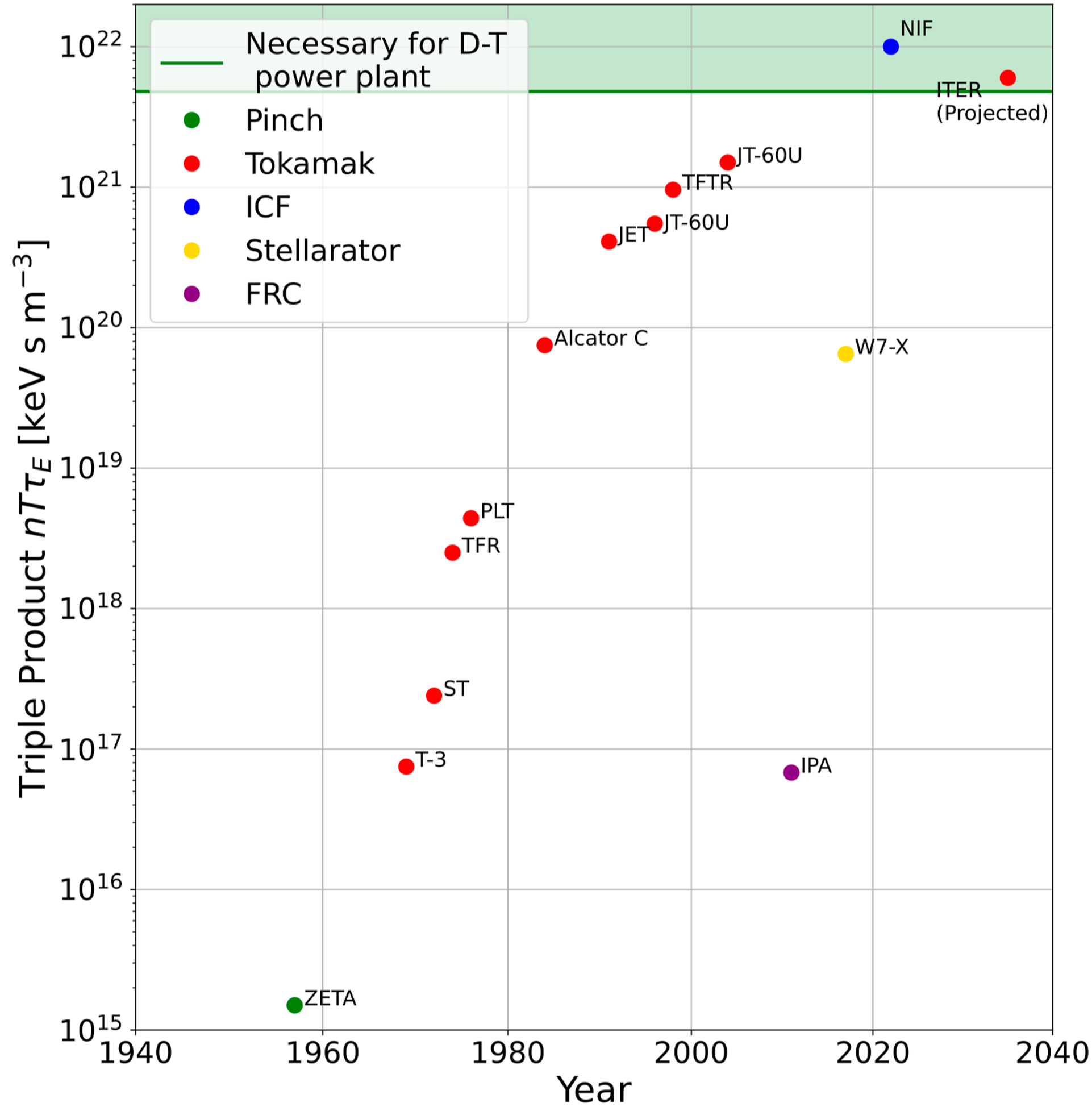
Il campo magnetico toroidale è prodotto da bobine avvolte attorno all'anello di plasma

Il solenoide centrale induce una corrente che genera il plasma e lo scalda per effetto Joule

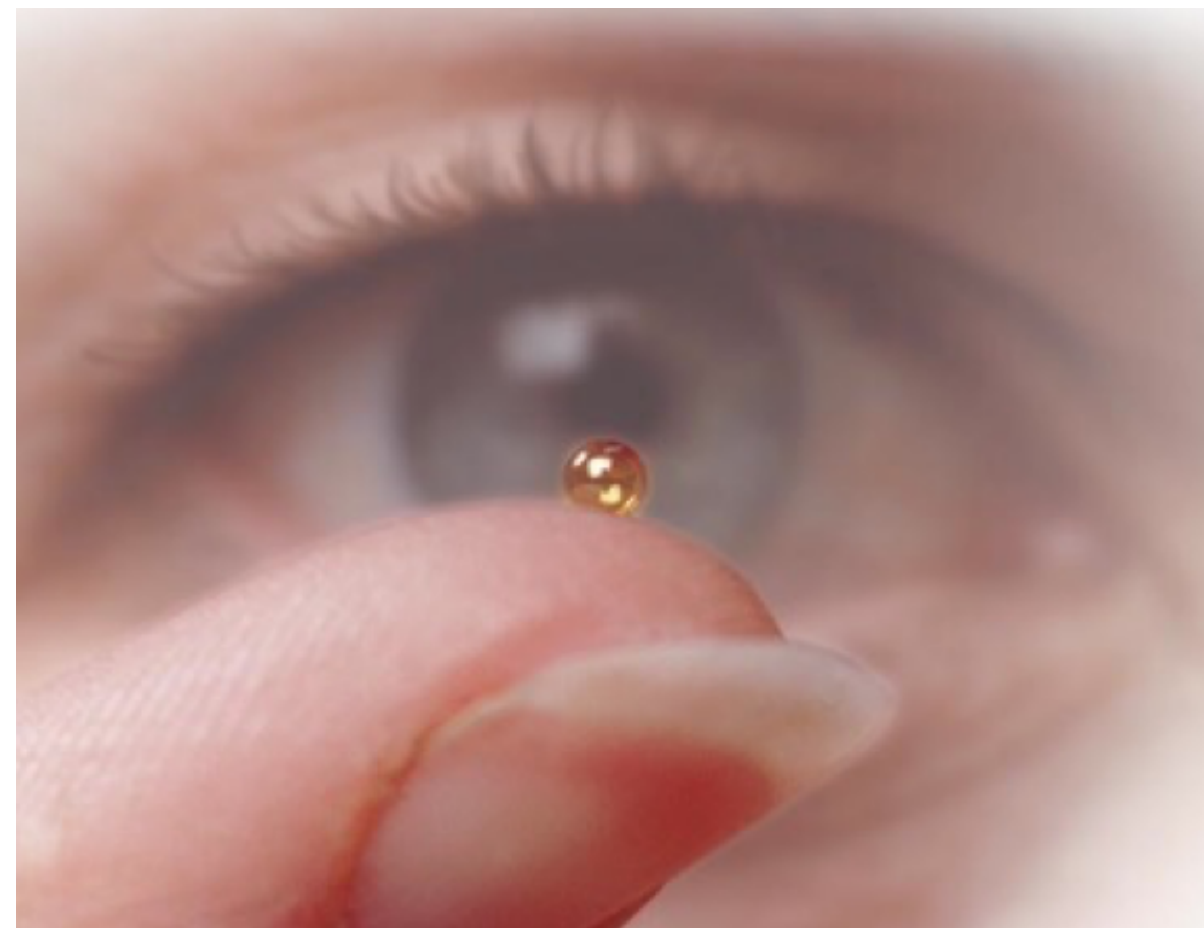
Altre bobine magnetiche controllano la posizione del plasma



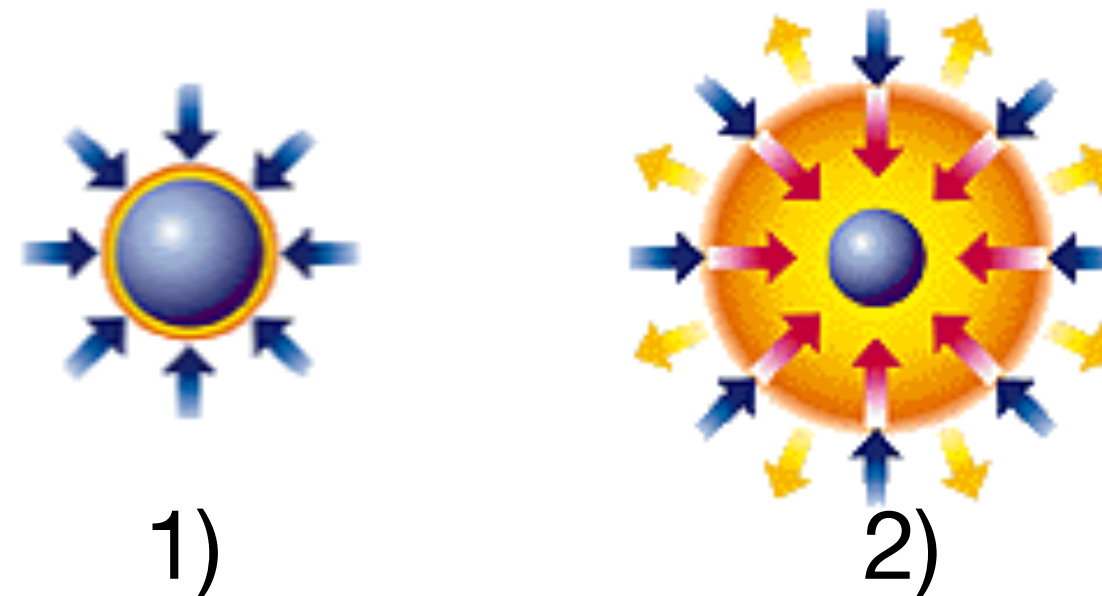
Il progresso del tokamak



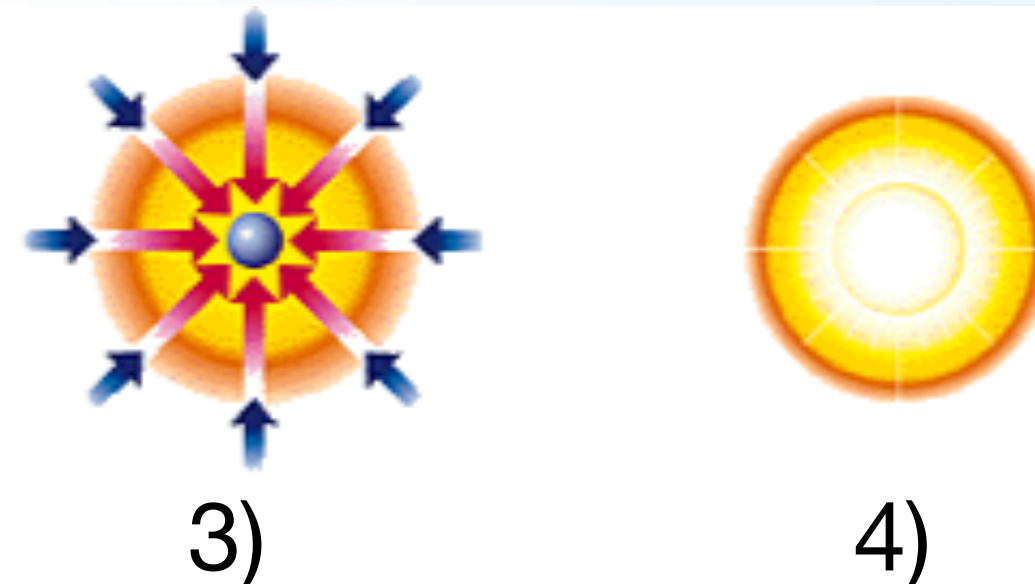
Il confinamento inerziale



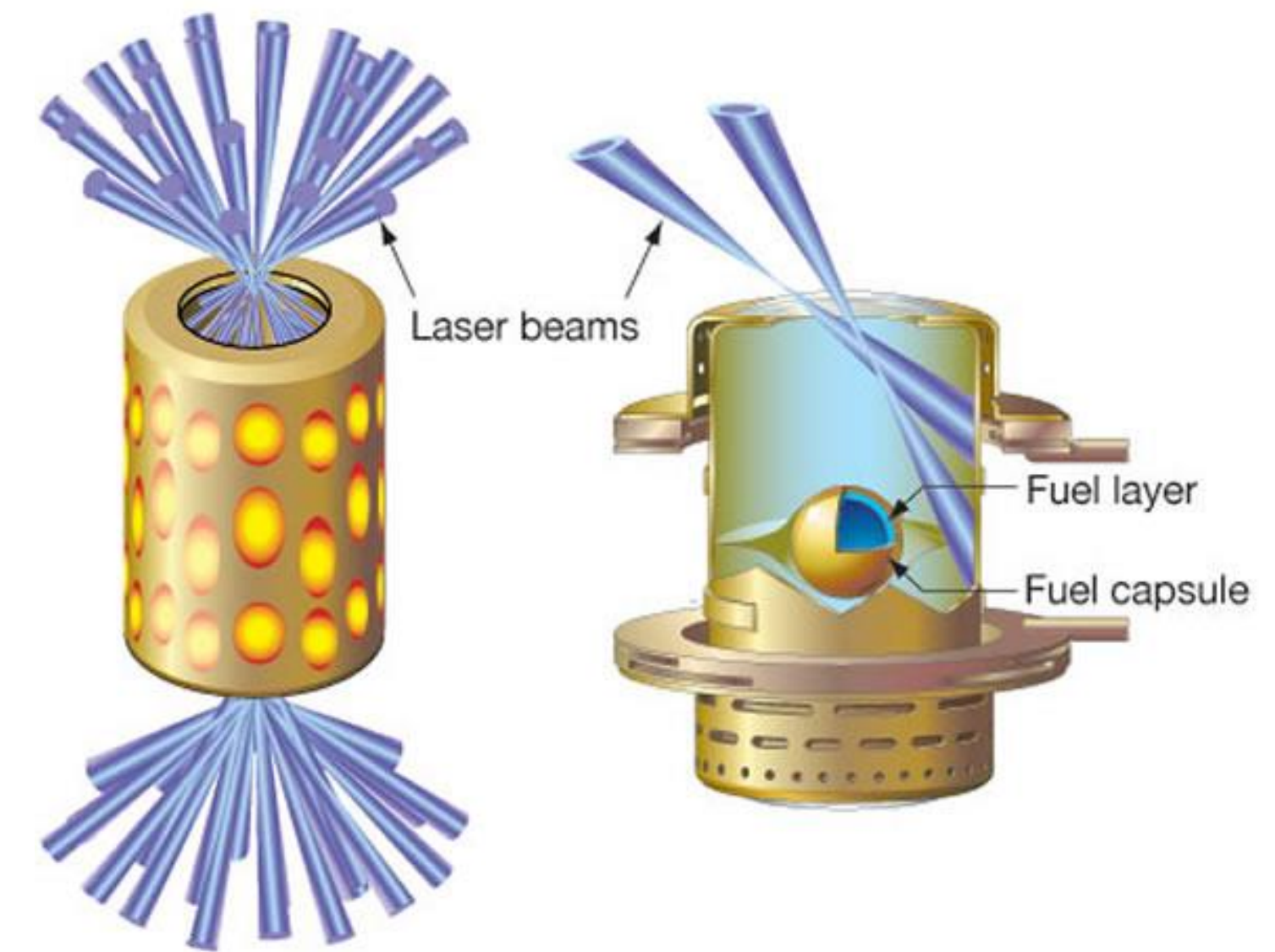
La pallina con pochi mg di una
mistura D-T
Viene irradiata da tutte le direzioni
con fasci laser di grande potenza di
picco



1) Riscaldamento rapido della superficie
esterna
2) Ablazione rapida della superficie e
conseguente implosione e compressione del
materiale del nucleo



3) Il nucleo raggiunge densità 20 volte maggiori
di quella del piombo e temperature di 100 milioni
di gradi, dando luogo a ignizione
4) la reazione nucleare innescata interessa tutto
il materiale contenuto nella pallina, sviluppando
una grande quantità d'energia

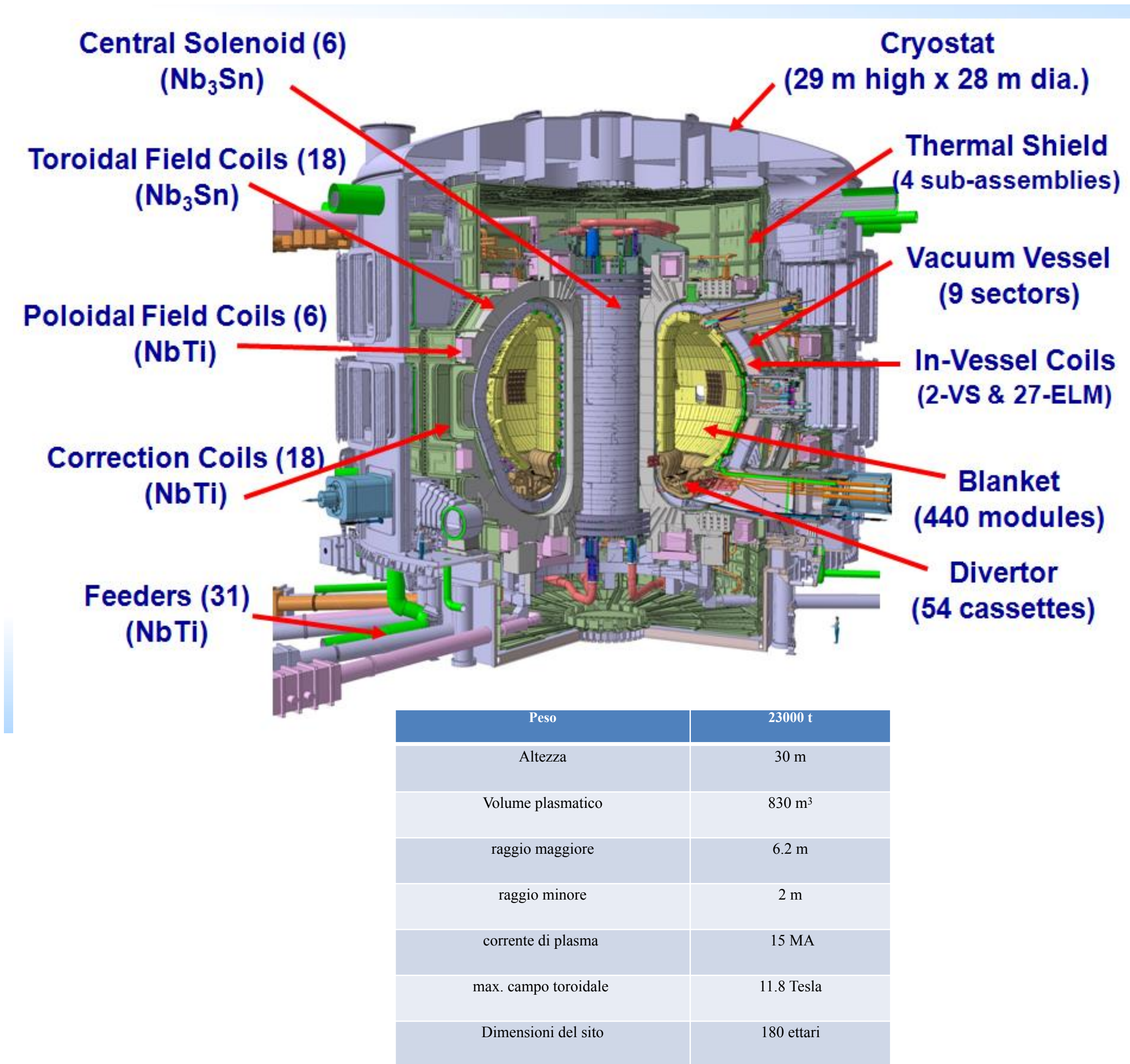


*All of the energy of NIF's 192 beams is
directed inside a gold cylinder called a
hohlraum, which is about the size of a
dime. A tiny capsule inside the
hohlraum contains atoms of deuterium
and tritium that fuel the ignition
process.*

NIF: metodo indiretto,
Produzione di raggi X
192 fasci Laser UV 351 nm
Potenza di picco 500 TW
Durata dell'impulso qualche psec
Fino a 400 MJ/pulse

ITER (1988 -): una moderna Torre di Babele?

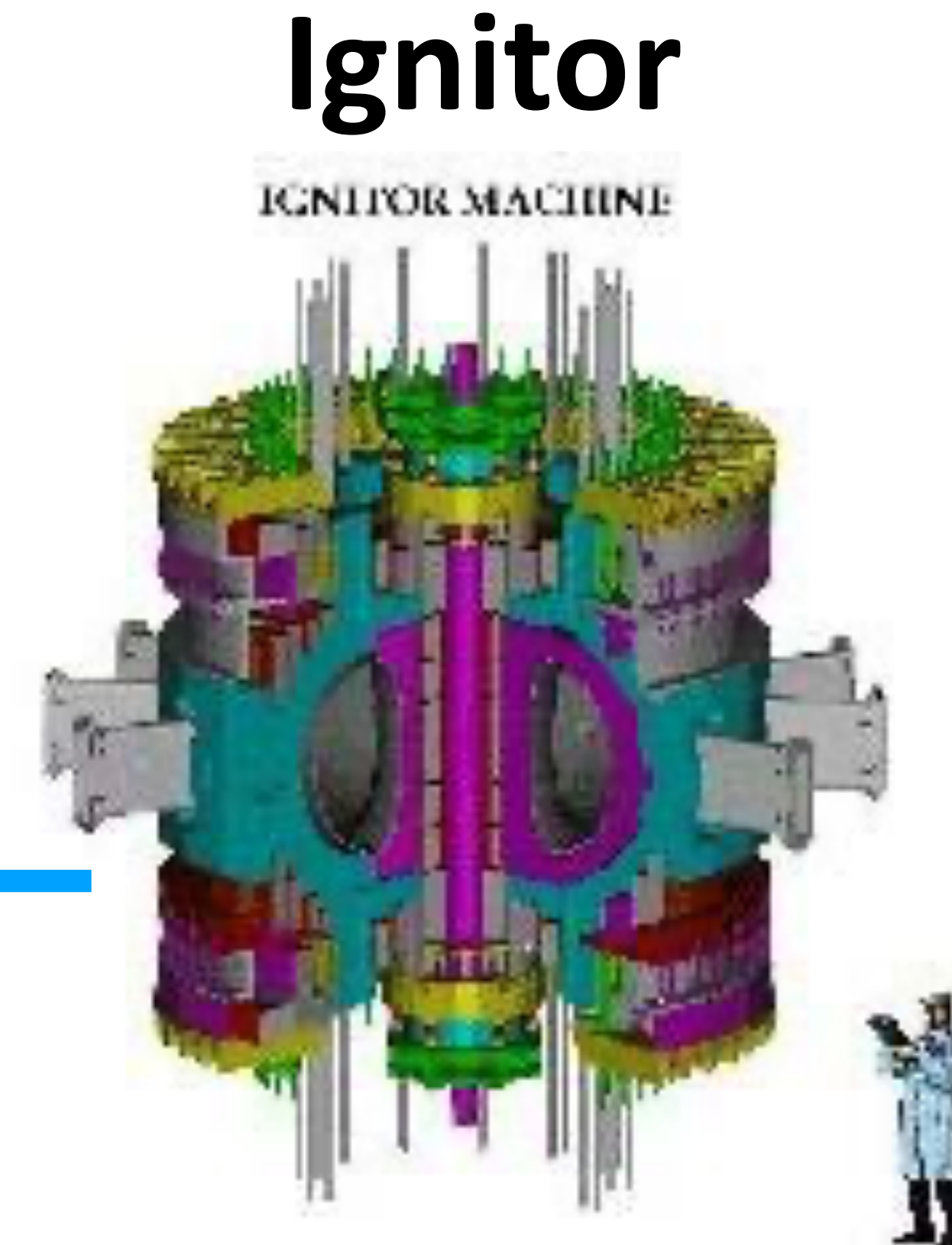
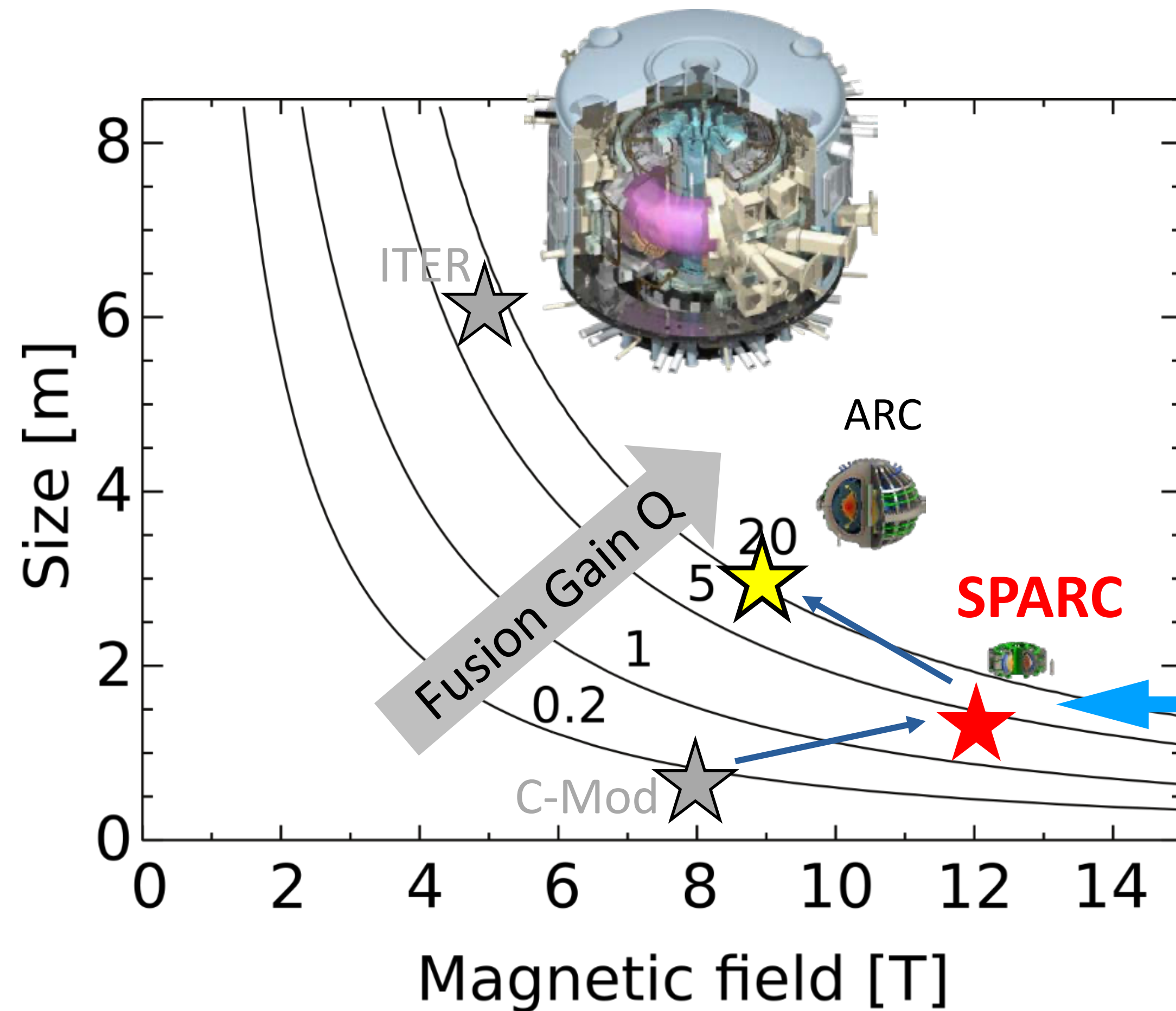
Successore del JET (1978-2023) - Costi enormi: da 5 iniziali a 45 G€ - Tempi dilatati di 15 anni



1. ITER è troppo grande. Un impianto di potenza basato su ITER sarebbe 60 volte più massiccio di un reattore convenzionale a fissione. E questo solo per il nucleo. Inoltre l'impianto avrebbe bisogno di un sistema di vuoto, criogenico, di trattamento e recupero ambientale
2. È troppo complesso. La macchina ha circa un milione di componenti. È inimmaginabile il costo di fare manutenzione e riparazione su una macchina del genere.
3. ITER costa troppo, e qualunque impianto di potenza può essere anche più costoso.
4. ITER ha già ampiamente sfiorato la tempistica di realizzazione, e di decenni. Qualunque cosa possa fare la fusione in futuro, non potrà certo contribuire ad abbattere le emissioni climalteranti. Semplicemente arriva troppo tardi.
5. ITER non è sicuro. ITER ha due problemi gravi di sicurezza: scariche nel plasma e quenching dei magneti superconduttori, che può causare surriscaldamento e fusione di componenti del reattore. Per non parlare di problemi di attivazione di materiali e dell'uso di combustibile radioattivo.
6. ITER necessita di nuove tecnologie. Nessun materiale solido può ragionevolmente resistere quando ITER dovesse funzionare in stato stazionario, perchè, ad es., l'elio caldo prodotto dalla fusione può essere assorbito dalle pareti, provocando bolle nel metallo.

I reattori piccoli ma ad alto campo magnetico, grazie ai superconduttori ad alta temperatura critica: arriveranno prima di ITER?

Obiettivo: l'ignizione del plasma, ossia $Q = P_{\text{out}}/P_{\text{in}} \rightarrow \infty$



Confinamento inerziale: risultati del 2022-2025

Discussione critica

Grande risultato dell'esperimento NIF

5 dicembre 2022: prodotti 3.15 MJ da fusione
a fronte di 2.05 MJ di energia del laser: $Q \approx 1.5$



- efficienza elettrica del laser 0.5%, il Q reale solo 0.012
- spara un colpo solo una o due volte al giorno
- che frazione dell'energia prodotta può essere effettivamente trasferita alla rete? non si sa
- Il bersaglio ~ 10.000 US\$, settimane a produrlo e ore a posizionarlo

Come dovrebbe essere una centrale da 1 GW?

- ipotesi realistica 100 MJ prodotti per impulso:
- aumentare la frazione di D-T "bruciata" (ora 7%)
- aumentare l'efficienza del laser di un fattore 100 almeno
- 10 impulsi al secondo
- 10 bersagli prodotti e posizionati al secondo
- Costo dell'energia: 1.000 US\$/MJ !!

Costo di esercizio di una centrale a gas 0.020 US\$/MJ

Nessuna tecnologia esistente è al momento in grado di migliorare significativamente queste cifre

Ma si è accuratamente evitato di dire che l'impulso del laser è "costato" ben 400 MJ

Il Trizio, il combustibile che non c'è

Isotopo dell'idrogeno $A=3$, vita media= 12 anni, inesistente in natura

Prodotto dal deuterio per cattura neutronica nei reattori moderati ad acqua pesante (CANDU)

Costoso: 30.000-100.000 US\$/g

Inventario attuale: 30Kg

Reattore da 2 GW termici $\approx$ 800 MW elettrici: consuma 150 Kg/anno!

Rigenerazione del trizio nel *blanket* del reattore a confinamento magnetico: $n + {}^6\text{Li} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{T}$

Efficienza massima teorica 115%, ma:

Solo il 10% del Trizio immesso viene “bruciato”

Il resto va estratto dai gas di scarico e dalle pareti del reattore e re-iniettato 10-20 volte prima di venir completamente utilizzato

L'esperienza (JET, TFTR) insegna che il 10% non è mai recuperato

I reattori a confinamento inerziale usano solo 0.25 mg/impulso

Per questo hanno sperimentato il D-T *ab initio*

e così hanno visto che la realtà era un fattore 1000 al di sotto delle simulazioni e ci sono voluti oltre 10 anni per di lavoro per ottenere un risultato accettabile.

Si potrebbero usare capsule contenenti solo deuterio e usare il trizio generato internamente, ma è solo una vaga ipotesi

La fusione nucleare è sostenibile?

Aspetti socioeconomici

Rigenerazione del trizio: richiede materiali, litio, berillio, piombo scarsi in natura

Contributo della fusione al mix energetico: modelli completamente fuori dalla realtà

Investimenti di centinaia di miliardi di euro, altissimi rischi tecnologici, prodotto non competitivo nella performance e nel prezzo, in quantità insignificante nel panorama globale

Costo (in conto capitale) dell'energia da fusione: \$22000/kW (ITER). Altre sorgenti (2019):

- gas/oil power plant—\$1000/kW;
- onshore wind—\$1600/kW;
- offshore wind—\$6500/kW;
- solar PV— \$1060–1130/kW (utility), \$1800–2000/kW;
- conventional hydropower—\$2680/kW;
- geothermal—\$2800/kW;
- coal—\$3500 to 3800/kW;
- advanced nuclear—\$6000/kW

Costi di esercizio: non calcolabili ora, ma il costo del trizio appare già insostenibile

L'iniziativa privata: la fabbrica delle illusioni

- **Fusion Industry Association (FIA)** nel mondo ci sono almeno 45 imprese, con approcci tecnologici molto diversi, e un finanziamento complessivo che supera i 7 miliardi dollari finora. Nel 2024 il finanziamento è cresciuto di 900 milioni. 23 hanno un approccio MCF, 9 sono da considerare ICF, 6 appartengono alla categoria fusione magneto-inerziale, 3 hanno un approccio ibrido elettrostatico- inerziale, le altre sono da considerarsi “non-tradizionali”.
- I vantaggi di un'azienda privata nei confronti di un'ente pubblico: evidente agilità di poter gestire gli aspetti burocratico-amministrativi, determinazione a raggiungere gli obiettivi nei tempi previsti, confronto continuo con le controparti (investitori e clienti).
- Nonostante l'elevato rischio finanziario associato alla fusione commerciale nella fase attuale, attrarre fondi è inevitabilmente molto più facile per le aziende private che mirano alla commercializzazione rispetto alle istituzioni pubbliche, che mirano più agli aspetti scientifici.
- Ma quale è la maturità tecnologica dei progetti delle aziende private o pubblico-private? Molto bassa, assenza di risultati sperimentali dai progetti condotti da soggetti privati, in compenso ci sono molte simulazioni e poi mancano lavori pubblicati, per ora ci sono solo reboanti proclami sul Web.
- Problemi enormi, prima di pensare di realizzare un impianto pilota: confinamento del plasma per impulsi lunghi e design della camera da vuoto e del blanket in grado di sopportare stress termomeccanici ed alte intensità di radiazione (MCF), magneti superconduttori affidabili e durevoli (MCF and MTF), laser potenti, efficienti e ad alta frequenza di ripetizione (ICF and MTF). Il problema economico poi, ossia l'efficienza energetica del reattore, è chiaramente del tutto fuori questione al livello attuale.
- Secondo il rapporto FIA, 89% delle aziende private anticipano la convinzione che la fusione fornirà energia alla rete alla fine degli anni 2030, e il 70% che questo punto di svolta potrebbe verificarsi già nel 2035. Come se, insomma, 70 anni di sforzi di scienziati e tecnologi siano stati spesi inutilmente e invece, all'improvviso, saltano fuori magicamente parecchi modi di realizzarla e in brevissimo tempo.
- **Tutto ciò non ha senso, evidentemente, e nessuna di queste affermazioni può essere presa sul serio, almeno da chi ha un minimo di conoscenza dei problemi che la realizzazione pratica della fusione comporta.**

Conclusioni

Energia illimitata, pulita, sicura, economica? Sembra proprio di no

I reattori a fusione devono affrontare alcuni grandi problemi cui le altre sorgenti energetiche non sono soggette:
mancanza di una fornitura di combustibile naturale (trizio),
grandi e irriducibili consumi di energia elettrica per ricavarne pochissima in cambio
grandi difficoltà tecniche con costi di conseguenza astronomici.

Poiché l'80 % dell'energia da fusione di deuterio-trizio appare sotto forma di flussi di neutroni, tali reattori condividono molti degli svantaggi dei reattori a fissione, tra cui la produzione di grandi masse di scorie radioattive e gravi danni da radiazioni ai componenti del reattore. Tutto ciò è indipendente dal tipo di confinamento del plasma.
Se i reattori potessero funzionare utilizzando solo deuterio allora il problema del rifornimento di trizio svanirebbe e il danno da radiazioni di neutroni verrebbe in parte alleviato, ma il deuterio esige temperature molto più elevate.

Questi impedimenti, insieme all'enorme esborso di capitale e a diversi svantaggi aggiuntivi condivisi con i reattori a fissione, renderanno i reattori a fusione molto più impegnativi da costruire e gestire rispetto a qualsiasi altro tipo di generatore di energia elettrica, se anche si riuscisse a raggiungere un alto livello di fattibilità tecnica.

Le dure realtà della fusione smentiscono le affermazioni dei suoi sostenitori di "energia illimitata, pulita, sicura ed economica", così entusiasticamente echeggiata da molti politici e giornalisti.

Lev Artsimovich, direttore del programma nucleare sovietico, così rispose a chi gli chiese quando il primo reattore termonucleare avrebbe iniziato il suo lavoro:

"Quando l'umanità ne avrà veramente bisogno, o forse un po' prima."