

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria Meccanica

Relazione per la prova finale

***«Verso l'energia da fusione nucleare: fondamenti, tecnologie e
prospettive future»***

Tutor universitario: Prof. Moro Federico

Laureando: *Meo Moreno*

Matricola: 2050156

Padova, 15/07/2026

→ Cos'è la fusione nucleare?

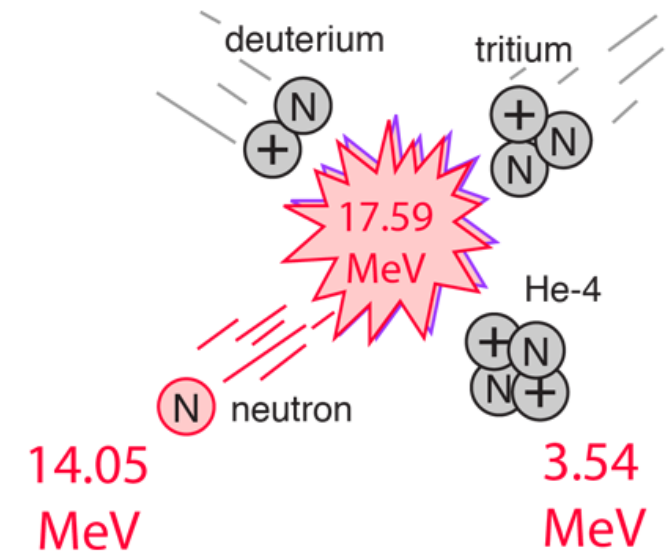
- Unione di due nuclei leggeri
 - Processo da cui è possibile estrarre energia
- $E = m c^2$

→ Perché può essere rivoluzionaria?

- Obiettivo: Rispondere ad una richiesta energetica globale in continuo aumento
- Combustibili abbondanti e potenzialmente infiniti (solitamente deuterio e trizio)
- Energia a basso impatto ambientale e a combustibile quasi inesauribile

→ Vantaggi rispetto ad altre fonti energetiche

- Più sicura rispetto alla fissione: nessuna fuga di potenza incontrollata
- Energia rilasciata è 4 milioni di volte superiore rispetto alla combustione delle materie fossili, per unità di massa
- Maggiore disponibilità energetica rispetto a fonti alternative come solare ed eolico

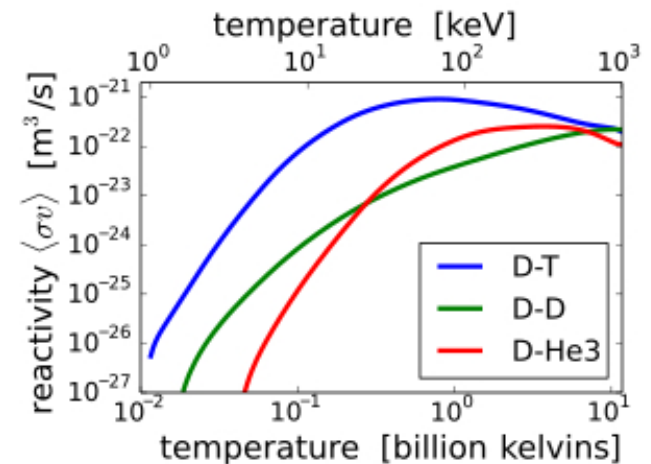


fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/NucEne/fusion.html#c7>

Combustibili

I più comunemente utilizzati sono deuterio e trizio perché presentano la sezione d'urto maggiore e rilasciano più energia rispetto agli altri isotopi. La tipologia di reagenti determina le condizioni operative.

- Deuterio (D)** : $N = 1$; è possibile estrarlo dall'acqua di mare, dove 1 m^3 ne contiene circa 33 g.
- Trizio (T)** : $N = 2$; emivita 12,3 anni, decade in elio-3. Scorta globale molto limitata (ca. 20 kg) prodotto come scarto di alcuni reattori nucleari ad acqua pesante (CANDU). Produzione in sito attraverso delle "breeding blankets", con il bombardamento neutronico del litio-6.



fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Nuclear_fusion

D-T: 70 keV (800 milioni di gradi Kelvin)

Maggior parte dell'energia è portata dal neutrone: più difficile estrarre l'energia rispetto a particelle cariche ed è dannoso per i materiali della camera di fusione.

Reagenti alternativi che non producono neutroni:	Svantaggi:
$\text{D} + {}^3\text{He} \rightarrow {}^4\text{He} + \text{p}$ (18,3 MeV)	• scarsità di ${}^3\text{He}$
$\text{p} + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3 {}^4\text{He}$ (8,7 MeV)	• $Z(\text{Boro}) = 5 \rightarrow$ forza di Coulomb elevata • meno energia per reazione rispetto a D-T

→ Come superare la barriera di Coulomb?

Tre parametri fondamentali:

1) Temperatura T

Per fare in modo che avvenga la fusione è necessaria una temperatura dell'ordine di 10 keV (per D-T).

Energia cinetica media di una particella:

$$E_k \propto k_b T$$

In queste condizioni il gas si trova sotto forma di plasma

2) Densità n

Energia cinetica elevata → particelle si allontanano rendendo improbabile le collisioni fra loro

È necessario garantire una densità sufficientemente elevata

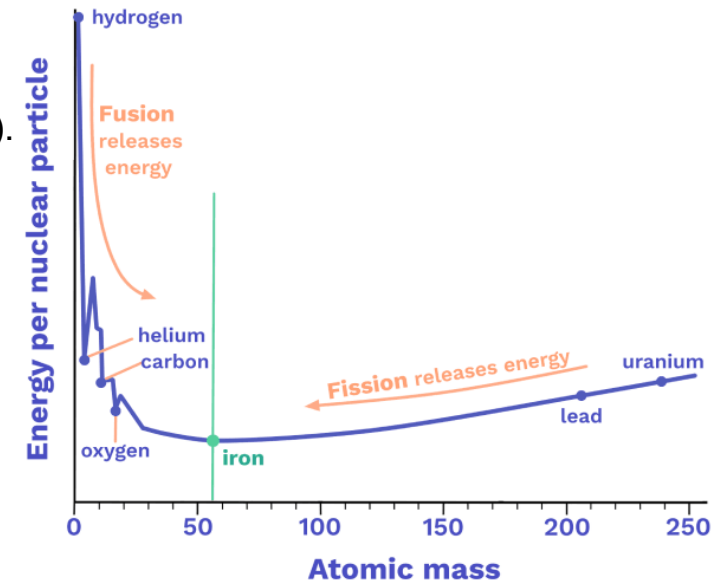
Nei sistemi MCF → pressione magnetica

3) Tempo di confinamento τ

Indica per quanto tempo il plasma è in grado di conservare la propria energia termica prima che venga dispersa nell'ambiente

A regime → energia cinetica prodotti favorisce altre reazioni → ridurre necessità riscaldamento esterno

Nuclear Potential of Different Elements



Source: <http://large.stanford.edu/courses/2010/ph240/hamerly2/>
Inertial Confinement Fusion, R. Hamerly, Stanford University, 2010.

→ Obiettivo: produzione netta di energia

Combinazione dei tre parametri per definire un punto operativo: **Criterio di Lawson**

Potenza di fusione > Potenza dissipata

$$f * E > W / \tau$$

Da cui si ricava la disuguaglianza in funzione dei parametri **n** e **τ** :

$$n * \tau > F_{\text{Lawson}}(T)$$

In funzione anche della temperatura **T**, viene detta funzione di Lawson di punto triplo:

$$T * n * \tau > F_{\text{triple}}(T)$$

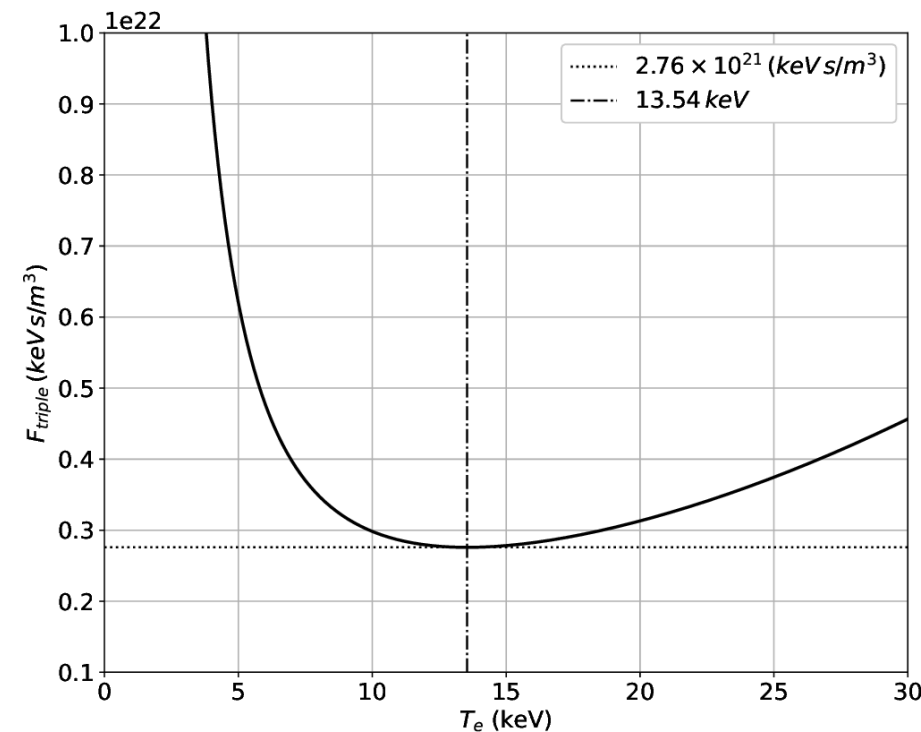
Fattore di guadagno energetico:

$$Q = P_{\text{fusione}} / P_{\text{ext}}$$

→ **Breakeven point** → $Q = 1$

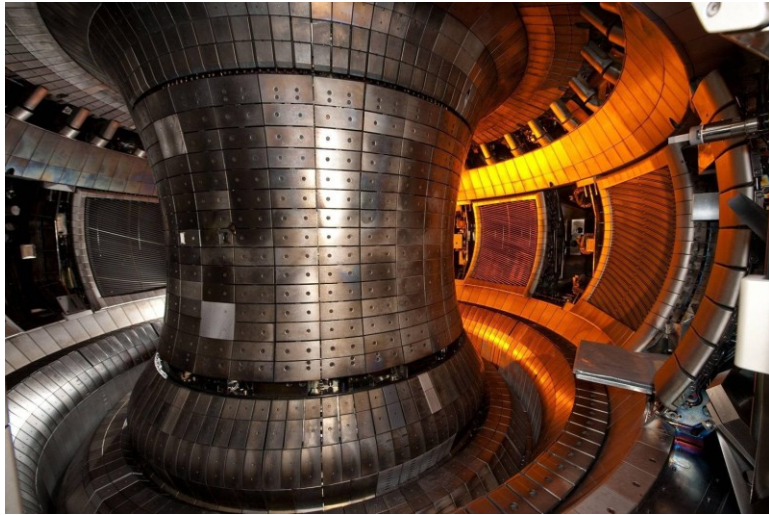
→ $Q = 1$ indica pareggio energetico, ma l'impianto continua a richiedere energia esterna per le perdite di sistema (P_{diss})

→ **Ignition “accensione”** → Auto-riscaldamento, $P_{\text{ext}} = 0$; $Q \rightarrow \infty$



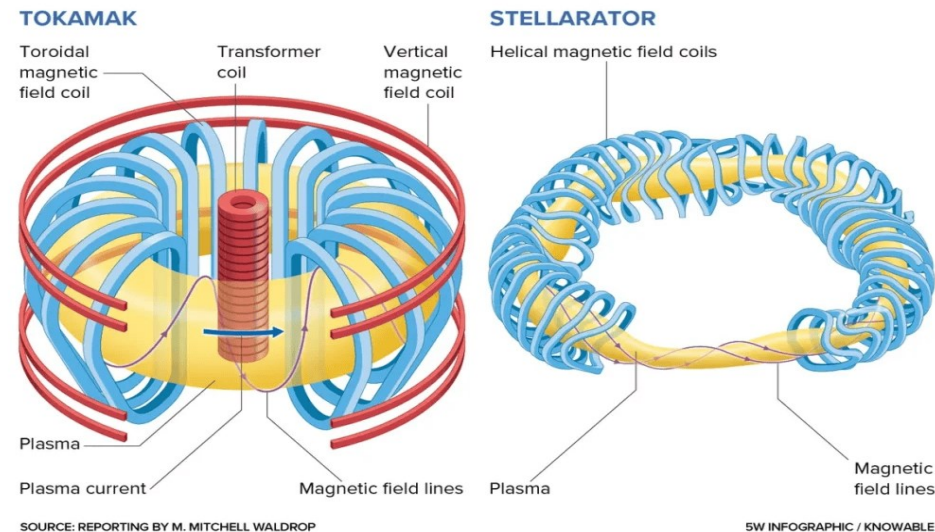
fonte: <https://farside.ph.utexas.edu/teaching/plasma1/Fusionhtml/node7.html>

CONFINAMENTO MAGNETICO (MCF)



- Temperatura sull'ordine dei 10^8 gradi (D-T) → altri parametri conseguenza di Lawson
- Utilizza campi magnetici per confinare i combustibili lontano dalle pareti, sfruttando le proprietà elettromagnetiche del plasma
- La condizione $\beta < 1$ deve essere soddisfatta, dove $\beta = p \text{ (plasma)} / p \text{ (magnetica)}$
- Massima forza magnetica è limitata da aspetti tecnologici → densità plasma relativamente basse (10^{14} 1/cm^3)
- Quindi per soddisfare il criterio di Lawson → necessità di tempi di confinamento più lunghi

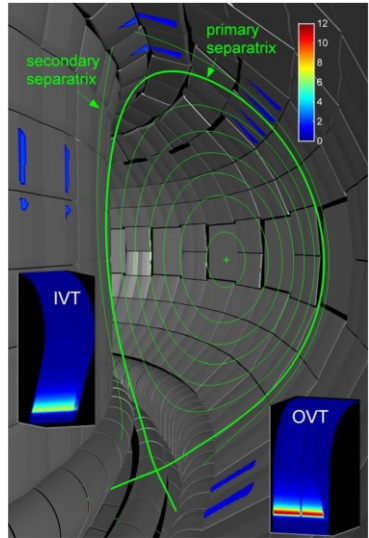
- I campi magnetici sono generati da bobine superconduttrici esterne che generano componenti toroidale e poloidale.
- Le due principali geometrie del confinamento magnetico sono il Tokamak e lo Stellarator



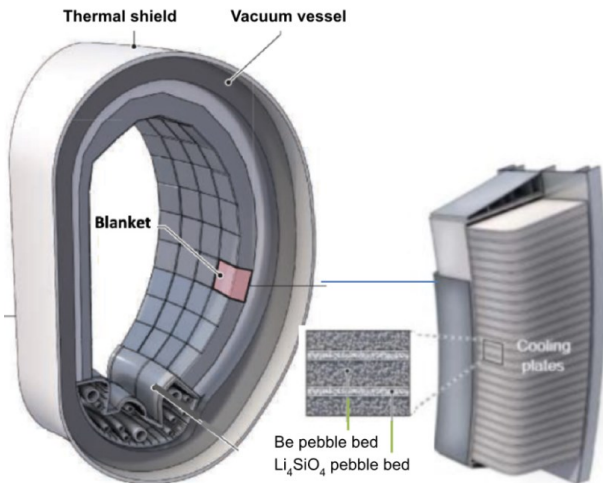
Il Tokamak

- Campo magnetico totale → campo poloidale e toroidale
- Particelle elicoidale lungo le linee di campo
- Componente poloidale → componente velocità rotazionale

Instabilità di kink → eccessivo attorcigliamento delle linee di flusso
fattore di sicurezza $q = r B_t / R B_p$

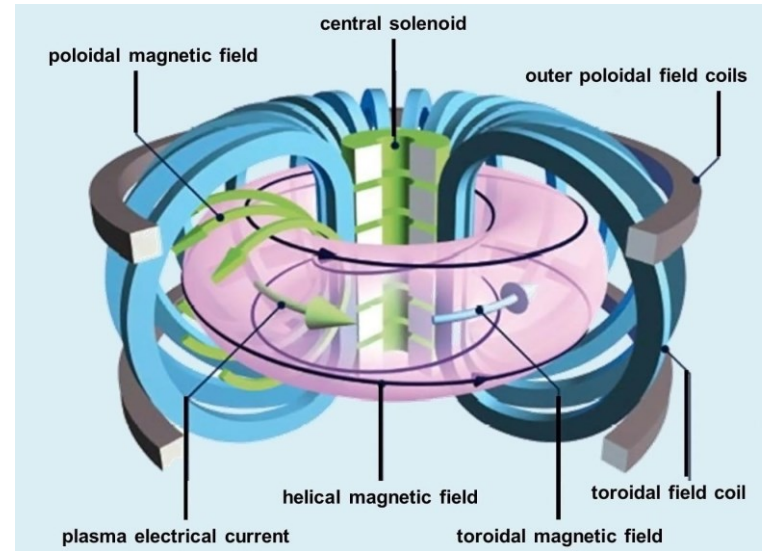


fonte:
https://www.researchgate.net/figure/Model-of-the-ITER-FW-and-the-divertor-used-for-simulations-of-IR-images-Also-shown-is_fig3_291418903

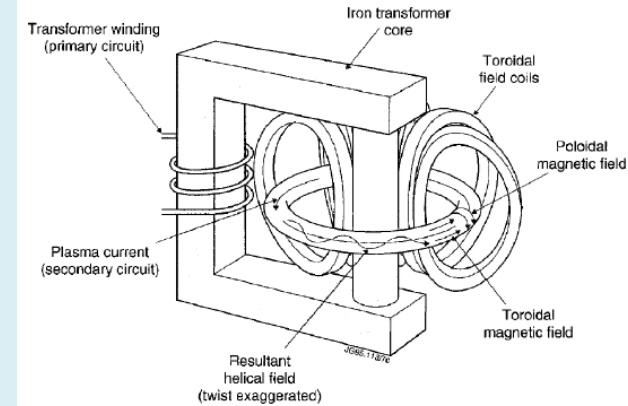


• Trizio

- Test blanket module Iter → produzione trizio e scambiatori di calore
- Riciclaggio del trizio → solo 1% viene bruciato



fonte: <https://scitechdaily.com/science-made-simple-what-is-a-tokamak/>



fonte: https://www.researchgate.net/figure/Toroidal-and-poloidal-magnetic-fields-Wesson-2004_fig1_237457900

• Riscaldamento del plasma:

- Effetto trasformatore → plasma circuito secondario (non sufficiente)
- Iniezione di fasci di particelle (NBI)
- Iniezione di onde a radiofrequenza (RF)
- Frequenza del ciclotrone ionico (ICRF)

Lo Stellarator

- Geometria toroidale non assialsimmetrica
- Interno campo di confinamento generato da bobine esterne di geometria complessa
- Non è presente alcuna corrente di plasma → elimina alcune instabilità rispetto al tokamak a parità di condizione operative

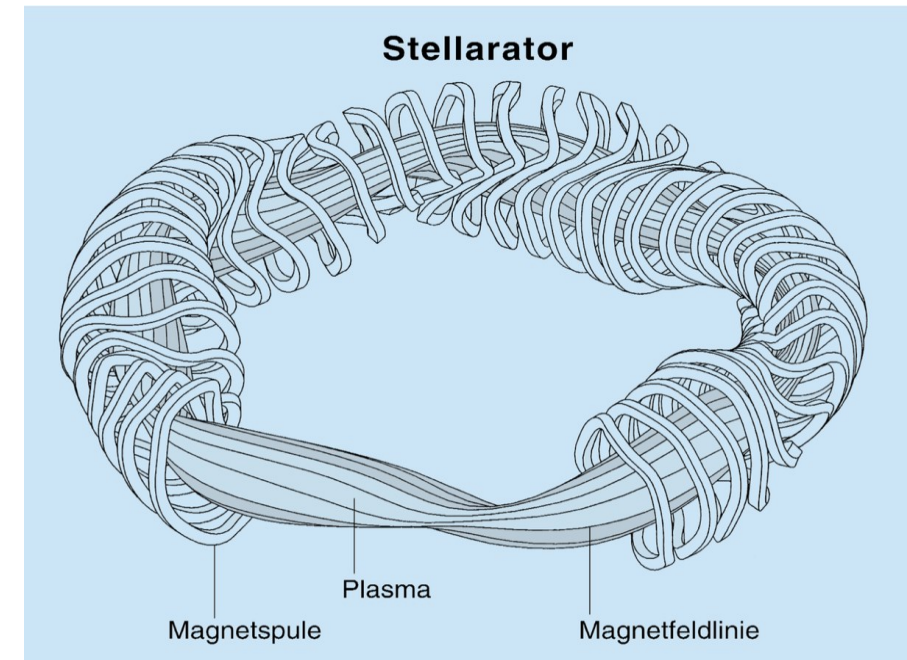
Il concetto chiave è che la componente rotazionale per annullare la velocità di deriva delle particelle è generata in modo puramente geometrico dalla rotazione fisica dell'asse magnetico del toro.

Non avendo corrente elettrica indotta all'interno del plasma :

- Intrinsecamente macchina a regime stazionario
- Riscaldamento ohmico assente → basato esclusivamente su metodi ausiliari:
 - onde elettromagnetiche alla frequenza del ciclotrone
 - iniezione di particelle

Esempio di Stellarator tipo torsatron, Oak Ridge National Laboratory - Advanced Toroidal Facility

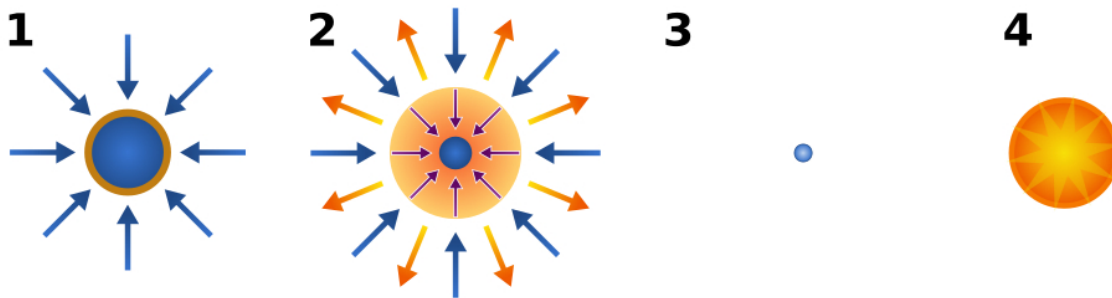
fonte: <https://en.wikipedia.org/wiki/Stellarator#Configurations>



fonte: <https://www.nzz.ch/wissenschaft/kernfusion-proxima-fusion-will-mit-einem-stellarator-strom-produzieren-ld.1873681>



CONFINAMENTO INERZIALE (ICF)



fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_confinement_fusion

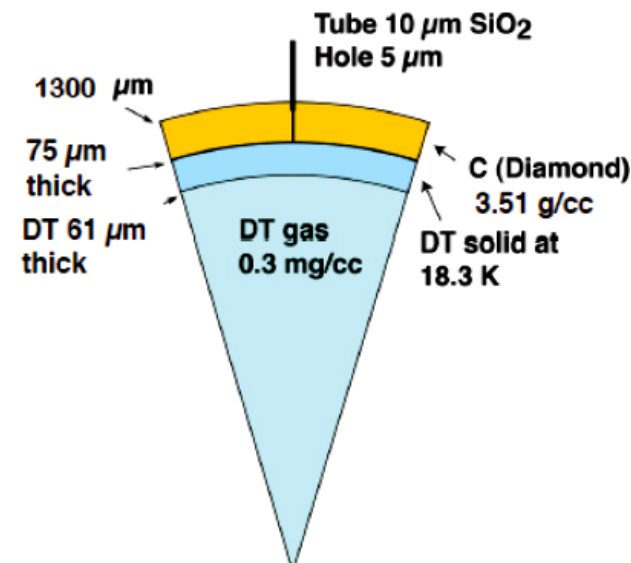
→ Capsula

Di forma sferica, composta da diversi strati, dall'esterno all'interno si trova:

- Materiale ablatore (berillio, plastica drogata o carbonio ad alta densità) che causa esplosione verso l'esterno
- Strato di combustibile solido congelato criogenicamente
- Combustibile in forma gassosa

- Si basa sul comprimere una capsula di pochi millimetri fino a densità e temperature estreme, in modo da ottenere un collasso della stessa (1000 g / cm^3)
- τ dell'ordine dei nanosecondi $\rightarrow$ plasma tenuto insieme solo dalla propria inerzia
- $\tau \approx R / C_s \rightarrow$ Criterio di Lawson può essere espresso in termini di densità e raggio del combustibile:

$$T n \tau > F_{\text{triple}}(T) \rightarrow \rho R > (\rho R)_{\text{min}}(T)$$



fonte: <https://www.nationalacademies.org/read/18288/chapter/4#15>

fonte: https://en.wikipedia.org/wiki/Inertial_confinement_fusion

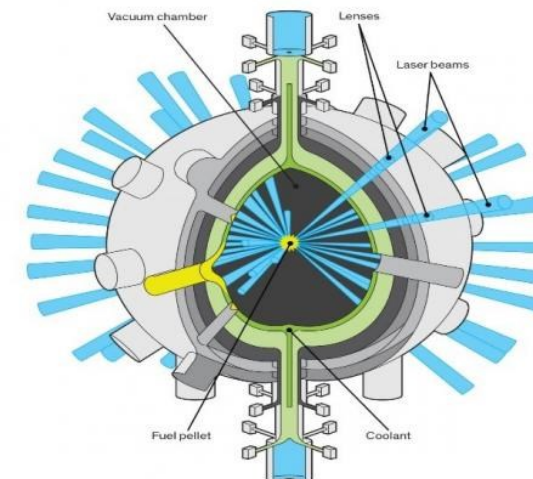
Direct & Indirect Drive

Direct Drive: l'energia del driver, sotto forma di fasci laser o particelle, colpisce direttamente la superficie esterna della capsula di combustibile.

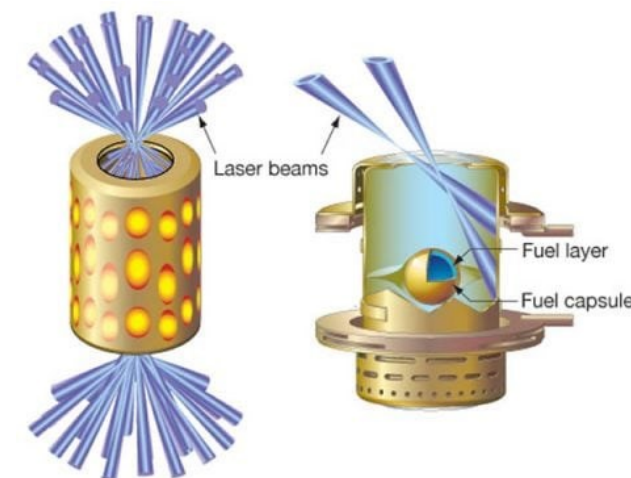
- Vantaggi: migliore rendimento, dimensioni e potenza del driver ridotti
- Svantaggi: Necessaria estrema precisione e sfericità del bersaglio (tolleranze di micrometri sulle superfici). Spessori irregolari degli strati, asimmetria direzione dei fasci e diversa potenza dei laser, possono portare ad instabilità idrodinamiche (es. Rayleigh-Taylor)

Indirect Drive: i fasci di energia colpiscono → "hohlraum" (oro o piombo) → irradia principalmente raggi X a una temperatura 3,3 milioni di gradi → provocano l'ablazione del materiale esterno

- Vantaggi: Fasci meno precisi, dimensioni e precisione della capsula meno influenti
- Svantaggi: Minor rendimento (conversione energia), possono comunque svilupparsi instabilità idrodinamiche



fonte: <https://kdmengineering.com/blog/nuclear-fusion-power-future>



fonte: <https://precision-ceramics.com/types-of-nuclear-fusion/>

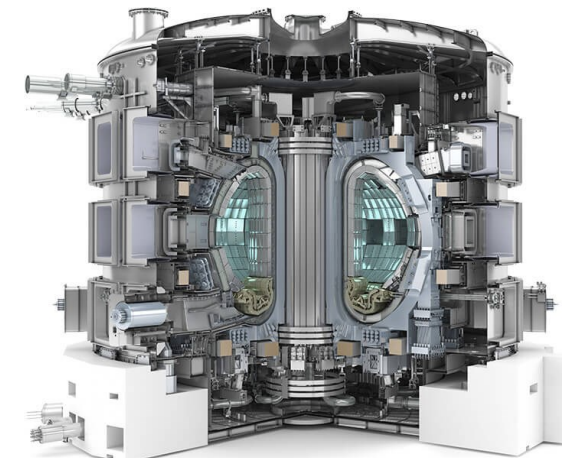
- Approccio migliore? → Dipende dallo scopo finale

Fusione a confinamento magnetico	Fusione a confinamento inerziale
Densità bassa e tempi di confinamento lunghi	Densità molto elevata e tempi di confinamento sui nanosecondi
Nacque negli anni '50 da alcuni fisici sovietici	Nacque negli anni '70 in concomitanza con i primi laser nel Lawrence Livermore National Laboratory in California
Utilizzato per sperimentare con la fusione nucleare	Fu il metodo principale per esperimenti per scopi militari (bomba idrogeno)
Funzionamento continuo → più adatto per una centrale per la produzione di energia	Funzionamento ad impulsi
Instabilità magnetoidrodinamiche, perturbazioni, riscaldamento plasma, il danneggiamento indotto dai neutroni, produzione e stoccaggio trizio	Instabilità idrodinamiche (Rayleigh-Taylor e Richtmyer-Meshkov), le instabilità laser-plasma, tolleranze di fabbricazione del bersaglio, la frequenza di ripetizione e l'efficienza del driver

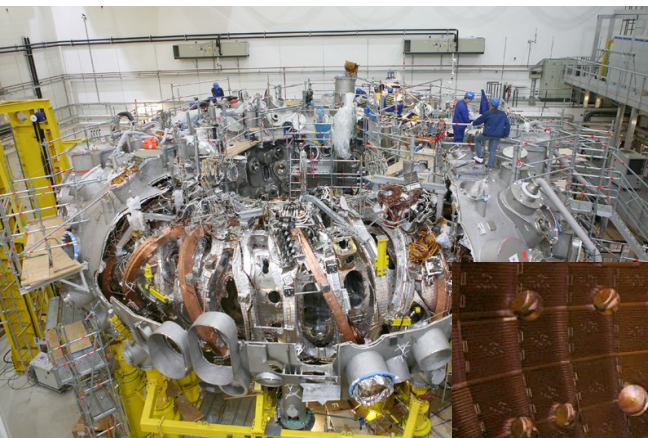
La lacuna più grande in entrambi: **guadagno energetico Q**

Q $\approx$ 0,3 ottenuto dal reattore tokamak JET nel 2022, producendo 59 MJ di energia in modo stabile per 5 secondi.	Il NIF Q $\approx$ 1,5 producendo 3,15 MJ da 2,05 MJ di energia laser fornita al bersaglio ottenuto nel dicembre 2022 (non tenendo conto di quella fornita all'impianto $\sim$ 400 MJ)
--	--

- ITER (Francia): Tokamak
 - Progetto internazionale (Eu, Usa, Russia, Cina, Giappone, Corea del Sud)
 - Più grande Tokamak realizzato, prima operazione prevista nel 2033-2035
 - Obiettivo: $Q > 10$ producendo 500 MW con 50 MW in ingresso
- Wendelstein 7-X (Germania): Stellarator
 - Più grande Stellarator al mondo
 - Costruito per dimostrare i risultati previsti dalla teoria e come alternativa al classico tokamak
 - Record del prodotto triplo con una fusione per 43 secondi nel 2025



fonte: <https://fusionforenergy.europa.eu/the-device/>



fonte:
<https://www.trendsderzukunft.de/wendelstein-7-x-fusionsreaktor-steht-vor-der-naechsten-experimentierphase/>



fonte: <https://theawesomer.com/nif-fusion-factory/10341/>

- NIF (USA): Confinamento Inerziale
 - Sistema laser più grande al mondo
 - Nato con l'obiettivo di fare ricerca sulla fisica dell'accensione del plasma
 - Indirect Drive
 - Ha superato varie volte il breakeven point, l'ultima nel 2025 con un massimo di 8,6 MJ (considerando sempre l'energia fornita alla capsula)
- Progetti Asiatici:
 - EAST: Tokamak situato in Cina, record di 1066 secondi plasma in stato stazionario nel 2025
 - JT-60: Più grande Tokamak, prima dell'avvio di ITER, situato in Giappone, opera come banco prova per le tecnologie di ITER
 - K-STAR: Tokamak situato in Corea del Sud, esegue test per ITER, nel 2024 ha mantenuto 100 milioni di °C per 48 secondi

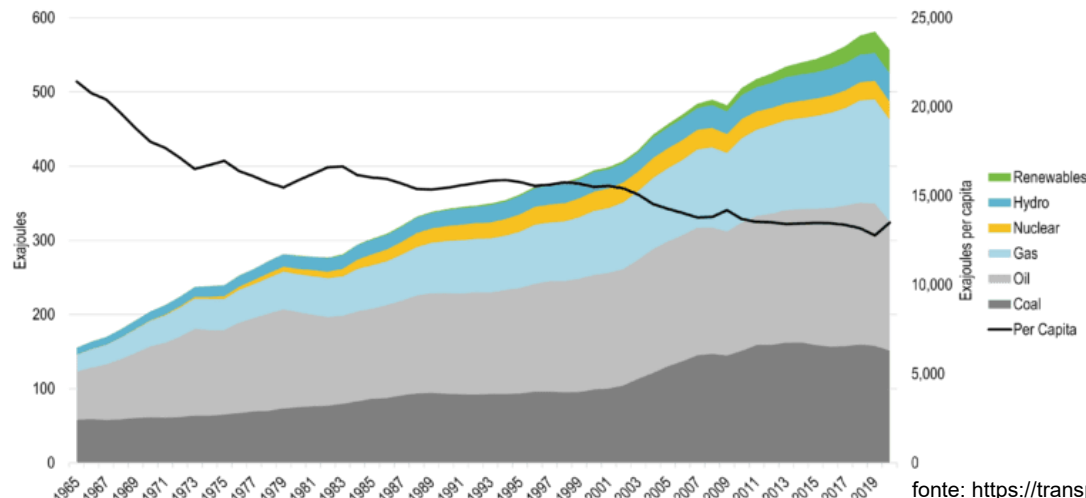
La fusione nucleare ha tutte le caratteristiche per diventare la maggiore risorsa di energia a livello globale,

- Densità energetica: ~4 milioni di volte superiore alla combustione fossile per unità di massa
- Sostenibilità: Deuterio dall'acqua di mare + trizio generato in sito
- Indipendenza energetica: Ridotta importazione di combustibili fossili

ma non è ancora perfetta:

- Materiali resistenti a pressioni sottovuoto che mantengano purezza del plasma
- Danneggiamento dei materiali dovuto ai neutroni
- Questione del trizio (emivita: 12,3 anni)
- Metodo efficiente per estrarre energia

Ma soprattutto manca un guadagno energetico sostanziale $Q \gg 1$ in modo sostenuto.



Previsioni realistiche:

- Breve termine: Energie rinnovabili, combustibili fossili e fissione nucleare esistente
- 2050: Potenziale impatto significativo sulle politiche globali (tecnologie mature)

fonte: <https://transportgeography.org/contents/chapter4/transportation-and-energy/world-energy-consumption/>