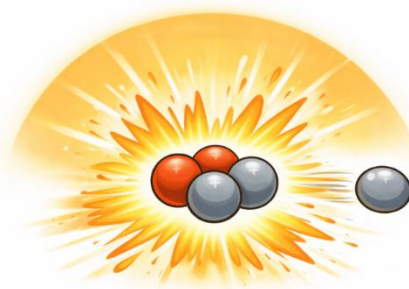
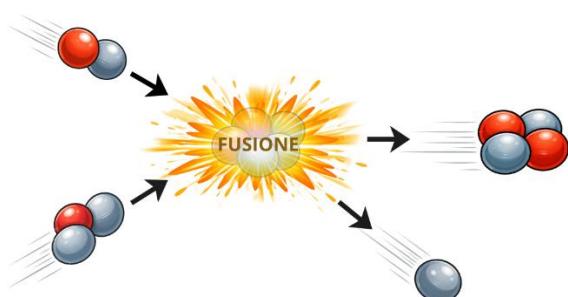


Come funziona la fusione nucleare e perché oggi non produce ancora energia elettrica.



◆ 1. Che cos'è la fusione nucleare



La **fusione nucleare** è un processo in cui **due nuclei di atomi leggeri si uniscono** per formare un nucleo più grande e più pesante.

In questo processo, la **somma delle masse dei nuclei di partenza risulta leggermente maggiore** della massa del nucleo finale: questa piccolissima differenza di massa si trasforma in **energia**, secondo la stessa relazione fisica descritta da **Albert Einstein** e già incontrata nel caso della **fissione nucleare**:

$$E = m \cdot c^2$$

dove:

- **E = energia;**
- **m = massa;**
- **c = velocità della luce.**

La fusione è il processo che avviene **naturalmente nelle stelle**, compreso il Sole, e che permette loro di produrre luce e calore per miliardi di anni. A differenza della fissione, però, la fusione **non spezza i nuclei**: li fa unire, richiedendo **condizioni fisiche estremamente difficili da ottenere sulla Terra**, come temperature e energie molto elevate.

♦ 2. Quali nuclei si fondono

Nella fusione nucleare studiata per scopi energetici si utilizzano **isotopi dell'idrogeno** (cioè atomi dello stesso elemento con nuclei diversi), in particolare:

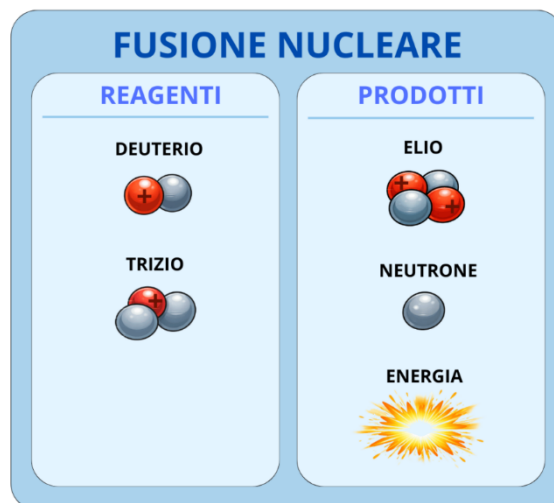
- **deuterio**;
- **trizio**.



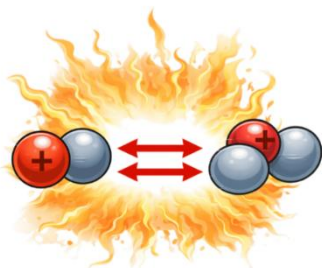
Questi nuclei, se portati a **temperature elevatissime**, possono fondersi formando **elio** e liberando una grande quantità di energia. Il **deuterio** è relativamente abbondante in natura e può essere ricavato anche dall'acqua, mentre il **trizio** è presente in natura solo in tracce e, per un uso energetico, **deve essere prodotto artificialmente**.

La scelta di deuterio e trizio non è casuale: tra tutte le possibili reazioni di fusione, questa è quella che richiede le condizioni **meno estreme** ed è quindi la più adatta agli esperimenti e ai progetti di fusione sulla Terra.

Nelle **stelle**, invece, la fusione avviene attraverso reazioni diverse, che utilizzano soprattutto l'idrogeno "normale" e producono direttamente gli isotopi necessari durante il processo stesso. Sulla Terra, non potendo riprodurre le stesse condizioni delle stelle, si scelgono le reazioni **più controllabili con la tecnologia attuale**.



♦ 3. Perché servono temperature così elevate



Per parlare di **fusione nucleare** non si considerano più gli atomi completi, ma solo i **nuclei**. Quando la temperatura aumenta moltissimo, infatti, gli **elettroni vengono separati dai nuclei** e gli atomi cessano di esistere come tali.

In queste condizioni la materia si trova nello stato di **plasma**, formato da **nuclei positivi** ed **elettroni liberi**. I nuclei, contenendo protoni con carica positiva, **tendono a respingersi** tra loro.

Per far avvicinare abbastanza due nuclei da permettere la fusione è quindi necessario fornire **un'enorme quantità di energia**, sotto forma di calore, in modo che i nuclei si muovano a velocità elevatissime.

Nelle **stelle**, la fusione è resa possibile da **temperature elevate** ma anche da **pressioni enormi** dovute alla gravità. Sulla Terra, dove non esistono condizioni simili, per ottenere la fusione è necessario **compensare aumentando molto la temperatura**, fino a superare i 100 milioni di gradi, e utilizzare sistemi artificiali per confinare il plasma.

◆ 4. Perché la fusione è così difficile da controllare

Il problema principale della fusione nucleare non è solo "accenderla" una volta, ma **mantenerla stabile in modo continuo, controllato ed energeticamente conveniente**.

Le difficoltà principali sono due:

- il **plasma raggiunge temperature così elevate** che nessun materiale può contenerlo direttamente;
- la reazione deve **durare abbastanza a lungo** da produrre più energia di quanta ne venga consumata per mantenerla.



Nessun materiale resiste



Confinamento magnetico

Per affrontare questi problemi si utilizzano sistemi di **confinamento**, come il confinamento magnetico, che permette di tenere il plasma lontano dalle pareti tramite potenti campi magnetici.

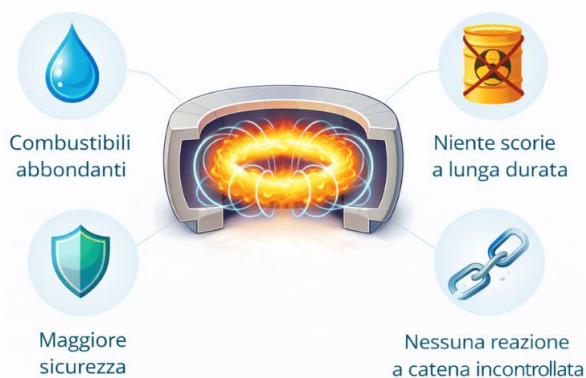
Oggi la fusione nucleare è ancora in fase sperimentale. Esistono grandi progetti di ricerca, come **ITER**, basati su reattori di tipo **Tokamak**, e altri sistemi alternativi come lo **Stellarator**. Tuttavia, **non esistono ancora centrali a fusione operative** per la produzione di energia elettrica.

◆ 5. I vantaggi potenziali della fusione nucleare

Se in futuro si riuscisse a controllare la fusione in modo efficiente, i vantaggi sarebbero notevoli, soprattutto se confrontati con i limiti della fissione nucleare:

- combustibili abbondanti e quasi inesauribili;
- **assenza di scorie radioattive a lunga durata**;
- minori rischi di incidenti gravi rispetto alla fissione;
- nessuna reazione a catena incontrollata.

Perché la fusione è considerata l'energia del futuro

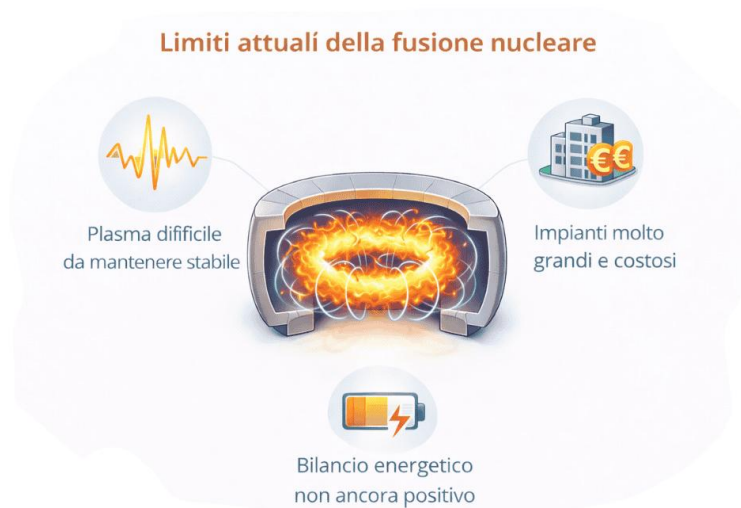


Per questi motivi la fusione viene spesso definita **l'energia del futuro**.

Tuttavia, si tratta di un futuro che richiede ancora molta ricerca e che, almeno per ora, non è una soluzione immediatamente disponibile.

Questi vantaggi, inoltre, sono teorici e dipendono dal fatto che la fusione, se mai diventerà operativa, funzioni come previsto.

◆ 6. Limiti attuali e prospettive



Nonostante il grande interesse scientifico, la fusione nucleare presenta ancora **enormi difficoltà tecniche**, legate soprattutto alle condizioni estreme necessarie per mantenerla attiva:

- mantenere il plasma stabile è estremamente complesso;
- gli impianti sono giganteschi e costosissimi;
- il bilancio energetico positivo non è ancora stato raggiunto in modo continuativo.

Per questo motivo, **a differenza della fissione**, la fusione non contribuisce oggi alla produzione di energia elettrica. Rappresenta però un **campo di ricerca avanzata**, da cui potrebbero arrivare importanti sviluppi in futuro.

◆ 7. Fusione e fissione: stessa fisica, usi diversi

Fissione e fusione sono entrambe reazioni nucleari, ma:

- la **fissione** è una tecnologia già utilizzata;
- la **fusione** è una tecnologia ancora in sviluppo.

Studiare entrambe permette di capire come **le stesse leggi della fisica** possano portare a soluzioni energetiche molto diverse, a seconda delle condizioni e delle scelte tecnologiche. Questo confronto aiuta a comprendere non solo come funziona l'energia nucleare, ma anche **perché alcune soluzioni sono già realtà e altre appartengono ancora alla ricerca**.

◆ 8. Approfondimento: fusione nucleare e armi termonucleari

Nell'articolo sulla **fissione nucleare** si è visto che questa reazione è stata utilizzata anche per scopi bellici, in particolare durante la Seconda guerra mondiale. Le bombe atomiche sganciate in quel periodo erano basate **solo sulla fissione nucleare**.



Le **armi nucleari moderne**, invece, sono in gran parte **armi termonucleari**, note anche come **bombe all'idrogeno**. In questi ordigni, una prima esplosione a fissione viene utilizzata per creare le condizioni estreme di temperatura e pressione necessarie ad avviare **reazioni di fusione** tra nuclei leggeri, isotopi dell'idrogeno.

La fusione permette di liberare quantità di energia **molto maggiori** rispetto alla sola fissione.

Per questo le bombe termonucleari sono enormemente più potenti delle bombe utilizzate durante la Seconda guerra mondiale.

Ancora una volta, questo mostra come la stessa conoscenza scientifica possa essere impiegata in modi profondamente diversi. La fisica nucleare non è di per sé “buona” o “cattiva”: sono le **scelte umane e politiche** a determinare se una scoperta viene usata per produrre energia, per fare ricerca o per distruggere.