

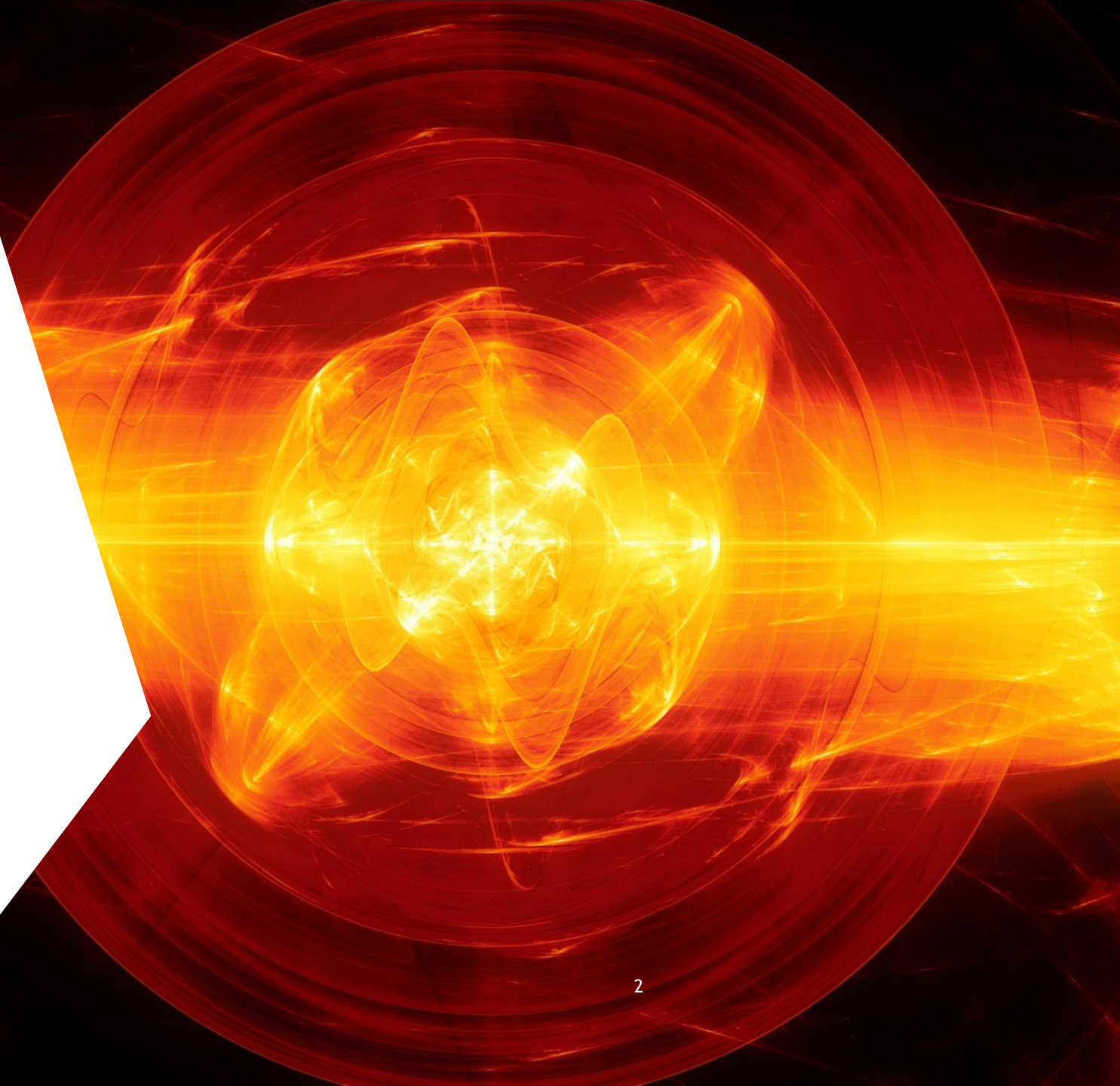
*Fissione e Fusione
Nucleare.*

**La Fusione
Nucleare: un
passo decisivo
verso il futuro**

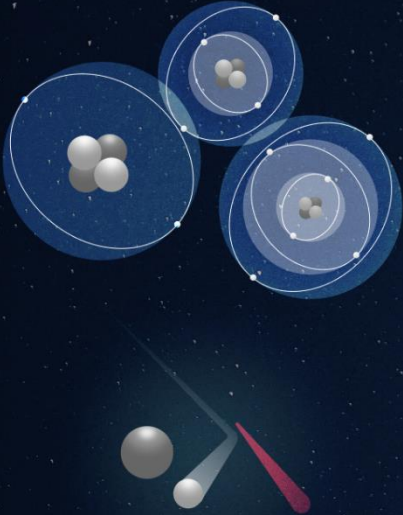
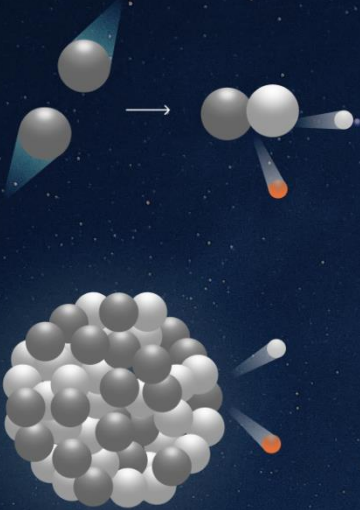
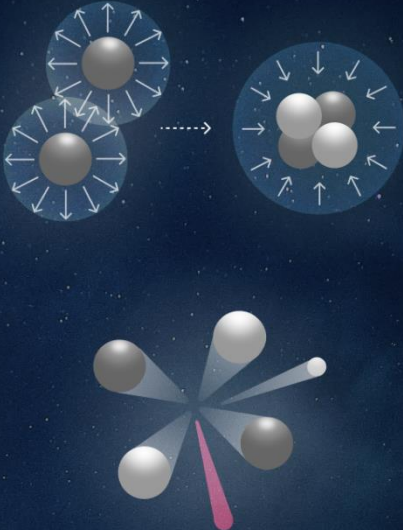
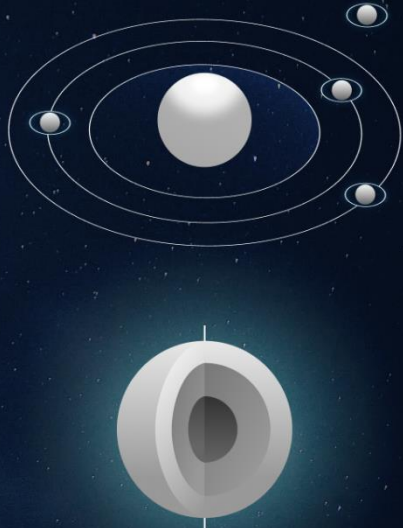


Fissione Nucleare.

Un Ripasso sulle nozioni di base



Quali sono le forze fondamentali della natura?

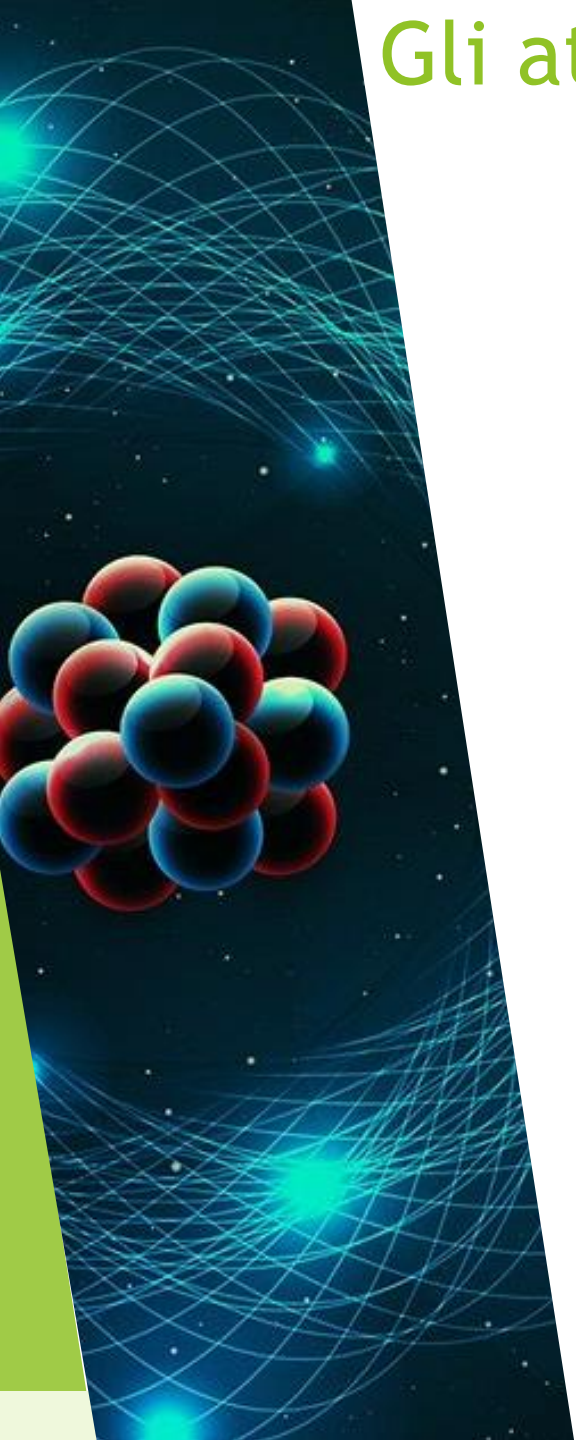
Le quattro forze fondamentali			
			
FORZA ELETTROMAGNETICA	FORZA NUCLEARE DEBOLE	FORZA NUCLEARE FORTE	FORZA GRAVITAZIONALE
<p>Governa l'interazione fra atomi e la formazione di molecole. Permette le reazioni chimiche e l'emissione di luce.</p>	<p>Governa il decadimento o la trasformazione di neutroni in protoni e il rilascio di neutrini e radiazioni. Permette le reazioni di fissione di atomi pesanti.</p>	<p>Governa la formazione e la stabilità dei nuclei legando insieme protoni e neutroni. Permette la fusione di nuclei di atomi leggeri.</p>	<p>Governa la formazione e il movimento di satelliti, pianeti, stelle, galassie e ammassi galattici. Permette alle stelle di innescare reazioni di fusione.</p>

Gli atomi: gli isotopi

Cosa sono gli isotopi?

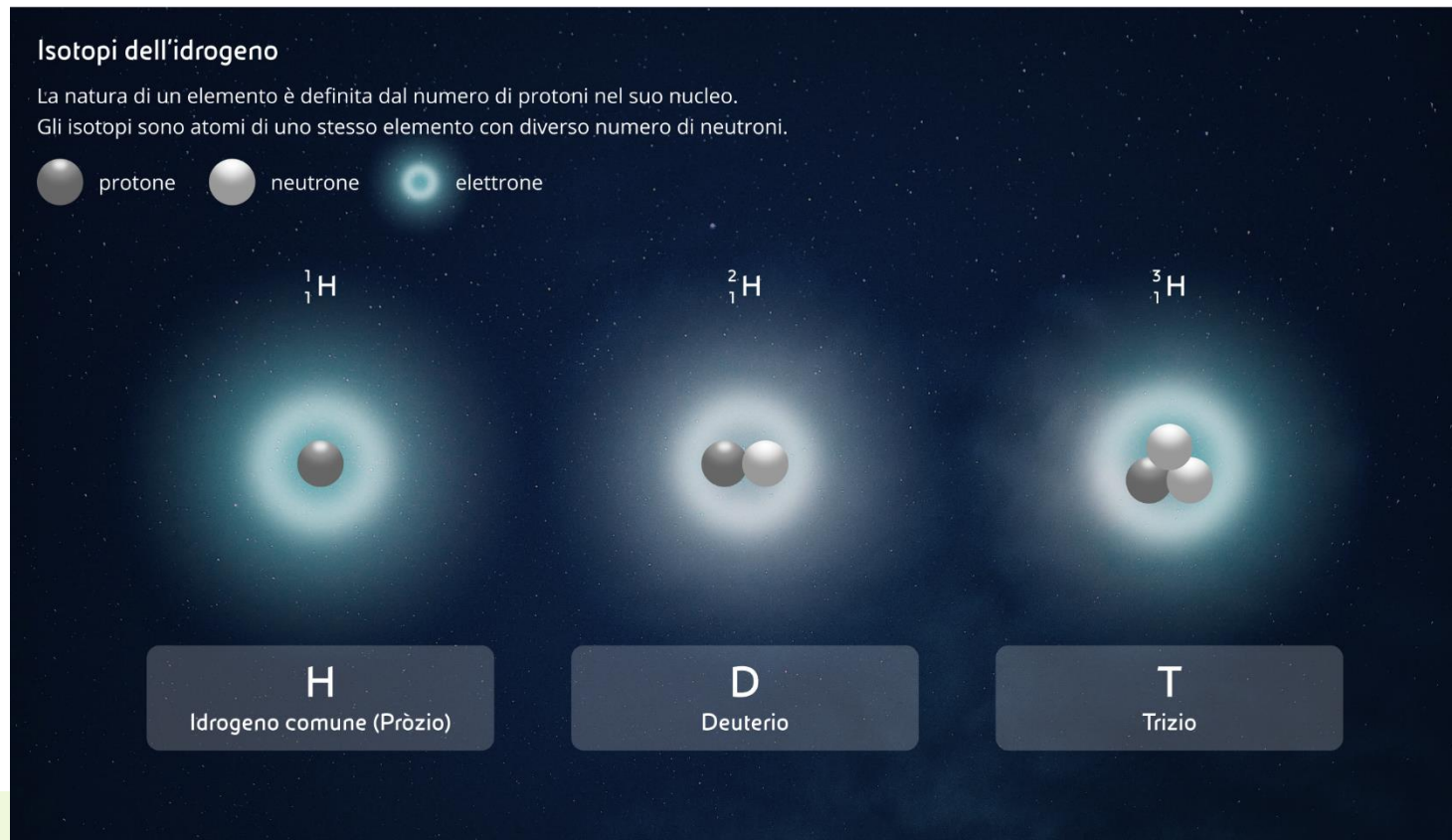
Dentro il nucleo si trovano anche i **neutroni**, che - come dice il loro nome - non posseggono alcuna carica elettrica, a differenza dei protoni carichi positivamente. **Se due nuclei con lo stesso numero di protoni (quindi dello stesso elemento) hanno un differente numero di neutroni, si dicono isotopi.** Il numero di neutroni in un nucleo ci dice esattamente di quale isotopo stiamo parlando.

Chimicamente, **gli isotopi di un certo atomo sono tutti uguali fra loro** perché hanno lo stesso numero di protoni e di elettroni, che determinano le loro proprietà chimiche. **Quello che cambia, è solo la massa del loro nucleo** (un neutrone pesa appena un poco di più di un protone e la somma di protoni e neutroni ci dà la massa totale del nucleo).



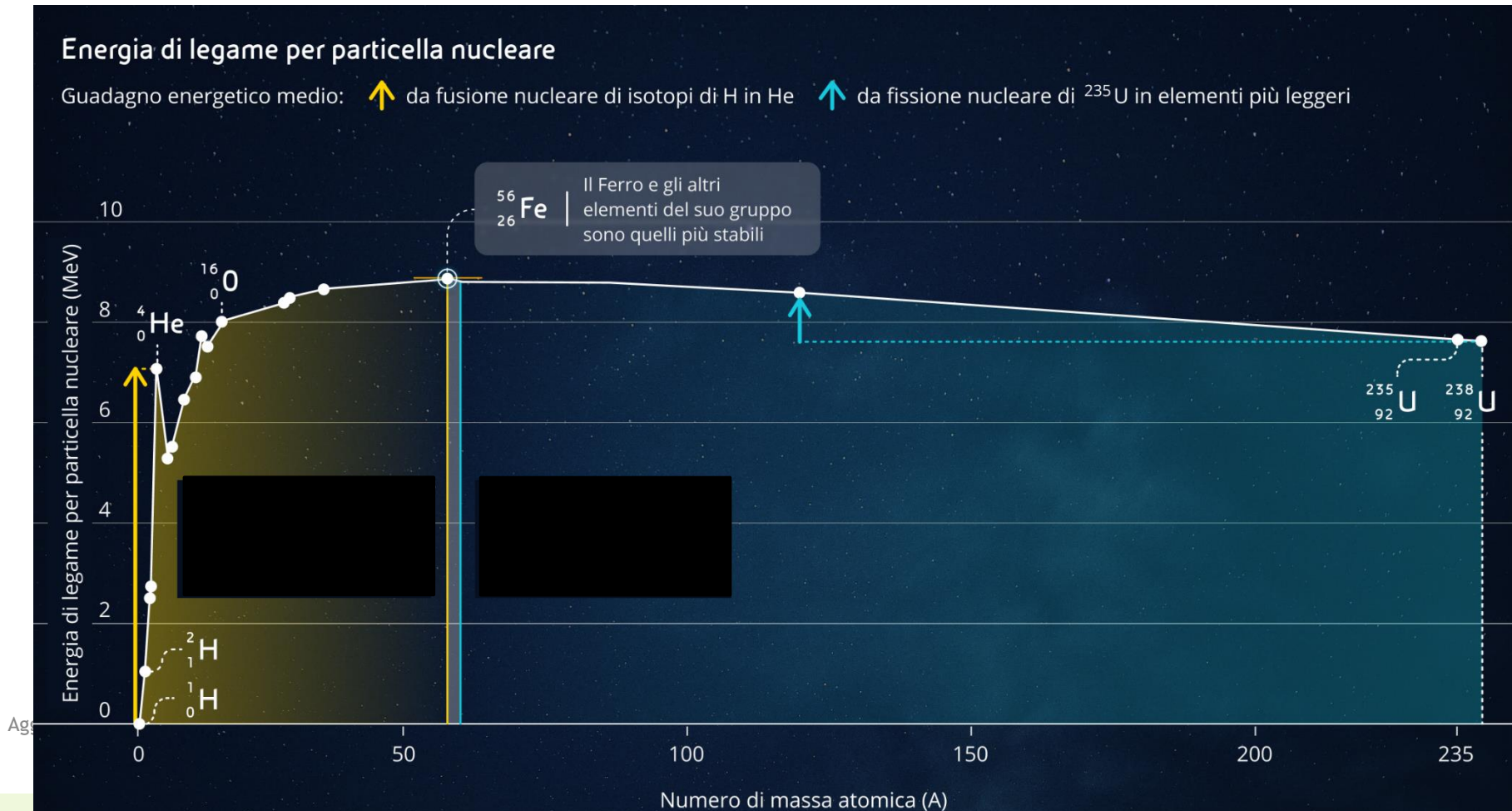
Gli atomi: gli isotopi più interessanti

Il nucleo dell'isotopo più comune dell'Idrogeno ha un solo protone e nessun neutrone. Lo chiamano tutti semplicemente Idrogeno ma il suo vero nome sarebbe Pròzio. Quando in un nucleo di Idrogeno c'è pure un neutrone, abbiamo il Deuterio. In natura, ogni 6670 atomi di Pròzio ne troviamo uno solo di Deuterio. E quando nel nucleo di Idrogeno ne troviamo tre abbiamo il Trizio, che è instabile ed esiste solo in tracce, ma può essere prodotto artificialmente.



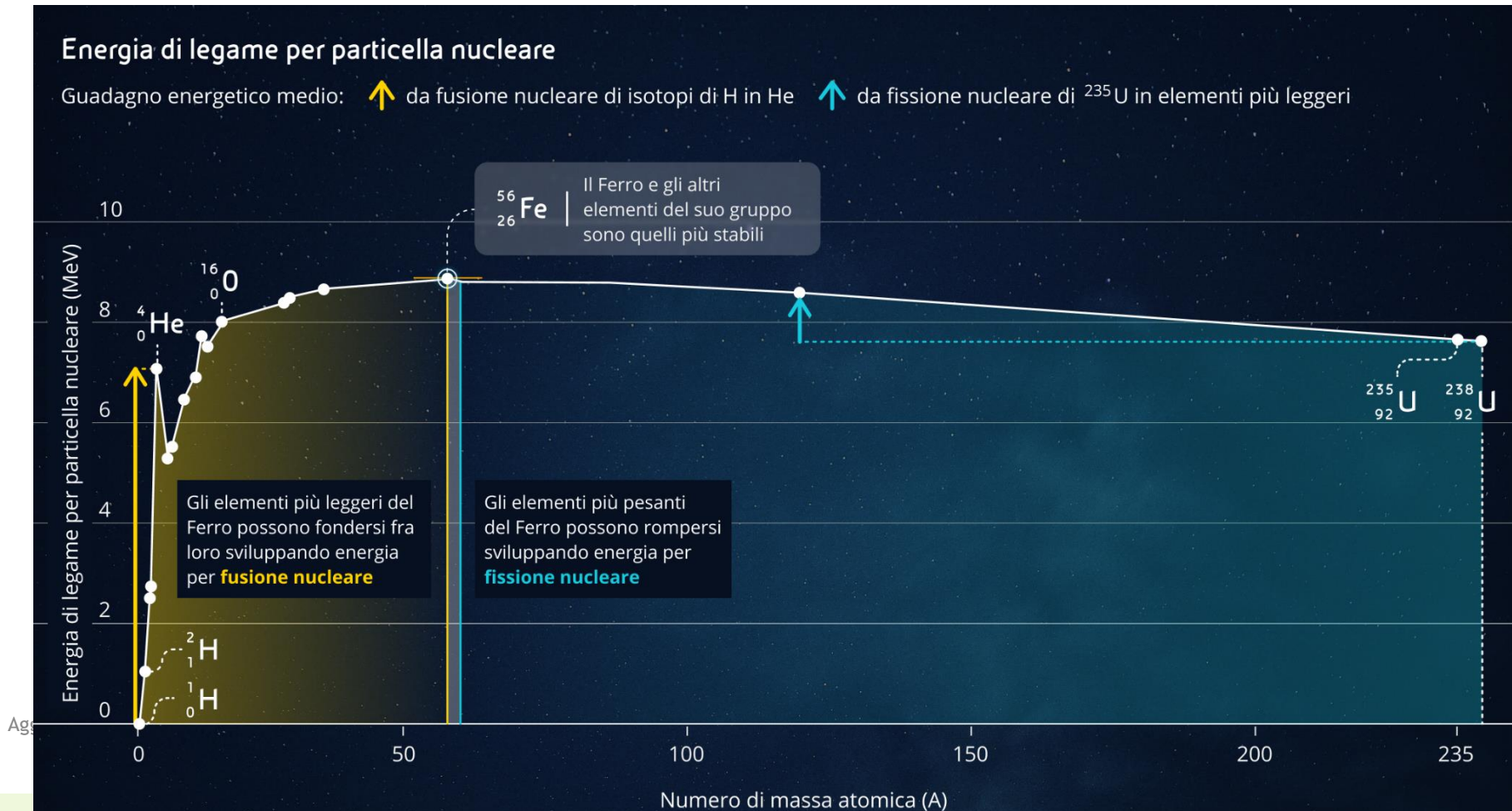
Gli atomi: l'energia di legame dei nuclei

Quando si riesce a vincere la forza nucleare forte fra protoni e neutroni di atomi pesanti – i fisici definiscono pesanti tutti gli atomi con più protoni del Ferro, che ne ha 26 – si riesce a liberare un sacco di energia. Se ne riesce a liberare ancora di più se si fondono insieme atomi leggeri – cioè con meno protoni del Ferro –



Gli atomi: l'energia di legame dei nuclei

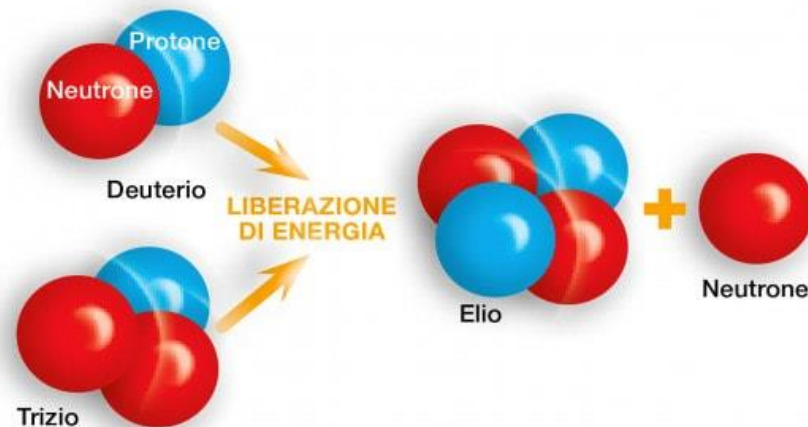
Se abbiamo compreso cosa si nasconde dentro il nucleo di un atomo e a padroneggiare concetti come protoni, neutroni e isotopi, ora siamo perfettamente attrezzati per procedere nel nostro viaggio alla scoperta dell'energia nucleare. Le due reazioni nucleari di cui parliamo oggi sono la fissione e la fusione. Ci interessano molto perché si possono usare entrambe per produrre energia.



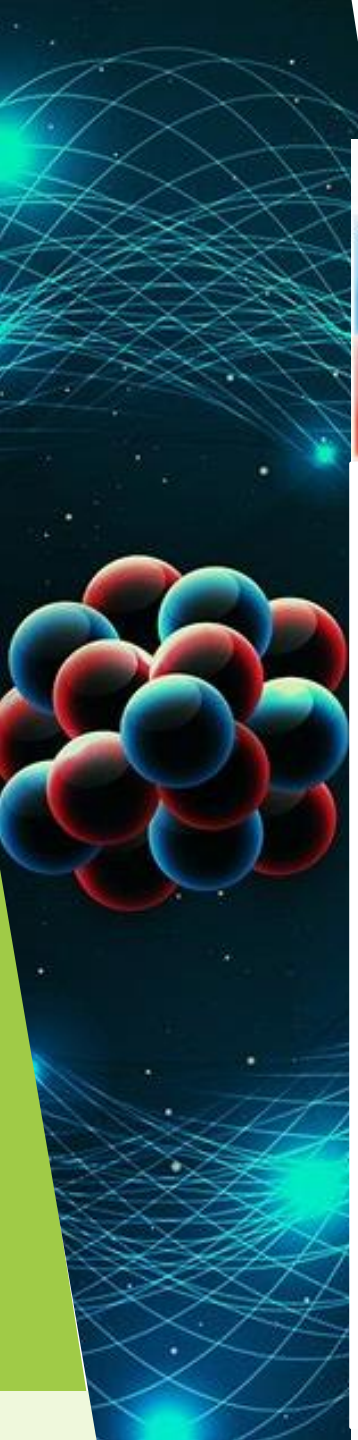
La fusione nucleare: la tecnologia

La fusione di due nuclei d'idrogeno libera un'enorme quantità di energia ed è la reazione fisica, totalmente naturale, che alimenta il Sole e le altre stelle. Il suo grande vantaggio è che non emette gas a effetto serra, né sostanze fortemente inquinanti o altamente radioattive, rendendola una fonte energetica estremamente interessante. Inoltre, è virtualmente inesauribile perché utilizza come combustibile una miscela di elementi molto facili da ottenere, e cioè deuterio e trizio, due isotopi dell'idrogeno.

Difatti la reazione da decenni (di gran lunga) più studiata, per utilizzare la fusione in un reattore di una centrale per produrre energia elettrica, è la fusione deuterio-trizio (D-T), perché è quella che richiede la temperatura più bassa. Tipicamente, questa reazione ha una temperatura di soglia di circa 200 milioni di gradi.



Gli atomi: la tabella periodica



Periodic Table of the Elements									
		Atomic Number		Melting Point					
1 IA 1A	2 IIA 2A	13 IIIA 3A	14 IVA 4A	15 VA 5A	16 VIA 6A	17 VIIA 7A	18 VIIIA 8A		
1 -259.1 H Hydrogen 1.008							2 -272.20 He Helium 4.003		
3 180.5 Li Lithium 6.941									

La fusione nucleare: la tecnologia

- **il deuterio è ricavato dall'acqua di mare,**
- **il trizio può essere prodotto da una reazione fisica con il Litio.**

La fusione di deuterio e trizio crea elio e neutroni ad alta energia che verranno assorbiti da uno degli isotopi del litio (il ${}^6\text{Li}$) presenti nel mantello; la reazione dei neutroni con il ${}^6\text{Li}$ genererà trizio. Il trizio formato in questo modo verrà raccolto all'interno del tokamak, consentendo così di alimentare la reazione di fusione.

Per arrivare a controllare la continuità della fusione in un impianto per la produzione di energia si sta studiando la tecnologia del confinamento magnetico che, come dice il nome, impiega campi magnetici potentissimi per gestire il plasma in cui avviene la fusione. La strada verso questa rivoluzionaria tecnologia è lunga, ma percorrerla significa puntare verso un futuro sostenibile.

Quando riusciremo a far sì che questa tecnologia diventi così matura da poter essere utilizzata a livello industriale, si potrà aprire uno scenario inedito in cui, finalmente, potrà essere garantita una fornitura estesa di energia pulita, sicura e sostenibile.

Domande e Risposte ... se le so

La sfida tecnica

Qualunque sia l'isotopo di partenza, due atomi di idrogeno hanno la stessa carica per cui tendono a respingersi elettrostaticamente: per fonderli insieme, quindi, è necessario raggiungere **temperature di centinaia di milioni di gradi**. L'agitazione termica che permette la fusione avviene in **un gas ionizzato ad altissima temperatura chiamato plasma**. Il principale nodo tecnico da sciogliere è proprio la gestione del plasma che deve essere confinato in alto vuoto, in uno spazio limitato e non entrare in contatto con le superfici della macchina, data la sua elevatissima temperatura.

Per far questo si utilizza il cosiddetto **Tokamak**, un dispositivo a forma di ciambella in cui, attraverso **un potentissimo campo magnetico generato da supermagneti posti intorno alla camera**, il plasma ad altissima temperatura viene generato e fatto orbitare vorticosamente all'interno della ciambella senza permettergli di entrare a contatto con le pareti. Da qui il nome della tecnologia: **fusione a confinamento magnetico (MCF)**.

Per "accendere" un reattore a fusione si immette nel tokamak una miscela di deuterio e trizio, la si riscalda con opportuni accorgimenti portandola prima allo stato di plasma e quindi, aumentando ancora di più la temperatura, alle condizioni di fusione. Il processo di fusione libera neutroni molto energetici, che vengono assorbiti in un "blanket": uno spesso rivestimento che contiene la camera di fusione.

Video 1

<https://stream24.ilsole24ore.com/video/economia/la-fusione-confinamento-magnetico/AEFUzHWC>

L'ispirazione che nasce dal Sole



- ▶ Il Sole, come tutte le stelle, è una fucina per la fusione, dove i nuclei di idrogeno si uniscono, formando elio e rilasciando energia.
- ▶ Le elevatissime forze gravitazionali determinano, al centro delle stelle, pressioni che contribuiscono a rendere possibile il processo di fusione.
- ▶ **La temperatura di quasi 10 milioni di gradi centigradi** che ivi si determina contribuisce a portare gli atomi nello stato di plasma, il quarto stato della materia.
- ▶ Normalmente, due nuclei caricati positivamente non si fondono a causa delle forze elettrostatiche di repulsione. Tuttavia, nelle stelle, le forze gravitazionali in gioco permettono di accelerare le particelle fino a vincere la reciproca forza di repulsione, per poi fondersi.

Attenzione !!!

Definizione: La temperatura di un corpo può essere definita come una misura dello stato di “agitazione” delle entità molecolari dalle quali è costituito...

Parliamone per 2 minuti

L'ispirazione che nasce dal Sole

Riprodurre condizioni paragonabili, sulla Terra, priva delle immense forze gravitazionali associate all'enorme massa del Sole, richiede sforzi di ricerca e tecnologici enormi, ai quali stanno lavorando molti Paesi. Il **tokamak**, un dispositivo inventato nel 1950, potrebbe essere la soluzione.

In costruzione nel sud della Francia, l'International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), una delle attuali istanze del tokamak, la più grande al mondo per dimensioni, è il risultato della collaborazione tra 35 paesi. Mentre sul Sole le reazioni di fusione si mantengono grazie alle condizioni estreme che si determinano nel suo nucleo, i processi per ottenere la fusione magnetica sulla Terra sono limitati principalmente dalla difficoltà:

ad ottenere le alte temperature necessarie per raggiungere lo stato di plasma,

- ✓ **a confinare tale plasma in uno spazio ristretto,**
- ✓ **a sostenere il plasma nel tempo**
- ✓ **a raccogliere l'energia generata, trasformandola in elettricità.**

Si prevede che il progetto ITER possa essere in grado di generare una potenza di plasma 10 volte maggiore (500 MW) di quanta ne assorbirà.

La fusione a confinamento magnetico (MCF, dal suo acronimo inglese "Magnetically Confined Fusion") è uno dei metodi più studiati e sperimentati per cercare di riprodurre questo fenomeno e per riuscire a sfruttare l'energia da fusione.

Il Tokamak

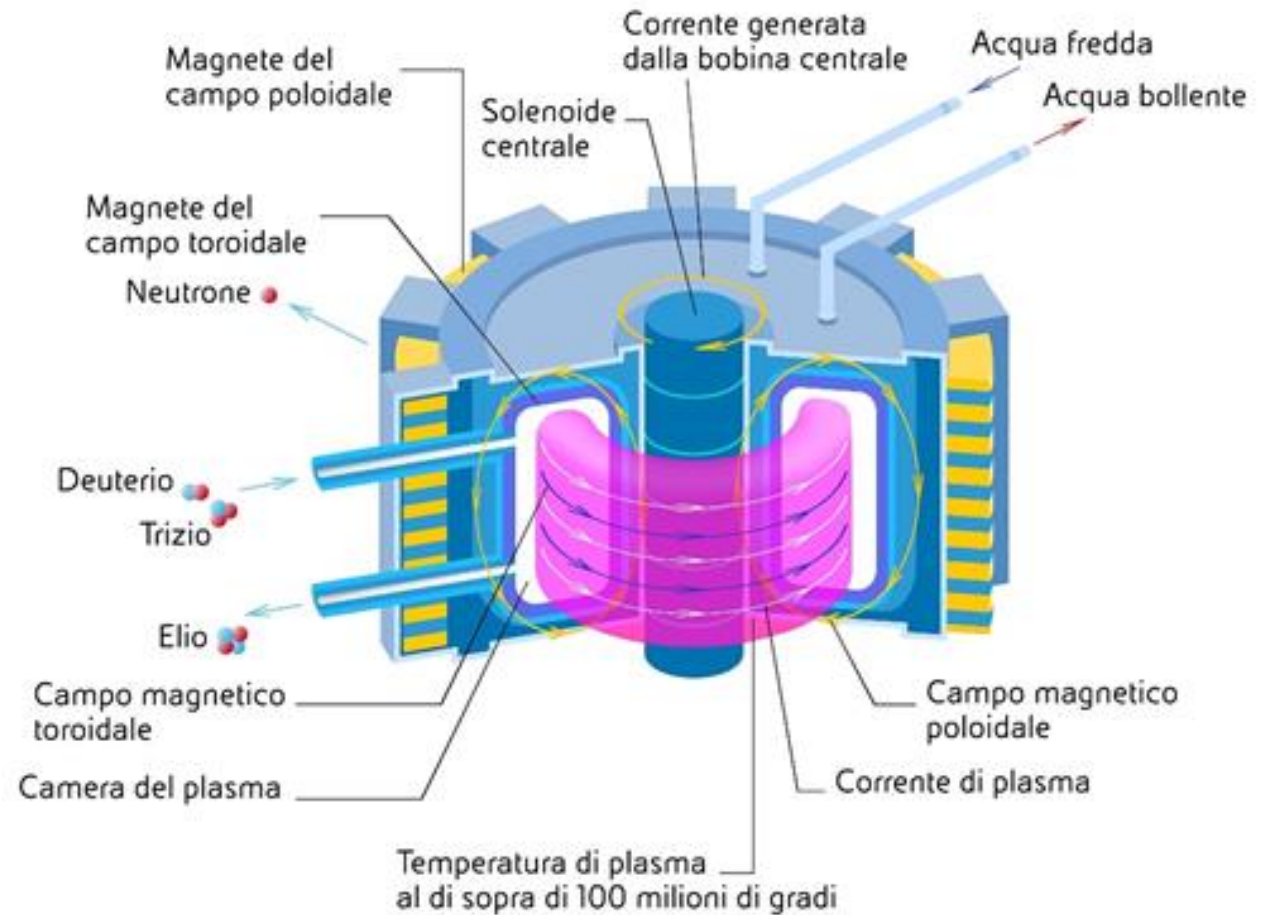
Un tokamak è costituito da una camera in alto vuoto a forma di ciambella (geometricamente un toroide) nella quale avviene la reazione di fusione.

Le geometrie del campo magnetico e della camera a vuoto determinano le dinamiche controllate del flusso di plasma al suo interno. L'intero dispositivo è avvolto da bobine di diverse geometrie realizzate con magneti superconduttori, che hanno la capacità di generare forti campi indotti, richiedendo una potenza ragionevolmente contenuta e contribuendo a generare, confinare e sostenere il plasma a una temperatura dell'ordine di ben 100 milioni di gradi (circa 10 volte quella del nucleo del Sole).

Il campo magnetico generato lungo tutta la circonferenza del toroide accelera le particelle e le confina cercando di minimizzare il contatto del plasma con le pareti interne del toroide.

Altri campi magnetici, indotti perpendicolarmente, hanno la funzione di controllare la stabilità del plasma. Le particelle sono accelerate grazie ai sistemi di riscaldamento del plasma, portando i nuclei carichi positivamente abbastanza vicini, superando le forze elettrostatiche e consentendo dunque loro di fondersi.

Schema semplificato del Tokamak



Raggiungere temperature elevate

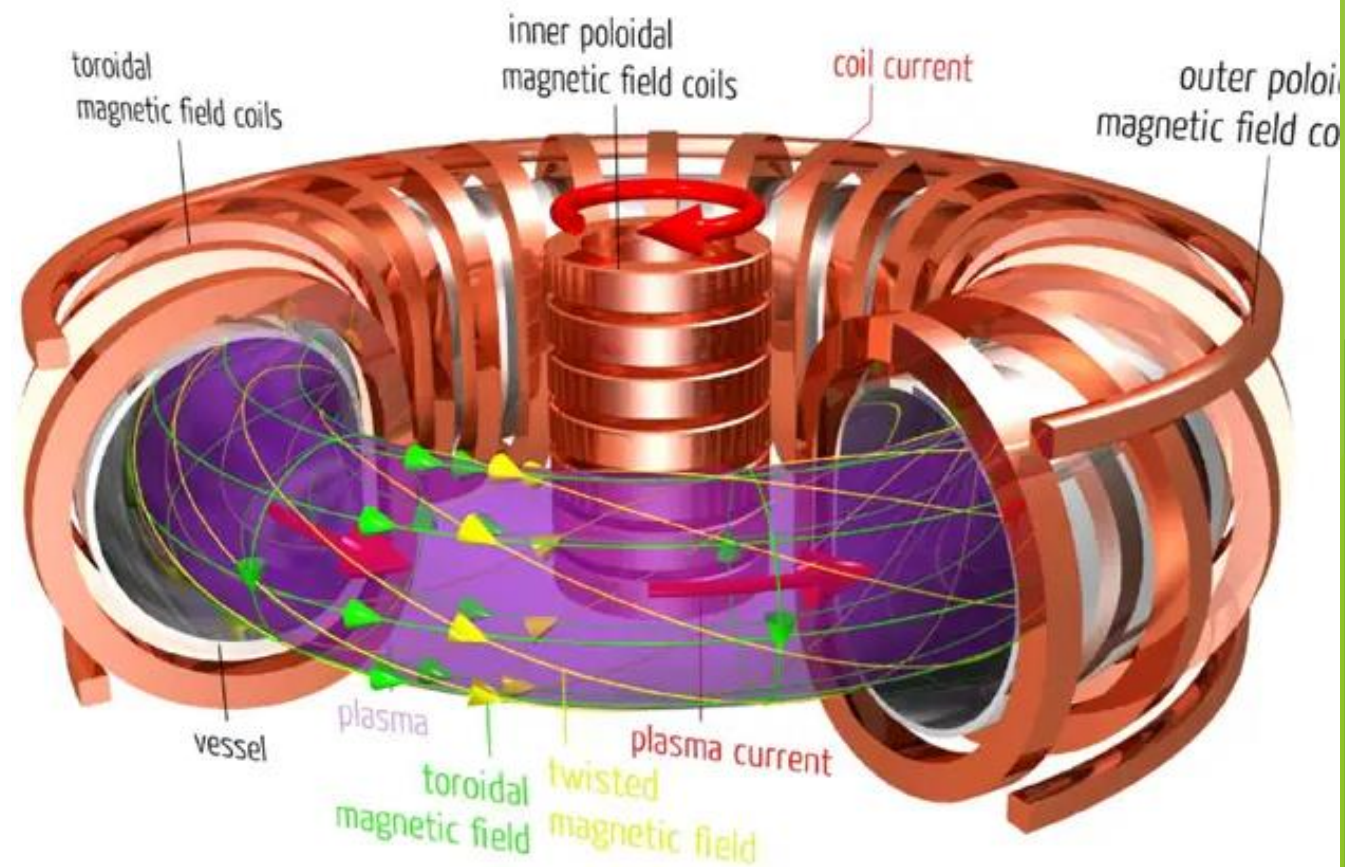
Nel tokamak, il plasma raggiunge le alte temperature di cui ha bisogno attraverso una serie di meccanismi di riscaldamento interni ed esterni. **Per prima cosa, sono i campi magnetici stessi a produrre calore, riscaldando il plasma. A questi si aggiunge una tecnica chiamata iniezione di fasci di neutri (neutral beam injection - NBI).** Questa tecnica introduce calore attraverso particelle neutre; gli isotopi di idrogeno nella camera sono allo stato di plasma, che viene quindi confinato e stabilizzato attraverso il campo magnetico. Un refrigerante che circonda il mantello di litio cattura tutto il calore generato e lo raccoglie per produrre elettricità.

La tecnologia dei magneti

► Attualmente i magneti toroidale, dal peso di circa 10 tonnellate, vengono raffreddati con elio liquido a una temperatura di circa -253.15°C (20 gradi sopra allo zero assoluto) ed alimentati con una corrente elettrica di intensità crescente, fino a 40.000 Amper, per periodi di tempo prefissati e in diverse condizioni di funzionamento, sviluppando un campo magnetico di elevatissima intensità, fino a 20 tesla (T).

► Tali campi magnetici non si sarebbero ottenuti con l'utilizzo di materiali tradizionali come il rame o superconduttori LTS (Low Temperature Superconductors) che si sarebbero danneggiati per il calore generato.

► Il risultato è stato raggiunto grazie alle proprietà dei superconduttori HTS (REBCO - Rare Earth Barium Copper Oxide) che compongono la parte attiva del magnete, che sono in grado di raggiungere performance molto più elevate in termini di campo magnetico associato



Percorsi alternativi alla fusione a confinamento magnetico

Il metodo MCF non è l'unica via allo studio per ottenere la fusione.

Ad esempio, **Il metodo della fusione a confinamento inerziale (Inertial Confinement Fusion - ICF)** utilizza una batteria di laser impulsati sincronizzati ad altissima potenza, che colpisce un pellet di combustibile ad alte densità. Le onde d'urto degli impulsi del laser riscaldano il plasma.

Esiste poi un ulteriore approccio alla fusione, chiamato **Magnetized Target Fusion (MTF)**: una delle sue varianti prevede una combinazione dei due metodi, quello magnetico e quello inerziale, in cui i campi magnetici confinano il plasma, che viene poi riscaldato con il laser o con un metodo alternativo. Tornando nell'ambito MCF, è allo studio, ad esempio tramite il sistema Wendelstein 7-X MCF in Germania, anche il cosiddetto "stellarator", che assomiglia molto ad un tokamak "contorto". Sebbene esistano altre differenze tra i due sistemi, la principale riguarda la forma delle bobine magnetiche, che determina il modo in cui lo stellarator applica le forze magnetiche al plasma. Le bobine dello stellarator sembrano un braccialetto deformato. A causa di questa forma complicata, che è studiata, anche con l'utilizzo di software dedicati, per ottimizzare l'efficacia delle forze magnetiche, **lo stellarator è più complicato da costruire di un tokamak.**

Il grande passo avanti nella fusione nucleare

I ricercatori del Livermore National Laboratory negli Stati Uniti hanno fatto un grande passo in avanti nello sviluppo della fusione nucleare, un metodo di produzione di enormi quantità di energia in modo pulito. Anche se ci vorranno decenni prima di sfruttare queste reazioni per produrre energia elettrica. Come anticipato da diversi media durante lo scorso week end, il dipartimento dell'Energia del governo degli Stati Uniti ha annunciato uno strepitoso risultato realizzato dal **National Ignition Facility (Nif)** del Lawrence Livermore National Laboratory: durante un'esperimento gli scienziati sono riusciti per la prima volta a realizzare un processo di fusione nucleare producendo più energia di quella necessaria a innescare la reazione, tramite la tecnologia della fusione a confinamento inerziale (**Inertial Confinement Fusion - ICF**).

Finora inoltre i vari esperimenti non erano mai riusciti a produrre più energia (parliamo di pochissima energia e per pochissimi secondi) di quella immessa nel sistema per produrla. In altre parole, finora hanno sempre consumato più energia di quella prodotta.

Il 5 dicembre 2022, però, nei laboratori del Nif 192 "cannoni laser ad alta potenza" hanno fatto esplodere un minuscolo cilindro grande quanto la punta di una matita che conteneva idrogeno congelato, innescando una reazione di fusione nucleare.

In meno di 100 trilionesimi di secondo, 2,05 megajoule di energia - all'incirca l'equivalente di una libbra di TNT (quasi mezzo kg) - hanno bombardato la pallina di idrogeno producendo un flusso di particelle di neutroni - il prodotto della fusione - che aveva l'equivalente energetico di circa 1,5 libbre di TNT. Il tutto producendo un **guadagno di energia di circa 1,5**.

Il sistema Laser del NIF

Da un impulso iniziale a bassa energia, creato da una specie di enorme flash si **ottengono 192 raggi** laser altamente energetici e strettamente focalizzati che vengono fatti convergere al centro della camera di confinamento inerziale, una struttura sferica rivestita di alluminio del diametro di 10 metri al cui interno c'è il minuscolo bersaglio contenente idrogeno. I bersagli del Nif sono controllati con precisione in un sistema di raffreddamento criogenico che mantiene il combustibile deuterio-trizio congelato all'interno di una capsula di dimensioni millimetriche chiamato hohlraum. Quando l'hohlraum viene riscaldato dai laser a temperature superiori a 3 milioni di gradi Celsius, i raggi X risultanti si riscaldano e soffiano via, o asportano, la superficie della capsula bersaglio, chiamata ablatore. Ciò provoca un'implosione simile a un razzo che comprime e riscalda il deuterio-trizio a temperature e densità estreme fino a quando gli atomi di idrogeno si fondono, creando nuclei di elio (particelle alfa) e rilasciando neutroni ad alta energia e altre forme di energia.

<https://www.youtube.com/watch?v=yixhyPN0r3g&t=25s>



La competizione delle tecnologie

Utilizzando questo metodo, a fronte di 2 megajoule di energia immessi il Nif ha ottenuto lo scorso 5 dicembre circa 3 megajoule di energia, **con un guadagno energetico di 1.5**. Un risultato importante, ma **in Europa si lavora su una scala differente**.

"Il Livermore ha già ottenuto un saldo positivo di energia da fusione che a Iter deve essere ancora raggiunto, ma **Iter ha un obiettivo ancora più ambizioso perché invece del 150% vuole fare il 1000%, ovvero conseguire un guadagno di potenza a fattore 10, ottenendo 500 mW di potenza di fusione per diverse decine di secondi**", spiega Paola Batistoni, responsabile della sezione sviluppo di Enea, l'Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile.

La competizione delle tecnologie

"In California si è badato a ottenere un risultato scientifico, mentre Iter sarà già un reattore sperimentale che oltre a conseguire un test scientifico servirà anche per definire la fattibilità tecnologica, superando la dimensione del laboratorio - spiega Batistoni -. Iter non sarà solo un tokamak, una camera toroidale a forma di ciambella con spire magnetiche come le macchine sperimentali fin qui utilizzate, ma verrà già equipaggiato di tutti i sistemi necessari, per esempio avrà già i magneti superconduttori, un divertore e componenti per l'autosufficienza del trizio che un domani potremo utilizzare nel reattore Demo per la produzione di energia a usi civili da immettere in rete. Le tecnologie per creare alcune di queste componenti mancano ancora, ma ci stiamo lavorando in parallelo".

La competizione delle tecnologie

Jet, il sistema MCT sviluppato dagli scienziati inglesi in collaborazione con la comunità europea, è una macchina sperimentale dotata di magneti di rame per il confinamento del plasma che limitano a livello costitutivo la possibilità del tokamak di lavorare per non più di cinque secondi, ma ha ugualmente raggiunto la fusione e confermato le previsioni di performance di Iter, progetto al quale è collegato.

"Grazie a Jet si è imparato a mantenere un plasma in condizioni di fusione, non ancora autosostenuta perché abbiamo ottenuto solo un terzo della potenza rispetto a quella immessa, ma siamo andati vicini al pareggio - spiega Batistoni -. In Iter potremo lavorare per durate maggiori grazie a magneti superconduttori, questo ci dà la fiducia di poter raggiungere l'obiettivo. Intorno al plasma dovremo costruire un reattore con tutte le tecnologie per operare in condizione sicura ed economica, sebbene ne manchino essenzialmente due: lo sviluppo di materiali da usare all'interno del reattore e un ciclo chiuso per l'autosufficienza del trizio".

La competizione delle tecnologie

<https://www.youtube.com/watch?v=Q1FkbCcO-gY&t=18s>

Domande e Risposte ... se le so

I problemi ancora da risolvere: Governare i protoni

Le sfide ancora aperte riguardano i materiali da utilizzare all'interno del reattore e il ciclo chiuso per l'autosufficienza del trizio. In entrambi i casi c'entrano i neutroni. **"I prodotti della fusione nucleare non sono radioattivi, cioè la reazione non produce scorie, tuttavia le strutture del reattore diventano radioattive a causa del bombardamento neutronico"**, spiega Batistoni. Fuoriuscendo dal campo magnetico e quindi dal plasma, i neutroni impattano ad altissima energia sul mantello, componente interna del reattore che si riscalda e permette di vaporizzare l'acqua avviando i tradizionali processi di generazione dell'energia elettrica. "Per Demo stiamo sviluppando acciai che, oltre a resistere dal punto di vista delle proprietà termomeccaniche, siano avanzati in due sensi: resistenti al bombardamento neutronico e a bassa radioattività indotta, dovranno cioè avere una radioattività non a lungo termine e decadere nel giro di un paio di secoli. Tali acciai non avranno bisogno di un deposito geologico permanente e potranno essere gestiti con sistemi più semplici rispetto ai materiali risultanti dalla fissione", dice l'esperta. Un'altra tecnologia da mettere a punto riguarda il ciclo chiuso del trizio, utilizzato come combustibile insieme al deuterio (entrambi sono isotopi dell'idrogeno), ma che a differenza di questo non si trova in natura, proviene dalle centrali nucleari a fissione e ha una disponibilità molto scarsa in tutto il mondo. "Iter è già un reattore, ma non avrà ancora l'autosufficienza del trizio e non potremo comprarlo sul mercato, perché non ci sarà - spiega Batistoni -. Dovremo produrlo e per questo vanno fatti ancora tutti i test tecnologici che dimostrino la fattibilità. L'idea è sviluppare componenti in litio, un metallo abbondante in natura, da collocare all'interno del reattore stesso affinché, reagendo con i neutroni usciti dal plasma, produca il trizio che potremo così recuperare per sostenere la fusione con il deuterio".

I problemi ancora da risolvere: Governare i protoni

Nuovi materiali, divertore e ciclo chiuso del trizio sono sfide che dovranno confluire in Demo ma riguarderanno anche le iniziative private, che si stanno moltiplicando nel mondo, per un totale di circa 4,8 miliardi di dollari raccolti. Qualcuno ha già annunciato di poter immettere in rete energia in tempi brevi. "Un conto è dichiarare di aver raggiunto la fusione, un altro è ottenere un guadagno di energia (che in Iter sarà possibile negli anni Trenta), un altro ancora riuscire a immettere energia in rete, farlo con nuovi materiali in grado di durare decenni e con un ciclo di autosufficienza del trizio: tutto questo non lo vedo possibile entro i prossimi dieci anni. Dal canto nostro, in Iter anche grazie ai passi avanti fatti con Jet abbiamo una roadmap: rispetto a 40 anni fa, oggi conosciamo la strada che ci porterà a dimostrare la fattibilità della fusione per un reattore che immetta energia in rete. E dovrà farlo in sicurezza ed economicità. Per noi l'orizzonte resta il 2050".

Conclusioni

- *La fusione nucleare è il processo che la natura ha «scelto» per generare l'universo*
- *E' potente, economica e potenzialmente sicura*
- *Non emette GHG e concettualmente non produce scorie radioattive*
- *Promette di essere la soluzione DEFINITIVA della generazione di energia per il mondo futuro*

Ma...

- ❖ *I processi industriali sono ancora da perfezionare e non saranno disponibili in maniera significativa entro il 2050*

Quello che ci rimane da fare è aspettare e tenerci sempre aggiornati sugli sviluppi futuri attenti a verificare i potenziali problemi se mai venissero fuori

Detto questo ... grazie di tutta la pazienza ed alle stimolanti discussioni di cui in tutti questi anni mi avete fatto dono





Grazie dell'attenzione e...
alla prossima




La fusione nucleare

<https://stream24.ilsole24ore.com/video/economia/la-fusione-confinamento-magnetico/AEFUzHWC>

Il Sole **24 ORE**
Video

☰ 🔍 Lunedì 30 Gennaio 2023 Naviga Serie Gallery Podcast Brand Connect    **ABBONATI** Accedi 



0:24 / 2:47

CREATO PER ENI

La Fusione a confinamento magnetico

12 gennaio 2023

Publicità

20 ANNI PER IL NUOVO RECORD. JET e ITER sono reattori a confinamento magnetico: utilizzano cioè campi magnetici per "confinare" il plasma (il gas surriscaldato di isotopi di idrogeno) nell'anello del reattore, in sospensione, senza che tocchi le pareti - che non potrebbero reggere quelle temperature. Sotto elevatissime temperature (circa 100 milioni di gradi centigradi) e pressioni, gli isotopi dell'idrogeno si fondono in elio, rilasciando energia sotto forma di neutroni. Qui si ferma il lavoro del JET, ma in futuro questi neutroni riscaldano l'acqua che, diventando vapore, alimenterà le turbine per produrre elettricità.

Per battere il record energetico, JET ha utilizzato una miscela di carburante al trizio, la stessa che alimenterà ITER, in costruzione a Cadarache, nel sud della Francia.

Il trizio è un isotopo raro e radioattivo dell'idrogeno (composto da un protone e due neutroni) che, quando si fonde con il deuterio (isotopo stabile dell'idrogeno, composto da un neutrone e un protone), produce molti più neutroni rispetto al far fondere solo atomi di idrogeno (composto da un solo protone). Ciò aumenta la produzione di energia, ma l'utilizzo di questo carburante ha richiesto a JET anni di adeguamento per preparare la macchina alla prova. Nell'esperimento del 21 dicembre 2021 il tokamak di JET ha prodotto 59 megajoule di energia in un "impulso" di fusione di cinque secondi, più del doppio dei 21,7 megajoule rilasciati nel 1997 in circa quattro secondi: un miglioramento ha richiesto 20 anni di ottimizzazione sperimentale e aggiornamenti di materiali strutturali - come la parete interna del tokamak, la regione del reattore più vicina al plasma.

Perché 100 milioni di gradi quando il Sole fa la stessa cosa con temperature che vanno da 5.500 °C (in superficie) a 13.600.000 gradi °C (nel nucleo, dove avvengono le reazioni di fusione)? La differenza la fanno le enormi pressioni nel nucleo della nostra stella, impossibili da replicare sulla Terra, dove è perciò necessario compensare con temperature altrettanto enormi.

"Q" È LA LETTERA MAGICA. La produzione di energia per un certo numero di secondi è essenziale per comprendere e studiare il riscaldamento, il raffreddamento e i moti all'interno del plasma - tutte