Modulo 1

Nozioni di base sulla fusione



Lo scopo di questo modulo è di introdurre la fusione nucleare con un focus sui perché e sui come. Perché la fusione nucleare è interessante, non solo per gli scienziati ma per tutti? Come funziona la fusione nucleare, sia come principio che come mezzo per produrre energia?

Queste domande portano automaticamente a una domanda finale. Qual è il problema? Perché è così difficile produrre energia dalla fusione?

Dopo questo modulo, conoscerai le basi della fusione nucleare e sarai in grado di confrontare la fusione come potenziale fonte di energia con altre fonti di energia. Potrai discutere del potenziale della fusione e capire perché la strada verso l'energia da fusione è così impegnativa.

Se vuoi imparare ancora di più sulla fusione dopo questo modulo, puoi lavorare attraverso gli altri moduli, che approfondiranno aspetti specifici della fusione.

1.1

L'energia e il suo ruolo nel nostro mondo

Il mix energetico

La prima domanda importante per la fusione può essere semplicemente espressa come: "Perché la fusione nucleare è interessante?" Per rispondere a questa domanda, dobbiamo prima esaminare non la fusione in sé, ma l'energia in generale. Dalla scoperta della macchina a vapore, il concetto di energia è diventato sempre più importante. L'energia viene utilizzata per riscaldare le nostre case durante i freddi inverni e rinfrescare le nostre case durante le calde estati.

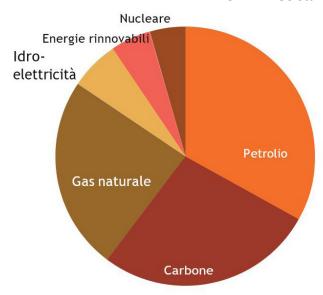


Figura 1. Un grafico a torta del mix energetico mondiale del 2019 diviso per risorsa. La quota di gran lunga maggiore è occupata dal petrolio, seguito da carbone e gas naturale. Idroelettrico, rinnovabili e nucleare seguono a una certa distanza. Fonte: BP Statistical Review of World Energy, 2020.

L'energia è ciò che permette a macchine, automobili e dispositivi di lavorare: dai trasporti all'alimentazione degli elettrodomestici, il mondo moderno non può fare a meno dell'energia.

Tutta questa energia di cui abbiamo bisogno deve essere prodotta in qualche modo. Dalla rivoluzione industriale, l'umanità ha scoperto e sviluppato molti modi intelligenti per produrre energia utilizzabile: le cosiddette fonti energetiche. Queste fonti di energia possono essere classificate, portando a due categorie principali:

energia non rinnovabile e energia rinnovabile.

A complicare ulteriormente le cose, queste possono essere ulteriormente classificate come energia sostenibile o energia non sostenibile.

I termini rinnovabile e sostenibile sono spesso usati in modo intercambiabile. Tuttavia, rinnovabile non è la stessa cosa di sostenibile. Rinnovabile significa che si ricarica nel tempo, mentre sostenibile significa che può essere "sostenuto" per periodi di tempo prolungati (senza conseguenze dannose per il futuro).

Abbattere alberi e piantarne di nuovi è rinnovabile, ma non sempre sostenibile: i semi appena piantati cresceranno in nuovi alberi e dopo un tempo sufficiente, quelli vecchi saranno sostituiti da quelli nuovi e il processo potrà ricominciare da capo. Tuttavia, se gli alberi vengono abbattuti più rapidamente di quanto ne vengano piantati di nuovi, il processo non è sostenibile: alla fine non rimarranno alberi. D'altra parte, i processi possono anche essere non rinnovabili ma sostenibili: la fissione nucleare (nota: la fissione non è la stessa cosa della fusione) non è rinnovabile (i depositi di uranio non

E per quanto riguarda energia verde o pulita?

I termini energia verde o energia pulita si incontrano spesso nella vita quotidiana. Green and clean sono etichette che indicano l'impatto ambientale di una fonte energetica: indicano che una fonte non produce emissioni nocive (carbonio/serra) (nel suo processo produttivo). È discutibile ciò che definisce una fonte di energia veramente pulita, poiché la produzione di una fonte di energia pulita può ancora portare a emissioni durante la sua costruzione o durante il trasporto. L'energia sostenibile di solito implica che può essere "sostenuta" per periodi di tempo prolungati senza conseguenze dannose (conosciute) per il futuro. Poiché questo è più chiaramente definito rispetto all'energia verde o pulita, l'attenzione qui si concentrerà sull'energia sostenibile.

Esercizio in aula 1.1

- (a) Stima quale percentuale dell'energia del tuo paese è creata da fonti di energia rinnovabile come solare, eolica, idroelettrica, ecc. Spiega come hai raggiunto la tua stima. Hai fatto delle ipotesi?
- (b) Confronta la tua stima con la stima di almeno un altro studente. Le stime differiscono molto? Confronta il ragionamento alla base delle stime: hai fatto ipotesi diverse?
- (c) Cerca il mix energetico del tuo paese. Confronta le tue stime con i dati. Le tue stime erano vicine?

Vedi anche esercizi: A.1, A.2, A.3.

vengono reintegrati naturalmente) ma ce n'è abbastanza per sostenere molti reattori per un tempo piuttosto lungo (anche se non per sempre) e, con una gestione responsabile delle scorie nucleari, senza conseguenze nefaste per il futuro. Pertanto, la fissione è vista come una fonte di energia non rinnovabile, ma può essere sostenibile.

Il problema energetico

Ora avete una visione più approfondita del mix energetico e della quantità di energia necessaria per far

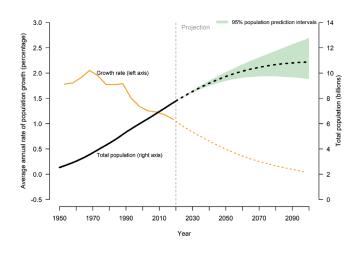


Figura 2. Il tasso di crescita della popolazione mondiale è in calo dagli anni '70. Questo è visibile dalla linea di tendenza arancione. Di conseguenza, la popolazione totale, rappresentata in nero, si sta spostando costantemente verso un valore costante di circa 11 miliardi di abitanti del mondo. L'area verde rappresenta l'incertezza nel modello utilizzato. Fonte: Nazioni Unite, Dipartimento per gli affari economici e sociali, Divisione Popolazione (2019). Prospettive della popolazione mondiale 2019: punti salienti. ST/ESA/SER.A/423.

funzionare la nostra società moderna, ma non siamo più vicini a capire perché la fusione sia importante. Per capirlo, dobbiamo esaminare il **problema energetico** che può essere collegato ai seguenti sviluppi.

La popolazione mondiale è in aumento. È aumentato da 6 miliardi nel 1999 a 7,8 miliardi nel 2020 e dovrebbe aumentare verso 8,5 miliardi nel 2030, 9,7 miliardi nel

2050 e 10,9 miliardi nel 2100, vedere anche la figura 2.

Il consumo medio di energia per persona è in aumento.

I Paesi si stanno sviluppando ulteriormente, portandosi a standard di vita più elevati. Uno standard di vita più elevato in genere significa un aumento del fabbisogno energetico, ad esempio a causa dello sviluppo di servizi di base, infrastrutture o maggiore accesso/disponibilità di energia elettrica e internet. Come dichiarato dalle Nazioni Unite, ogni essere umano ha diritto a uno standard di vita adeguato alla propria salute e al proprio benessere. Garantire a tutti l'accesso a standard di vita adeguati ha una priorità più alta rispetto alla riduzione del consumo medio di energia per persona e non sarebbe etico negare alle persone questi migliori standard di vita.

La maggior parte dell'energia proviene ancora da fonti dannose per l'ambiente, in particolare che portano a emissioni di gas serra. I combustibili fossili dominano il nostro approvvigionamento energetico e mentre le fonti energetiche rinnovabili e pulite stanno crescendo rapidamente, non stanno crescendo abbastanza velocemente da sostituire la nostra dipendenza dai combustibili fossili prima che l'irreversibile cambiamento climatico si verifichi. Il cambiamento climatico avrà molti effetti dannosi sul mondo: si prevede che l'aumento delle temperature porterà a condizioni meteorologiche più estreme (che porteranno, ad esempio, a incendi e ondate di calore), e si prevede che il cambiamento climatico avrà anche un impatto negativo sulla salute umana, sulla fauna selvatica e sulla economia globale. Quindi, i combustibili fossili non sono una soluzione sostenibile per il futuro: il cambiamento climatico è già in atto e occorre agire ora, con urgenza.

La combinazione di questi tre fattori è il problema energetico che il mondo deve affrontare oggi.

Soluzioni al problema energetico

Come per ogni problema, dovrebbe esserci qualche possibile soluzione. Per il problema energetico si possono pensare a molte possibili soluzioni, ma la maggior parte di queste soluzioni si accompagna a forti

cambiamenti dello stile di vita e del tenore di vita medio: due cose che la maggior parte delle persone non vuole sacrificare. Logicamente, ci sono due modi principali in cui il problema energetico può essere risolto:

(1) Diminuendo drasticamente il fabbisogno energetico (medio).

Ciò può essere fatto rendendo i processi molto più efficienti (un problema tecnologico) o riducendo drasticamente il consumo energetico individuale (un problema sociale). L'ottimizzazione dell'efficienza energetica ha i suoi limiti: ci sarà sempre qualche forma di perdita di energia, sia che si tratti di perdite di calore nei cavi elettrici o di attrito all'interno di una macchina. Allo stesso tempo, ci sono anche molte cose che possono essere

rese ancora più efficienti, da un migliore isolamento degli edifici a un uso più intelligente del calore, dei trasporti o delle risorse.

D'altra parte, ridurre il consumo medio di energia è un'opzione molto praticabile, se non necessaria. Il cambiamento climatico influenzerà drasticamente le nostre vite, che ci piaccia o no. Di conseguenza, i cambiamenti dello stile di vita sono inevitabili, soprattutto considerando che attualmente una piccola parte ricca della popolazione mondiale consuma la maggior parte dell'energia totale, mentre il consumo dei poveri è molto inferiore: molte persone ancora non hanno nemmeno accesso all'elettricità. Non possiamo aspettarci che chi non ha elettricità rimanga senza elettricità perché gli altri ne usano così tanta.

(2) Aumentando drasticamente la produzione di energia sostenibile.

Se dovessimo abbandonare immediatamente tutti i combustibili fossili, potremmo risparmiare molte emissioni! Comunque, è più facile a dirsi che a farsi. Entrano in gioco aspetti politici ed economici: l'industria dei combustibili fossili è grande e non può svanire da un giorno all'altro: i combustibili fossili devono essere sostituiti da alternative elettriche. In alcune aree si possono già osservare rapidi cambiamenti (si pensi alle auto elettriche), ma questo

cambiamento verso alternative elettriche è tanto veloce quanto la produzione e lo scale-up di queste alternative.

C'è bisogno di tempo per la transizione verso alternative elettriche, mentre allo stesso tempo il tempo sta per scadere per evitare che si verifichino effetti dannosi dovuti al cambiamento climatico.

Chiaramente tutto quanto sopra porta a un problema sociale di enormi proporzioni che influenzerà tutta la vita sul nostro pianeta.

Cercando modi per aumentare la quantità di energia prodotta in modo sostenibile, si finisce inevitabilmente con le più famose fonti di energia rinnovabile: l'energia solare ed eolica. L'unico problema con questi è che non possono funzionare senza sosta, mentre la nostra società funziona senza sosta. Pertanto, queste fonti di energia devono essere abbinate a adequate soluzioni di accumulo di energia. L'energia solare ed eolica variano durante il giorno, ma il problema principale risiede nella loro stagionalità e dipendenza dalla loro posizione. In inverno le giornate sono più corte e c'è meno luce disponibile rispetto alle giornate estive, mentre i venti sono più forti in inverno rispetto all'estate. Allo stesso tempo, a seconda della posizione geografica, alcuni luoghi avranno venti forti tutto l'anno, mentre altri avranno

venti calmi e alcuni luoghi riceveranno più luce solare di altri (si pensi ad esempio a fitte foreste, ampie steppe, aridi deserti o artici).

Quando il solare e l'eolico vengono confrontati con i combustibili fossili, è particolarmente facile vedere quanto siano utili i combustibili fossili proprio perché possono generare molta energia ininterrottamente: possono fornire un costante carico di base indipendentemente dal fatto che la luce solare o il vento siano meno intensi per un certo periodo di tempo. Tuttavia, l'uso continuato di combustibili fossili andrà a scapito di un futuro vivibile per molti.

Di conseguenza, possiamo identificare due approcci principali a risolvere il problema energetico:

(1) Fare un migliore accumulo di energia Ad esempio, batterie migliori e più potenti.

(2) Trovare un modo alternativo per fornire questo carico di base.

L'opzione più nota: Passa al nucleare!

Sfortunatamente, anche se le batterie stanno diventando migliori e più economiche, le combinazioni di energia sostenibile come quella solare o eolica e lo stoccaggio di energia attraverso le batterie sono ancora molto più costose dei combustibili fossili. Le fonti energetiche sostenibili non solo devono raggiungere i combustibili fossili, ma devono superarli e sostituirli entro i prossimi 30 anni. E se lo fanno, non è affatto certo che la combinazione di fonti rinnovabili e stoccaggio di energia sarà in grado di fornire tutta l'energia necessaria a livello globale in futuro. D'altra parte, anche la fissione nucleare che fornisce il carico di base è tutt'altro che ideale in quanto produce scorie radioattive di lunga durata.

Fusion come soluzione (di riserva).

Poiché vi sono ancora incertezze riguardo al mix energetico ideale del futuro, l'esplorazione di varie alternative potrebbe portare al miglior mix energetico non solo per il prossimo futuro, ma anche per il futuro lontano. Qui la fusione nucleare potrebbe entrare in gioco come potenziale futura fonte di energia. La fusione nucleare è un processo che possiamo osservare continuamente, è il processo che alimenta il S e tutta la vita sul nostro pianeta dipende da esso. L'obiettivo è creare una piccola stella controllata qui sulla Terra e gli scienziati di tutto il mondo si stanno avvicinando sempre di più. Tuttavia, la fusione nucleare non risolverà i problemi dell'immediato futuro, poiché ci vorrà del tempo prima che l'energia da fusione sia realizzata. Tuttavia, potrebbe essere la risposta ai nostri problemi energetici per i secoli a venire.

Se l'energia dalla fusione nucleare potesse essere ottenuta qui sulla Terra, sarebbe una soluzione sostenibile e intrinsecamente sicura con (quasi) nessuna emissione. Sarebbe in grado di fornire un carico di base proprio come i combustibili fossili o la fissione nucleare. Sarebbe una fonte energetica compatta con un'abbondanza di combustibile disponibile: sufficiente per generare energia per centinaia se non migliaia di anni. Tuttavia, la fusione è tutt'altro che ideale: è complessa ed estremamente difficile e il guadagno netto di energia attraverso la fusione non è ancora

stato raggiunto. Tuttavia, la fusione sarebbe un'ottima opzione di ripiego se le altre fonti energetiche non fossero in grado di fornire abbastanza energia sostenibile per il futuro. Scienziati di tutto il mondo sono al lavoro per risolvere la grande sfida che è l'energia da fusione con la speranza di sbloccare l'alto potenziale della fusione nucleare come fonte di energia del futuro. In conclusione, non esiste una soluzione "d'oro" per risolvere il problema energetico. Il tempo stringe per prevenire cambiamenti climatici irreversibili e, come dimostrato dalla firma dell'Accordo di Parigi nel 2015 da parte di 190 paesi e dell'Unione Europea, il mondo concorda sul fatto che le emissioni globali di gas serra devono essere ridotte per limitare l'aumento della temperatura globale a 2 gradi Celsius. Per fare ciò, il mix energetico del mondo deve cambiare drasticamente. La fusione non risolverà i nostri problemi entro i prossimi 50 anni, ma se può essere fatta funzionare, potrebbe risolvere i nostri problemi energetici per molte generazioni a venire. Quindi, è visto come un obiettivo degno dalle molte persone che lavorano per raggiungere la fusione il più velocemente possibile.

Nei prossimi capitoli di questo modulo verranno spiegate le basi della fusione nucleare. Daremo un'occhiata alla fusione all'interno del Sole, impareremo cos'è un plasma e vedremo quali sono i passaggi fondamentali per costruire un dispositivo di fusione. Si dimostrerà che raggiungere la fusione non è così difficile, ma che la creazione di energia utilizzabile da essa è la grande (e ancora irrisolta) sfida. Alla fine di questo modulo, sarai in grado di comprendere la fisica principale alla base di un dispositivo di fusione nucleare.

1.2

Fusione all'interno del Sole

Ora che il "perché" è fuori mano, è il momento del "come". Per prima cosa, diamo un'occhiata all'unico reattore a fusione che ha funzionato senza sosta da prima ancora che l'umanità sapesse cosa fosse la fusione: il Sole.

II Sole

Il Sole è un enorme insieme di particelle tenute insieme dalla gravità. Per dirla semplicemente: a causa della gravità qualsiasi oggetto con massa attrae qualsiasi altro oggetto con massa.

L'entità di questa attrazione (quanto gli oggetti duri si "tirano" l'uno sull'altro) dipende da quanto è grande la massa. Sulla Terra, il nostro stesso pianeta è molto pesante e trascina tutto verso il suo centro. Ciò si traduce nella gravità che sentiamo, che mantiene i nostri piedi ben saldi a terra e fa cadere gli oggetti verso terra.

Il Sole è molto più pesante: circa 333.000 volte la massa

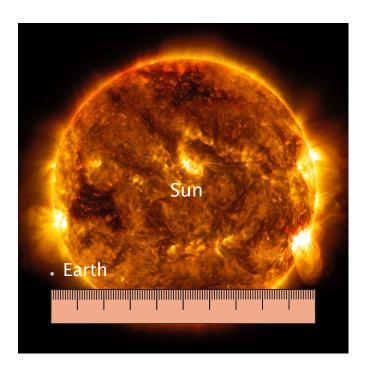


Figura 3. Rispetto al Sole, la Terra è incredibilmente piccola. Un punto azzurro pallido, come diceva Carl Sagan. Il suo raggio è cento volte più piccolo di quello del Sole, mentre il suo volume è un milione di volte inferiore. Adattato da: NASA/Osservatorio Dinamico Solare.

della Terra. Di conseguenza, la forza gravitazionale del Sole è molto più forte della gravità che sentiamo sulla Terra. Tuttavia, deve esserci anche una forza verso l'esterno, altrimenti il Sole collasserebbe in un punto. Questa forza verso l'esterno è il risultato delle reazioni di fusione nel nucleo del Sole.

Nello stesso modo in cui la pressione aumenta sulla Terra man mano che ci addentriamo verso il centro del pianeta, la pressione all'interno del Sole diventa sempre più alta, più ci avviciniamo al centro. Questo è lo stesso principio che porta ad alte pressioni quando si va in luoghi molto profondi negli oceani: tutta la massa sopra preme verso il basso a causa della gravità, e se c'è molta massa sopra di te, significa che la pressione diventa più alta. La gravità attira tutte le particelle verso il centro, in sostanza cercando di comprimere tutta la massa. L'alta pressione nel nucleo del Sole porta quindi a una forza verso l'esterno che bilancia la forza di gravità verso l'interno. Di conseguenza, il Sole non collassa in un punto né si espande: è in equilibrio.

Nel nucleo del Sole, la temperatura è estremamente alta. Logicamente, poiché il Sole perde calore alla sua superficie (attraverso la radiazione), la temperatura è più bassa in superficie e più alta al centro. Allo stesso tempo, a causa della compressione delle forze gravitazionali, la densità è massima al centro. Di conseguenza, le condizioni nel nucleo del Sole sono molto estreme e, a causa di queste condizioni estreme, c'è la possibilità che particelle separate diventino una: possono fondersi. Quando due particelle si fondono, viene rilasciata molta energia e questo rilascio di energia porta all'elevata pressione verso l'esterno che contrasta le forze gravitazionali e impedisce al Sole di collassare.

Dentro l'atomo

Esaminiamo più a fondo cosa sono esattamente queste "particelle" e cosa succede se si "fondono".

Tutti gli oggetti fisici sono costruiti con qualcosa. Se potessimo ingrandire sempre di più un oggetto, vedremmo che (quasi) tutti gli oggetti sono costituiti da complesse strutture molecolari, che sono costituite

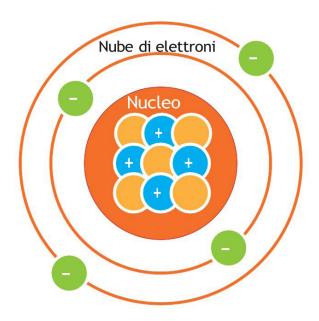


Figura 4. Una rappresentazione schematica di un atomo. Al suo centro si trova il nucleo, che è costituito da protoni (caricati positivamente) e neutroni (neutri). Attorno al nucleo si trova una nuvola di elettroni (con carica negativa).

da singole molecole, che sono costituite a loro volta da atomi. Ciascuno di questi atomi ha una struttura simile: un nucleo e una "nuvola" di elettroni che si muovono intorno a questo nucleo. Il nucleo a sua volta è costituito da due tipi di particelle: protoni e neutroni.

Il numero di protoni nel nucleo determina che tipo di atomo, o elemento, è: se il nucleo ha un solo protone, lo chiamiamo idrogeno, se ha due protoni, lo chiamiamo elio. Sono stati trovati e classificati molti elementi diversi che possono essere visti nella tavola periodica, vedi scheda a parte. Il numero di neutroni all'interno del nucleo può differire, risultando in diverse versioni di un certo elemento: ad esempio, un nucleo composto da un solo protone senza neutroni è semplicemente chiamato idrogeno, ma se ha sia un protone che un neutrone, lo chiamiamo deuterio, un diverso isotopo di idrogeno. Nel caso degli atomi di idrogeno esistono tre possibili isotopi: idrogeno "normale", deuterio e trizio (che ha un protone e due neutroni).

Qual è allora la differenza tra un protone e un neutrone? Un protone è una particella carica positivamente, mentre un neutrone è una particella neutra. La carica elettrica si presenta in due tipi: positiva e negativa. Le cariche positive respingono altre cariche positive e attraggono

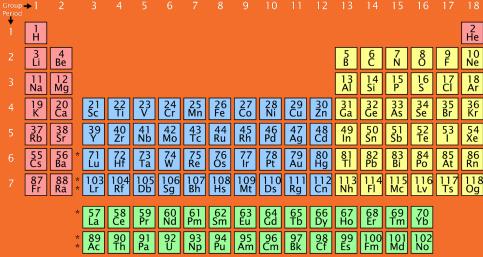


Figura 5. Sistema periodico degli elementi. Fonte: utente di Wikimedia Double Sharp (CC BY- SA 4.0)

Notazione atomica

Ora che sappiamo cosa sono gli atomi e gli isotopi, esaminiamo brevemente la notazione usata per loro. Poiché il numero di protoni di un atomo determina quale tipo di atomo, o elemento, è, questo è il primo identificatore: il numero atomico. Per l'idrogeno (H) questo è 1, per il carbonio (C) è 6. Tutti gli atomi di idrogeno hanno numero atomico 1, tutti gli atomi di carbonio hanno numero atomico 6, indipendentemente da quale isotopo sia.

La quantità totale di protoni e neutroni insieme dà la massa atomica totale: il numero di massa. Poiché protoni e neutroni hanno massa approssimativamente uguale, viene comunemente usata l'unità di massa atomica (amu), che è circa 1 per un protone (1,007276 amu) e anche per un neutrone (1,008665 amu). Gli elettroni sono molto più leggeri, quindi per la massa totale di un atomo questi possono solitamente essere trascurati. Quindi per l'idrogeno normale il numero di massa è 1 (solo un protone e un elettrone), per il deuterio questo è 2 (protone + neutrone + elettrone) e per il trizio è 3 (protone + neutrone + neutrone + elettrone).

Questo porta a una notazione standard per gli isotopi atomici, con il numero di massa (in alto) e il numero atomico (in basso) visualizzati accanto alla lettera (sul lato sinistro) corrispondente al tipo di atomo. Poiché la lettera contiene le stesse informazioni del numero atomico, possiamo anche scegliere di tralasciare il numero atomico. La notazione con una lettera insieme al numero di massa e al numero atomico sarà usata in questi capitoli.

quelle negative, mentre le cariche negative respingono altre cariche negative e attraggono quelle positive. Questo è lo stesso processo che ti fa rizzare i capelli quando ti carichi tu stesso: se i capelli sulla tua testa si caricano tutti allo stesso modo (per esempio perché tocchi qualcosa che è carico) allora si respingeranno a vicenda. Il risultato è che tutti i peli si allontaneranno il più possibile dagli altri, facendoli stare dritti!

Significa allora che gli atomi sono carichi? Mentre il nucleo è sempre carico positivamente (poiché è composto solo da protoni e neutroni), è circondato da elettroni che gli volano intorno. Gli elettroni sono particelle caricate negativamente con esattamente la stessa carica di un protone, ma negativa. Gli atomi sono sempre neutri, quindi ci deve essere lo stesso numero di particelle caricate negativamente e positivamente in un atomo. Quindi c'è sempre un numero uguale di protoni ed elettroni in ogni atomo.

Ciò non significa che esistano solo particelle con lo stesso numero di protoni ed elettroni: se un atomo perde uno (o più) elettroni e si carica positivamente, diventa un ione positivo e se guadagna uno (o più) elettroni aggiuntivi, diventa a ione negativo. L'elettrone che non fa più parte di un atomo si chiama a elettrone libero. Esiste un'ampia varietà di ioni, sia caricati positivamente che negativamente.

Reazioni nucleari

Torniamo al processo di fusione: ora che sappiamo cosa sono i nuclei, vediamo cosa succede quando due nuclei si fondono.

Nel Sole, la temperatura è abbastanza alta da permettere a due nuclei di entrare in collisione, anche se si respingono a causa della loro carica positiva, per diventare un nuovo nucleo più grande. Questa si chiama reazione di fusione nucleare o reazione di fusione in breve. Le reazioni di fusione nelle stelle possono portare a elementi più pesanti che possono anch'essi fondersi se la temperatura è sufficientemente alta. In questo modo, è possibile creare elementi più pesanti e l'energia viene rilasciata nelle stelle tramite catene di reazioni di fusione.

Esercitazione in aula 1.2

Il concetto di densità di energia è importante in fisica e sebbene sembri difficile, si riduce a "quanta energia c'è dentro un certo volume di roba". Se si brucia 1 litro di benzina e si misura la quantità di energia che viene rilasciata (sotto forma di calore) e la si divide per il volume bruciato, si ottiene una misura della densità di energia. Per tutti i combustibili è possibile determinare una densità energetica.

- (a) Tra i combustibili elencati di seguito, quale immagini abbia la più alta densità di energia? Quale indovineresti avere la densità di energia più bassa? Ordinali dal più alto al più basso.
- (b) Confronta la tua graduatoria con quella di almeno un altro studente. Discuti perché li hai inseriti in questo ordine.
- (c) Cerca le densità di energia. Confronta le tue classifiche con i dati. Le tue stime erano vicine?

Benzina - petrolio - carbone - legna - idrogeno (gas) - etanolo - deuterio - uranio

Vedi anche esercizi: A.4, A.5, A.6, A.7, A.8.

Vediamo la reazione di fusione più interessante, che è quella più facile da provocare: la reazione di fusione deuterio-trizio, o Fusione D-T.

$$_{1}^{2}H^{+} + _{1}^{3}H^{+} \rightarrow _{2}^{4}He^{2+} + n + 17.6 MeV$$

In questa reazione, due isotopi di idrogeno, deuterio (un protone, un neutrone) e trizio (un protone, due neutroni) si fondono per formare un nucleo di elio, un neutrone libero e un'enorme quantità di energia: 17,6 MeV. Qui, MeV sta per mega-elettronvolt. L'elettronvolt (eV) è un'unità di energia, come il Joule (J), che è frequentemente utilizzato nei processi nucleari e atomici.

enormemente alta. Se bruciamo un litro di benzina e confrontalo con la fusione di un litro di carburante a base di deuterio e trizio, la reazione di fusione produrrà molta più energia: circa 10 milioni di volte di più! Questo vale per tutte le reazioni nucleari, sia di fissione che di fusione e questo rende le reazioni nucleari estremamente utili per creare energia, ma purtroppo le rende anche adatte a scopi più sinistri, come dimostrato dallo sviluppo della bomba atomica durante la seconda guerra mondiale (una bomba a fissione dispositivo) e lo sviluppo della bomba H durante gli anni '50 (che utilizzava una combinazione di fissione e fusione).

Elettronvolt

Gli elettronvolt suonano come uno strano tipo di unità, ma è molto utile per i processi atomici. Poiché i processi atomici avvengono su scala molto piccola, abbiamo a che fare con quantità di energia molto piccole. Quindi un'unità più piccola è molto più facile da usare qui (scrivere tutto in Joule è solo ingombrante). Nella scelta di un'unità più piccola, è meglio scegliere qualcosa che sia facilmente e accuratamente misurabile, pur essendo allo stesso tempo correlato ai processi per i quali vogliamo un'unità adatta.

Poiché l'energia delle particelle atomiche è principalmente correlata al loro movimento, l'energia che una particella guadagna quando la acceleriamo è una scelta naturale. Le particelle cariche sono le più facili da accelerare (utilizzando una differenza di potenziale) e gli elettroni svolgono un ruolo estremamente importante nei processi atomici. Quindi 1 elettronvolt (eV) è definito come l'energia guadagnata da un elettrone, quando viene accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt (V) (partendo da fermo nel vuoto). Quindi un elettrone con carica e, accelerato su una differenza di potenziale di 1 V risulta in 1 eV.

Per dirla in una certa prospettiva, se usiamo una batteria AA (che fornisce circa 1,5 V) per accelerare un elettrone (nel vuoto, partendo da fermo), allora otterremmo un elettrone con un'energia di:

carica \times Tensione = 1 e \times 1,5 V = 1,5 eV.

Ritorno sulla Terra

Ora possiamo capire perché il Sole può esistere: la gravità spinge verso l'interno e l'energia che si sprigiona nelle reazioni di fusione nel nucleo del Sole riscalda il nucleo e lo fa espandere, provocando una pressione verso l'esterno.

L'equilibrio tra la pressione interna ed esterna assicura che il Sole non collassi a causa della gravità o esploda a causa dell'energia rilasciata nelle reazioni di fusione.

Da quando l'umanità ha capito come funzionano le stelle, abbiamo cercato di replicare quel processo sulla Terra per generare energia. Ma il problema è che anche l'intera Terra è troppo piccola perché la fusione funzioni allo stesso modo sulla Terra come fa nel Sole. Dobbiamo trovare alternative alla gravità estremamente forte. Fortunatamente, abbiamo trovato diversi modi per creare la fusione sulla Terra. Il più comune è creare un "plasma" e utilizzare magneti molto potenti per controllarlo. Per capire il modo migliore per creare la fusione sulla Terra, per prima cosa dobbiamo sapere quali condizioni sono necessarie affinché la fusione avvenga.

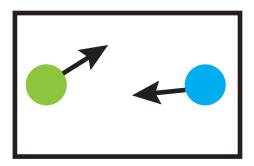
Criteri per la fusione

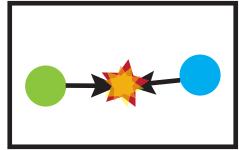
Nel Sole, l'enorme pressione dovuta alla gravità consente il verificarsi di reazioni di fusione. Questa pressione è il prodotto di due cose: temperatura e densità. Entrambi sono importanti per il verificarsi delle reazioni di fusione. Per chiarire questo, diamo un'occhiata a una situazione ipotetica con solo due particelle caricate positivamente intrappolate in una scatola.

Le due particelle si respingono a causa della loro carica. Questa repulsione dipende dalla distanza tra le particelle: se sono vicine la repulsione è forte, ma se c'è una certa distanza tra loro allora la repulsione diventa rapidamente piuttosto debole. Naturalmente, le particelle si allontanano il più possibile l'una dall'altra, ma poiché si trovano in una scatola, verranno fermate alle pareti opposte della scatola. Se le particelle si avvicinano abbastanza tra loro, sono in grado di fondersi. Supponiamo che una volta che le due particelle

si tocchino, si fondano automaticamente in una nuova particella più grande. Perché ciò accada, dobbiamo in qualche modo riunire le particelle: dobbiamo vincere la

Figura 6. Due particelle cariche positivamente ad alta velocità all'interno di una scatola. Quando la velocità è sufficientemente elevata, le particelle possono superare la repulsione e scontrarsi in modo da toccarsi.





loro repulsione con la forza. Poiché la repulsione diventa più forte quanto più le particelle si avvicinano, questa non è una cosa facile. Ma può essere fatto facendo volare le particelle abbastanza velocemente da poter scontrarsi e fondersi insieme.

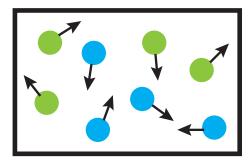
Torniamo alle due particelle intrappolate in una scatola. Diamo alle due particelle alta velocità e lasciamole volare nella scatola altrimenti vuota: diamo le particelle energia cinetica. Le particelle rimbalzeranno sulle pareti e voleranno casualmente attraverso la scatola. Se le particelle si avvicinano l'una all'altra, la repulsione tra le particelle le allontanerà. Tuttavia, guando la velocità delle particelle diventa sufficientemente elevata, la repulsione non è più abbastanza forte da separare le particelle e possono scontrarsi: le particelle si toccheranno e si fonderanno. In questo scenario. una collisione può essere vista come un caso di alta pressione molto breve: le particelle si muovono molto velocemente e una volta che si scontrano, premeranno contro l'altra particella molto forte nel momento in cui le particelle si toccano.

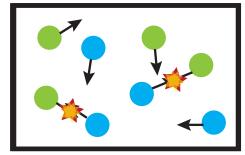
Qui è importante il legame tra energia cinetica e temperatura. La temperatura è una misura dello stato medio di agitazione termica di un insieme di particelle (movimento casuale o vibrazione di un insieme di particelle). Quindi, nella nostra situazione ipotetica con le due particelle, abbiamo dato alle particelle velocità molto elevate e, di conseguenza, la velocità media è alta e quindi la temperatura per le (il raggruppamento di) particelle è alta. Quindi, riscaldando le nostre particelle,

possiamo aumentare la loro velocità media e se la loro velocità è abbastanza alta c'è la possibilità che le particelle possano fondersi.

Tuttavia, se ci sono solo due particelle molto piccole all'interno di una scatola, la possibilità che si scontrino e si fondano casualmente è molto piccola. Quindi dobbiamo aumentare la probabilità che le particelle si fondano: possiamo aumentare il numero di particelle all'interno della scatola. Finché tutte le particelle hanno velocità sufficientemente elevate in modo che ciascuno di essi abbia la probabilità di fondersi, aumentando il

Figura 7. Una scatola è riempita con molte particelle caricate positivamente che hanno ciascuna un'alta velocità. Quando la velocità è sufficientemente elevata, le particelle possono superare la repulsione e scontrarsi. Se ci sono più particelle, è più probabile che si verifichino collisioni.





numero di particelle all'interno della scatola si otterrà una maggiore probabilità che si verifichi la fusione. Aumentando il numero di particelle nella scatola (e mantenendo la scatola uguale) aumentiamo la densità delle particelle. Quindi, per ottenere la fusione è meglio utilizzare una combinazione di alta densità e alta temperatura. Questo è osservabile nel Sole, dove la densità al centro è alta e anche la temperatura al centro non è esattamente fredda. Quindi, è questa combinazione di alta densità e alta temperatura che porta alle condizioni estreme necessarie per le reazioni di fusione all'interno del Sole.

Tuttavia, abbiamo sorvolato su un fattore importante qui: abbiamo bisogno di una scatola perché funzioni! Se le particelle non sono confinate, le collisioni non si verificheranno. Qui è pratico introdurre il tempo di confinamento. Se si riesce a mantenere un prodotto a una sufficientemente alta densità e temperatura per un periodo di tempo più lungo, si otterrà più potenza di fusione. Tuttavia, il nostro insieme di particelle non manterrà automaticamente la sua alta temperatura: si raffredderà rapidamente se non la terremo ben

isolata. Quindi dobbiamo mantenere la nostra energia "confinata" nella nostra scatola, il nostro reattore a fusione. Altrimenti il calore lascerà rapidamente il reattore.

È simile a come teniamo calda una stanza: se una finestra è aperta mentre proviamo a riscaldare la stanza e se fuori fa molto freddo, dobbiamo riscaldare molto di più per mantenere la stanza alla temperatura che vogliamo e molta energia viene sprecata. Dobbiamo confinare l'energia all'interno della stanza e assicurarci che la temperatura possa essere mantenuta alta in modo che possano verificarsi molte reazioni di fusione. Se il tempo di confinamento è grande, ciò significa che l'energia rimane all'interno della nostra scatola per un tempo più lungo e di conseguenza anche la possibilità che si verifichino reazioni di fusione è maggiore.

Fusione sulla Terra

Nel Sole le particelle nel nucleo sono confinate molto bene, ma sulla Terra la gravità non fa il lavoro per noi. Abbiamo bisogno di confinare l'energia in un altro modo per ottenere il maggior numero possibile di reazioni di fusione usando la minima quantità di energia. Fortunatamente, in ciascuna di queste reazioni di fusione viene rilasciata molta energia. Questa energia non viene rilasciata sotto forma di luce: l'energia viene rilasciata come energia cinetica nelle particelle che si creano nella reazione di fusione. Ciò significa che alla fine di una reazione di fusione si ottengono particelle ancora più veloci che aiutano ad aumentare la temperatura complessiva e possono aiutare a mantenere la reazione in corso.

Dal momento che non possiamo usare la gravità per creare densità e temperature elevate come nel Sole, dobbiamo trovare un altro modo per ottenere condizioni così estreme e dobbiamo confinare tutta questa energia in un certo modo. Dobbiamo creare una combinazione di alta densità e alta temperatura e confinare tutta l'energia per garantire che la probabilità che due particelle si fondano diventi abbastanza alta nei nostri dispositivi di fusione sulla Terra.

1.3

Plasma

Come accennato in precedenza, il modo più comune per creare la fusione sulla Terra fa uso del plasma. In questa sezione verrà discusso cos'è un plasma e come viene utilizzato per la fusione.

Riscaldare il combustibile

Come affermato prima, la temperatura è una misura dell'energia: è una misura della velocità media con cui le particelle si muovono o vibrano. Più alta è la temperatura, più veloce è il movimento o la vibrazione. Questo vale per tutta la materia in tutte le fasi: solidi, liquidi e gas. Se un oggetto solido, come un pezzo di metallo, viene riscaldato, gli atomi iniziano a vibrare con oscillazioni maggiori. In un solido, questo non

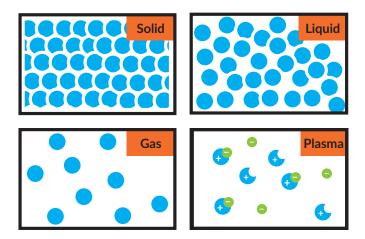


Figura 8. Una rappresentazione schematica delle tre fasi della materia e di un plasma. Tutte le particelle si muovono o vibrano: la velocità media dipende dalla temperatura della materia. Il moto medio delle particelle aumenta quando la materia viene riscaldata. In un solido, il moto delle particelle è molto limitato. In un liquido le particelle possono già muoversi più liberamente e in un gas le particelle possono muoversi (quasi) completamente libere. Quando un gas viene riscaldato a temperature sufficientemente elevate, inizia a scomporsi: si forma un plasma, costituito da particelle cariche separate.

cambia molto la forma dell'oggetto; il pezzo di metallo si espande un po' ma rimane sostanzialmente lo stesso. Se diventa abbastanza caldo, la struttura macroscopica (= osservabile ad occhio nudo) del pezzo di metallo inizia a rompersi. Le particelle si muoveranno più velocemente e gli oggetti perderanno la loro struttura: si verificherà la fusione. Una volta che diventa ancora più caldo, la struttura macroscopica, ora un liquido, può rompersi ulteriormente: può diventare un gas. Durante

questa fase di transizione da liquido a gas i legami tra gli atomi sono completamente scomposti e le particelle iniziano a volare liberamente. Le uniche interazioni tra le particelle di gas sono le collisioni.

Questo processo di trasformazione da solido a liquido a gas (o viceversa) è chiamato passaggio di fase. La temperatura alla quale si verifica un cambiamento di fase dipende dal tipo di atomi e dai tipi di legami tra di loro. Alcuni materiali inizieranno a sciogliersi a basse temperature (cioccolato, candele) mentre altri, come i metalli, si sciolgono solo a temperature molto elevate. Alcune forme di materia bollono addirittura a temperature così basse da essere viste in natura solo in fase gassosa: ad esempio l'ossigeno nell'aria che respiriamo, che inizia a bollire già alla bassissima temperatura di -183 °C.

Ricorda che il nostro combustibile per la fusione è il deuterio e il trizio, che sono due diversi isotopi dell'idrogeno. A temperatura ambiente, l'idrogeno è già un gas. La densità di un materiale è anche correlata alla sua fase: se fondiamo un materiale, in generale ci sarà più spazio tra le particelle: il volume aumenterà e il numero di particelle rimarrà lo stesso, portando a una densità inferiore. Di conseguenza, se il nostro combustibile è un gas, generalmente abbiamo basse densità. Quindi per raggiungere le condizioni di fusione, dobbiamo riscaldare il gas a temperature molto elevate.

Ionizzazione

Quindi il nostro carburante è un gas e dobbiamo riscaldare questo gas a temperature estreme. Ma cosa succede se riscaldiamo ulteriormente un gas? Può un gas fare qualcosa di simile all' "ebollizione", come fa un liquido? In un certo senso sì: se i gas diventano abbastanza caldi, c'è una sorta di rottura. Questa rottura non è dissimile dalla fusione o dall'ebollizione, dove i legami tra atomi e molecole si rompono, nel senso che ora iniziano a rompersi i legami stessi all'interno di un atomo: i legami tra il nucleo e gli elettroni.

Questa rottura si verifica quando un gas viene riscaldato in modo tale che l'energia dell'atomo raggiunga oltre

una certa soglia, l'energia di ionizzazione. L'atomo inizia a disgregarsi e i nuclei possono essere privati di uno o più elettroni: l'atomo diventa uno ione. Questo processo è chiamato ionizzazione. Poiché la maggior parte degli atomi ha più elettroni, la maggior parte degli atomi può essere privato di più di un solo elettrone. Se tutti gli elettroni vengono strappati via, lo ione diventa completamente ionizzato, risultando in un nucleo positivo libero senza elettroni. Quando un gas inizia a scomporsi in ioni ed elettroni, si parla di plasma. Quindi un plasma è un gas ionizzato, costituito da ioni

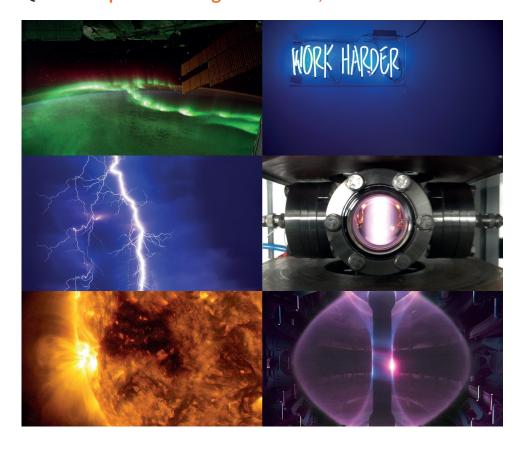


Figura 9. Esempi di plasmi. Dall'alto in basso e da sinistra a destra vediamo l'Aurora Boreale (Northern Lights), un'insegna al neon, un fulmine, una scarica sperimentale al plasma, il Sole e una scarica all'interno del tokamak sferico MAST. Crediti: NASA, Pixabay/Pexels, Pixabay/ FelixMittermeier, Plasmalab TU Eindhoven/ JPKW Frankemölle, NASA/ Osservatorio di dinamica solare e CCFE.

positivi liberi e liberi elettroni negativi. Di solito, non tutti gli atomi sono ionizzati in un plasma. Se tutti gli atomi sono ionizzati, si parla di plasma completamente ionizzato. Potrebbe non essere una sorpresa che il Sole non sia una palla di gas: il Sole è una grande palla di plasma!

Alla ricerca di plasmi

"Sembrano difficile da creare, quei plasmi", potresti pensare. Tuttavia, i plasmi sono la forma di materia più abbondante nell'universo. La maggior parte degli oggetti nello spazio sono nello stato di plasma: stelle, nebulose e altro ancora. Sulla Terra, i plasmi sono meno comuni, ma possono ancora essere osservati molto. Il fulmine è un plasma, l'aurora boreale è causata dai plasmi nel cielo settentrionale e, a seconda della tua esatta definizione di plasma, anche le fiamme (calde) potrebbero essere contate come plasmi. A causa dell'abbondanza di plasma in natura, a volte viene indicato come il quarto stato della materia. Oltre alla loro presenza in natura, i plasmi si trovano spesso anche nell'industria. Dagli strumenti di disinfezione negli ospedali, alla produzione di nuovi chip per computer, pannelli solari o i prossimi smartphone, l'elaborazione del plasma viene utilizzata ovungue. Esistono molti modi diversi per creare plasma, ad esempio utilizzando le onde elettromagnetiche (proprio come quelle generate in un forno a microonde!).

Differenza tra un gas e un plasma

"Ora qual è la differenza tra un gas e un plasma, a parte il nome di fantasia allora?" La distinzione principale deriva dal fatto che un plasma è costituito da ioni ed elettroni, cioè particelle cariche, mentre un gas normale è costituito da soli atomi neutri. Quindi, in un plasma,

Esercitazione in aula 1.3

Quindi, la differenza tra un plasma e un gas sta nella massa delle particelle cariche o neutre. Tuttavia, la maggior parte dei plasmi può essere osservata brillare, mentre i gas sono spesso incolori e sicuramente non brillano. Allora perché i plasmi si illuminano?

[Scelta multipla]

- (A) A temperature sufficientemente elevate tutto inizierà a irradiarsi, quindi i plasmi si illuminano naturalmente a causa dell'alta temperatura.
- (B) Le particelle cariche si muovono liberamente e una volta che un elettrone libero e uno ione entrano in collisione, c'è la possibilità che si ricombinino. In questo processo di ricombinazione le particelle cariche si combinano in una particella neutra e viene emessa luce. Se la luce emessa si trova nello spettro visibile, il plasma inizierà a brillare.
- (C) In alcune reazioni nucleari viene emessa luce. Se la luce emessa si trova nello spettro visibile, il plasma inizierà a brillare.

Fulmine

A causa della conduttività del plasma, il fulmine può essere spiegato: il fulmine è un'enorme corrente elettrica tra una nuvola carica e la superficie della Terra. A causa della differenza di carica tra la nube e la superficie, il gas vicino alla nube inizia a scomporsi e si forma un plasma che può condurre la carica. Una volta che la carica viene trasferita dalla nuvola alla Terra, la conduzione si interrompe e il fulmine scompare. Tutto questo avviene in un batter d'occhio: un lampo.

abbiamo cariche che si muovono liberamente. Ciò significa che un plasma può avere correnti e condurre elettricità, proprio come un filo metallico. Accanto alla sua conducibilità, un'altra importante qualità dei plasmi è che sono sensibili ai campi elettrici e ai campi magnetici.

Campi elettrici e magnetici

I Campi elettrici sono un modo per descrivere come un oggetto carico influenza altri oggetti carichi nel suo ambiente. Una particella carica attrae o respinge altre particelle cariche, a seconda che abbiano lo stesso (++/--) o opposto (+-/-+) tipo di carica.

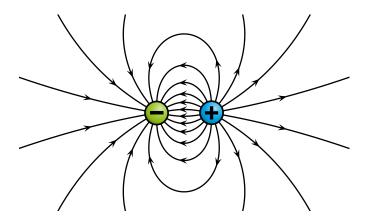


Figura 10. Una rappresentazione schematica di un campo elettrico tra una particella caricata positivamente e negativamente. Viene tracciata una serie di linee di campo elettrico. Si noti che le linee di campo hanno una direzione che va da positiva a negativa. Adattato da: Wikimedia Commons/Geek3.

La forza dell'interazione dipende dalla distanza tra le particelle cariche. Se una particella carica fosse fissata nello spazio, allora possiamo immaginare che se una particella immaginaria...una particella di prova— fosse posta vicino alla particella, allora l'interazione tra le due sarebbe forte (o la particella fissa attirerebbe l'altra particella o la respingerebbe). Ciò significa che il campo elettrico della particella fissa è forte nel punto in cui abbiamo posizionato la particella immaginaria. Se collochiamo una particella immaginaria molto

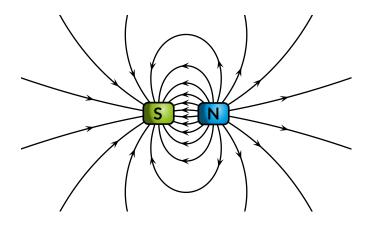


Figura 11. Una rappresentazione schematica di un campo magnetico tra due 'poli magnetici'. Viene tracciata una serie di linee di campo magnetico. Si noti che le linee di campo hanno una direzione che va da "nord" a "sud". In realtà, le linee del campo magnetico attraversano i "poli magnetici" e formano anelli chiusi. Adattato da: Wikimedia Commons/ Geek3.

lontano, allora sentirebbe ancora un'interazione, ma solo molto debolmente: il campo elettrico della particella fissa è debole lontano dalla particella. Immaginando tali particelle "di prova" ovunque attorno alla particella fissa, possiamo avere un'idea della forza dell'interazione in tutte le posizioni nello spazio: lo chiamiamo campo elettrico.

Possiamo tracciare linee partendo dalla particella che vanno verso l'esterno in tutte le direzioni e non si incrociano mai: linee di campo elettrico. In questo modo, possiamo visualizzare il campo poiché se le linee di campo giacciono vicine l'una all'altra allora il campo elettrico è forte e se sono lontane l'una dall'altra allora il campo è debole. La direzione delle linee del campo elettrico è sempre da carica positiva a carica negativa.

Un campo magnetico è definito in modo simile, ma invece di essere un'interazione tra cariche positive e negative, il campo può essere visualizzato come un'interazione tra due 'poli magnetici': Nord e Sud. Due poli simili si respingono e due poli opposti si attraggono. Un modo più realistico di visualizzare un campo magnetico è fatto disegnando linee di campo, ora chiamate linee del campo magnetico, che formano sempre anelli chiusi. Se le spire attraversano un materiale (magnetico), allora il punto in cui le linee di campo escono dal materiale può essere visto come

il "polo nord" e dove le linee di campo entrano nel materiale come il "polo sud". Quando le linee di campo giacciono al di fuori del materiale magnetico, le linee di campo vanno da "nord a sud". Poiché i campi magnetici possono esistere anche nel vuoto, è possibile che una linea di campo magnetico non attraversi un materiale magnetico.

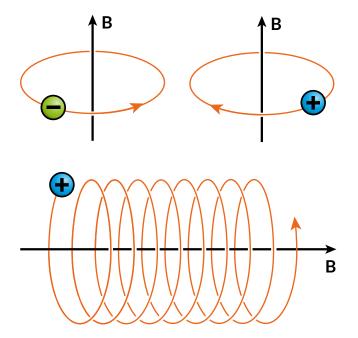


Figura 12. Il moto di una particella carica (negativamente o positivamente) in un campo magnetico. Quando la particella si muove perpendicolarmente al campo magnetico, inizierà a muoversi in circolo attorno alla linea del campo magnetico. Se la particella ha anche una velocità nella direzione del campo magnetico, la particella seguirà una traiettoria elicoidale attorno alla linea del campo magnetico. Questo movimento circolare/elicoidale attorno alla linea del campo magnetico è chiamato giroscopio.

Esercitazione in aula 1.4

La direzione del campo magnetico (ovvero la direzione delle linee del campo magnetico) dipende dalla direzione delle cariche in movimento. Disegna la direzione del campo magnetico disegnando diverse linee del campo magnetico per le seguenti situazioni:

- (a) Un filo rettilineo attraverso il quale scorre una corrente.
- (b) Un anello circolare di filo attraverso il quale scorre una corrente in senso antiorario.
- (c) Un elettrone che si muove in un cerchio (in senso orario) e un protone che si muove in un cerchio (in senso antiorario). Confronta questo con le direzioni della domanda b: cosa noti?
- (d) Cosa puoi dire della direzione del campo magnetico rispetto alla direzione del moto in generale?

Vedi anche esercizi: A.9, A.10.

Quindi il campo magnetico non avrà poli nord o sud, mentre il campo magnetico esiste ancora.

Particelle cariche in un campo magnetico

Quando una particella carica entra in un campo magnetico, la particella carica inizierà a girare intorno alle linee del campo magnetico.

Questo movimento dovuto al campo magnetico, il cosiddetto giromotore, è molto utile! Se vogliamo che le particelle si scontrino abbastanza forte da fondersi. abbiamo bisogno di temperature estremamente elevate. Quindi dobbiamo creare un plasma e riscaldarlo fino a temperature estreme. Il problema, quindi, è che a queste temperature estreme non esistono materiali in grado di trattenere il plasma confinato: il contenitore inizierebbe a sciogliersi e il plasma caldo all'interno si raffredderebbe al contatto con il contenitore. È qui che inizia a manifestarsi l'utilità dei campi magnetici: se riusciamo a controllare il plasma con i magneti, possiamo tenerlo lontano dalle pareti del contenitore e sospendere il plasma, in modo che non possa fondere il nostro dispositivo di fusione (e il nostro dispositivo di fusione non può raffreddare il plasma)! Possiamo confinare a plasma utilizzando campi magnetici.

1.4

Costruire un dispositivo per la fusione

Ora abbiamo le conoscenze di base necessarie per iniziare a costruire un dispositivo di fusione! Sappiamo delle reazioni di fusione nucleare e di come il Sole produce la fusione. Abbiamo identificato i criteri per creare reazioni di fusione: dobbiamo mantenere una combinazione sufficientemente alta di densità e temperatura e confinare questa energia in modo che possano verificarsi molte reazioni di fusione. Nel Sole queste condizioni sono soddisfatte naturalmente a causa della gravità, ma sulla Terra abbiamo bisogno di un altro modo.

L'approccio più comune consiste nell'utilizzare campi magnetici per confinare il plasma e creare pressioni elevate riscaldando il plasma a temperature elevate per un tempo sufficientemente lungo perché abbiano luogo

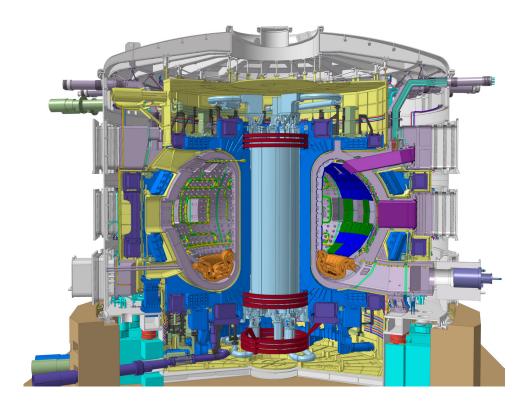


Figura 13. Schema del tokamak ITER, attualmente in costruzione nel sud della Francia. Nello schema sono visibili le bobine di campo toroidale (blu scuro), le bobine di campo poloidale (viola scuro) e il solenoide centrale (azzurro, al centro). Credito: Organizzazione ITER,https://www.iter.org.

le reazioni di fusione. Soprattutto in Europa, la maggior parte dei progetti di fusione che mirano alla produzione di energia da fusione si concentrano sul riscaldamento e sul confinamento magnetico di un plasma. Questo approccio alla fusione è chiamata fusione a confinamento magnetico o MCF.

Ora che abbiamo capito che i magneti possono essere usati per confinare un plasma, esaminiamo più a fondo cosa questo significa per un dispositivo di fusione magnetica. Iniziamo dando un'occhiata al tipo più comune di dispositivo di fusione: il tokamak.

II tokamak

L'origine della parola tokamak è russa: tokamak è un acronimo russo che sta per "Camera toroidale con bobine magnetiche" o "Camera toroidale con campo magnetico assiale". Ed è anche esattamente quello che è: una camera a forma di ciambella circondata da bobine magnetiche che possono contenere un plasma. L'interno della forma a ciambella è vuoto, in cui può essere iniettato combustibile per fusione (gas idrogeno), che viene poi trasformato in un plasma e riscaldato (di solito con onde radio). Questo plasma viene quindi confinato utilizzando i magneti che si trovano all'esterno della camera a forma di ciambella (e talvolta parzialmente all'interno della camera, a seconda del tokamak).

Esercitazione in aula 1.5

Diversi tokamak e dispositivi di fusione toroidale hanno diverse proporzioni: il rapporto tra il raggio maggiore R e il raggio minore a. Di conseguenza le forme di questi tori possono variare parecchio. Diamo un'occhiata più da vicino a queste diverse forme.

- (a) Fai uno schizzo di un toro con un raggio maggiore grande, ma con un raggio minore piccolo. Cosa sembra questo?
- (b) Ora fai uno schizzo di un toro con un piccolo raggio maggiore e un grande raggio minore. Perché è più difficile disegnare?
- (c) Cosa accadrebbe se rendessi il raggio maggiore sempre più piccolo mantenendo un raggio minore grande? Con che forma finisci? Ora guarda le proporzioni dei due schizzi da (a) e (b).
- (d) Cosa succede se le proporzioni cambiano?
- (e) Qual è il rapporto di aspetto più basso possibile per un toro?

Esercitazione in aula 1.6

Come abbiamo visto, ci sono due direzioni principali su un toro: quella toroidale e quella poloidale. Queste possono creare confusione, quindi diamo un'occhiata più da vicino.

- (a) Fai uno schizzo delle due possibili sezioni trasversali di un toro.
- (b) Quale sezione trasversale è la sezione trasversale poloidale? Qual è la sezione toroidale? Cosa noti della direzione toroidale/poloidale e delle rispettive sezioni trasversali?

Geometria di un tokamak

Prima di esaminare i diversi sistemi magnetici di un tokamak standard, diamo uno sguardo alla geometria di un dispositivo a forma di ciambella: un toro.

Un modo elegante è pensare a un toro in due costanti e due variabili di coordinate: il raggio maggiore R, il raggio minore a, l'angolo poloidale θ (theta) e l'angolo toroidale ϕ (fi). Un esempio di toro è visibile in figura 14 che comprende anche tutte queste variabili.

Il raggio maggiore e minore possono essere visti come i raggi dei due diversi cerchi individuabili in un toro: il raggio dal centro del 'buco' della 'ciambella' verso il centro del cerchio minore della ciambella è chiamato raggio maggiore R, mentre il raggio del cerchio minore della ciambella si chiama raggio minore a. In realtà, il "cerchio" più piccolo della ciambella è spesso più triangolare o a forma di D nei moderni tokamak. Questo aiuta a migliorare le prestazioni del tokamak.

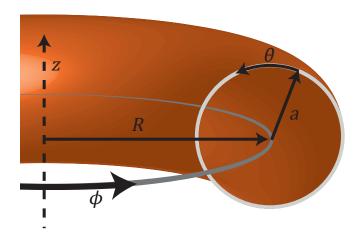


Figura 14. Schema della geometria di un toro. Sono indicati il raggio maggiore (R) e il raggio minore (a) del toro. Sono inoltre disegnate le direzioni toroidale (ϕ) e poloidale (θ). Credito: Jens Peter Frankemölle/TU Eindhoven.

Un esempio di tale bobina si trova in figura 1.

Le altre due coordinate sono le coordinate poloidali e toroidali o gli angoli poloidali e toroidali, θ e φ. La direzione toroidale è la "via lunga intorno" al toro, mentre la direzione poloidale è la "via breve intorno" al toro. Poiché il toro è simmetrico, è necessario definire dove l'angolo toroidale è uguale a zero. Per l'angolo poloidale, il punto più esterno del toro è solitamente considerato un angolo poloidale uguale a zero.

Bobine magnetiche

Ora che abbiamo più familiarità con la geometria di un tokamak, diamo un'occhiata ai diversi magneti di un tokamak standard e come vengono chiamati. Vedremo quindi perché abbiamo bisogno di tutti questi diversi magneti per confinare il plasma all'interno della camera a forma di ciambella.

Muovendo particelle cariche all'interno di un anello circolare, si ottiene un campo magnetico nella direzione perpendicolare, vedi figura 12. Quando le particelle cariche si muovono in un anello così chiuso, si parla di corrente, con la direzione di questa corrente che coincide con la direzione di moto di particelle cariche

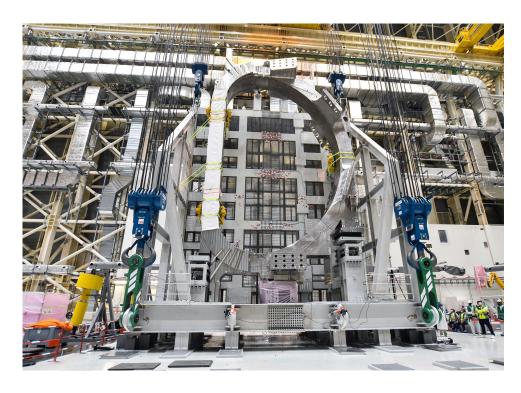


Figura 15. Questo è TF12, il primo di diciotto magneti a campo toroidale a forma di D posizionati attorno alla camera a vuoto di ITER. Prodotto in Giappone, questo è alto 17 m e largo 9 m il gigante era seduto all'interno della sala riunioni di ITER il 9 giugno 2021. Fonte: Organizzazione ITER, https://www.iter.org.

Solenoidi

Per creare i campi magnetici richiesti, vengono utilizzate bobine elettromagnetiche. Ricorda, come discusso alla fine del capitolo precedente, che se facciamo muovere una particella carica in un anello chiuso, la direzione del campo magnetico all'interno di questo anello chiuso è perpendicolare al moto della particella (e al di fuori dell'anello chiuso è è nella direzione opposta) e la direzione del campo magnetico dipende dal fatto che la particella in movimento sia caricata positivamente o negativamente; vedi figura 12.

Poiché gli elettroni sono in grado di muoversi liberamente attraverso un metallo, le particelle cariche sono in grado di muoversi attraverso fili metallici. Quando un tale filo viene avvolto molte volte, viene chiamato bobina. Quando una bobina di filo funge da magnete quando trasporta una corrente, la chiamiamo bobina magnetica o solenoide.

positivamente. Se una corrente è prodotta da elettroni (o altre particelle negative), la direzione delle particelle è opposta alla direzione della corrente. Sotto l'influenza di una differenza di potenziale, gli elettroni possono muoversi attraverso un filo metallico. Quindi, facendo scorrere una corrente attraverso bobine (metalliche) e posizionando correttamente queste bobine, è possibile creare un campo magnetico nella direzione desiderata.

Nella figura 13 è visibile uno schema del tokamak di ITER. La prima serie di magneti che probabilmente hai notato sono quelli avvolti attorno al recipiente a vuoto, che hanno la forma un po' come una D maiuscola. Questi sono bobine di campo toroidale. Poi abbiamo altri due sistemi di bobine che sono importanti. Innanzitutto, le bobine impilate al centro del buco della ciambella: il solenoide centrale. In secondo luogo, ci sono un paio di grandi magneti che si trovano nella parte superiore e inferiore della macchina: le bobine di campo poloidale. Questi tre gruppi di magneti costituiscono il principale sistema magnetico di un tokamak. Di solito ci sono alcuni magneti aggiuntivi più piccoli per migliorare le

prestazioni del tokamak, ma questi sono di minore importanza e non saranno discussi qui. Nelle prossime sezioni esamineremo più in dettaglio le bobine di campo toroidali e il solenoide centrale.

Bobine di campo toroidale

Il primo passo verso un dispositivo di fusione stabile è il confinamento del plasma in una forma toroidale. Per questo, dobbiamo prima far girare il plasma in loop nella direzione toroidale. Poiché ora sappiamo come creare un campo magnetico in una certa direzione e poiché una particella carica segue la linea del campo magnetico (in una traiettoria elicoidale), ora abbiamo tutte le conoscenze di cui abbiamo bisogno per capire come far muovere le particelle cariche in un anello in direzione toroidale: posizionare anelli chiusi di bobine che trasportano corrente attorno al percorso in cui vogliamo che le particelle vadano. Quindi, quando vogliamo che le particelle girino in direzione toroidale, dobbiamo avvolgere delle bobine magnetiche attorno a questa forma: le bobine del campo toroidale! Quando posizioniamo molte di queste bobine a forma di D attorno alla camera a forma di ciambella, il campo magnetico inizia a girare in circoli all'interno della ciambella. Il campo toroidale è di gran lunga il più forte campo magnetico nel tokamak.

Quindi, ora il plasma si muove in direzione toroidale. Suona bene, vero? Ma allora perché abbiamo bisogno di bobine diverse dalle bobine di campo toroidale? Sfortunatamente, se abbiamo solo un campo magnetico in direzione toroidale, il plasma diventa instabile. Si è scoperto che l'aggiunta di un campo magnetico

Esercitazione in aula 1.7

Diamo un'occhiata a un tokamak standard, concentrandoci sui suoi tre principali sistemi magnetici.

- (a) Quali magneti si possono vedere giacere nella sezione trasversale poloidale? Come si chiamano questi magneti e ha senso questo nome?
- (b) Spiega i nomi degli altri due gruppi di magneti.

poloidale al campo magnetico toroidale potrebbe risolvere questo problema: il risultato è un campo magnetico elicoidale.

Solenoide centrale e corrente di plasma

Per creare questo campo magnetico elicoidale tanto necessario, viene utilizzato (indirettamente) il solenoide centrale. Il solenoide centrale è un po' diverso in quanto il suo obiettivo non è creare un campo magnetico in sé: utilizza l'induzione elettromagnetica per creare una corrente (toroidale) nel plasma. Per comprendere il concetto di induzione elettromagnetica, dobbiamo prima tornare alle linee del campo magnetico. Come discusso nel capitolo precedente, possiamo visualizzare un campo magnetico creando linee di campo magnetico che formano anelli chiusi. L'intensità del campo magnetico B, è direttamente correlata alla densità di linee del campo magnetico. Se le linee di campo sono vicine tra loro, il campo magnetico è forte in quella zona. Se le linee di campo sono molto distanti, il campo magnetico è debole in quella zona. Successivamente, il concetto di flusso magnetico è importante.

Il flusso magnetico è una quantità che è definita per una certa area. È uguale all'intensità del campo magnetico (cioè la densità della linea del campo magnetico) moltiplicata per l'area (perpendicolare) attraverso la quale scorrono quelle linee del campo. Di conseguenza, il flusso magnetico può essere visto come una misura dell'energia magnetica che "scorre" lungo le linee del campo attraverso una certa area. La relazione tra flusso magnetico, intensità del campo magnetico e area può essere scritta come:

 $\Phi = B A \cos(\alpha)$

Dove Φ (phi maiuscolo) è il flusso magnetico, B è l'intensità del campo magnetico, A è l'area di interesse e a è l'angolo tra la normale alla superficie e la direzione della linea del campo magnetico.

Se abbiamo una bobina fissa, possiamo creare un campo magnetico facendo passare una corrente attraverso di

essa. Se questa corrente attraverso la bobina è costante, le linee del campo magnetico rimangono nella stessa posizione e mantengono la stessa densità delle linee di campo: il campo magnetico rimane costante. Ciò significa che per una certa area (fissa) vicino alla bobina anche il flusso magnetico è costante.

D'altra parte, quando aumentiamo lentamente la quantità di corrente attraverso il circuito, il campo magnetico cambia lentamente al variare della corrente: correnti più elevate portano a un campo magnetico più forte e quindi a una maggiore densità di linee di campo. Il numero di linee di campo ora aumenta per una certa area vicino al magnete o alla bobina: il flusso magnetico aumenta.

Tuttavia, alla natura non piacciono i cambiamenti nel flusso magnetico! Ogni volta che c'è un cambiamento

Campo magnetico

L'intensità del campo magnetico B è un concetto importante nella fisica dell'elettricità e del magnetismo. È anche una quantità che può creare molta confusione, poiché ha molti nomi: l'intensità del campo magnetico, la densità della linea del campo magnetico, la densità del flusso magnetico o l'induzione magnetica. I vari nomi sono frutto di convenzione, alcuni scrittori preferiscono l'uno, altri scrittori preferiscono l'altro. In un trattamento matematico più rigoroso del magnetismo, le linee di campo non vengono più utilizzate e sostituite da campi vettoriali matematici. Di conseguenza, le definizioni per i campi elettromagnetici vengono adattate e sebbene si parli dello stesso B, nella letteratura avanzata è più spesso chiamata induzione magnetica o densità di flusso magnetico. Dal momento che basiamo la nostra spiegazione sulle linee di campo (e per evitare confusione tra l'induzione magnetica e la legge di induzione) ci atteniamo o alla "magnitudo del campo magnetico" o alla "densità delle linee del campo magnetico". Vale anche la pena menzionare: l'unità dell'intensità del campo magnetico è il Tesla, dal nome dell'inventore Nikola Tesla. Anche l'omonima azienda prende il nome da qui.

nel flusso magnetico, un cosiddetto 'forza lettromotrice' o fem è automaticamente indotta. La fem indotta cerca quindi di contrastare il cambiamento del flusso magnetico creando una tensione che porta a una corrente (che crea un campo magnetico opposto).

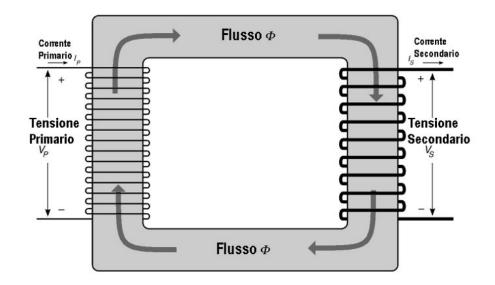
Prendendo una bobina come esempio: quando aumentiamo la corrente attraverso la bobina, il campo magnetico aumenta e di conseguenza aumenta il flusso magnetico all'interno dell'anello del filo. Questo cambiamento di flusso magnetico crea quindi un campo elettromagnetico che cerca di resistere al cambiamento di flusso magnetico creando una corrente nella direzione opposta che crea un campo magnetico che si oppone al campo crescente originale. Questa resistenza a una variazione del flusso magnetico si verifica in qualsiasi mezzo conduttore vicino alla bobina. È molto importante capire qui che l'entità della fem dipende dalla velocità di variazione del flusso magnetico e non dall'intensità del campo magnetico.

Quindi, se hai due bobine vicine l'una all'altra e una corrente variabile viene percorsa attraverso una di esse, il flusso magnetico cambia all'interno di entrambe! Questo perché il campo magnetico della prima bobina viene percepito dalla seconda. Pertanto, un cambiamento nel flusso magnetico si verifica anche nella seconda bobina e induce una corrente in essa. Questo processo è chiamato induzione elettromagnetica e rende possibile indurre correnti e campi magnetici in spire non collegate!

Aumentando il numero di avvolgimenti in una bobina, è possibile aumentare la fem indotta: ogni avvolgimento avverte la variazione del flusso magnetico, tutti gli avvolgimenti sono collegati, la variazione totale del flusso magnetico per la bobina è la somma dei singoli contributi. La fem totale viene quindi ottenuta moltiplicando la variazione del flusso magnetico per il numero totale di avvolgimenti della bobina. Per utilizzare questo principio a nostro vantaggio, sono stati inventati i trasformatori.

Un trasformatore è costituito da due bobine scollegate, una bobina primaria e una secondaria, e viene

Figura 16. Un trasformatore con un nucleo di ferro. Una corrente alternata attraverso l'avvolgimento primario induce un campo magnetico variabile nel nucleo di ferro. Il nucleo di ferro trasporta questo campo all'avvolgimento secondario, dove la variazione del flusso magnetico induce una corrente negli avvolgimenti secondari. In un tokamak mettiamo l'avvolgimento primario all'interno dell'avvolgimento secondario. Credit: Wikimedia Commons/ BillC



utilizzato con correnti alternate che portano a un flusso magnetico costantemente variabile nelle bobine. In un trasformatore ideale, nessuna potenza viene persa nel processo di induzione e quindi la potenza nelle bobine primaria e secondaria deve essere la stessa:

$$I_{\rm p}V_{\rm p}=I_{\rm s}V_{\rm s}$$

dove I_p e I_s sono le correnti attraverso la bobina principale (p) e la bobina secondaria (s) e V_p e V_s sono le tensioni attraverso le bobine primarie e secondarie. Poiché la fem totale percepita dalla bobina dipende dal numero di avvolgimenti della bobina, otteniamo:

Esercitazione in aula 1.8

L'uso dell'induzione per generare una corrente di plasma che crea il nostro campo poloidale ha un grosso svantaggio: rende un tokamak un dispositivo pulsato.

(a) In che modo l'induzione magnetica porta al funzionamento a impulsi?

(b) Perché questo è un problema per un reattore a fusione?

Vedi anche esercizio: R.11.

$$V_{p}/V_{s}=N_{p}/N_{s}$$
 ,

dove N_p è il numero di spire della bobina primaria e N_s è il numero di spire della bobina secondaria. Di conseguenza, variando gli avvolgimenti della bobina, le correnti e le tensioni possono essere convertite come vogliamo.

Ora torniamo al nostro tokamak. Il solenoide centrale all'interno del tokamak è un'enorme bobina primaria con molti avvolgimenti. Poiché il plasma è conduttivo, può trasportare anche corrente: il plasma agisce essenzialmente come un anello a filo singolo e rende il nostro tokamak un enorme trasformatore con una bobina primaria con molti avvolgimenti e una bobina secondaria composta da un unico anello di plasma. Creando una corrente variabile nel solenoide centrale, si crea un campo magnetico variabile che induce una grande corrente al centro del plasma. Questa corrente di plasma crea quindi il campo magnetico poloidale di cui abbiamo bisogno! Di conseguenza, abbiamo un campo magnetico sia toroidale che poloidale, che porta al nostro cruciale campo magnetico elicoidale per un confinamento stabile!

Bobine di campo poloidali e bobine extra

Quindi, la corrente del plasma crea il campo magnetico poloidale di cui abbiamo bisogno. Ci si sarebbe potuti aspettare che le bobine del campo poloidale generassero un campo magnetico poloidale, ma in realtà la funzione principale delle bobine del campo poloidale è quella di aiutare a controllare la forma e la posizione del plasma. Il campo creato dalle bobine del campo poloidale è molto più debole del campo toroidale o del campo poloidale generato dalla corrente del plasma.

Accanto alle bobine di campo toroidale, al solenoide centrale e alle bobine di campo poloidali ci sono molte più bobine in un tokamak regolare, che vengono utilizzati per scopi di controllo più avanzati. Tuttavia, queste bobine aggiuntive non aggiungono una

conoscenza di base della fusione nucleare e pertanto non saranno discusse nei moduli.

Confinamento magnetico

Ora siamo finalmente in grado di capire come possiamo creare un sistema magnetico stabile in cui il plasma è confinato: utilizzando bobine di campo toroidale per creare un campo magnetico toroidale in combinazione con una corrente di plasma che aggiunge un campo poloidale (ed è generato dal solenoide centrale) si crea un campo magnetico elicoidale.

C'è un'ultima parte da discutere: il bilanciamento della pressione all'interno del tokamak. In un tokamak c'è una pressione verso l'esterno e una pressione verso l'interno. Se queste sono uguali, il plasma rimane stabile. Questo è lo stesso di uno pneumatico per bicicletta: l'aria nello pneumatico deve premere abbastanza forte verso l'esterno sul pneumatico in gomma per contrastare la pressione del terreno. Se la pressione dell'aria è troppo bassa, il terreno "vince" e lo pneumatico si appiattisce.

In un tokamak, abbiamo la pressione verso l'esterno proveniente dal plasma, quindi si espanderà a meno che non ci sia una forza che lo respinga. Quindi qual è la forza che spinge indietro il plasma? C'è solo un candidato: la forza di Lorentz! Il plasma trasporta una corrente e quella corrente sente una forza dovuta al campo magnetico. Il risultato è una forza sul plasma diretta verso l'interno. Questa è la forza che tiene insieme il plasma: confinamento magnetico. Quindi, attraverso il confinamento magnetico possiamo costruire dispositivi di fusione come i tokamak per creare le condizioni in cui si verificano le reazioni di fusione nucleare qui sulla Terra.

Ora che hai elaborato il primo modulo, sai già molto sulla fusione: conosci il problema energetico, conosci la fusione nel Sole, sai quando avviene la fusione e come possiamo creare queste condizioni qui sulla Terra nel dispositivo di fusione più comune, il tokamak. Nei prossimi moduli potrai acquisire conoscenze più approfondite sulla fusione nucleare, da quattro diverse prospettive.

1.5

Ulteriori letture

Per saperne di più sulla fusione nucleare, sono disponibili quattro moduli che guardano alla fusione da una certa prospettiva. Sono disponibili i seguenti moduli.

Modulo 2: Verso la fusione

In questo modulo, viene discussa la storia della fusione e del suo sviluppo, evidenziando diversi progetti e tentativi di reattori. Tutti i passaggi importanti per arrivare dove siamo oggi sono spiegati fino allo stato attuale della fusione oggi.

Modulo 3: Controllo del plasma

In questo modulo viene spiegato come viene riscaldato, controllato e misurato un plasma di fusione. Esistono diversi modi per riscaldare il plasma e, a causa della temperatura estrema, sono necessarie speciali tecniche di misurazione. Sulla base di diverse misurazioni del plasma, è possibile tenere sotto controllo il reattore a fusione.

Modulo 4: Materiali di fusione

In questo modulo vengono spiegate le sfide materiali della fusione. La parete del reattore a fusione deve essere realizzata con materiali molto speciali in grado di resistere alle dure condizioni di fusione. Ogni componente del dispositivo di fusione ha il proprio obiettivo e ha requisiti materiali diversi, dall'arresto dei neutroni al raffreddamento per creare un forte campo magnetico.

Modulo 5: Distribuzione

In questo modulo, l'energia da fusione viene messa in prospettiva guardando al mercato dell'elettricità e via confrontando la fusione con altre fonti di energia. Oltre ai numeri, anche la politica dell'energia gioca un ruolo nel determinare se la fusione diventerà una fonte di energia.

Risorse online

Oltre ai diversi moduli di lezione sulla fusione, ci sono molte informazioni e contenuti educativi da trovare online. In ogni modulo si possono trovare libri, articoli o link interessanti.

Un divertente esempio di contenuto fusion gratuito è l'app 'Operation Tokamak', che può essere scaricata gratuitamente su iOS AppStore e Android Play Store:

https://apps.apple.com/us/app/operazione-tokamak/id808190835

https://play.google.com/store/apps/details?id=dk.markfilm.operationtokamak&hl=nl&gl=US

In questa app puoi azionare un tokamak controllando la forza dei magneti e il sistema di riscaldamento. Mantenendo il reattore nelle giuste condizioni e sopprimendo le instabilità quando si presentano, puoi mantenere la reazione e mirare a creare quanta più fusione possibile.



Operazione Tokamak nell'AppStore iOS



Operazione Tokamak nel Play Store di Android

Colophon

Fusion Basics è il primo di cinque moduli sulla fusione nucleare. Insegnano i concetti di base della fusione nucleare a livello di scuola secondaria. Tutti i moduli possono essere trovati gratuitamente sul websito di FuseNet, https://fusenet.eu.

Autore

Sander Korteweg

Editori

Sander Korteweg Sjoukje Tijmensen-Hoekstra

Progettazione grafica

Jens Peter Frankemölle David Becker

Traduzione italiana

Enrica Donati Davide Silvagni

Immagine di copertina

Osservatorio della NASA/Solar Dynamics

Editore

FuseNet

Supporto finanziario

Questo progetto non sarebbe stato possibile senza il sostegno finanziario di EUROfusion.

This material has been created and distributed by FuseNet for educational purposes. This work has been carried out within the framework of the EUROfusion Consortium, funded by the European Union via the Euratom Research and Training Programme (Grant Agreement No 101052200 — EUROfusion). Views and opinions expressed are however those of the author(s) only and do not necessarily reflect those of the European Union or the European Commission. Neither the European Union nor the European Commission can be held responsible for them. This work is licensed under a Creative Commons Attribution–NonCommercial–ShareAlike 4.0 International License.



