

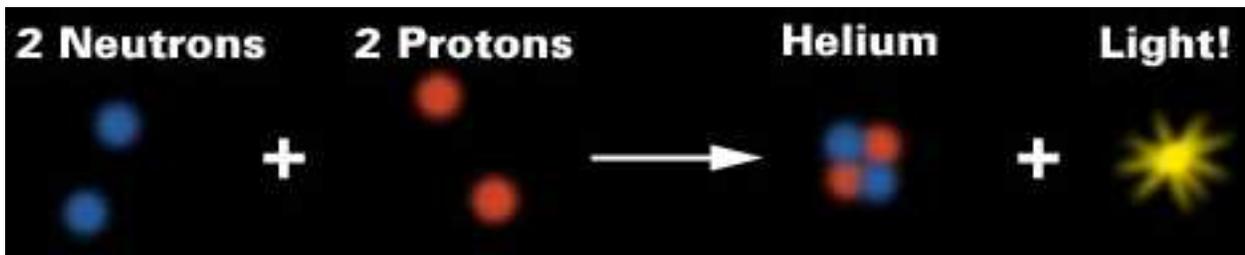
LA FUSIONE TERMONUCLEARE

(appunti presi dal sito dell'Enea: <http://www.fusione.enea.it/>)

E' la reazione nucleare che avviene nel sole e nelle altre stelle, con produzione di una enorme quantità di energia.

A temperatura ordinaria, in un gas, le particelle sono neutre; viceversa a temperatura superiore a qualche eV, poiché le singole particelle tendono a dissociarsi negli elementi costitutivi (ioni ed elettroni) il gas si trasforma in una miscela di particelle cariche, cioè un plasma .

Il plasma, costituisce il 99% della materia di cui e' composto l'Universo e quindi è detto anche: "quarto stato della materia". E' il principale costituente delle stelle e del sole. Nel sole, che ha una temperatura interna di 14 milioni di gradi, la reazione di fusione di nuclei di idrogeno (reazione protone-protone) è responsabile di gran parte dell'energia che giunge fino a noi sotto forma di



calore e di luce (e di neutrini solari).

In stelle più calde o di massa maggiore prevalgono altre reazioni. A temperature intorno ai 15-20 milioni di gradi queste reazioni si basano sul ciclo del carbonio in cui il C12 funge da catalizzatore per la fusione di 4 protoni in un nucleo di He4 ,due positroni, due neutrini, e un gamma, con sviluppo di 26.63 MeV di energia (di cui il 5% è associata ai neutrini prodotti).

Il problema dell'evoluzione stellare è governato dall'energia da fusione e dall'energia gravitazionale: in una stella molto giovane composta da atomi di idrogeno, l'energia gravitazionale è dominante, la stella si contrae, aumenta la sua temperatura e la sua densità finché diventano importanti le reazioni di fusione con liberazione di energia.

Si verificano in sequenza stadi gravitazionali e nucleari a temperature e densità crescenti e vengono bruciati nuclei con carica crescente, fino ai nuclei di ferro per i quali l'energia di legame presenta un massimo. A questo punto le reazioni nucleari assorbono energia anziché produrla.

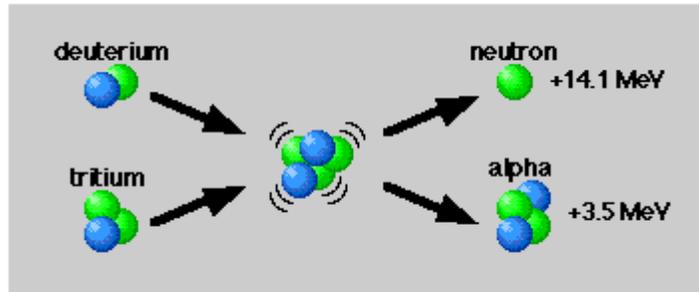
Per ottenere la reazione di fusione il plasma di idrogeno deve esser confinato in uno spazio limitato: nel sole questo si verifica ad opera delle enormi forze gravitazionali in gioco.

Inoltre, il processo di fusione, nel sole, avviene con estrema lentezza, ragione per cui esso brilla da miliardi di anni.

Nella reazione di fusione nuclei di elementi leggeri quindi, quali l'idrogeno, a temperature e pressioni elevate, fondono formando nuclei di elementi più pesanti come l'elio.

Sono noti tre isotopi dell' idrogeno : l' idrogeno propriamente detto(H), il deuterio(D) e il trizio(T). Il nucleo di tutti e tre contiene un protone, il che li caratterizza come forme dell' elemento idrogeno; il nucleo di deuterio contiene inoltre un neutrone mentre quello del trizio due neutroni. In tutti i casi l' atomo neutro ha un elettrone al di fuori del nucleo per compensare la carica del singolo protone.

La reazione più probabile è quella che avviene tra un nucleo di deuterio e un nucleo di trizio, reazione in cui si genera un nucleo di elio (particella alfa) e un neutrone. In questa reazione la massa complessiva dei prodotti è inferiore a quella delle particelle interagenti e si verifica liberazione di energia secondo il principio di equivalenza massa-energia. L'energia liberata si distribuisce tra la particella alfa e il neutrone in rapporto inverso alle rispettive masse.



I due nuclei interagiscono solo a distanze molto brevi, equivalenti alle dimensioni del nucleo (10^{-13}cm); in questo caso le forze nucleari sono predominanti sulle forze di repulsione elettrostatica dovute alla carica positiva dei nuclei (forze che crescono all'avvicinarsi dei nuclei in proporzione inversa al quadrato della distanza). Perché due nuclei si avvicinino a distanze sufficientemente brevi è necessario che la velocità con cui si urtano sia molto alta; la loro energia cinetica (e quindi la temperatura) cioè deve essere molto elevata. Per ottenere in laboratorio reazioni di fusione, ad esempio, è necessario portare una miscela di deuterio e trizio a temperature elevatissime (100 milioni di gradi) per tempi di confinamento sufficientemente lunghi. In tal modo i nuclei hanno tempo di fare molte collisioni, aumentando la probabilità di dar luogo a reazioni di fusione.

Per ottenere in laboratorio la fusione termonucleare controllata, con un bilancio energetico positivo, è necessario riscaldare un plasma di deuterio-trizio a temperature molto alte (100 milioni di gradi, più di sei volte la temperatura all'interno del sole), mantenendolo confinato in uno spazio limitato per un tempo sufficiente a che l'energia liberata dalle reazioni di fusione possa compensare sia le perdite, sia l'energia usata per produrlo.

Occorre cioè soddisfare le condizioni espresse dal Criterio di Lawson, condizioni che dipendono dalla temperatura del plasma.

Nel caso di un plasma di deuterio-trizio a 100 milioni di gradi, (pari a circa 10 KeV di energia) a basso contenuto di impurità, il Criterio di Lawson afferma che il prodotto della densità di particelle del plasma per il tempo di confinamento deve essere maggiore di $3 \times 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$.

Le reazioni nucleari di interesse per la fusione sono, quindi, quelle che coinvolgono i nuclei più leggeri, cioè i nuclei dell'idrogeno e dei suoi isotopi.

In particolare, la reazione di interesse più immediato è quella che si verifica tra i nuclei di due forme pesanti dell'idrogeno, gli isotopi deuterio e trizio (a temperature di 100 milioni di gradi):



Questa reazione è la più facile da realizzare ed è anche la più efficiente al fine della produzione di energia.

Prodotti della reazione sono l'elio⁴, isotopo dell'elio, detto anche particella alfa che porta, sotto forma di energia cinetica, 1/5 dell'energia totale prodotta nella reazione (3,5 MeV) e un neutrone che ne porta i 4/5 (14,1 MeV).

Il deuterio è abbondante nell'acqua di mare (30 g /m³) mentre il trizio, materiale radioattivo con un tempo di dimezzamento di 12.36 anni, non esiste in quantità apprezzabili in natura e deve quindi essere generato.

Per esempio 10 grammi di deuterio, che possono essere estratti da 500 litri d'acqua e 15g di trizio prodotti da 30 g di Litio, molto presente nella crosta terrestre, costituirebbero il combustibile sufficiente necessario al fabbisogno medio della vita di un uomo in un paese industrializzato.

A temperature così elevate, necessarie per la fusione, il problema diventa, come confinare il plasma in un recipiente.

In linea di principio il plasma costituito da particelle cariche (ioni di deuterio e trizio) può essere confinato mediante un campo magnetico: in assenza di questo campo le particelle si muoverebbero a caso in tutte le direzioni, urterebbero le pareti del recipiente e il plasma si raffredderebbe inibendo la reazione di fusione.

In un campo magnetico invece le particelle sono costrette a seguire traiettorie a spirale intorno alle linee di forza del campo mantenendosi lontano dalle pareti del recipiente.

Nella fusione a confinamento magnetico il plasma caldo è racchiuso in una camera a vuoto, e una opportuna configurazione di campi magnetici esterni e/o prodotti da correnti circolanti nel plasma impedisce il contatto con le pareti del recipiente.

Sono state studiate, a questo proposito, diverse configurazioni magnetiche :

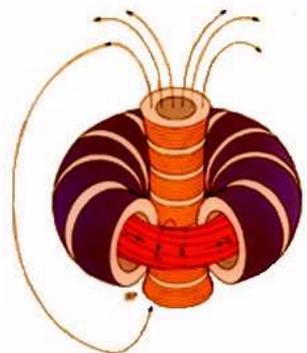
configurazioni a specchio in cui le linee di forza del campo magnetico sono aperte alle estremità del plasma e configurazioni a simmetria toroidale (es. Stellarator, Tokamak).

Quella che ha ottenuto finora i migliori risultati nella fusione a confinamento magnetico, è quella del Tokamak.

Il tokamak è un dispositivo di forma toroidale caratterizzato da un involucro cavo, costituente la "ciambella", in cui il plasma è confinato mediante un campo magnetico con linee di forza a spirale. Questa configurazione magnetica è ottenuta mediante la combinazione di un intenso campo magnetico toroidale prodotto da bobine magnetiche poste intorno alla "ciambella", con un campo magnetico poloidale realizzato mediante la corrente indotta nel plasma dall'esterno, quest'ultimo necessario per evitare la deriva delle particelle del plasma verso le pareti del recipiente.

Le particelle di plasma si avvitano intorno alle linee di forza del campo.

Bobine supplementari esterne occorrono per realizzare campi magnetici ausiliari che controllano la posizione del plasma nella "ciambella".

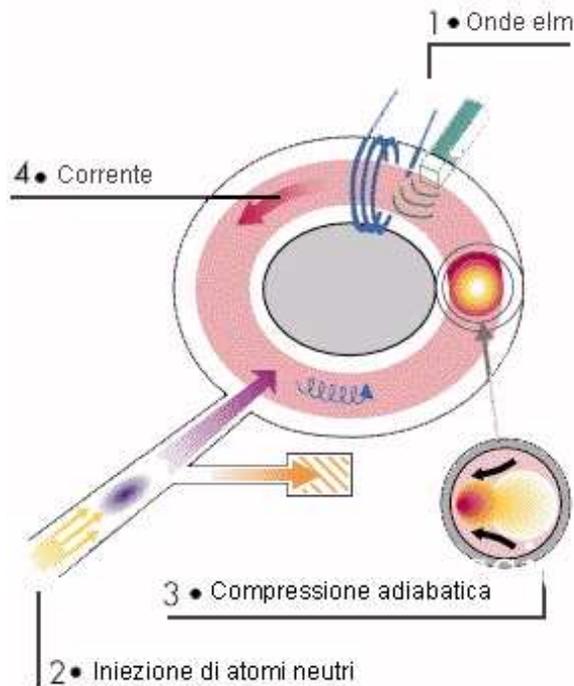


Riscaldamento del Plasma

Essendo il plasma un conduttore elettrico, è possibile riscaldarlo mediante una corrente indotta dall'esterno: il plasma nella "ciambella" si comporta come una spira cortocircuitata che costituisce il secondario di un trasformatore il cui primario è all'esterno.

La corrente indotta ha così il duplice scopo di creare il campo poloidale e di riscaldare il plasma a temperatura elevata (4 nella figura sottostante).

Questo tipo di riscaldamento è detto riscaldamento ohmico o resistivo, obbedisce alla legge di Joule, ed è analogo al riscaldamento di una lampadina o di una stufetta elettrica.



Un limite a detto riscaldamento ohmico (4 in figura) è dato dal fatto che la resistività del plasma decresce al crescere della temperatura e la massima temperatura ottenibile nel plasma, è di alcuni milioni di gradi.

Per raggiungere le temperature richieste per la fusione termonucleare è necessario, quindi, ricorrere al riscaldamento supplementare, che si può realizzare:

- per assorbimento nel plasma di onde elettromagnetiche, iniettate mediante guide d'onda o antenne che trasferiscono ad esso energia elettromagnetica (1 in figura);
- per iniezione di atomi neutri di elevata energia cinetica che attraversano il campo magnetico, vengono ionizzati e trasferiscono per collisione la loro energia al plasma (2 in figura);
- per compressione adiabatica del plasma, ottenuta spostando il plasma verso regioni a campo magnetico più forte, con conseguente riscaldamento (3 in figura).

Sempre in accordo con la legge di Lawson si è sviluppata un' altra linea di ricerca: la fusione a confinamento inerziale, (Impianto ABC) che consiste nell'ottenere in laboratorio una serie di micro-esplosioni bombardando piccole sferette contenenti una miscela di deuterio-trizio con fasci di luce laser o di particelle, di alta energia. L'energia elettromagnetica dei fasci laser di alta potenza (o l'energia cinetica delle particelle accelerate) è trasferita uniformemente alla superficie della sferetta. La superficie della sferetta evapora e, secondo il principio di azione e reazione, il combustibile

viene compresso e riscaldato. Si realizza così la condizione di altissima densità del plasma anche se per tempi di confinamento molto brevi.

Altri esperimenti sono allo studio al fine di ottenere reazioni di fusione. Ad esempio: la fusione di deuterio-trizio catalizzata da fasci di "muoni" (particelle nucleari negative, instabili, di massa uguale a 207 volte quella dell' elettrone e di vita media di 2,2 microsecondi), che avrebbero la proprietà di ridurre le distanze internucleari e quindi di favorire la reazione. La fusione catalizzata da muoni non è, per ora, conveniente ai fini di un bilancio energetico positivo, sia per la necessità di produrre queste particelle mediante acceleratori che consumano molta energia, sia perché il muone tende a legarsi al nucleo di elio prima di aver ottenuto un numero di reazioni sufficiente a rendere redditizio il processo.