

Alex Saja  
Camilla Vanelli  
Alberto Benatti

4°A  
Liceo Scientifico Leonardo da Vinci  
Gallarate  
18/04/2011



**L'energia del futuro:  
La  
Fusione Nucleare**

Secondo il modello atomico Standard, gli atomi sono composti da un nucleo costituito da protoni aventi carica positiva e neutroni aventi carica neutra e da uno spazio vuoto in cui orbitano piccole particelle di carica negativa dette elettroni. Questi ultimi sono legati al nucleo da legami di natura elettrica, mentre i protoni e i neutroni (nucleoni) sono uniti dalla forza nucleare forte.

## Che cos'è una reazione nucleare?

Una **reazione nucleare** è una trasformazione della materia che riguarda i nuclei degli atomi di determinati elementi chimici, che in una reazione vengono trasformati in nuclei diversi dai nuclei reagenti. Si ha dunque un cambiamento del numero atomico dei singoli elementi. Si differenzia appunto dalle reazioni chimiche poiché avviene una modifica della composizione nucleare e non un semplice scambio di elettroni. Per originare una reazione di questo tipo è necessaria una quantità di energia, detta energia di barriera.

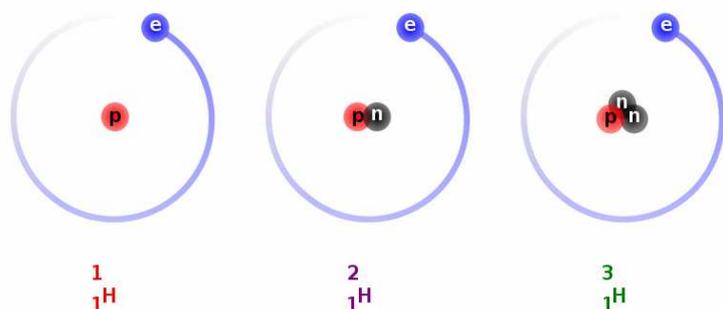
Le principali reazioni nucleari sono: la fissione nucleare, la fusione nucleare e l'annichilimento dell'antimateria.

## La fusione nucleare

La fusione nucleare è una particolare reazione nucleare che avviene nella maggior parte dei casi ad altissime temperature. Essa consiste nella compressione di due o più atomi al fine di ottenerne uno di massa maggiore e energia. Si distinguono in: esoergoniche, quando dalla fusione viene emessa più energia di quanta ne venga usata per la compressione; viene detta endoergoniche, quando l'energia sviluppata viene assorbita per la formazione del nuovo nucleo. Di conseguenza gli studi per il campo relativo alla produzione di energia si basa sulle reazioni esoergoniche.

## Come avviene la fusione

Per parlare di come avviene la fusione nucleare, bisogna prima fare breve accenno alla teoria della relatività di Einstein:  $E=mc^2$ ; dove E è l'energia, m la massa e c la velocità della luce. In questa reazione dunque la somma delle masse del nuovo nucleo che si viene a creare e del neutrone rilasciato è inferiore alla massa dei reagenti; tale differenza è la massa che si trasforma in energia. Inoltre si deve ricordare che l'idrogeno possiede tre isotopi: prozio, deuterio e trizio.



Partendo da sinistra il primo modello rappresenta il prozio, il cui nucleo è costituito da un solo protone; il seguente è chiamato deuterio e possiede oltre ad un protone anche un neutrone; l'ultimo è lo schema del

trizio, isotopo radioattivo, diffuso in piccole quantità sulla Terra. Esso possiede un protone e due neutroni.

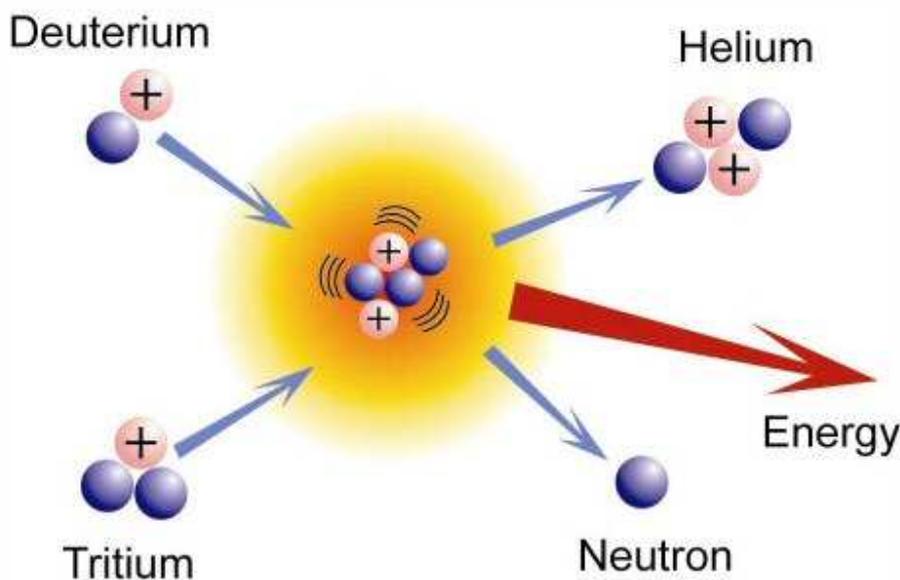
L'energia nelle fusioni si misura in elettronvolt (eV) e con i suoi multipli.

$$1\text{eV}=1,602\ 176\ 46 \times 10^{-19}\ \text{J}$$

$$1\text{MeV}=1,602\ 176\ 46 \times 10^{-13}\ \text{J}$$

Affinché si operi la fusione nucleare i nuclei dei due reagenti devono essere avvicinati a tal punto che la forza nucleare forte prevalga sulla repulsione elettromagnetica (la repulsione che avviene per le medesime cariche elettriche positive dei due nuclei). Ciò avviene a distanze prossime al femtometro ( $10^{-15}$  metri). Al fine di raggiungere tale distanza, si devono raggiungere altissime pressioni, altissime temperature e altissima densità.

Un motivo per cui la fusione nucleare è decisamente più conveniente rispetto alle reazioni



Schema che raffigura la fusione di deuterio e trizio

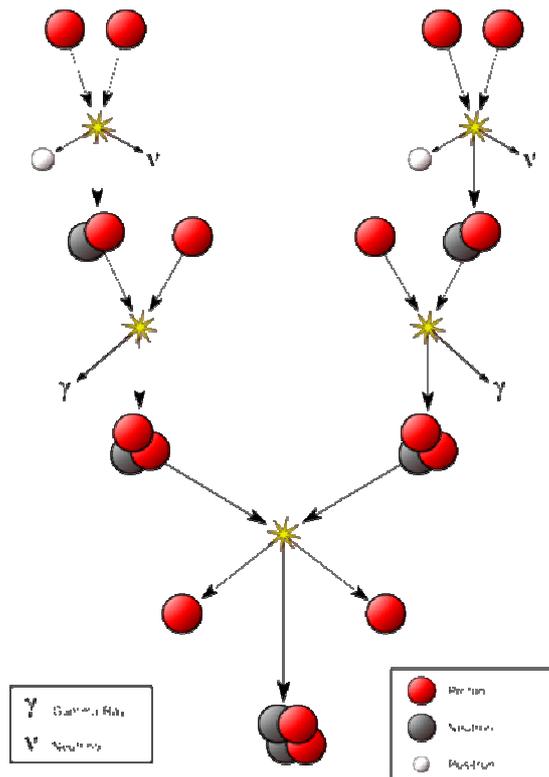
chimiche è data dal fatto che l'energia potenziale totale di un nucleo è di gran lunga più alta dell'energia che lega gli elettroni al nucleo. Per questa ragione l'energia rilasciata dalle reazioni nucleari è notevolmente superiore di quella delle reazioni chimiche. Ad esempio l'energia di legame dell'elettrone al nucleo di idrogeno è di 13,6 eV mentre l'energia che viene rilasciata dalla

reazione deuterio-trizio mostrata in seguito è pari

a 17,5 MeV, cioè  $10^6$  volte maggiore della prima. Dunque con un grammo di deuterio e trizio si potrebbe produrre l'energia sviluppata da 11 tonnellate di carbone!

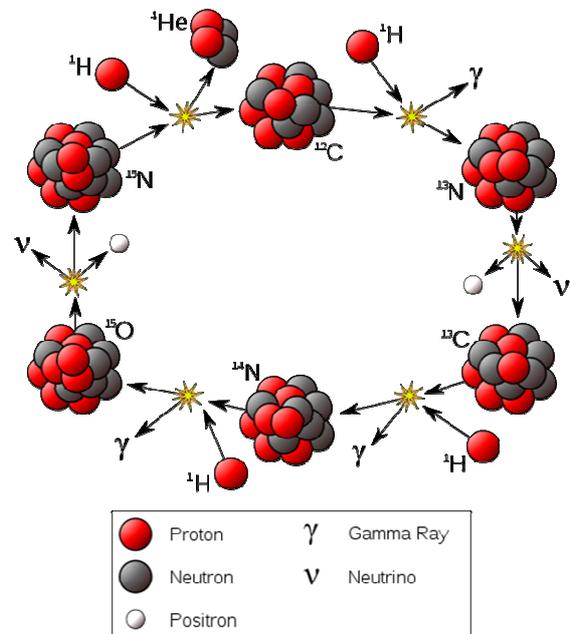
Fino ad ora abbiamo parlato di atomi generici, tuttavia si devono fare alcune precisazioni al riguardo; infatti più l'atomo è pesante più energia di attivazione sarà necessaria, dunque si dovranno utilizzare elementi molto leggeri per realizzarla qui sulla Terra. Basti pensare che le stelle più grandi arrivano al massimo a realizzare la fusione tra atomi di ferro a temperature e pressioni colossali!

Sulle stelle esistono diversi cicli di fusione tra cui la reazione a catena protone-protone e il ciclo CNO.



La prima avviene nella maggior parte di stelle con massa ridotta come il Sole, e si attua tra atomi di idrogeno (protoni) che uniti producono atomi di elio.

La seconda avviene in stelle di grande massa, operando serie di reazioni nucleari in cui partecipano atomi di carbonio, azoto e ossigeno: per questa ragione è chiamato ciclo CNO o ciclo Bethe.



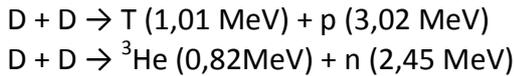
Entrambe le reazioni hanno temperature di soglia troppo alte per la nostra attuale tecnologia e non sono dunque oggetto delle attuali ricerche. Infatti per realizzare reattori a fusione sono necessarie reazioni a bassa energia di soglia, ovvero reazioni a cui viene richiesta poca energia di attivazione. Un altro problema è la scarsa possibilità di controllare i neutroni, e dunque si deve ricercare una reazione che non liberi neutroni, aneutronica, o reazioni che liberino neutroni a bassa energia.

Queste sono alcune delle reazioni prese in esame dagli scienziati, tra parentesi è riportata l'energia emessa:

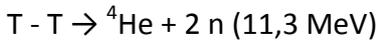
1. reazione D-T (la soglia più bassa corrisponde a 50.000 eV)



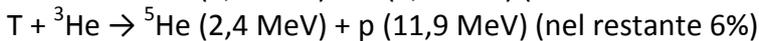
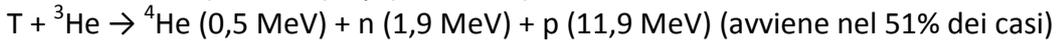
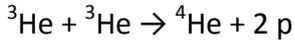
2. reazione D-D (le due reazioni hanno la stessa probabilità di avvenire)



3. Reazione T-T



4. Reazioni dell' ${}^3\text{He}$ , ad eccezione della seconda sono aneutroniche:



La reazione più studiata è dunque la reazione deuterio-trizio poiché ha la più bassa energia di attivazione e dunque permette di avere temperature dei reagenti nettamente inferiori (circa 20eV, ovvero 200 milioni di gradi). Lo svantaggio di questa reazione è la produzione di neutroni ad alta energia (14,1MeV) che non possono essere schermati con campi magnetici ma solamente da schermature apposite come il cemento armato. Inoltre tali neutroni tendono ad attivare i materiali metallici nelle vicinanze. Tuttavia l'alta energia di questi neutroni permette che la cattura del calore dalle pareti schermanti e dunque la conversione in energia. Un reattore di questo tipo è l'ITER, che è in fase di costruzione a Cadrache, nel sud della Francia.

Per quanto riguarda la reazione D-D, essa svilupperebbe neutroni a più bassa energia(2,5 MeV circa), tuttavia l'energia di attivazione è notevolmente più alta che nella reazione D-T.

## La fusione nucleare in natura

Confrontando le varie reazioni nucleari di fusione nelle stelle se ne deduce che, oltre ad essere una possibile fonte di energia rinnovabile, la fusione è anche il processo per mezzo del quale si formano, a partire da idrogeno, i nuclei di tutti gli elementi chimici presenti in natura. Esistono diverse reazioni di fusione nucleare; le più comuni sono:

- catena protone-protone, schematizzata nell'immagine soprastante,
- catena CNO, anch'essa descritta in precedenza,
- reazione triplo alfa, un processo che fa parte del ciclo dell'elio,
- processi di fusione di carbonio, ossigeno e neon. Tali reazioni sono più complesse.

Oltre che produrre nuovi elementi chimici, indispensabili per la costituzione dei pianeti e quindi della vita, la fusione nucleare emette, sotto forma di energia radiante (tra cui quella luminosa che permette la loro osservazione), una grandissima quantità di energia, tra cui quella adoperata dagli esseri viventi per garantire il proprio sostentamento. Studieremo più approfonditamente una stella che ci interessa da vicino: il Sole.

## Un esempio di fusione nucleare: Il sole

Il Sole è una stella gialla di massa non relativamente alta se confrontata con altre stelle ( $1,98 \times 10^{30}$  kg) che utilizzando la catena protone-protone, un insieme di reazioni nucleari, sintetizza elio e

libera energia. Avvengono anche reazioni riconducibili alla catena CNO, seppur in numero minore. Questo processo di fusione nucleare si divide in tre fasi.

1. Nel primo stadio due nuclei di prozio fondono in un nucleo di deuterio rilasciando un positrone, un neutrino ed energia:  ${}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^2_1\text{H} + e^+ + \nu_e + E$ . Secondo la relatività ristretta, il positrone, particella di massa pari a quella di un elettrone e carica opposta, reagisce con un elettrone presente nel nucleo del Sole annichilandosi reciprocamente e trasformando le proprie masse in energia sotto forma di radiazioni prive di massa: due raggi gamma.
2. Nel secondo stadio il deuterio si combina con un altro nucleo di prozio per formare elio-3 liberando un altro raggio gamma,  ${}^2_1\text{H} + {}^1_1\text{H} \rightarrow {}^3_2\text{He} + \gamma$ .
3. Il terzo stadio può avvenire in tre diverse modalità chiamate rami, a seconda della temperatura interna del nucleo stellare. Il risultato complessivo è comunque lo stesso, infatti si ottengono nuclei di elio-4 (isotopo più diffuso dell'elio, il cui nucleo è composto da due neutroni e da due protoni) e si rilascia energia. Nel Sole è più frequente il primo tipo di reazioni: nel 91% dei casi si verifica il ramo PP I, che è anche il più semplice. E' infatti composto di una sola fase:  ${}^3_2\text{He} + {}^3_2\text{He} \rightarrow {}^4_2\text{He} + {}^1_1\text{H} + {}^1_1\text{H}$ .  
I protoni liberati sono poi riutilizzati per il formarsi di nuove reazioni nucleari. Il ramo PP II coinvolge la formazione di elementi intermedi, quali berillio e litio, che vengono poi utilizzati per costituire elio. Il ramo PP III, dotato di una fase ulteriore, è simile.

Il risultato finale della reazione è che si sono trasformati nuclei di prozio in nuclei di elio-4, rilasciando energia sotto forma di raggi gamma. Tali raggi attraversando gli strati più esterni della stella e si trasformano in raggi X fino a poi raggiungere la superficie esterna e ad irradiarsi nello spazio in gran parte come energia visibile dall'occhio umano (la luce) ed in parte minore come raggi infrarossi o ultravioletti.

### Quanta massa si converte in energia?

Considerando le reazioni complessivamente si nota che da sei nuclei di idrogeno (prozio) si ottengono un nucleo di elio-4 e due protoni. Dunque quattro protoni si trasformano in un nucleo di elio stabile. Un protone ha massa 1,007 276 u mentre un nucleo di elio-4 ha massa 4,003 910 u (u è l'unità di massa atomica).

Conoscendo le masse dei nuclei reagenti e del nucleo prodotto, calcoliamo il difetto di massa:

$$\Delta m = m_0 - m_{fin}$$

$$\Delta m = 4 \cdot m_{{}^1_1\text{H}} - m_{{}^4_2\text{He}}$$

$$\Delta m = 4 \cdot 1,007\,276\text{ u} - 4,003\,910\text{ u}$$

$$\Delta m = 0,025194\text{ u}$$

L'unità di massa atomica u vale  $1,660565 \cdot 10^{-27}\text{ kg}$ , ne deriva che il difetto di massa è pari a  $4,1836 \cdot 10^{-29}\text{ kg}$ . Una quantità estremamente piccola che però si trasforma in energia secondo

l'equazione della relatività ristretta:  $E = m \cdot c^2$ .

$$E = 4,1836 \cdot 10^{-29} \cdot (2,99792458 \cdot 10^8)^2$$

$$E = 4,1836 \cdot 10^{-29} \cdot 8,9875 \cdot 10^{16}$$

$$E = 37,6003 \cdot 10^{-13}\text{ J} = 23,5\text{ MeV}$$

L'energia emessa sotto forma di raggi gamma da una singola catena protone-protone è quindi pari a 23,5 MeV. Quindi da un grammo di idrogeno è possibile ottenere  $56,139 \cdot 10^{10}\text{ J}$  di energia. Una quantità immensa, che costituisce un incentivo a incrementare la ricerca sulla realizzazione della fusione nucleare.

## Quando finirà l'idrogeno?

L'idrogeno usato come combustibile nel nucleo del Sole, nonostante garantisca al Sole una vita molto lunga, non è infinito. I fisici prevedono che in un futuro molto remoto, tra circa 5 miliardi di anni, tale elemento comincerà a scarseggiare e la stella inizierà a collassare per effetto della forza di gravità. Dopodiché entrerà in un nuovo ciclo, composto di reazioni triplo alfa, che costituirà carbonio e ossigeno a partire da elio. Nel compiere queste reazioni il Sole si espanderà tanto da inglobare la terra e raggiungere un diametro di circa 150 milioni di chilometri. Stando alle previsioni degli scienziati, dopo approssimativamente 700 milioni di anni, il Sole avrà consumato la disponibilità di elio, terminerà le reazioni di fusione e collasserà nuovamente su se stesso, diventando una nana bianca con volume prossimo a quello terrestre.

## Reazioni endoergoniche

Stelle dotate di massa almeno cinque volte quella solare, invece, riescono a effettuare reazioni nucleari in cui si producono altri elementi con numero atomico superiore a quello dell'ossigeno fino al ferro. Poiché la formazione in reazioni di fusione di elementi avente numero atomico maggiore di quello del ferro è endoergonica, ossia necessita di una quantità di energia maggiore di quella emessa, non avviene nelle stelle più comuni. Tuttavia, nel nostro sistema solare si trova una grande quantità di tali elementi chimici. Si ipotizza che la loro origine è imputabile a reazioni endoergoniche avvenute in supernovae, stadi finali di stelle molto massicce che, quando esplodono, rilasciano una grandissima entità di energia ed emettono luminosità molto elevata, superiore a quella del Sole.

## Realizzazione della fusione nucleare sulla Terra

Negli anni '20 Atkinson e Houtermans, uno scienziato britannico ed un tedesco, avanzarono l'idea che il Sole possa brillare a seguito di reazioni termonucleari; fu poi postulato più dettagliatamente il ciclo di produzione energetica mediante fusione nucleare. Successivamente Rutherford, Walton e Cockcroft osservarono la cattura di un protone da parte di un atomo di litio-7, e la disintegrazione di quest'ultimo in due particelle alfa con liberazione di energia. Riuscirono anche nel 1925 a fondere due nuclei di deuterio in un elio-3 ed un neutrone o in uno di trizio ed un protone, liberandosi in ambedue i casi, grande energia. Gli studi ripresero nel dopoguerra, infatti nel 1951 i fisici sovietici Andrej Sacharov ed Igor Tamm progettarono l'embrione del più moderno Tokamak. Durante la guerra fredda, un'équipè di scienziati statunitensi lavorarono alla realizzazione della bomba H, un ordigno che sfruttando la fusione nucleare ha un'immensa potenza distruttiva. Con la prima conferenza *Atomi per la Pace* del 1958, si capì che era necessario studiare più a fondo i plasmi e si dette il via a studi di base che occuparono gli anni successivi, inaugurando così negli anni successivi una collaborazione a livello mondiale. Nel 1978 il PLT (Princeton Large Torus), un reattore statunitense, produsse plasmi ad oltre 60 milioni di gradi. Dopodiché verso la metà degli anni '80 iniziarono gli esperimenti con il TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor) con mescole di deuterio e trizio. Negli stessi anni in Europa il JET (Joint European Torus) produsse i primi plasmi e fuse con successo deuterio e trizio. Nel 1988 in Giappone iniziarono esperimenti molto avanzati con il JT-60, Tokamak di grandi dimensioni, mentre nell'89 entrò in funzione il Tokamak FTU nei laboratori italiani di Frascati, nel Lazio.

Le ricerche sulla fusione nucleare vertono sulla realizzazione di un reattore in grado di produrre energia elettrica a partire da elementi leggeri. Esistono diversi studi in questo settore, animati sia dai governi dei Paesi più industrializzati sia dalla comunità stessa dei fisici. Lawson, un fisico americano, enunciò un famoso criterio, da tenere in considerazione nel realizzare un reattore di

successo. Riassunto, tale principio afferma che un reattore a fusione deve emettere energia maggiore di quella fornita, un concetto all'apparenza ovvio che comporta numerosi calcoli. Nella versione più moderna è semplicemente chiamato criterio di ignizione.

I principali ostacoli da superare nel creare un reattore di successo che rispetti il criterio di ignizione sono:

- a) realizzare lo stato di plasma, per il quale sono necessarie temperature dell'ordine di  $10^8\text{K}$ ;
- b) portare la pressione nel plasma a valori molto elevati;
- c) confinare i nuclei reagenti e dunque le particelle di plasma (mobilissime) in uno spazio ristretto, in modo che entrino in collisione tra loro e avvenga l'ignizione, l'innescò della reazione;
- d) trovare un materiale in grado di resistere ad un intenso flusso di neutroni.

Per ovviare a questi problemi sono in fase di studio diversi prototipi che lavorano in diverse condizioni:

- ❖ fusione con campi magnetici, in questo settore si concentra gran parte della ricerca. Essi coinvolgono temperature e pressioni elevatissime che sono raggiunte attraverso complicate macchine che producono campi magnetici come il Tokamak o lo Z-Pinch. Dei progetti, aventi un Tokamak, l'ITER rappresenta il tentativo su cui si concentrano le maggiori aspettative ma esistono molti altri prototipi tra cui: il DEMO, finanziato dalle maggiori potenze economiche mondiali, il cui fine è dimostrare la possibilità di generare energia elettrica tramite reazioni di fusione nucleare; i già citati JET e TFTR e l'IGNITOR, un progetto che inizialmente italiano coinvolse finanziamenti russi grazie ai quali si stima di avviare la costruzione entro il 2012.
- ❖ Fusione inerziale, in cui una miscela di deuterio e trizio, dopo essere riscaldata e compressa, viene bombardata da raggi laser che innescano la fusione. Prototipi in questo settore sono gli statunitensi Nova e NIF.
- ❖ Fusione fredda, un possibile sviluppo di energia a fusione che ha suscitato, negli ultimi anni, molto clamore a causa della sua effettiva attuazione. E' particolare poiché è un tentativo di realizzare reazioni di fusione a temperature e pressioni molto minori degli altri prototipi, che vengono classificati come fusione calda. Si è provato attraverso celle elettrolitiche in grado di confinare le reazioni e con l'utilizzo di muoni come catalizzatori. Giuliano Preparata, un fisico italiano (1942-2000), portò grandi contributi in questo campo supportando teoricamente l'esperimento del 1989 dei chimici americani Fleischmann e Pons, che sostennero di essere riusciti a realizzarla. Nel 2008 il giapponese Yoshiaki Arata mostrò, in una conferenza, il proprio esperimento condotto con catalizzatori di platino e riuscito nella produzione di energia elettrica. Ci sono stati molto dubbi a riguardo che testimoniano come la fusione fredda sia all'apparenza molto accreditata come modalità di realizzazione di un reattore, ma che nasconda ancora molte insidie.

Approfondiamo lo studio del Tokamak, di un suo modello, il FTU, e dell'ITER, il progetto di collaborazione internazionale.

## **Tokamak**

Un Tokamak è una macchina di forma toroidale. Il nome è di origine russa e tradotto letteralmente vuol dire Camera Toroidale e Bobine Magnetiche. Esso è ancora in via di sperimentazione.

Progetti che coinvolgono il Tokamak: sono FTU, Frascati Tokamak Upgrade, e JET.

Questa macchina funziona utilizzando una miscela di due isotopi dell'idrogeno: il deuterio e il trizio. La miscela di gas allo stato di plasma risulta essere completamente ionizzata pertanto

controllabile attraverso degli opportuni campi elettromagnetici esterni. I campi magnetici utilizzati sono di tre tipi: campi toroidale e verticale indotti esternamente e campo poloidale generato dal plasma stesso.

Il primo viene generato per mezzo di bobine toroidali. Permette di creare un campo diretto attorno all'asse di simmetria del toro che vincola le particelle cariche a fluire lungo quella direzione.

Il secondo viene generato per mezzo di bobine. Permette il controllo della posizione del plasma all'interno del toro.

Il terzo invece assicura l'equilibrio del plasma.

Affinché il plasma raggiunga le condizioni di fusione termonucleare devono essere soddisfatte particolari condizioni espresse dal criterio di ignizione.

Importante per il raggiungimento di queste condizioni è la temperatura del plasma, che viene aumentata attraverso varie tecniche, tra cui: il riscaldamento ohmico, l'introduzione di particelle ad alta energia nonché irraggiamento di campi elettromagnetici alla frequenza di risonanza per mezzo di antenne a radiofrequenza.

La configurazione magnetica nota come Tokamak è il risultato delle ricerche condotte negli anni '50 dagli scienziati russi Andrei Sakharov e Igor Tamm. L'idea base del Tokamak era infatti quella di confinare un gas ad alta temperatura (plasma) con dei campi magnetici, per ottenere energia dalla fusione nucleare controllata. In Occidente questa configurazione era ignota, in quanto le ricerche sulla fusione erano tenute segrete. Fu solo nel 1955 che gli Stati Uniti scoprirono l'esistenza del Tokamak.

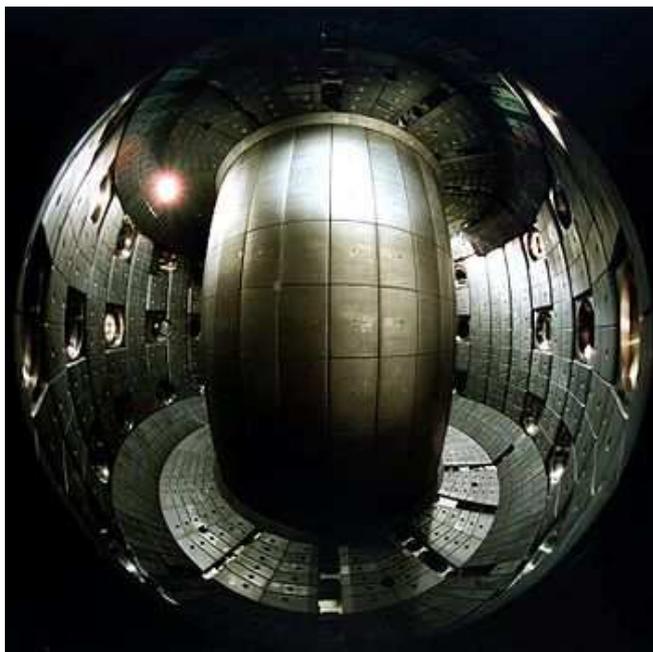


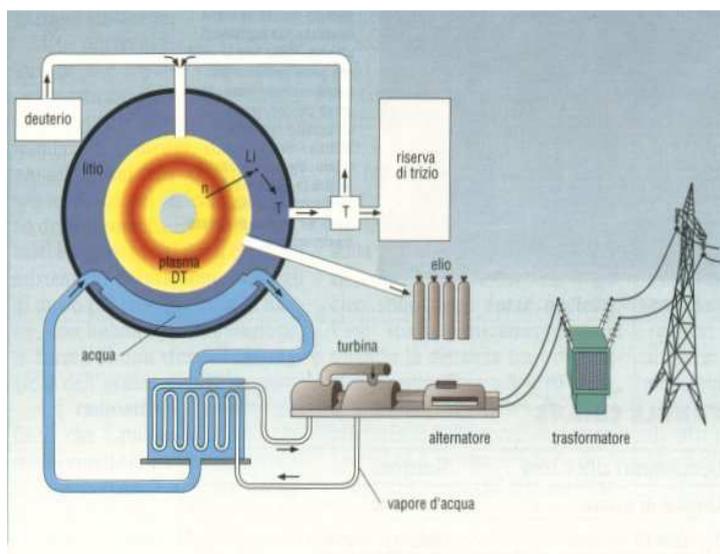
Foto che raffigura l'interno di un Tokamak

In un Tokamak, come condizione iniziale viene creato un vuoto spinto o ultraspinato, mediante apposite pompe a vuoto. L'accensione della corrente di plasma nel contenitore toroidale avviene in diverse fasi:

- si immette corrente nelle bobine di campo toroidale;
- viene poi immessa una piccolissima quantità di gas (generalmente idrogeno o suoi isotopi)
- si immette corrente nel solenoide centrale, che occupa il buco centrale del toro, creando un flusso nel nucleo del Tokamak: esso costituisce il circuito primario di un trasformatore, di cui il toro costituisce il circuito secondario;
- la corrente nel primario viene fatta rapidamente calare, e questo crea una forza elettromotrice. Gli atomi neutri vengono ionizzati, si crea una scarica con elettroni via via più numerosi per effetto degli urti fra elettroni e atomi neutri.
- il gas non è più neutro, ma è diventato plasma: a questo punto la corrente elettrica riscalda il plasma a temperature anche molto elevate (qualche milione di gradi).

Se il gas introdotto nel Tokamak è una miscela di deuterio e trizio, si possono allora studiare le reazioni di fusione termonucleare dei plasmi ricreando per certi versi l'ambiente che si ha all'interno delle stelle.

Il metodo tradizionale per scaldare un plasma è quello di indurre una corrente elettrica nel toro (metodo che viene talvolta chiamato riscaldamento ohmico). Tuttavia, nel Tokamak questo lo si ha quando il campo magnetico toroidale è molto grande rispetto alla corrente di plasma.



Raffigurato a sinistra vi è lo schema di un reattore nucleare a fusione di tipo tokamak. Il plasma di deuterio e trizio è mantenuto lontano dalle pareti del contenitore da intensi campi elettromagnetici. Una frazione dei neutroni prodotti dalla fusione del deuterio e del trizio, serve a produrre altro trizio mediante una reazione che avviene nello strato di litio intorno al plasma. L'elio, che è un altro prodotto della fusione, è raccolto fuori dal reattore. Il calore che si sprigiona a causa delle reazioni di fusione viene asportato dall'acqua come in un reattore a fissione.

### FTU (Frascati Tokamak Upgrade)

FTU è una macchina tokamak di medie dimensioni con un elevato campo magnetico progettata e sviluppata nei laboratori italiani di Frascati dall'ENEA. La generazione di un elevato campo magnetico richiede il passaggio negli avvolgimenti toroidali di una corrente continua di 37.800 Ampere per 1.5 secondi. Poiché tutti gli avvolgimenti di FTU sono bobine di rame, al fine di evitarne il danneggiamento, è necessario abbassare la loro resistività in modo da diminuire drasticamente la dissipazione per effetto Joule. L'unica possibilità è di tenerle costantemente alla temperatura di lavoro dell'azoto liquido, pari a circa  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

FTU ha una notevole complessità e richiede un numero elevato di sistemi (o sotto-impianti) per il suo funzionamento, spesso collocati in altre strutture adiacenti.

### Iter

ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, in seguito usato nel significato originale latino, *cammino*) è un progetto internazionale che coinvolge l'Unione europea, la Russia, la Cina, il Giappone, gli Stati Uniti, l'India e la Corea del nord, che si propone di ricreare un reattore a fusione in grado di ricavare più energia di quanta ne serva per l'innesco e il sostentamento. Esso è in fase di costruzione a Cadarache, nel sud della Francia, e dovrebbe essere completato entro il 2012. Si tratta di un reattore deuterio-trizio in cui il plasma verrà confinato all'interno del Tokamak. Si parla tuttavia ancora di un reattore sperimentale che, si spera, possa permettere agli scienziati, sia di amplificare le conoscenze riguardanti la fisica del plasma, sia di poter sviluppare successivamente nella futura centrale elettrica a fusione DEMO una più certa, sicura ed efficiente reazione di fusione.

Di seguito i dati tecnici del Tokamak che verrà installato nell'ITER:

- **Altezza edificio:** 24 m
- **Larghezza edificio:** 30 m
- **Raggio esterno del plasma:** 6,2 m
- **Raggio interno del plasma:** 2 m
- **Temperatura di plasma:**  $1,5 \times 10^8$  K
- **Potenza in uscita:** 500-700 MW
- **Volume di plasma:** 837 m<sup>3</sup>
- **Superficie del plasma:** 678 m<sup>2</sup>
- **Campo magnetico toroidale al raggio maggiore del plasma:** 5,3 T
- **Durata dell'impulso di fusione:** > 300 s
- **Rendimento:** > 10

Secondo le specifiche su cui verrà costruito l'ITER, si crede che possa produrre 10 volte l'energia utilizzata per l'innesco e il sostentamento. L'energia verrà assorbita in un primo momento da un mantello protettivo (shielding blade) refrigerato ad acqua. Inoltre momentaneamente, si crede almeno fino al 2025, non verrà dotato di una macchina di produzione del trizio e verrà dunque ottenuto dalle centrali canadesi CANDU.



**Schema dell'ITER**

## Pro e contro di energia prodotta da fusione nucleare

L'effettiva realizzazione di un reattore nucleare a fusione comporterebbe naturalmente degli svantaggi:

- l'estrazione del deuterio dall'acqua e la produzione del trizio comportano costi molto elevati;
- costosa risulterebbe anche la costruzione di una centrale a fusione. La fusione richiede temperature di lavoro elevatissime, tanto elevate da non poter essere contenuta in nessun materiale esistente. Il plasma di fusione viene quindi trattenuto grazie all'ausilio di campi magnetici di intensità elevatissima, che allo stato attuale richiedono una quantità di energia anche superiore a quella prodotta. Per questo in alcuni esperimenti per ottenere le alte temperature vengono utilizzati dei potenti laser.
- Anche in questo caso gli addetti all'impianto correrebbero il rischio di essere continuamente esposti alle radiazioni, avendo quindi aspettative di vita inferiori alla media.

Esistono tuttavia considerevoli vantaggi che si possono trarre dalla fusione nucleare:

- le scorie non sono radioattive. Nelle centrali a fissione, i prodotti di risulta (scorie) sono atomi instabili, che cercano di raggiungere la stabilità, e per farlo emettono radiazioni

dannose per gli organismi biologici. Tali scorie sono altamente radioattive e pericolose e necessitano di migliaia di anni perché la radioattività decada a livelli non dannosi creando il problema di allestire dei luoghi sicuri di stoccaggio. Nelle centrali a fusione invece le scorie non sono niente di tutto ciò. Infatti vengono prodotti elio, gas inerte e non radioattivo, e trizio che ha una vita media di 12 anni circa. Le centrali a fusione non producono gas che influiscono sul riscaldamento globale.

- Non vi è produzione di plutonio, materiale molto radioattivo e anche molto pericoloso. Le particelle alfa che esso emette possono danneggiare gravemente gli organi interni, se viene ingerito o inalato. In particolar modo sono a rischio lo scheletro, la cui superficie assorbe il plutonio, ed il fegato, dove viene raccolto e concentrato;
- il combustibile della fusione è estratto dall'acqua, una risorsa presente in qualsiasi paese del mondo. Esso è costituito da deuterio, disponibile per qualsiasi nazione con sbocco sul mare o che comunque ha a disposizione una fonte d'acqua (eventualmente può comprarla), e da trizio, entrambi isotopi dell'idrogeno, presente nell'acqua all'11,19%;
- si riducono le conseguenze di eventuali incidenti. In caso di perdita di controllo, il reattore a fusione tenderà a raffreddarsi arrestando spontaneamente il processo di fusione. Nel caso dell'attuale fissione nucleare le conseguenze sono drammatiche poichè le grandi quantità di uranio combustibile tendono a produrre calore in una reazione a catena incontrollata, provocando la fusione del nocciolo del reattore e la conseguente emissione nell'atmosfera di enormi quantità di radiazioni (es. Chernobyl).
- Si ha una produzione di energia elevata a differenza di quella prodotta nelle centrali a fissione. Inoltre non possono essere sfruttate per fini terroristici o per fini che possono danneggiare-distruggere una nazione.

## Conclusioni

Nonostante alcuni aspetti negativi, possiamo facilmente intuire che rispetto alle attuali centrali energetiche, i reattori a fusione potrebbero modificare totalmente la concezione dell'energia; basti pensare che non vi saranno più guerre per il petrolio o altri materiali per la produzione dell'energia, dato che il deuterio e il litio (da cui si ricava il trizio) sono ampiamente presenti sulla terra. Inoltre, ad eccezione dell'innesco, non verranno prodotti gas, altre sostanze tossiche o pericolose per l'ozono. Dunque ci auguriamo che gli investimenti in questo campo della fisica aumentino per assicurarci un futuro meno dipendente da sostanze non rinnovabili quali petrolio, carbone, uranio ed altri combustibili.

## Fonti

Abbiamo tratto informazioni e immagini dai seguenti siti:

<http://ulisse.sissa.it>

<http://www.fmboschetto.it>

<http://www.astroala.it/>

<http://it.wikipedia.org>

<http://www.fisicamente.net>

<http://fusione.enea.it>

<http://sapere.it>

<http://www.sansepolcroliceo.it/>