

La Fusione Nucleare

“Non esiste il benché minimo indizio che faccia pensare che l'energia nucleare diverrà mai accessibile, perché questo comporterebbe essere in grado di spaccare l'atomo a comando” (Albert Einstein, 1932)

Roberto Caretoni - Liceo Classico G. Pascoli - Classe III B - Anno Scolastico 2005/06

Indice

1 - Introduzione	2
1.1 - Cos'è la fusione nucleare	2
1.2 - Breve cronologia della fusione nucleare	2
2 - La fusione nucleare nelle stelle	3
2.1 - Il ciclo protone-protone	4
2.2 - Il ciclo carbonio-azoto-ossigeno	5
2.3 - Il processo tre alfa	5
2.4 - Il processo alfa	6
2.5 - Il processo di fusione del carbonio	6
2.6 - Il processo di fusione del neon	7
2.7 - Il processo di fusione dell'ossigeno	7
2.8 - Il processo di fusione del silicio	7
3 - La fusione nucleare come fonte di energia	8
3.1 - Condizioni per la fusione controllata	8
3.2 - Il Tokamak	9
3.3 - Pro e contro della fusione nucleare	12
4 - Un'applicazione negativa: la bomba all'idrogeno	13
Bibliografia	16

1 - Introduzione

La fusione nucleare è la sfida del terzo millennio: ogni attività umana produce inquinamento, tuttavia la fusione nucleare potrebbe consentire l'abbattimento di tutti i problemi emersi dall'esperienza della fissione nucleare, l'attuale processo mediante il quale si produce energia nucleare sin dalla seconda metà del secolo scorso.

La fusione nucleare, infatti, è una via pulita per produrre energia, senza rischio di esplosioni devastanti o irraggiamento da scorie radioattive, che si basa sul medesimo processo che si sviluppa naturalmente nelle stelle come il Sole.

1.1 - Cos'è la fusione nucleare

Mentre la fissione nucleare è una reazione in cui i nuclei di atomi pesanti vengono divisi in nuclei più leggeri, con il conseguente rilascio di energia, la fusione nucleare sfrutta il processo inverso, infatti, consiste nell'unione di due nuclei leggeri in un nucleo più pesante: come per la fissione, anche nella fusione nucleare la liberazione di energia è dovuta al fatto che la massa dei prodotti è inferiore alla massa dei reagenti.

La reazione di fusione nucleare avviene quando due nuclei, vincendo la [forza elettromagnetica](#) repulsiva (in quanto entrambi i nuclei sono positivi), riescono ad avvicinarsi a tal punto da reagire tramite la [forza d'interazione nucleare forte](#), fondendosi in un nucleo solo, più pesante ma di massa inferiore dei reagenti. Questa differenza di massa, detto difetto di massa, si trasforma in energia secondo la relazione formulata da Albert Einstein $E=mc^2$, dove E sta per l'energia liberata, m sta per la massa perduta nella reazione, e c sta per la velocità della luce. Affinché questo avvenga, la materia deve raggiungere livelli di temperatura altissimi, nell'ordine di milioni di kelvin.

1.2 - Breve cronologia della fusione nucleare

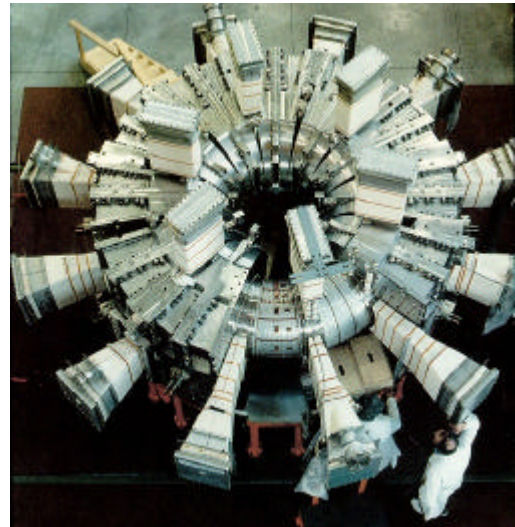
Così come ogni importante traguardo scientifico, la strada che ha portato alla scoperta della fusione nucleare è stata lunga e difficoltosa, e tuttora non si è ancora conclusa, anzi, la riproduzione di essa in termini vantaggiosi non è ancora stata raggiunta. Ecco una breve cronologia degli eventi di maggior rilievo nello studio della fusione nucleare:

- ? fine anni '20: Atkinson e Houtermans ipotizzano che il Sole possa brillare a seguito di reazioni termonucleari;
- ? 1925: Rutherford, Oliphant ed Harteck compiono la fusione di due deutoni (nucleo di deuterio) ottenendo grande energia;
- ? 1951: i fisici sovietici Andrej Sacharov ed Igor Tamm disegnano ciò che più tardi verrà chiamato Tokamak. Da questo momento poco si sa sulle ricerche nucleari degli Stati: la guerra fredda è in corso;
- ? 1958, Ginevra: si svolge la Conferenza *Atomi per la Pace*. Si capisce l'importanza dei plasmi che saranno oggetto di approfonditi studi negli anni successivi;
- ? 1968: il Tokamak sovietico mostra la strada sulla possibilità del confinamento magnetico;

Forza elettromagnetica: detta anche forza di Coulomb (in onore del suo scopritore, che ne studiò il suo funzionamento dal 1777 al 1785), è l'interazione che agisce tra particelle cariche, mediante l'azione di particelle virtuali dette fotoni. Può essere attrattiva (tra cariche di segno opposto) o repulsiva (tra cariche di segno uguale).

Forza d'interazione nucleare forte: ipotizzata per primo da Enrico Fermi, è la forza che agisce tra i quark (particelle fondamentali indivisibili, alla base di protoni e neutroni), legandoli a formare protoni e neutroni, mediante l'azione di particelle virtuali dette gluoni. E' una forza d'intensità maggiore rispetto a quella elettromagnetica, ma di raggio d'azione molto inferiore, e permette di tenere uniti nel nucleo protoni e neutroni.

- ? 1978: quella che allora si chiamava Comunità Europea mette in piedi uno dei progetti di studio della fusione più ambiziosi, il JET (Joint European Torus), che viene iniziato a costruire ad Abingdon in Gran Bretagna. Nel giugno 1983 il JET produce i primi plasmi e mostra di funzionare fino agli esperimenti di fusione del deuterio e del trizio del 1991;
- ? 1978: il PLT (Princeton Large Torus) statunitense produce plasmi ad oltre 60 milioni di gradi.
- ? metà degli anni '80: iniziano gli esperimenti con il TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor), in particolare con mescole di deuterio e trizio;
- ? 1988: esperimenti avanzati in Giappone con il JT-60, Tokamak di grandi dimensioni;
- ? 1989: entra in funzione il Tokamak FTU (Frascati Tokamak Upgrade) nei Laboratori Nazionali di Frascati (Roma), risultato di ricerche iniziate nel 1976.



Tokamak del progetto FTU

2 - La fusione nucleare nelle stelle

Fino al secolo scorso si credeva che l'energia prodotta dalle stelle fosse rigorosamente effetto della contrazione che esse subivano sotto l'azione del loro intenso campo gravitazionale. Questa teoria era però insufficiente a spiegare la longevità del Sole, al quale già venivano riconosciuti, sulla base di prove scientifiche, circa 5 miliardi di anni di età. Nei primi anni del '900 gli astrofisici cominciarono ad interrogarsi sulle reali cause della vita delle stelle, ed a piccoli passi si avvicinarono al risultato finale: infatti, nel 1939, in un articolo intitolato "Energy Production in Stars", Hans Bethe (fisico tedesco deceduto lo scorso anno) analizzò le differenti possibilità per delle reazioni in cui l'idrogeno, l'elemento più abbondante nell'Universo e nelle stelle, viene fuso in elio, grazie agli immensi valori di temperatura e pressione raggiunti all'interno degli astri a causa della contrazione gravitazionale, che provocano l'aumento dell'energia cinetica delle molecole, che riescono ad interagire fra di loro superando la repulsione colombiana dei nuclei dando origine alle reazioni di fusione. Selezione due processi: il primo, la catena protone-protone, principale fonte di energia nelle stelle di piccola massa (inferiore o uguale al Sole); il secondo, il ciclo carbonio-azoto-ossigeno, motore invece delle stelle più grandi. Questa scoperta valse a Bethe il Premio Nobel per la fisica, che gli fu conferito nel 1967.

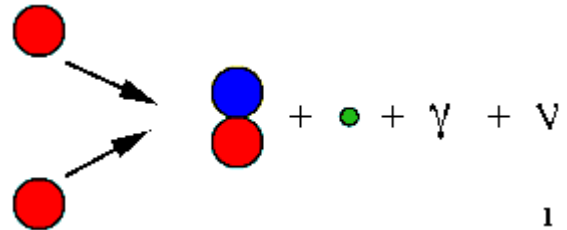
A seconda della propria massa iniziale, all'interno delle stelle avvengono reazioni diverse, ed allo stesso modo esse si evolvono in maniere differenti e vivono per tempi differenti. Infatti, più cresce la massa, meno tempo ci metterà il nucleo della stella a raggiungere la temperatura necessaria ad avviare le reazioni di fusione, e, usando un'analogia automobilistica, meno tempo ci metterà a bruciare tutto il carburante avendo un motore più potente. Invece più è piccola la massa, più la stella impiegherà a raggiungere la temperatura di fusione (essendo meno forte l'azione della forza di gravità degli strati esterni su quelli interni) e più impiegherà a terminare il carburante, proprio come una piccola utilitaria. Tratto comune nell'evoluzione di tutte le stelle è però la prima fase di reazioni nucleari, che a prescindere dal processo con cui avvengono, hanno sempre come risultato elio prodotto bruciando idrogeno, elementi che compongono il 95% della materia stellare. Inoltre, in ogni caso, tutti i processi di fusione termonucleare possono procedere solo fino alla formazione di nuclei di ferro, infatti, le reazioni che hanno come reagenti il ferro, non liberano energia, bensì la assorbono, perciò una volta giunte alla formazione di questa sostanza, le stelle interrompono comunque la produzione di energia nucleare.

2.1 - Il ciclo protone-protone

Come detto in precedenza, quando il nocciolo della stella, sotto l'azione della forza gravitazionale, raggiunge temperature sufficienti, si avviano all'interno di esso reazioni di fusione nucleare. Gli elementi presenti nel nucleo stellare si trovano allo stato di [plasma](#), e grazie all'alta densità ed all'elevatissima energia cinetica, interagiscono fra di loro in uno spazio ridottissimo: è in queste condizioni che si avviano le prime reazioni di fusione nucleare all'interno delle stelle.

Nelle stelle di massa inferiore a 1,5 masse solari, dove la temperatura del nocciolo non supera i 15 milioni di kelvin, la produzione di elio a partire da idrogeno avviene secondo il cosiddetto ciclo protone-protone.

Il ciclo p-p inizia quando i protoni di due nuclei di idrogeno (^1H) si fondono a formare un nucleo di [deuterio](#) (^2H): infatti, uno dei due protoni si trasforma in neutrone, espellendo da sé un [neutrino](#) ed un [positrone](#), che con grande probabilità è destinato ad annichilarsi con un elettrone, liberando radiazioni

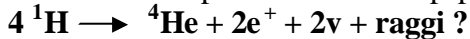


gamma energetiche sotto forma di fotoni. Il deuterio appena formato si fonde a sua volta con un altro nucleo di idrogeno, formando così un nucleo di elio ^3He , un isotopo leggero dell'elio, e liberando altri raggi gamma. La catena si chiude quando due nuclei di elio "leggero"

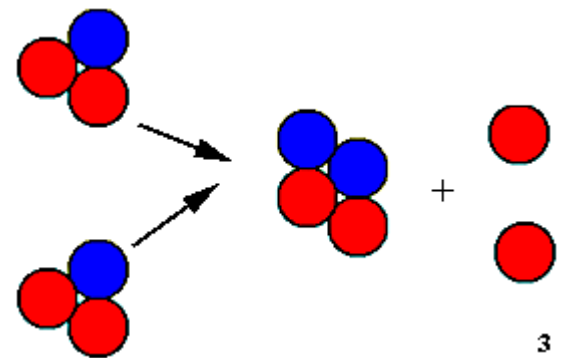
Il deuterio appena formato si fonde a sua volta con un altro nucleo di idrogeno, formando così un nucleo di elio ^3He , un isotopo leggero dell'elio, e liberando altri raggi gamma. La catena si chiude quando due nuclei di elio "leggero"

formati in precedenza si fondono in un nucleo di elio normale (^4He), emettendo due protoni che potranno essere riutilizzati per un nuovo ciclo.

Il bilancio complessivo del ciclo p-p è dunque:



L'energia complessiva rilasciata è pari a 26,7 MeV.



Nel Sole avvengono in media 10^{38} cicli p-p al secondo, ma non perché esso sia un ciclo che si svolge molto rapidamente, anzi: ci vogliono infatti circa 10 miliardi di anni prima che un protone, tramite collisioni casuali, riesca a fondersi con un altro. Il processo è vantaggioso solo perché all'interno del Sole, e di tutte le altre stelle, c'è talmente tanto carburante che in ogni momento ci sono moltissimi protoni che reagiscono fra di loro.



Plasma: identificato per la prima volta nel 1879 dal fisico londinese Sir William Crookes, è definito il quarto stato della materia, in quanto si distingue dagli altri per le sue particolari caratteristiche. Il plasma è infatti un gas ionizzato, in cui elettroni e nuclei, separati fra loro, si muovono in modo indipendente, in una sorta di "brodo" caldissimo che, nonostante sia formato da cariche positive e negative, è complessivamente neutro.

Deuterio: scoperto nel 1931 da Harold Clayton Urey, chimico statunitense, si tratta di un isotopo stabile dell'idrogeno, il cui nucleo è composto oltre che da un protone, anche da un neutrone. Per questa scoperta nel 1934 Urey fu conferito del Premio Nobel per la chimica.

Neutrino: postulato nel 1930, ma scoperto solo nel 1956 da Clyde Cowan e Fred Reines durante un esperimento sul reattore nucleare a fissione, si tratta di una particella elementare dotata di una massa insignificante (da 100000 a 1 milione di volte inferiore a quella dell'elettrone) e priva di carica elettrica. La materia, per quanto densa, non riesce a trattenerli, perciò, una volta prodotti nel Sole, giungono sulla Terra in breve tempo, permettendoci di studiare la nostra stella.

Positrone: scoperto nel 1932 da Carl Anderson, il positrone, detto anche antielettrone, è l'antiparticella dell'elettrone: ha infatti la stessa massa, ma carica opposta, ed al contatto con esso si annichila, scomparendo entrambi e rilasciando grandi quantità di energia.

2.2 - Il ciclo carbonio-azoto-ossigeno

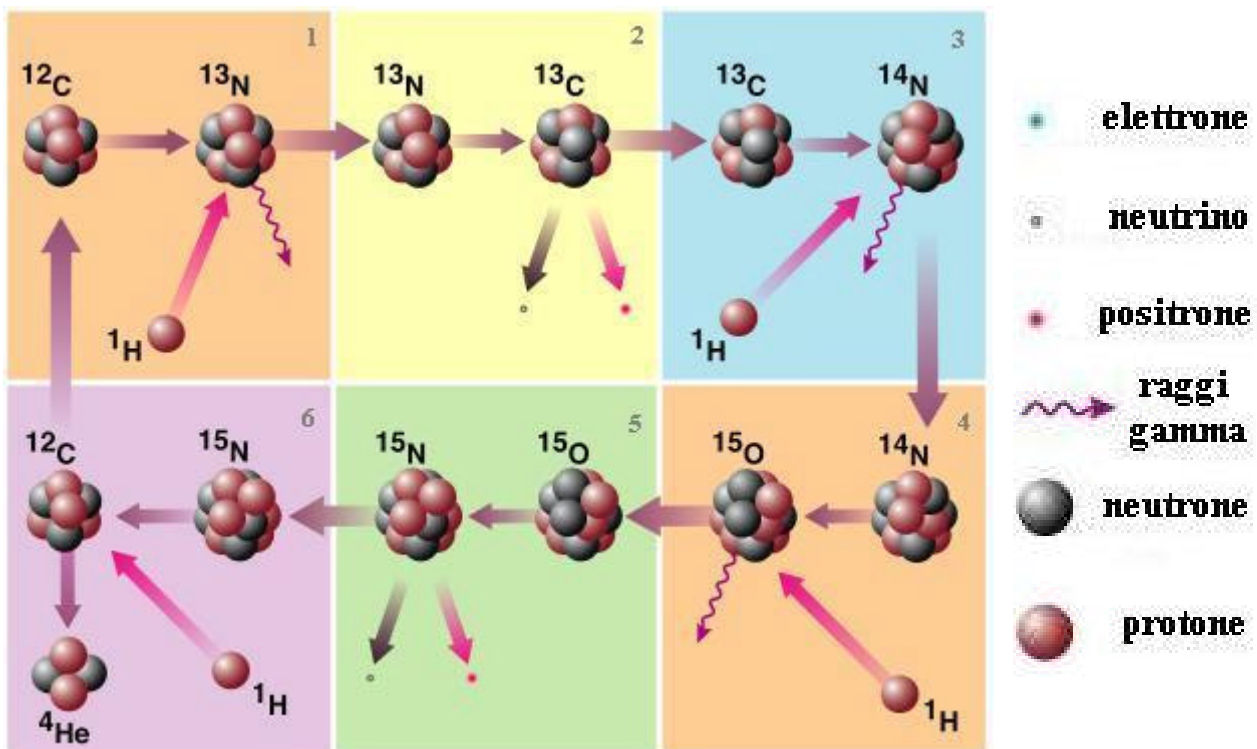
Nelle stelle superiori a 1,5 masse solari, se nel nocciolo, dove la temperatura supera i 20 milioni di kelvin, ci sono altri elementi oltre all'idrogeno ed all'elio, si può avviare un altro tipo di reazioni, denominato ciclo CNO (carbonio-azoto-ossigeno).

Il ciclo CNO inizia quando il protone di un nucleo di idrogeno (^1H) si fonde con un nucleo di carbonio (^{12}C), formando un nucleo di azoto instabile (^{13}N) e liberando energia sotto forma di raggi gamma. Il nucleo di azoto, essendo instabile, decade in un isotopo del carbonio (^{13}C), liberando un positrone ed un neutrino. Il carbonio formatosi, si fonde a sua volta nuovamente con un nucleo di idrogeno (^1H), formando un nucleo di azoto (^{14}N) e liberando altri raggi gamma. L'azoto, a sua volta si fonde con un altro nucleo di idrogeno (^1H), liberando altri raggi gamma e creando un nucleo instabile di ossigeno (^{15}O), che decade in un isotopo dell'azoto (^{15}N), liberando un positrone ed un neutrino. Il ciclo si conclude quando l'isotopo dell'azoto appena formatosi, fondendosi con un nucleo di idrogeno, si trasforma in un nucleo di carbonio (^{12}C) e in uno di elio (^4He).

Il bilancio complessivo del ciclo CNO è dunque: $4\ ^1\text{H} \rightarrow\ ^4\text{He} + 2e^+ + 2\nu + \text{raggi ?}$

L'energia complessiva rilasciata è pari a circa 25 MeV.

Il risultato finale è lo stesso del ciclo p-p: infatti, pur subendo una serie di trasformazioni, il carbonio si riforma alla fine del ciclo così come era all'inizio, e funge quindi solo da catalizzatore della reazione; sono i quattro nuclei di idrogeno a scomparire, favorendo la formazione finale di un nucleo di elio, di due positroni, di due neutrini e di energia sotto forma di raggi gamma.



2.3 - Il processo tre alfa

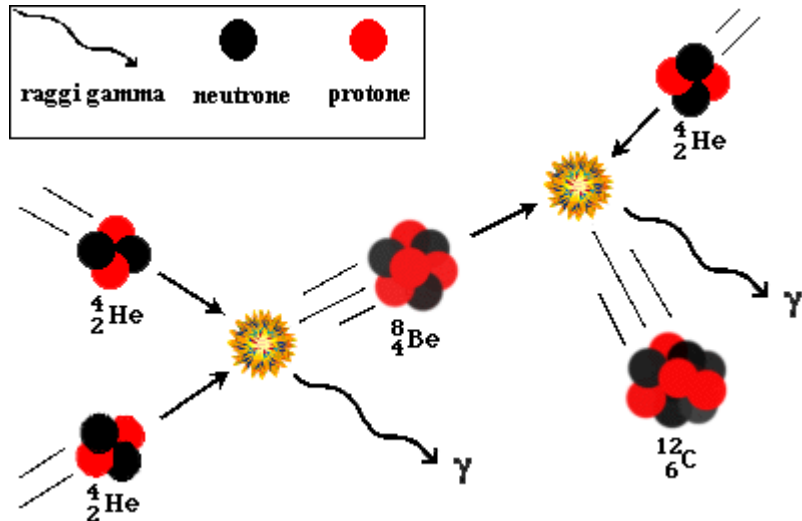
Una volta terminato l'idrogeno del nocciolo, le reazioni di fusione si esauriscono, e la stella, non potendo più opporre alla forza gravitazionale la pressione di radiazione (forza prodotta dalle reazioni nucleari che contrasta il collasso gravitazionale e che consente alla stella di mantenersi in equilibri idrostatico), ricomincia a contrarsi su se stessa. Se la stella ha massa inferiore a 0,5 masse solari, la contrazione procede incontrastata portando la stella a spegnersi lentamente. Invece, se la stella ha massa superiore a 0,5 masse solari, la contrazione provoca un aumento della temperatura

interna, e nello strato intorno al nocciolo, formato principalmente da idrogeno, si innescano nuovamente reazioni di fusione dell'idrogeno in elio: la stella si trasforma in gigante rossa. Quando la temperatura del nocciolo raggiunge i 100 milioni di kelvin, si innescano le reazioni di fusione dell'elio.

Il processo tre alfa è il processo per cui tre nuclei di elio (${}^4\text{He}$), dette appunto particelle alfa, vengono trasformati in nuclei di carbonio.

Esso inizia quando due nuclei di elio (${}^4\text{He}$) si fondono a formare un nucleo di berillio (${}^8\text{Be}$). Il berillio prodotto è però instabile, e nell'ordine di 10^{-16}s decade di nuovo nei due nuclei di elio. Nelle condizioni in cui si svolgono queste reazioni di fusione, però, si forma una piccola sovrabbondanza di berillio stabile, che fondendosi con un altro nucleo di elio, si trasforma in carbonio (${}^{12}\text{C}$).

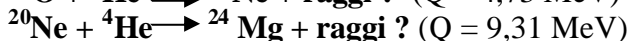
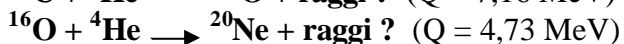
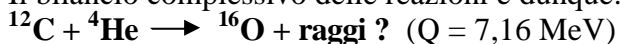
Il bilancio complessivo del processo tre alfa è dunque:
 $3 {}^4\text{He} \rightarrow {}^{12}\text{C} + \text{raggi } \gamma$
 L'energia complessiva rilasciata è pari a circa 7,5 MeV.



2.4 - Il processo alfa

Mentre il processo tre alfa richiede solo elio, il processo alfa può avvenire soltanto quando nella stella sono già stati prodotti nuclei di carbonio. A partire dalla fusione del carbonio (${}^{12}\text{C}$) e dell'elio (${}^4\text{He}$), infatti, nella stella viene sintetizzato ossigeno (${}^{16}\text{O}$), che a sua volta può combinarsi con un altro nucleo di elio formando neon (${}^{20}\text{Ne}$), che a sua volta può fondersi con un altro nucleo di elio trasformandosi in magnesio (${}^{24}\text{Mg}$).

Il bilancio complessivo delle reazioni è dunque:



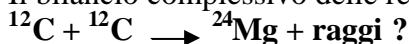
La produzione di neon e di magnesio è molto difficile, perciò all'interno del nucleo si viene a formare una grande quantità di carbonio e ossigeno, a discapito di elementi più pesanti come il neon, presenti in minor percentuale.

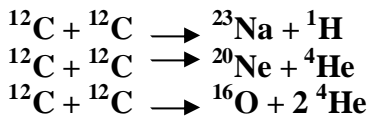
2.5 - Il processo di fusione del carbonio

Una volta terminato l'elio nel nucleo, se la stella ha massa inferiore a 2 masse solari, non vengono raggiunte le condizioni per attivare nuove reazioni di fusione; se invece la stella ha una massa sufficiente, essa diventa una supergigante rossa: la temperatura sale fino ad attivare la fusione dell'elio nel guscio attorno al nocciolo, mentre il nocciolo, contraendosi, raggiunge gli 800 milioni di kelvin, temperatura alla quale si attiva la fusione del carbonio in elementi più pesanti.

In questa fase, all'interno del nocciolo, i nuclei di carbonio (${}^{12}\text{C}$), presenti in grande quantità, si fondono tra loro a due a due, dando a vita a ossigeno, magnesio e neon.

Il bilancio complessivo delle reazioni è:

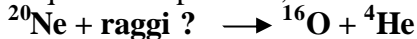




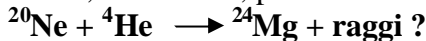
2.6 - Il processo di fusione del neon

Terminato il carbonio nel nucleo, le reazioni si interrompono e la stella riprende a contrarsi. Se la massa è sufficiente (circa 8 masse solari), però, nel guscio attorno al nucleo si riattivano le reazioni del carbonio, e nel nocciolo, una volta raggiunta la temperatura di circa 1,2 miliardi di kelvin, si attiva il processo di fusione del neon.

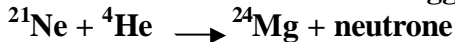
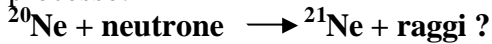
A queste temperature, alcuni nuclei di neon decadono in ossigeno ed elio:



L'elio, a sua volta, può essere subito riutilizzato per produrre magnesio:



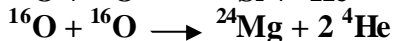
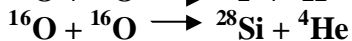
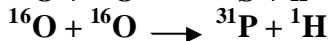
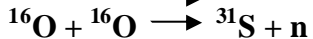
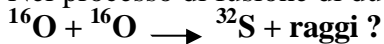
Il neon può anche fondersi con un neutrone producendo energia ed un isotopo del neon, ^{21}Ne , che a sua volta si fonde con un nucleo di elio producendo magnesio ed un neutrone da riutilizzare nel processo:



2.7 - Il processo di fusione dell'ossigeno

Con il processo del neon, al centro della stella si crea un nucleo inerte di ossigeno e magnesio. Terminato il neon, il nucleo si contrae in seguito al collasso gravitazionale, e si creano le condizioni per attivare il processo di fusione dell'ossigeno, che necessita di temperature nell'ordine di 1,5 miliardi di kelvin.

Nel processo di fusione di due nuclei di ossigeno, possono avvenire parecchie reazioni:

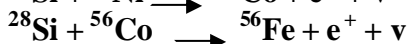
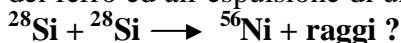


La reazione più probabile che avvenga è comunque quella che porta alla produzione di silicio.

2.8 - Il processo di fusione del silicio

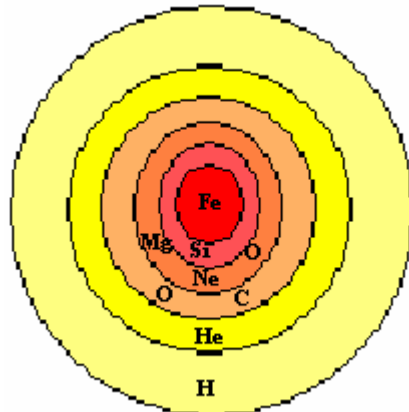
Terminato il processo dell'ossigeno, la stella riprende a contrarsi, e se il nocciolo riesce a raggiungere la temperatura di 4-5 miliardi di kelvin, sia avvia il processo di fusione del silicio, estremamente rapido.

La fusione di nuclei di silicio porta alla produzione di nichel, che a sua volta si fonde con un altro nucleo di silicio, espellendo un positrone ed un neutrino e trasformandosi in cobalto, che a sua volta si fonde con un altro nucleo di silicio portando alla produzione di un isotopo estremamente stabile del ferro ed all'espulsione di un altro neutrino e di un altro positrone:



Una volta prodotto ferro all'interno del nucleo, non si possono attivare altre reazioni di fusione, poiché le reazioni a partire da tale elemento non liberano energia, bensì la assorbono. La contrazione gravitazionale della stella a questo punto non trova più ostacoli, e la stella collassa su se stessa inevitabilmente. La fine della stella dipenderà ancora una volta dalla sua massa: se inferiore a

8 masse solari, diventerà una nana bianca, se superiore, invece, esploderà in maniera catastrofica come supernova, dando luogo infine o ad una stella a neutroni o ad un buco nero.



Composizione a strati di una stella di grande massa nella fase finale della sua evoluzione

3 - La fusione nucleare come fonte di energia

Già negli anni Quaranta possiamo avere notizie del primo reattore nucleare a fissione (a Chicago, realizzato dall'èquipe di Enrico Fermi), e negli anni Cinquanta della prima centrale economicamente vantaggiosa ed estremamente produttiva (a Calder Hall, nel Regno Unito). Non si può dire la stessa cosa invece per quanto riguarda lo sfruttamento dell'energia proveniente dalla fusione nucleare: nonostante esistano già prototipi di reattori a fusione, e vari esperimenti siano stati compiuti con successo, si è ancora ben lontani dal raggiungimento dell'obiettivo finale: si ritiene infatti che le prime centrali potranno essere attive solo fra almeno 40 anni.

3.1 - Condizioni per la fusione controllata

Nelle stelle le reazioni di fusione nucleare si innescano spontaneamente, grazie alle particolari condizioni presenti all'interno: densità e temperature elevatissime, tempo a disposizione enorme.

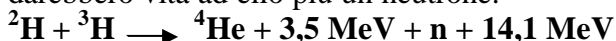
Sulla Terra la situazione è ben diversa, la densità e la temperatura in condizioni naturali, in confronto, sono insignificanti, così come il tempo a disposizione dell'uomo.

Bisogna quindi riprodurre le condizioni necessarie per attivare la fusione nucleare in modo che sia però favorevole allo sviluppo umano.

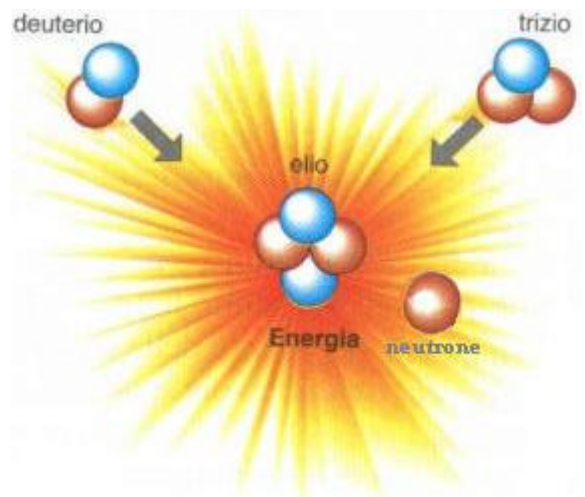
Se nei nuclei stellari le prime reazioni si attivano a 15-20 milioni di kelvin, sulla Terra perché esse avvengano bisogna che la materia in questione (il plasma) raggiunga almeno i 100 milioni di kelvin.

Bisogna inoltre mantenerla confinata in uno spazio limitato per un tempo sufficiente affinché l'energia liberata possa compensare sia le perdite, sia l'energia usata per produrre il tutto.

La reazione di fusione più facile da ottenere, e considerata la più favorevole, è quella che vede coinvolti due isotopi dell'idrogeno, il deuterio (di cui si è parlato precedentemente) e il trizio (simbolo ^3H ; il suo nucleo è formato da un protone e due neutroni), che fondendosi darebbero vita ad elio più un neutrone:



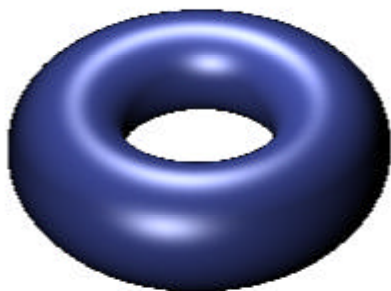
3,5 MeV è l'energia liberata dal nucleo di elio, mentre 14,1 MeV è quella liberata dal neutrone, per un totale di 17,6 MeV.



3.2 - Il Tokamak

Siccome non esiste materiale solido in grado di resistere alle altissime temperature alle quali dovrebbe trovarsi il plasma per attivare le reazioni di fusione, negli anni '50, degli studiosi russi hanno pensato di tenerlo sospeso nell'aria, evitando il contatto con qualsiasi materiale esterno, ed hanno così progettato il Tokamak, acronimo delle parole russe "toroidalnaya kamera magnitnaya katushka", che significano macchina a camera toroidale ed avvolgimento magnetico.

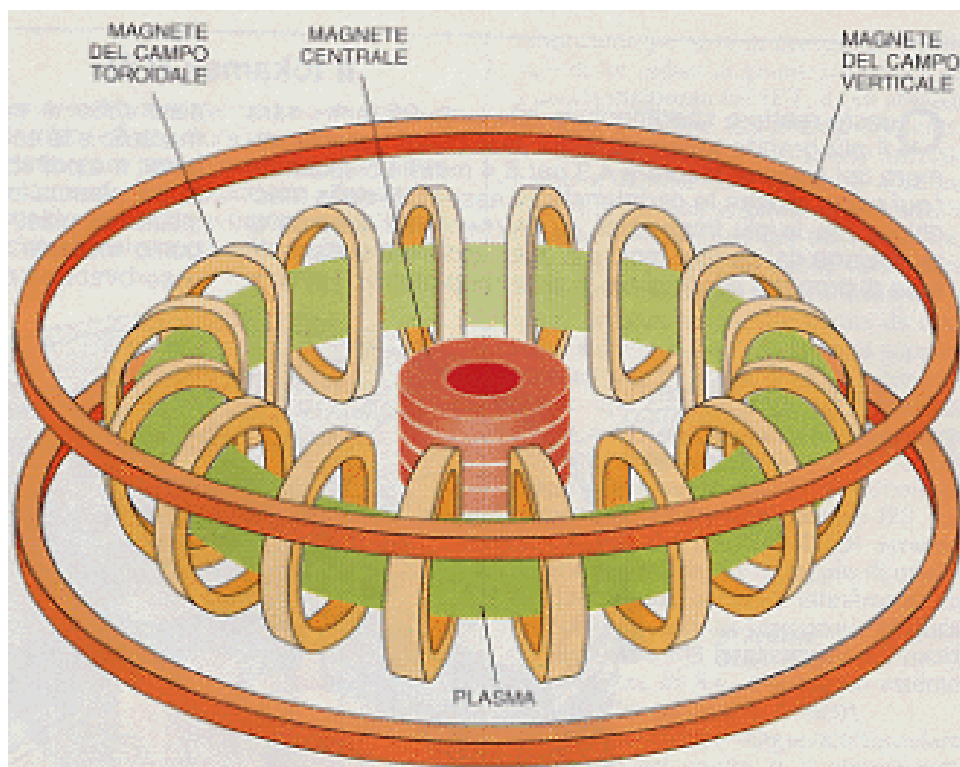
Questa macchina sfrutta il concetto del confinamento magnetico: il plasma, grazie ad una serie di campi magnetici di particolare configurazione, risulta racchiuso tra le linee di forza di essi, che lo riducono a una ridotta sezione di spazio, e rendendo così impossibile la sua uscita dal reattore, impedendo l'inibizione del processo.



Il suo stesso nome, la camera del Tokamak, dove viene confinato il plasma, ha forma toroidale: il latino *torus*, un cuscino a forma di ciambella, è una forma geometrica generata dalla rotazione di una circonferenza attorno ad un asse. Il risultato è una figura a ciambella.



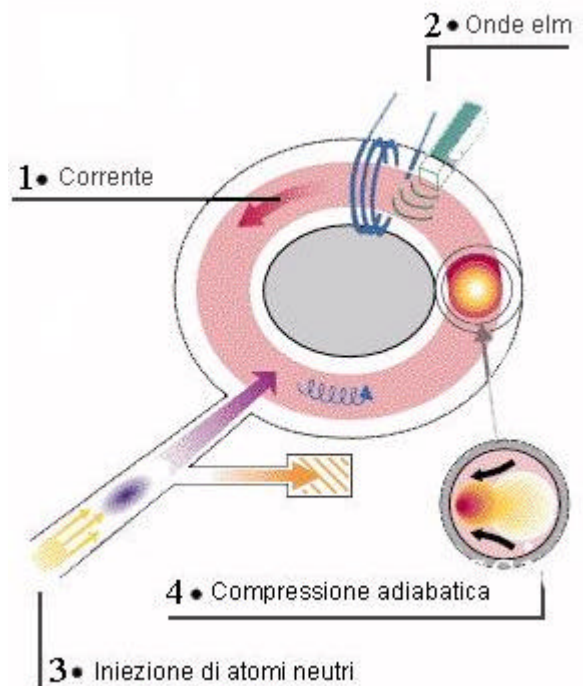
All'interno della camera ci sono tre diversi gruppi di bobine che generano campi magnetici: il gruppo principale è quello che produce il campo toroidale che deve confinare il plasma; nel centro della camera, nel "buco della ciambella", ci sono altri magneti che inducono corrente elettrica nel plasma, la quale fluisce toroidalmente, riscaldandolo; infine, un altro gruppo dei magneti, detti del campo verticale, fungono da stabilizzatori, tenendo il plasma bene al centro del toro.



Affinché il reattore diventi conveniente, bisogna che il plasma raggiunga la temperatura di ignizione, cioè la temperatura alla quale si ha l'autosostentamento della fusione, in quanto la potenza prodotta dalla fusione dei nuclei è maggiore della potenza immessa per attivarla.

Ci sono vari modi per riscaldare il plasma:

1. riscaldamento ohmico (o resistivo): essendo il plasma un conduttore elettrico, è possibile riscaldarlo per induzione elettromagnetica; il plasma, infatti, si comporta come una spira che costituisce il circuito secondario di un trasformatore il cui circuito primario è il magnete centrale del Tokamak, che genera un campo magnetico variabile nel tempo. La corrente indotta, oltre a riscaldare il plasma per effetto Joule, genera a sua volta un altro campo magnetico che agisce sul plasma. Il limite di questo sistema dipende dal fatto che la resistività del plasma diminuisce con l'aumentare della temperatura;
2. riscaldamento per assorbimento di onde elettromagnetiche, come le microonde (le stesse utilizzate per riscaldare i cibi nelle nostre case);
3. riscaldamento per iniezione di atomi neutri, che penetrano nel plasma, si ionizzano, e trasferiscono per urto la propria energia cinetica al plasma;
4. riscaldamento per compressione adiabatica del plasma, ottenuta spostando il plasma verso zone della camera toroidale dove il campo magnetico è più intenso, con il conseguente aumento di energia cinetica, e quindi di temperatura.



Un altro sistema per ottenere la fusione nucleare è quello del confinamento inerziale: in questo caso si tratta di bombardare con fasci di luce laser o con elettroni ad alta energia cinetica una pastiglia di plutonio (3 mm di diametro per 0,2 grammi di peso circa) circondata da una superficie sferica (poco meno di 2 mm) composta da una miscela di deuterio e trizio. L'urto fra il fascio laser (o di elettroni accelerati) e la pastiglia fa comprimere il plutonio, portandolo ad una densità di circa 250 volte quella iniziale, e la superficie di deuterio e trizio, portandola ad una densità di oltre 4000 volte rispetto all'inizio. Il plutonio, compresso, genera una microesplosione nucleare (fissione), e, l'energia prodotta, si propaga uniformemente nella superficie della sferetta, provocando la fusione degli elementi. La superficie evapora, e il combustibile si comprime e si riscalda. Si realizza in questo modo la condizione di altissima densità del plasma, ma per tempi di confinamento molto brevi. Inoltre, questo processo necessita di laser di energia elevatissima.

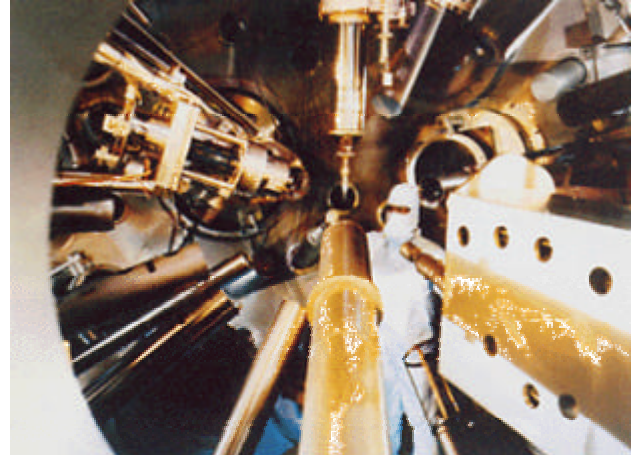
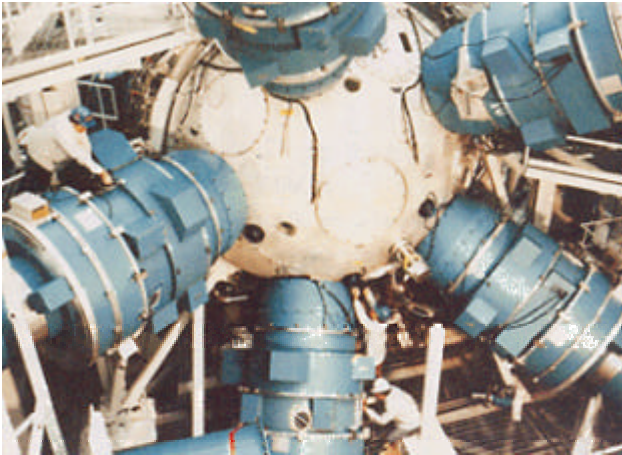
Il metodo del confinamento inerziale è quello usato nella bomba all'idrogeno.

Potenza: lavoro compiuto nell'unità di tempo. In elettrotecnica è definita come il lavoro svolto da una carica elettrica in un campo elettrico nell'unità di tempo. Nel SI la potenza si misura in Watt (Joule/Secondo)

Effetto Joule: osservato dal fisico inglese vissuto nell'800 James Prescott Joule, è il fenomeno per cui un conduttore, attraversato da corrente elettrica continua, genera calore, secondo la formula $Q = i^2 \cdot R \cdot t$, dove Q è il calore (espresso in Joule), i è l'intensità di corrente (espressa in Ampere), e t il tempo (espresso in secondi).

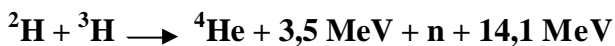
Resistività: detta anche resistenza elettrica specifica, è l'attitudine di un materiale a opporre resistenza al passaggio di cariche elettriche, secondo la formula $\rho = R \cdot S / l$, dove ρ è la resistività (espressa in ohm per metro), R è la resistenza elettrica del campione (espressa in ohm), S è l'area della sezione del campione (espressa in metri quadrati) e l è la lunghezza del campione (espressa in metri). Nel nostro caso, siccome la resistività è direttamente proporzionale alla resistenza, se diminuisce la resistività, diminuisce anche la resistenza, e quindi diminuisce anche il calore prodotto.

Il confinamento magnetico e il Tokamak rimangono comunque le strade più battute per la realizzazione della fusione nucleare controllata.



Camera di combustione e interno dell'istallazione laser fissione-fusione Nova, Lawrence Livermore Laboratory, USA

Come detto in precedenza, la reazione più conveniente per la produzione di energia dalla fusione nucleare è quella tra deuterio e trizio, che genera, oltre che all'energia, elio ed un neutrone:



Questa reazione, oltre ad essere la più facile in termini tecnologici, in quanto è quella che richiede minor energia di attivazione, è anche la più efficiente in termini di produzione energetica.

Una volta realizzata la fusione, bisogna raccogliere l'energia liberata per trasformarla in elettricità, e riutilizzare i prodotti in modo da renderli inoffensivi, se non addirittura riciclarli.

Il primo problema è il trattamento dei neutroni prodotti: i neutroni, infatti, sono i principali responsabili della radioattività, e sono perciò pericolosi sia per le strutture inorganiche, in quanto ne modificano la composizione chimica, sia per la quasi totalità degli organismi viventi (gli scarafaggi possono resistere a tassi di radioattività ben superiori a quelli letali per l'uomo!), in quanto possono modificare il codice genetico, provocando tumori e mutazioni irreversibili ed ereditarie.

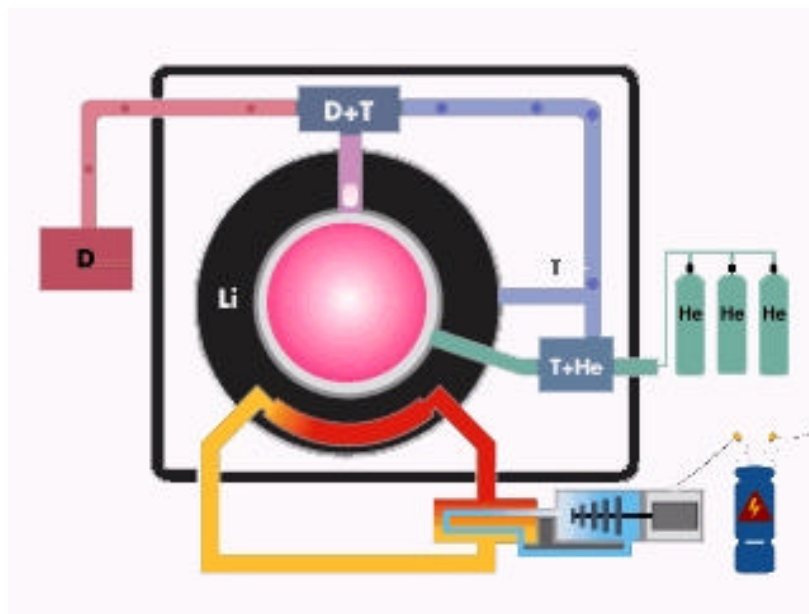
Nei reattori a fusione del futuro, perciò, fra il nocciolo, dove avvengono le reazioni, e l'esterno, sarà frapposto uno schermo di litio, spesso circa un metro, col compito di assorbire i neutroni, evitando che essi si disperdano nell'ambiente esterno, e di riutilizzarli, per trasformarsi in elio e in trizio pronto per essere riutilizzato, secondo le seguenti reazioni:



Il litio è comunque considerato tossico, quindi è necessario uno sviluppo forte della tecnologia robotica, dato che non sarebbe possibile lavorare vicino a tali quantità di questo metallo.

Il mantello di litio ha anche un'altra funzione: all'interno di esso, infatti, scorrerà un fluido, che raccoglierà il calore prodotto nelle reazioni di fusione del deuterio e del trizio. I neutroni trasportano circa l'80% dell'energia prodotta: una volta assorbiti dal litio, trasferiranno quindi ad esso la loro energia; il litio, a sua volta, riscalderà il fluido con cui entra a contatto, che a sua volta, attraverso ad uno scambiatore di calore (componente in cui si realizza uno scambio di calore tra due fluidi a diversa temperatura), produrrà vapore che muoverà delle turbine, che, attraverso un alternatore, produrranno elettricità.

I nuclei di elio invece, essendo più pesanti, rimarranno all'interno del plasma, trasferendo ad esso la loro energia, e favorendo l'autosostentamento della reazione, senza ulteriore immissione di energia dall'esterno.



Schema del futuro reattore termonucleare

3.3 - Pro e contro della fusione nucleare

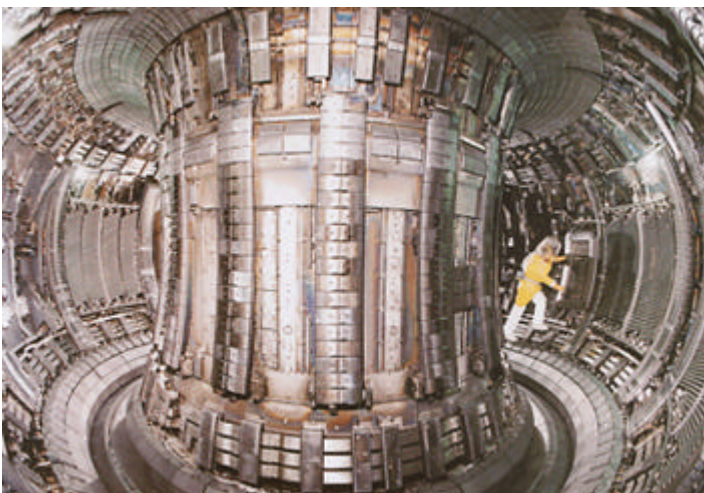
La fusione nucleare è vista dalla grande maggioranza del mondo scientifico come una soluzione a lungo termine dei problemi energetici della Terra.

Si possono elencare tra i vantaggi più rilevanti:

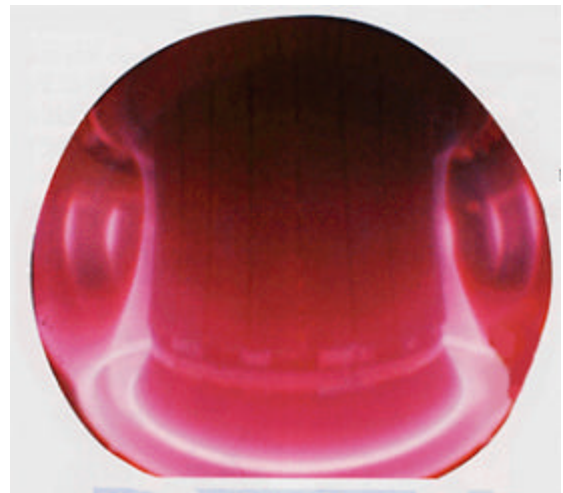
- ? nessun tipo di pericolose scorie radioattive: se nelle centrali a fissione vengono prodotte scorie pericolose, con vita media anche di migliaia di anni, nelle centrali a fusione verrebbero prodotti solo elio, gas inerte e non assolutamente radioattivo, e trizio, che ha un tempo di dimezzamento (tempo occorrente perché la metà degli atomi di un campione puro dell'isotopo decadano in un altro elemento) di appena 12 anni circa, e che comunque viene riutilizzato nelle reazioni di fusione;
- ? nessuna possibilità di incidenti devastanti come Chernobyl, in quanto il reattore non contiene sostanze radioattive come l'uranio, né scorie pericolose;
- ? produzione di energia di molto superiore rispetto alle centrali a fissione;
- ? combustibile quasi infinito: sia il deuterio sia il trizio sono infatti isotopi dell'idrogeno, presente nell'acqua all'11,19%. Siccome il deuterio può essere estratto dall'acqua, esso è a disposizione di tutte le nazioni con uno sbocco col mare, o comunque di tutte le nazione che possono permettersi di comprare dell'acqua (e se una nazione può permettersi di costruire una centrale a fusione, certamente può permettersi anche un po' d'acqua...). Per comprendere la quantità di materia prima, basti pensare che potendo sfruttare tutto il deuterio contenuto in un lago di medie dimensioni, utilizzando la fusione nucleare sarebbe possibile rifornire di energia una nazione per secoli; inoltre, per pareggiare l'energia di un ditale pieno di deuterio, sono necessarie venti tonnellate di carbone! Il problema del combustibile si presenta invece con la fissione nucleare;
- ? nessuna dispersione nell'atmosfera di prodotti chimici da combustione (come l'anidride carbonica), e praticamente nessun contributo al riscaldamento del pianeta;
- ? nessuna possibilità di utilizzo dei reattori a fusione con scopi bellici o terroristici.

Come in ogni cosa però, c'è anche un rovescio della medaglia:

- ? costi elevatissimi per la costruzione degli impianti necessari, soprattutto a causa delle enormi temperature di lavoro necessarie;
- ? elevati costi di estrazione del deuterio, nonostante la grande reperibilità, e di produzione del trizio;
- ? come per le centrali a fissione, limitata vita operativa a causa della radioattività indotta nelle strutture; i materiali, inoltre, diventano scorie radioattive, anche se in misura di 1000 volte inferiore a quelle delle centrali a fissione; inoltre le scorie hanno tutte tempo di dimezzamento breve: si stima che in mezzo secolo al massimo non rappresentino più un pericolo.



Interno di un Tokamak, per comprenderne le dimensioni



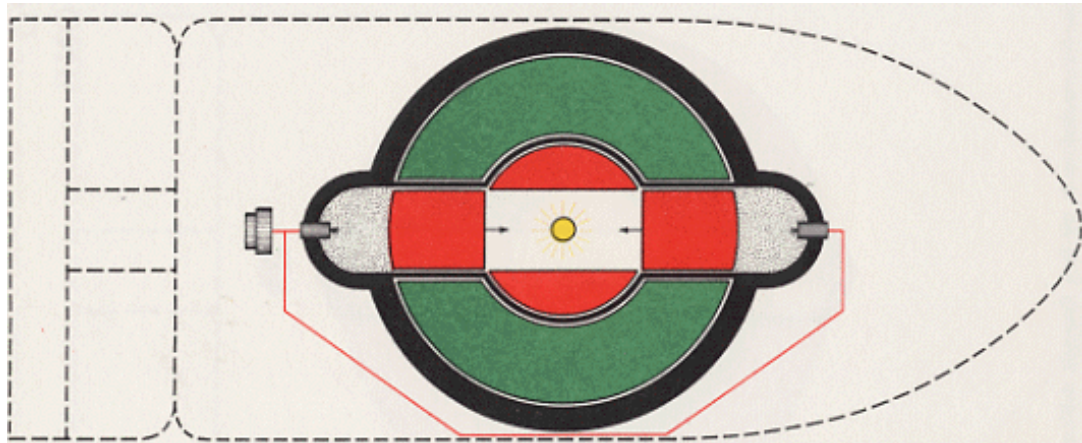
Interno dello stesso Tokamak, contenente del plasma

4 - Un'applicazione negativa: la bomba all'idrogeno

Anche una cosa positiva come la fusione nucleare, può avere i suoi risvolti negativi. Spesso l'uomo ha fatto cattivo uso delle proprie conoscenze, e come ha fatto quando ha ideato la bomba atomica, sfruttando il processo di fissione nucleare, allo stesso modo ha sfruttato la fusione per creare bombe ancora più devastanti.

Fu dello scienziato Edward Teller, consigliere militare del presidente americano Ronald Reagan, l'idea di una bomba che sfruttasse la fusione nucleare, mediante la fissione, per diventare ancora più devastante rispetto alle "semplici" bombe atomiche.

Il concetto era semplice: usare una normale bomba atomica, quindi a fissione, per raggiungere la temperatura necessaria ad attivare la fusione dell'idrogeno (o di un suo isotopo, in opportune miscele) contenuto nel recipiente attorno alla bomba atomica. In questa bomba, detta anche a fissione-fusione, è la seconda esplosione, quella causata dalla fusione un milionesimo di secondo dopo la prima, che sprigiona l'energia maggiore: circa l'80-90% della potenza distruttiva è data appunto dall'idrogeno.



Schema della bomba a due fasi fissione-fusione

La prima bomba H fu XX-11 IVY MIKE, esplosa dagli Stati Uniti il 31 ottobre 1952 su Enewetak, un atollo delle Isole Marshall nell'Oceano Pacifico.

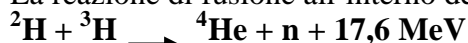


Esplosione di Ivy Mike nel 1952

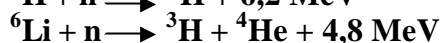
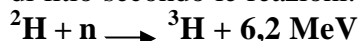
La fantasia umana però non si è fermata alla bomba H a due fasi, ma è arrivata ha ideare la bomba H a tre fasi, fissione-fusione-fissione, che ha ben presto sostituito il prototipo precedente.

Anche in questo tipo di bomba la prima reazione di fissione serve per attivare le reazione di fusione dei materiali nell'involucro sovrastante, deuterio e trizio, che a loro volta attivano l'ultima reazione di fissione, quella più devastante.

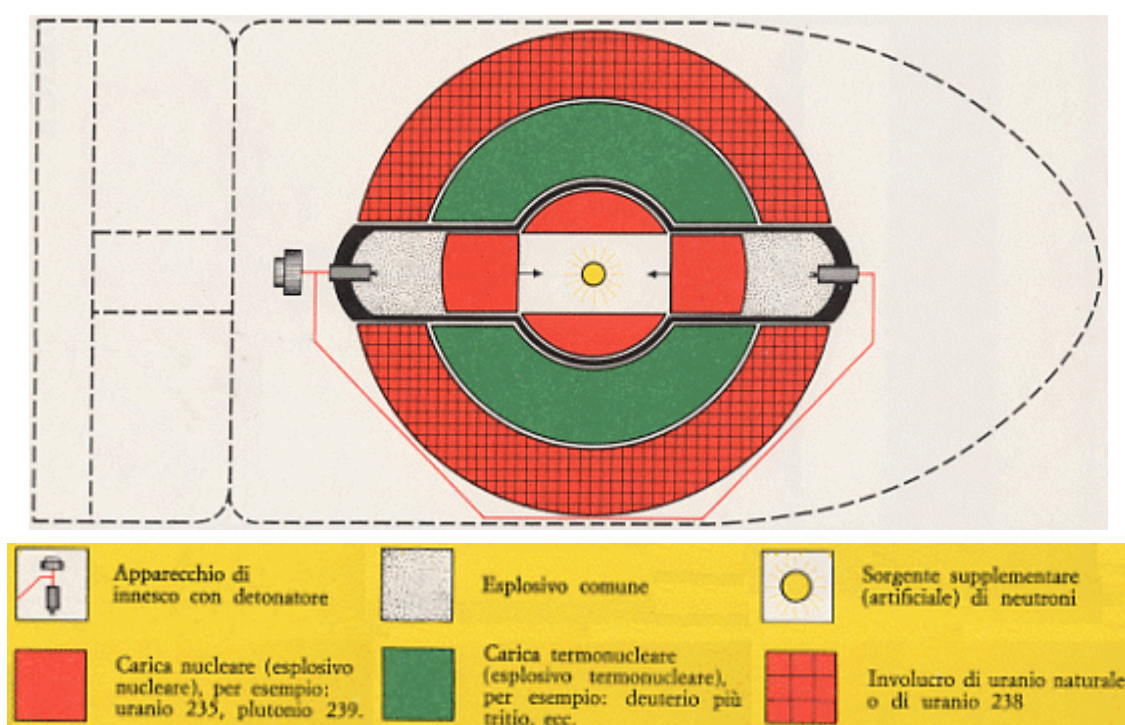
La reazione di fusione all'interno della bomba è esattamente quella studiata per le centrali nucleari:



In questo caso però, il trizio non è già presente nella composizione iniziale dell'ordigno, ma viene prodotto dall'urto veloce di neutroni, prodotti nella fissione precedente, contro nuclei di deuterio e di litio secondo le reazioni:



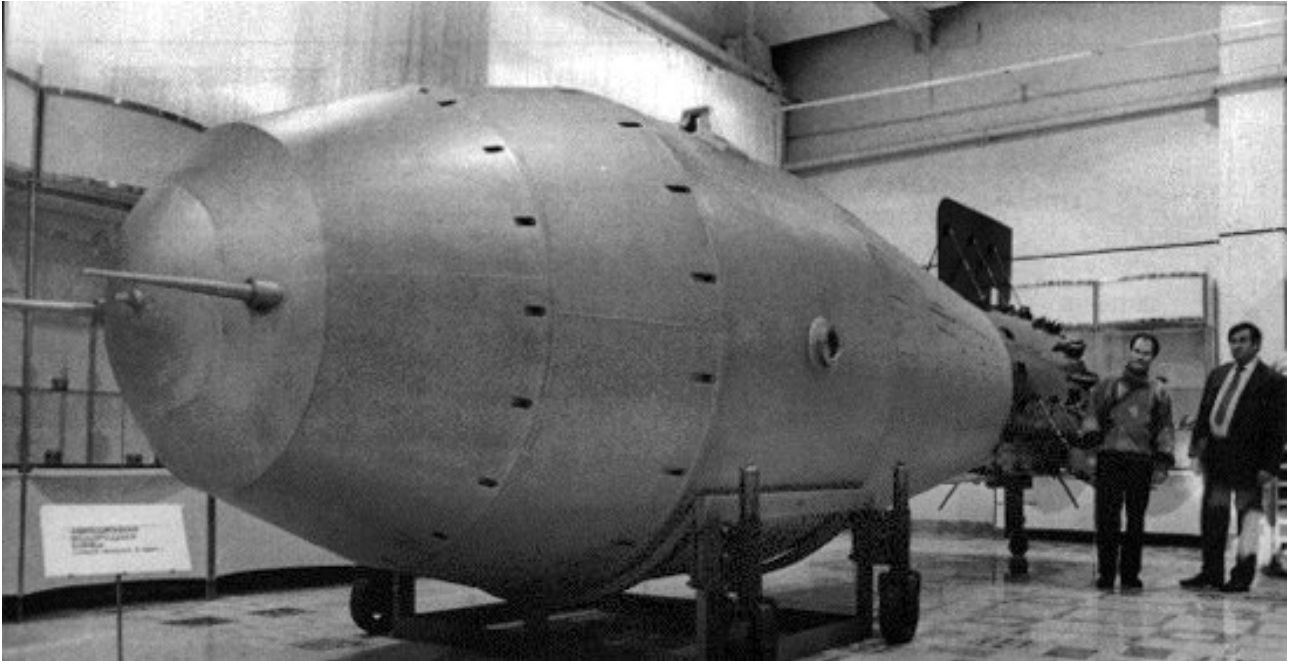
I neutroni ad alta energia prodotti successivamente nella fusione tra deuterio e trizio, a loro volta innescano l'ultima, devastante fissione, dell'uranio (generalmente ${}^{238}\text{U}$).



Schema della bomba a tre fasi fissione-fusione-fissione

La bomba H a tre fasi più potente creata dall'uomo è stata lo Zar (o Tsar). Fu creata dall'Unione Sovietica nel 1961. La sua potenza era di circa 57 [megatoni](#), cioè circa 4000 volte più potente di Little Boy (13 kilotoni), la bomba atomica sganciata su Hiroshima il 6 agosto 1945, e circa 2000 volte più potente di Fat Man (25 kilotoni), la bomba atomica sganciata su Nagasaki il 9 agosto 1945. Zar fu sganciata nella baia di Mityushikha, nel nord del circolo artico, e fu fatta esplodere a 4000 metri dal suolo. La nube a fungo risultante dall'esplosione era alta 60km. È stato calcolato che se fosse stata sganciata su Londra avrebbe distrutto ogni cosa nel raggio di 30 km, e avrebbe incendiato tutto ciò che si trovava nel raggio di 90 km.

Megatone: equivale a 10^3 kilotoni, unità di misura della potenza degli esplosivi. Un kilotone indica l'energia liberata dall'esplosione di una quantità pari a 1000 tonnellate di tritolo, e corrisponde a circa $4,6 \times 10^{12}$ Joule. Il kilotone ovviamente rappresenta un'unità di misura della sola forza meccanica dell'esplosione, e non comprende gli altri effetti collaterali, come ad esempio l'emissione di radiazioni.



La devastante bomba Zar

Bibliografia

Bergamaschini, M.E. et al. (2004), *La conoscenza del mondo fisico*, vol. 2, Milano, Carlo Signorelli Editore.

Caccia, P. et al.(2005), *Nucleosintesi Stellare*, SILSIS-MI.

Emerico A., *La vita di una Stella*.

Neviani, I. & Pignocchino Feyles, C. (2005), *Geografia Generale*, terza edizione, Torino, Società Editrice Internazionale.

Renzetti R., *Reattori nucleari a fusione*, <http://www.fisicamente.net/index-496.htm>

Renzetti R, *Ordigni nucleari*, <http://www.fisicamente.net/index-515.htm>

Associazione culturale Ecoage, *Il nucleare sicuro: la fusione*, <http://www.ecoage.com/ambiente/nucleare/energia-nucleare-fusione-nucleare.asp>

Ente per le Nuove tecnologie, l'Energia e l'Ambiente, Italia, Unità Tecnico Scientifica Fusione dell'ENEA, <http://www.fusione.enea.it/index.html>

Wikimedia Foundation Inc., Wikimedia Italia, <http://www.wikipedia.org/>