

# ***LA FUSIONE NUCLEARE:***

## ***da fuoco delle stelle a nuova fonte energetica***

Sara Romer e Arturo Romer

Il 23 marzo 1989, i ricercatori Martin Fleischmann e Stanley Pons dell'università dello Utah (USA) annunciarono di avere rivelato un processo di fusione nucleare a temperatura ambiente, cioè un processo di fusione a freddo. Tale scoperta era rivoluzionaria poiché permetteva di produrre in modo semplice (sfruttando il principio dell'elettrolisi) energia pulitissima. Purtroppo, la riproducibilità dell'esperimento non era garantita e tentativi successivi non furono capaci di dimostrarne in modo inconfutabile la validità.

Nel marzo di quest'anno l'interesse per la fusione nucleare controllata è stato ravvivato da una nuova pubblicazione scientifica. Un gruppo di ricercatori americani e russi afferma di avere osservato in un esperimento relativamente semplice un processo di fusione [1]. Il metodo presentato si basa su di un principio fisico scoperto nel 1935 [5] ma ancora oggi non del tutto compreso, chiamato sonoluminescenza. Se un liquido viene irradiato con delle intense onde sonore, vi si può osservare la formazione spontanea di bolle di gas. Queste bolle non sono stabili e in breve tempo si sgonfiano (implodono). A causa di questa forte compressione, il gas si riscalda, emettendo luce. Se questo aumento di temperatura è sufficientemente elevato (nell'ordine di milioni di gradi) lo si potrebbe anche sfruttare per innescare una reazione di fusione. In questo caso si tratta di una reazione di fusione nucleare calda, come quella che si verifica nelle stelle.

Nell'esperimento sopra citato, si è utilizzato come liquido dell'acetone deuterato, cioè dell'acetone dove al posto degli atomi di idrogeno si hanno degli atomi di deuterio (un isotopo dell'idrogeno). Il liquido è stato poi sottoposto ad un fascio di ultrasuoni. Questo trattamento provoca la formazione di bolle. Dopo avere raggiunto un diametro di circa 1 millimetro le bolle si sgonfiano riducendo le loro dimensioni a pochi millesimi di millimetro. Secondo i ricercatori, a queste condizioni, la temperatura del gas dovrebbe essere di 10 milioni di gradi, paragonabile alla temperature nelle stelle.

Anche nel caso di questa scoperta il dibattito è acceso e solo nuovi esperimenti potranno dimostrare o confutare la validità della nuova tecnica.

Ma che cosa è la fusione nucleare?

I paragrafi seguenti cercano di dare una semplice risposta a questa domanda, presentando i principi che stanno alla base di questo processo.

## 1. ATOMI E NUCLEI

Gli oggetti che ci circondano, la Terra e in generale tutta la materia sono costituiti da unità microscopiche chiamate **atomi**. Un atomo ha una struttura sferica con un raggio 10'000'000 volte più piccolo di un millimetro (di solito tale raggio viene descritto con le unità di misura Ångstrom). A sua volta questa struttura non è omogenea, bensì comprende diverse particelle atomiche distribuite in modo non uniforme. Infatti, l'atomo è formato da un **nucleo** centrale e compatto, costituito da protoni  $p$  e neutroni  $n$  (detti in generale **nucleoni**), attorno al quale orbitano gli elettroni  $e$ . Il raggio del nucleo è 10'000 volte più piccolo di quello dell'atomo e giacché gli elettroni sono circa 2'000 volte più leggeri dei protoni e dei neutroni, la massa dell'atomo è praticamente tutta concentrata nel nucleo che ha dunque una densità altissima.

I protoni hanno una carica elettrica positiva e gli elettroni una carica elettrica negativa. I neutroni invece sono privi di carica. Poiché gli atomi sono elettricamente neutri, il numero dei protoni e quello degli elettroni è sempre esattamente uguale. Il numero degli elettroni (e dunque quello dei protoni) viene chiamato numero atomico  $Z$ . Al contrario il numero dei neutroni  $N$  è variabile e non deve essere necessariamente lo stesso di quello dei protoni. Il numero di massa dell'atomo viene quindi definito come il numero totale di protoni e neutroni,  $A = Z + N$ .

In generale, un nucleo viene indicato con l'annotazione  ${}^A_Z X$ . Due o più nuclei sono detti isotopi (dal greco "topos" = luogo) se hanno lo stesso numero di protoni  $Z$ , ma un numero diverso di neutroni  $N$ . Gli isotopi occupano lo stesso posto nel sistema periodico degli elementi.

L'idrogeno ha il nucleo più semplice: esso è composto da un solo protone,  ${}^1_1\text{H}$ . Il deuterio è un isotopo dell'idrogeno,  ${}^2_1\text{H}$  (anche semplicemente designato D), con un nucleo composto da un protone e un neutrone. Il trizio è un altro isotopo dell'idrogeno,  ${}^3_1\text{H}$  (anche semplicemente T). Esso ha due neutroni e un protone.

Il secondo nucleo più semplice è quello dell'elio,  ${}^4_2\text{He}$ , formato da due protoni e due neutroni.

Idrogeno e elio e i loro isotopi sono i nuclei che stanno alla base di un processo di fusione nucleare.

## 2. L'ENERGIA DI LEGAME

Ma perché i protoni nel nucleo non si respingono rendendo impossibile l'esistenza di un atomo?

La scienza dell'elettrostatica ci insegna che particelle di carica uguale si respingono e questa repulsione è tanto più intensa quanto più vicine sono le cariche. Pertanto i protoni nel nucleo si respingono vicendevolmente e, se nel nucleo esistessero solo tali forze elettriche, esso non potrebbe esistere. Neppure la forza di gravità può spiegare la coesione dei protoni perché a livello microscopico essa è troppo debole. Forze di altra natura devono esistere all'interno del nucleo per permetterne l'esistenza. Queste forze nucleari (forti), scoperte nel corso del XX secolo, sono indipendenti dalla carica e dalla massa dei nucleoni. Esse sono attrattive e diventano efficaci per distanze paragonabili al raggio del nucleo ( $10^{-15}$  m).

A causa delle forze nucleari, i protoni (o i neutroni) non lasciano spontaneamente il nucleo. Solo fornendo energia dall'esterno li si può rimuovere. L'energia di legame è dunque definita come l'energia necessaria per rimuovere un nucleone dal nucleo. Nel caso di un'energia di legame negativa la formazione di un nucleo sarebbe impossibile poiché esso si dissocerebbe spontaneamente. Figura 1 rappresenta schematicamente l'energia di legame per nucleone in funzione del numero di massa  $A$  (unità 1 MeV =  $1.6 \cdot 10^{-13}$  J =  $4.45 \cdot 10^{-20}$  kWh).

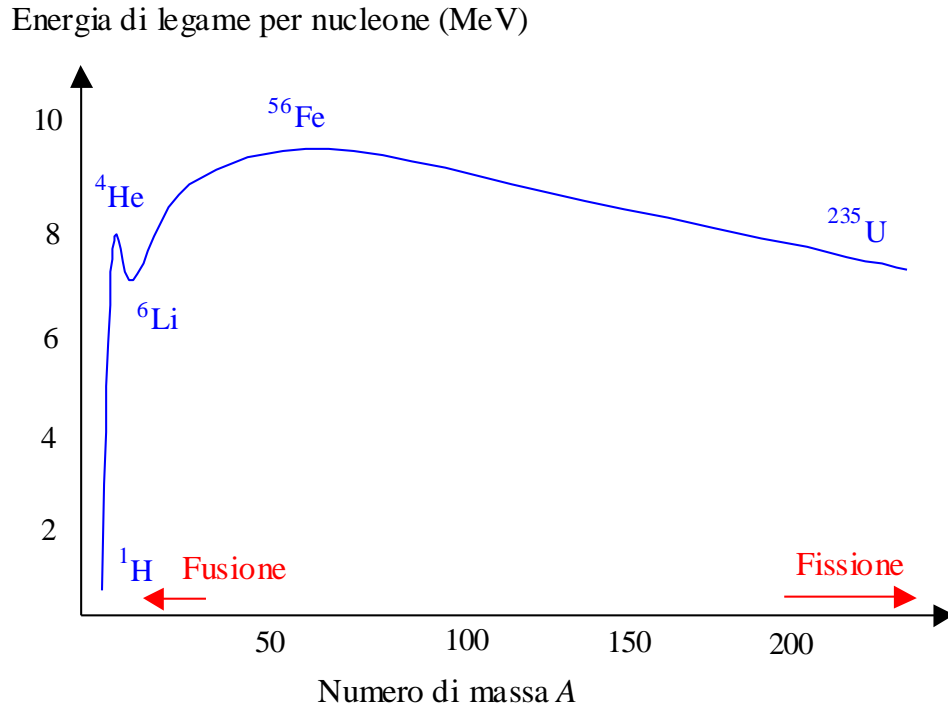


Fig. 1: Energia di legame media per nucleone (in MeV).

Si può notare che l'energia di legame aumenta per i nuclei leggeri con l'aumentare di  $A$ . Per  $A = 4$ , cioè per il nucleo di elio, essa è particolarmente elevata poiché la configurazione con due protoni e due neutroni è particolarmente stabile. L'energia di legame raggiunge un massimo per il nucleo del ferro ( $A = 56$ ) e decresce poi per i nuclei pesanti. Da tale comportamento si desume che esistono due processi mediante i quali si possono ottenere specie atomiche più stabili. Da un lato, due nuclei leggeri ( $A < 10$ ) possono fondersi, formando un nucleo più pesante. Questo è anche più stabile poiché è caratterizzato da un'energia di legame maggiore, bisogna cioè fornirgli maggiore energia se si vuole rimuovere i nucleoni. Dall'altro lato, un nucleo pesante ( $A > 200$ ) si può spezzare in due nuclei più leggeri. Questi sono anche caratterizzati da un'energia di legame maggiore e dunque sono più stabili del nucleo di partenza. In atomi molto pesanti, come l'uranio o il plutonio, l'energia di legame è difatti appena sufficiente a compensare le forze elettrostatiche. Infatti, per  $Z > 92$  non esistono più nuclei stabili.

Questi due processi sono chiamati fusione e fissione nucleare [2].

### 3. FISSIONE E FUSIONE

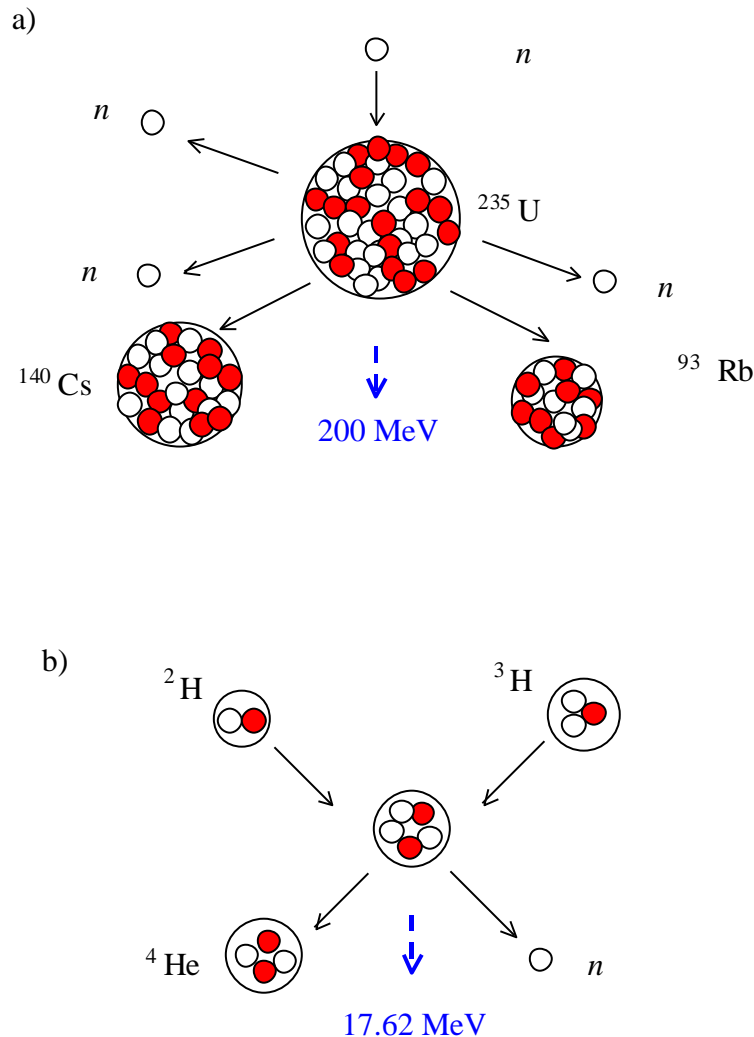


Fig. 2: a) La fissione; b) La fusione e l'energia liberata dal processo.

La **fissione** è la frammentazione di un nucleo pesante (per esempio uranio o plutonio) in nuclei più leggeri. La **fusione**, quale processo opposto della fissione, è l'unione di nuclei leggeri, come l'idrogeno, in un nucleo più pesante. Figura 2 riassume questi due processi.

Fissione e fusione nucleare sono processi capaci di trasformare la materia in energia. Questa produzione di energia è spiegabile in termini di energia di legame per nucleone. Il guadagno di energia di legame per nucleone durante questi meccanismi comporta che il prodotto della reazione è più legato dei reagenti, per cui si ha un **difetto di massa** rispetto ai reagenti, cioè la massa del prodotto è più piccola della massa dei reagenti. Ma dove è finita questa massa?

Le leggi fondamentali della Fisica classica non sono capaci di spiegare questo fenomeno che viene invece previsto dalla moderna teoria della Relatività. La massa si è trasformata in energia,  $E$ , secondo la famosa equazione relativistica di Albert Einstein:

$$E = \text{massa} \cdot c^2,$$

dove  $c$  è la velocità della luce nel vuoto. Massa e energia sono dunque concetti equivalenti.

Il difetto di massa è dunque l'energia (cinetica, elettromagnetica) liberata dipende dalla differenza delle energie di legami per prodotto e reagenti.

#### 4. LE STELLE: REATTORI A FUSIONE NUCLEARE



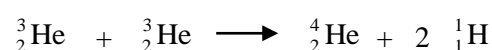
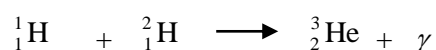
Fig. 3: Il Sole.

La fusione è un fenomeno molto frequente in natura. Infatti, l'energia irraggiata dal Sole e dalle stelle è dovuta a reazioni di fusione nucleare (Figura 3). Una stella è fatta di gas leggeri, quali idrogeno e elio. A causa della grandissima contrazione gravitazionale alla quale questi gas sono sottoposti, la materia stellare si trova a pressioni e temperature elevatissime (nell'ordine milioni di gradi). Tali pressioni e temperature sono essenziali per il meccanismo della fusione nucleare, giacché comprimono sufficientemente i nuclei gli uni agli altri, opponendosi alle forze di repulsione elettrica. Come visto nei paragrafi precedenti, tutti i nuclei hanno infatti una carica elettrica positiva. Alle condizioni a noi abituali, è così molto difficile che due nuclei si uniscano poiché quando si cerca di avvicinarli essi si respingono a causa delle cariche positive. Nelle stelle, invece, le condizioni sono tali che i nuclei possono avvicinarsi abbastanza da entrare nel raggio di azione delle forze nucleari che li terranno uniti a formare un nucleo più pesante.

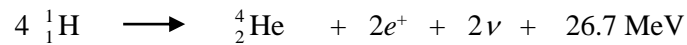
La fusione di due nuclei di idrogeno non genera però un nucleo stabile. Difatti perfino le fortissime forze nucleari non sono in grado di tenere assieme due soli protoni a causa della loro forte repulsione elettrica. Esiste però in un nucleo una seconda forza nucleare, chiamata forza nucleare debole. Grazie a questa forza uno dei protoni può trasformarsi in neutrone emettendo contemporaneamente due particelle elementari, quali un positrone  $e^+$  (una particella identica ad un elettrone ma con carica positiva) e un neutrino elettronico  $\nu$  (una particella neutra):



Si forma così un nucleo di deuterio ( ${}^2\text{H}$ ). Un nucleo di deuterio può a sua volta fondere con un protone rimasto isolato e formare il nucleo di elio  ${}^3\text{He}$  (2 protoni e un neutrone), liberando una radiazione elettromagnetica  $\gamma$ . Due nuclei  ${}^3\text{He}$  possono poi fondere e formare un nucleo di elio  ${}^4\text{He}$  (2 protoni e due neutroni), lasciando liberi i restanti due protoni che possono ricominciare il ciclo.



Ogni volta che il ciclo viene compiuto 4 protoni vengono convertiti nel nucleo di elio, liberando una grande quantità di energia. Il processo può venire riassunto dalla seguente equazione:



26.7 MeV è il difetto di massa.

Il Sole consuma con questo processo 600 milioni di tonnellate di idrogeno per ogni secondo. L'età del Sole è stimata essere 5 miliardi di anni e fortunatamente, secondo gli astrofisici, la nostra stella continuerà ad irraggiare per altrettanti anni.

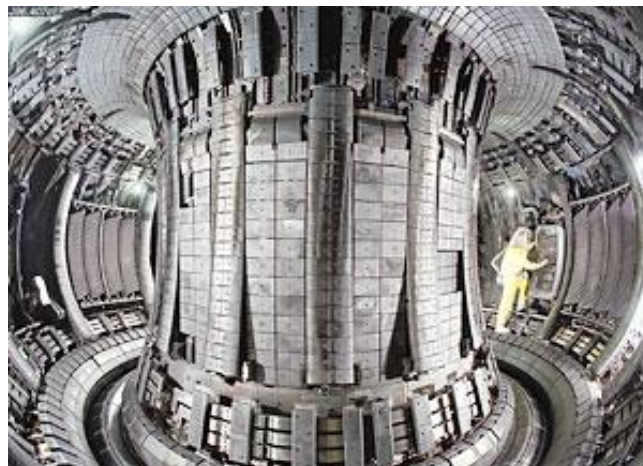
## 5. LO SFRUTTAMENTO DEL PROCESSO DI FUSIONE

Nel 1952, gli Americani hanno fatto esplodere la prima bomba H, ossia una bomba ad idrogeno che sfrutta la fusione nucleare e che viene innescata dall'esplosione di una bomba a fissione. L'uso bellico non è stato però seguito da un uso intelligente e pacifico.

Ancora ai nostri giorni, non c'è un uso civile del meccanismo della fusione nucleare su ampia scala. Si ha solo un uso sperimentale nei laboratori di ricerca dove da anni si stanno compiendo enormi sforzi per realizzare sulla Terra una reazione di fusione controllata (una reazione termonucleare). Il maggiore ostacolo è dovuto alle difficili condizioni sperimentali che richiedono temperature e pressioni elevatissime, simili a quelle nelle stelle. A queste condizioni la materia esiste in forma di plasma, cioè come miscuglio di ioni e elettroni. Non esiste materiale che sia in grado di contenere un plasma a tali temperature. Campi magnetici molto elevati vengono per esempio usati per realizzare il confinamento del plasma. Una volta confinato, il plasma deve essere riscaldato fino alla temperatura dove si innescano le reazioni di fusione.

Accanto agli studi sulla fusione calda (con temperature simili a quelle nelle stelle), ricercatori, come Fleischmann e Pons, stanno ricercando un'altra via, quella della fusione a freddo, cioè a temperatura ambiente. Nell'ambito di questa breve presentazione ci soffermiamo solo sulla fusione calda.

a)



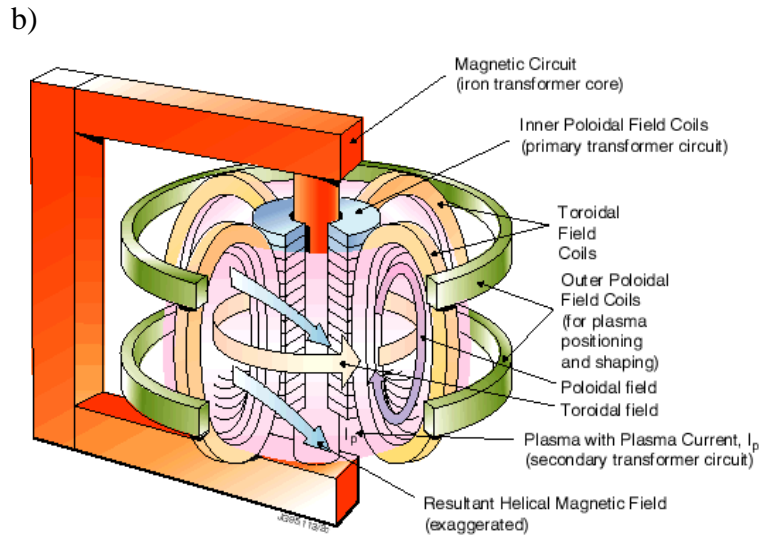
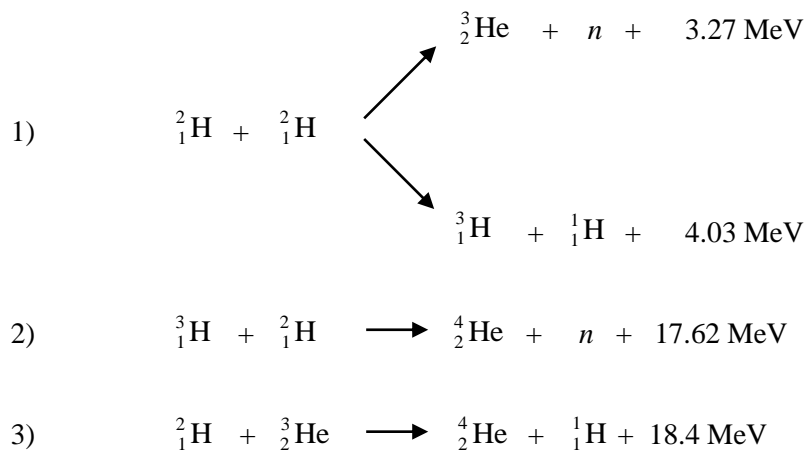


Fig. 4: Il JET. a) L'interno dell'anello dove il plasma viene confinato con forti campi magnetici; b) I campi magnetici e il plasma in forma schematica (Immagini dalla fonte [3]).

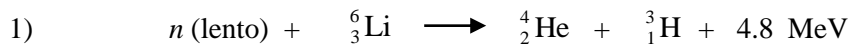
Una delle più grandi macchine sperimentali per la fusione ad elevate temperature è il JET (Joint European Torus in Culham, UK), una “ciambella” con un raggio maggiore di 2.96 m e raggi minori di 1.25 m (orizzontale) e 2.10 m (verticale) [3]. Il campo magnetico usato è di 3.45 Tesla e la corrente di plasma  $4.8 \cdot 10^6$  Ampère. La potenza di riscaldamento del plasma è di 25 MW e la potenza di fusione 16 MW. La temperatura all'interno dell'anello è di 150 milioni di gradi. Figura 4 mostra alcuni particolari del JET.

Anche Svizzera ci sono centri di ricerca nel campo della fusione. Uno di questi è il Centro di ricerca per la fisica dei plasma (CRPP) al Politecnico di Losanna in collaborazione con l'Istituto Paul Scherrer di Villigen (Argovia) [4].

Da decenni si studiano le seguenti reazioni:



Per motivi tecnici gli sforzi maggiori si stanno concentrando sulla reazione deuterio-trizio [2]. I neutroni liberati possono poi essere utilizzati per altre reazioni nucleari, come per esempio:



Il segno “-” significa che energia deve essere fornita dall’esterno. Il trizio derivante da queste reazioni può essere riciclato per la reazione deuterio-trizio.

Ma perché nonostante le grandi difficoltà si continua a investire nella ricerca per la fusione controllata?

Il seguente confronto energetico mostra come la fusione nucleare sia una fonte energetica preziosa, fornendo, a pari massa di reagenti, più energia rispetto alla combustione classica e alla fissione:

- 1) Combustione: 1 kg di carbone corrisponde a 8,14 kWh
- 2) Fissione: 1 kg di  ${}^{235}\text{U}$  corrisponde a  $2,3 \cdot 10^7$  kWh
- 3) Fusione: 400 g di  ${}^2_1\text{H}$  + 600 g di  ${}^3_1\text{H}$  corrispondono a  $10^8$  kWh

La fusione ha anche numerosi vantaggi che la rendono una fonte energetica rispettosa dell’ambiente. I vantaggi e gli svantaggi di questa tecnica vengono riassunti nel prossimo paragrafo.

## 6. UNA FUTURA CENTRALE TERMONUCLEARE

Supponendo che i problemi tecnici di confinamento e riscaldamento del plasma siano risolti in modo soddisfacente, una futura centrale termonucleare potrebbe usare come combustibile deuterio arricchito con un 10% di trizio (vedi anche Figura 5). Le reazioni possibili sarebbero quelle sopra presentate ( ${}^2_1\text{H} + {}^2_1\text{H}$ ;  ${}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H}$ ;  ${}^2_1\text{H} + {}^3_2\text{He}$ ;  $n + {}^6_3\text{Li}$ ). Nella reazione deuterio-trizio l’80% dell’energia liberata è assunto dai neutroni. Per convertire questa energia di movimento (cinetica) dei neutroni in elettricità si può usare un moderatore (acqua o grafite) come nei reattori a fissione. L’energia cinetica viene così trasformata in energia termica che scalda un fluido che contemporaneamente serve da refrigerante del moderatore.



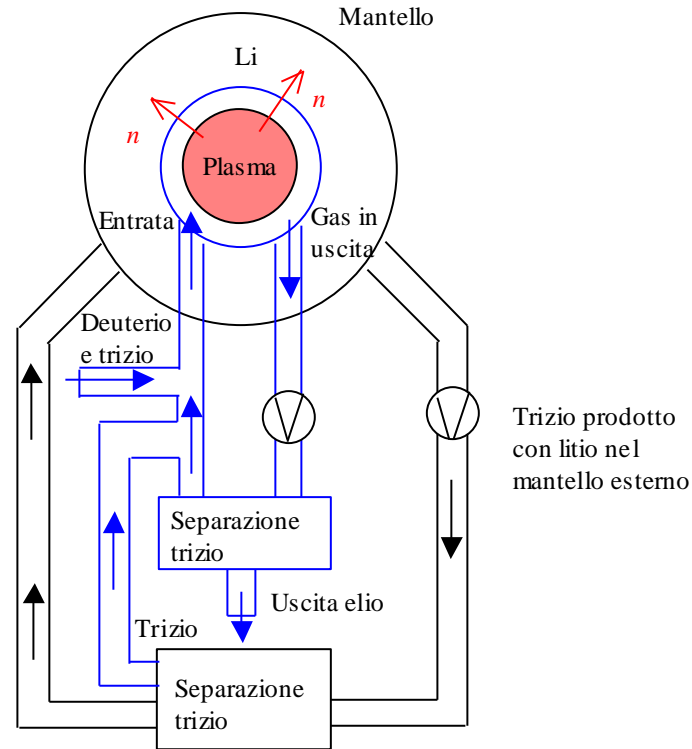


Fig. 5: Ciclo chiuso in un reattore a fusione.

Un reattore a fusione ha numerosi **vantaggi**, quali:

- Nessun consumo di riserve mondiali di ossigeno e idrocarburi. Dunque nessuna emissione di anidride carbonica e di altri prodotti di combustione.
- Il prodotto primario è presente in enormi quantità nei mari. In 30 litri di acqua si ha 1 g di deuterio. Anche il litio è abbondante nelle rocce, negli oceani e nelle acque minerali.
- Non vengono prodotte scorie radioattive. In realtà il trizio è radioattivo (tempo di dimezzamento 12.3 anni) ma viene prodotto e consumato in un ciclo chiuso. L'impatto ambientale è dunque minimo.
- Un reattore a fusione è un impianto sicuro in caso di una calamità naturale o bellica. Una sua eventuale distruzione non sarebbe una catastrofe come nel caso di un reattore a fissione.

Un reattore a fusione ha però anche degli **svantaggi** che non sono tuttavia tecnicamente insormontabili:

- Il forte flusso dei neutroni implica un'attivazione radioattiva delle strutture del reattore.
- I neutroni possono modificare il materiale del reattore (per esempio rigonfiamenti).

**FONTI**

[1] R. P. Taleyarkhan *et al.*, *Science* **295**, 1868 (2002)

[2] A. Prat Bastai e B. Quassati de Alfaro, *Il problema dell'energia: Fusione nucleare*, Zanichelli editore, 1984

[3] <http://www.jet.efda.org>

[4] <http://crppwww.epfl.ch>

[5] H. Frenzel e H. Schultes, *Zeitschrift der Physikalischen Chemie* **B27**, 421 (1935)