

# LA FUSIONE : Fisica di una fonte energetica fondamentale

Le reazioni di fusione liberano l'energia che alimenta il sole e le altre stelle. Affinche il rilascio di energia sia rilevante, cioè vi sia un numero di reazioni sufficientemente elevato, occorrono plasmi ad alta temperatura, confinati per tempi abbastanza lunghi. I risultati delle ricerche in fisica del plasma vengono utilizzati per riprodurre sulla terra le condizioni necessarie per la fusione controllata la quale dovrebbe in futuro contribuire a soddisfare il crescente fabbisogno mondiale di energia. Sullo sfondo del tema Sole-Terra, questo manifesto tratta alcuni temi riguardanti la fusione: il suo rapporto con altre fonti energetiche, la fisica del processo, il riscaldamento ed il confinamento dei plasmi per la fusione ed alcuni risultati delle ricerche nel campo.

## Produzione e trasformazione dell'energia.

La società moderna dispone di diverse fonti energetiche: l'energia prodotta necessita spesso di una conversione prima del suo utilizzo. Nella maggior parte delle centrali, si produce sostanzialmente energia termica per reazioni chimiche o di fissione nucleare o – in futuro – per reazioni di fusione. Il calore così prodotto è poi convertito in altre forme utili con processi termodinamici. La seconda legge della termodinamica impone dei limiti all'efficienza di questi processi di conversione per cui, inevitabilmente, una parte dell'energia prodotta va perduta. Inoltre l'intero processo rilascia nell'ambiente delle scorie. L'energia prodotta da un kilogrammo di combustibile, che è molto più elevata nei processi nucleari, si basa sulle reazioni illustrate nel retro. Nel futuro reattore a fusione di prima generazione, molto probabilmente la reazione utilizzata sarà quella tra il deuterio, che è abbondante sulla terra, ed il trizio. Quest'ultimo verrà prodotto nel mantello di litio del reattore stesso grazie alla fissione del litio in trizio ed elio provocata dai neutroni della reazione DT. La centrale andrà dunque rifornita soltanto di deuterio e litio.

## Produzione di energia mediante reazioni di fusione.

L'equazione  $\Delta E = (m_i - m_f)c^2$  stabilisce che l'energia cinetica liberata  $\Delta E$  è proporzionale alla differenza tra la massa iniziale dei reagenti ( $m_i$ ) e quella finale dei prodotti ( $m_f$ ). L'energia di legame di un nucleo è la differenza tra la massa del nucleo e la massa totale dei nucleoni (protoni e neutroni) che lo costituiscono. Il grafico dell'energia di legame per nucleone mostra che, combinando elementi con massa piccola (fusione), si ottengono nuclei con una energia di legame per nucleone maggiore: viene cioè liberata dell'energia. Per elementi di massa maggiore (più di 62 u.a.) la scissione del nucleo (fissione) permette, per lo stesso motivo, di liberare energia. Siccome la curva è più ripida nella zona "fusione" che nella zona "fissione", nella fusione l'energia liberata per nucleone è maggiore. Vengono mostrate schematicamente le caratteristiche di due importanti processi di fusione: la catena p-p, che è la sorgente primaria dell'energia del sole e la reazione D-

T che verrà utilizzata nei reattori a fusione di prima generazione. Il tasso di reazione di fusione risulta fortemente dipendente dalla temperatura ionica. Le alte temperature richieste sono indispensabili affinché i nuclei possano avvicinarsi a distanze dell'ordine di  $10^{-15}$  m dove la forza di attrazione nucleare, molto potente ma di corto raggio, possa prevalere sulla repulsione elettrostatica e provocare la fusione. L'enorme differenza tra i valori del tasso di reazione D-T e quello p-p spiega perché venga scelta la prima per le applicazioni reattoristiche.

## Il plasma - quarto stato della materia.

Il plasma, insieme di particelle elettricamente cariche e libere di muoversi, è presente in molte forme nell'universo e ricopre una regione incredibilmente vasta di densità e temperature. La fisica del plasma è la base delle nostre conoscenze sul sole, sulle stelle, sullo spazio interstellare, sulle galassie, sulle insegne al neon, sui fulmini, sull'aurora e sulle tecniche per controllare i processi di fusione. I plasmi sono influenzati dalle interazioni elettriche a lungo raggio tra elettroni e ioni e dalla presenza di campi magnetici applicati dall'esterno oppure generati da correnti interne. La dinamica di questi sistemi è complessa e deve essere ben studiata per procedere nello sviluppo dell'energia di fusione.

## Le condizioni per realizzare la fusione controllata.

Progressi nelle tecniche di riscaldamento e confinamento del plasma sono ancora necessari per realizzare la fusione controllata. Per un plasma D-T, che dovrà raggiungere temperature di  $10^8$  K, i due metodi di confinamento più promettenti sono quello magnetico e quello inerziale. Il tokamak, una macchina toroidale avente una camera da vuoto a forma di ciambella nella quale si avvolgono a spirale le linee di forza del campo, è il dispositivo a confinamento magnetico più studiato. Nel confinamento inerziale, intensi fasci di luce laser o di ioni comprimono una piccola pastiglia di combustibile fino a densità e temperature estremamente elevate tali da innescare numerose reazioni di fusione nel pur breve tempo di implosione del bersaglio che è confinato dalla sua stessa inerzia.

Per realizzare la fusione controllata, un plasma ad alta temperatura e densità deve essere confinato per un tempo abbastanza lungo. Questo criterio può essere espresso in termini di parametro di confinamento, ovvero il prodotto della densità per il tempo di confinamento dell'energia. Esperimenti recenti hanno prodotto plasmi con tempi di confinamento, densità o temperature vicine e talvolta superiori a quelle richieste per l'autosostentamento della fusione controllata, ma ancora non si sono ottenuti contemporaneamente i valori richiesti per entrambi i parametri.

## Informazioni su Ricerche in Corso e Materiale Divulgativo sulla Fusione in Internet (World Wide Web)

**Fusion Education Project Home Page:** <http://FusEdWeb.pppl.gov/CPEP/Chart.html>  
**CPEP Home Page:** <http://pdg.lbl.gov/cpep.html>  
**CPEP Product Information:** [http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep\\_how\\_to\\_order.html](http://pdg.lbl.gov/cpep/cpep_how_to_order.html)

**ENEA home page** <http://www.enea.it>  
**CRPP home page** <http://www.epfl.ch/crpp/> o <http://crppwww.epfl.ch>

### TEC-Homepages

FZJ/IPP Juelich: <http://www.fz-juelich.de/ipp/>  
ERM-KMS Brussels: <http://fusion.rma.ac.be/>  
FOM Rijnhuizen: <http://www.rijnh.nl/>

Tramite i siti indicati, si possono ottenere altri indirizzi di interesse.

---

Il “**Contemporary Physics Education Project**” (CPEP) è un'associazione senza fini di lucro di fisici ed insegnanti. Il materiale prodotto riguarda le conoscenze scientifiche attuali sulla materia e l'energia e descrive le scoperte più rilevanti degli ultimi trent'anni. Il CPEP promuove anche numerosi convegni per insegnanti. Ulteriori informazioni possono essere richieste al seguente indirizzo di posta elettronica [pdg@lbl.gov](mailto:pdg@lbl.gov) o direttamente acquisite al sito internet sopra citato. Nuovo materiale sarà disponibile prossimamente. Il materiale può essere ordinato a **Science Kit**, 777 East Park Drive, Tonawanda, NY 14150 USA, Telefono +1-800-828-7777, Fax +1-716-874-9572.

Il “**Centre de Recherches en Physique des Plasmas**” (CRPP) è il pilastro dell'Association Euratom-Confederation Suisse. Le sue attività riguardano la ricerca sperimentale e teorica sui plasmi di fusione, nel sito dell'École Polytechnique Federale de Lausanne (EPFL) e la tecnologia della fusione (sviluppo e test di materiali a bassa attivazione e di superconduttori), nel sito del Paul Scherrer Institut (PSI) a Villigen. Gli obiettivi sperimentali del tokamak TCV (Tokamak à Configuration Variable) del CRPP mirano ad un'ottimizzazione degli scenari di produzione e controllo di plasmi fortemente allungati e allo studio delle proprietà di confinamento di tali plasmi in regime ohmico ed in presenza di riscaldamento addizionale (ECRH). Per maggiori informazioni rivolgersi a: Secrétariat CRPP-EPFL, CH 1015 Lausanne, Tel : +41-21-693 34 87/82; Fax +41-21-693 51 76.

L'ENEA, “**Ente per le Nuove Tecnologie, l'Energia e l'Ambiente**”, è un'organizzazione di ricerca scientifica e di sviluppo tecnologico con una vasta esperienza, riconosciuta a livello internazionale, nella realizzazione di programmi di ricerca avanzata e nell'attuazione di progetti complessi. Opera in dieci centri di ricerca distribuiti in tutta Italia. Svolge ricerche strategiche nell'ambito di progetti internazionali su tematiche di particolare complessità quali la fusione, il fotovoltaico, il calcolo parallelo, la modellistica meteorologica. Realizza interventi finalizzati allo sviluppo dell'innovazione presso le imprese in collegamento anche finanziario con le regioni e con le iniziative comunitarie. Fornisce supporto e consulenza scientifica e tecnologica alle amministrazioni pubbliche centrali e locali per la soluzione di problemi di particolare complessità, urgenza e gravità, per lo studio e la predisposizione di normative, per la partecipazione a iniziative e programmi internazionali. Copie di questo manifesto (in italiano) possono essere richieste a **ENEA, Centro Ricerche Frascati**, via E. Fermi, 45 - CP 65 - 00044 Frascati - Roma. Tel. 06-94005210 / 94005198 / 94005294. Fax 06-94005791. Per chiamate dall'estero va aggiunto il prefisso 39.

Il “**Trilateral Euregio Cluster**” (TEC) è un'associazione di istituti nazionali di ricerca del Belgio, dei Paesi Bassi e della Germania : il Laboratoire de Physique des Plasmas-Laboratorium voor Plasmafysica della Ecole Royale Militaire-Koninklijke Militaire School (ERM-KMS) di Bruxelles; il FOM-Instituut voor Plasmafysica Rijnhuizen di Nieuwegein; e l'Institut für Plasmaphysik del centro di ricerche di Jülich. Copie di questo manifesto in diverse lingue tra cui italiano, francese, olandese, tedesco, spagnolo o portoghese possono essere richieste a **Institut für Plasmaphysik**, Forschungszentrum Jülich GmbH, D-52425 Jülich, Fax +49-2461-615452.