La Fusione

Fisica di una fonte energetica fondamentale

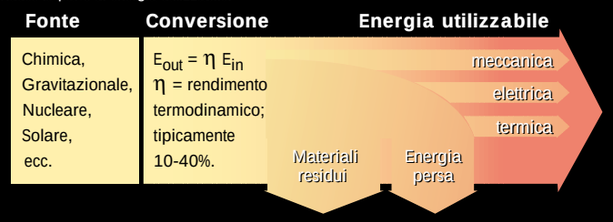
Le reazioni di fusione sono la fonte di energia del sole e delle altre stelle. Nelle reazioni di fusione, nuclei leggeri si combinano per formare nuclei di massa maggiore. Il processo di fusione nucleare trasforma massa (m) in energia cinetica (E) secondo la legge di Einstein $E=mc^2$. Nel sole, una sequenza di reazioni di fusione, detta catena p-p, ha inizio con delle reazioni tra protoni, ovvero nuclei di idrogeno, e termina con la produzione di particelle alfa, cioè nuclei di elio. La catena p-p fornisce la maggior parte dell'energia solare e continuerà a farlo per miliardi di anni.

Per realizzare la fusione sulla terra, occore portare gli atomi a temperature molto elevate, oltre i 10 milioni di gradi. A tali temperature, gli atomi sono ionizzati e costituiscono un plasma. Una produzione netta di energia si ottiene quando il plasma è confinato abbastanza a lungo perchè si abbia un numero sufficiente di reazioni di fusione. Realizzando reattori a fusione, si disporrebbe di una fonte energetica illimitata data l'abbondanza di combustibile come il deuterio. Importanti progressi sono stati effettuati verso la realizzazione di questo obiettivo.

FONTI E CONVERSIONE DELL'ENERGIA

PANORAMA DEI PROCESSI DI CONVERSIONE

L'energia assume molteplici forme e svariati processi di trasformazione consentono di passare dall'una all'altra. Mentre l'energia totale si conserva, in genere, durante una trasformazione, si riduce la parte di energia utilizzabile.



Parametri fisici di reazioni esotermiche

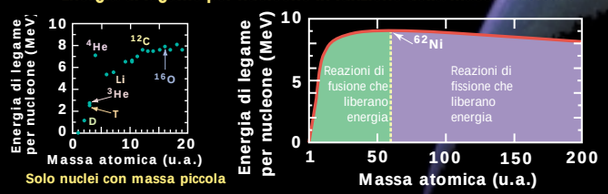
Tipo di reazione :	chimica	fissione	fusione
Esempio	$C + O_2 \Rightarrow CO_2$	$^1n + ^{235}U \Rightarrow ^{143}Ba + ^{91}Kr + 2\,^1n$	$D\,(^2H) + T\,(^3H) \Rightarrow ^4He + ^1n$
Materie prime (ingresso alla centrale)	Carbone e Aria	UO_2 (3% ^{235}U + 97% ^{238}U)	Deuterio e Litio
Temperature tipiche (K)	1000	1000	100 000 000
Energia liberata per kg di combustibile (J/kg)	$3{,}3 \times 10^7$	$2{,}1 \times 10^{12}$	$3{,}4 \times 10^{14}$

FUNZIONAMENTO DELLE REAZIONI DI FUSIONE

FISICA NUCLEARE DELLA FUSIONE

La fusione di elementi con massa piccola libera energia proprio come la fissione di elementi con massa grande.

Energia di legame per nucleone in funzione della massa nucleare



Energia della reazione nucleare : $\Delta E = k\,(m_i - m_f)\,c^2$

Dalla formula di Einstein $E = mc^2$. ΔE = energia liberata per reazione; m_i = massa iniziale totale dei reagenti; m_f = massa finale totale dei prodotti. Il fattore k vale 1 in unità S.I., o 931,466 MeV/(u.a.)c^2, se si esprime l'energia in MeV e la massa in unità atomiche (u.a.).

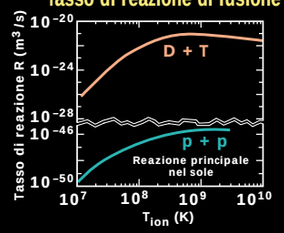
Massa atomica

(La massa dell'elettrone è di 0.000549 u.a.)

Simbolo	Particella	Massa (u.a.)
n (^{1}n)	Neutrone	1,008665
p (^{1}H)	Protone	1,007276
D (^{2}H)	Deuterone	2,013553
T (^{3}H)	Tritone	3,015500
^{3}He	Elio-3	3,014932
α (^{4}He)	Elio-4	4,001506

* 1 u.a. = $1{,}66054 \times 10^{-27}$ kg = 931,466 MeV/c^2

Tasso di reazione di fusione



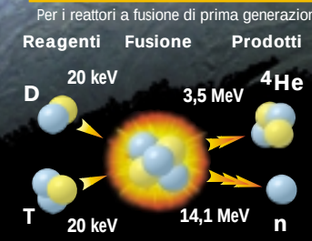
Numero di reazioni per unità di tempo e di volume = $R\,n_1 n_2$

n_1, n_2 = densità dei reagenti (ioni/m^3); R = tasso di reazione (m^3/s).
Moltiplicando per ΔE si ottiene la densità di potenza di fusione.

DUE IMPORTANTI REAZIONI DI FUSIONE

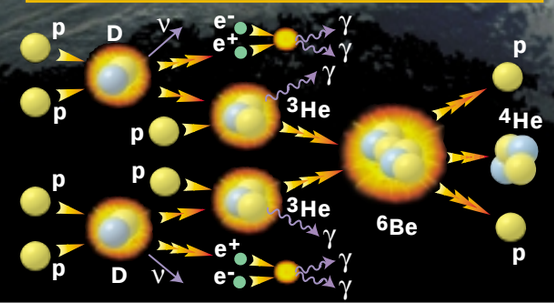
$D + T \Rightarrow {}^4He + {}^1n$

Per i reattori a fusione di prima generazione



1 eV = $1{,}6022 \times 10^{-19}$ J. Una energia cinetica media delle particelle di 1 eV corrisponde ad una temperatura di 11 600 K.

"p-p": IL CICLO DEL SOLE



CREARE LE CONDIZIONI PER LA FUSIONE

RISCALDAMENTO E CONFINAMENTO DEL PLASMA

Confinamento:

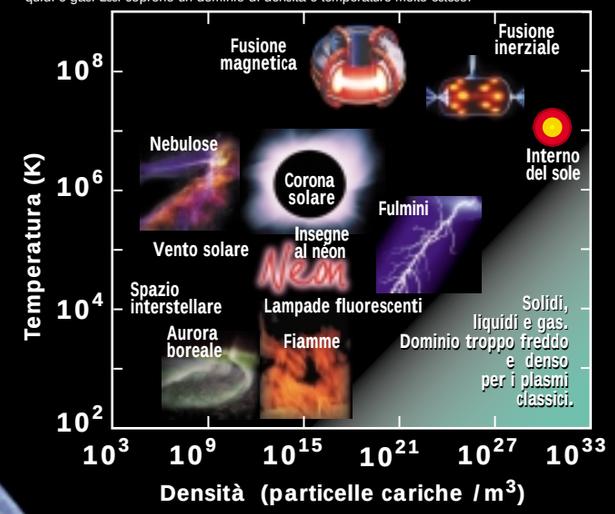
Per liberare energia in quantità notevoli la fusione richiede plasmi ben confinati ad alta densità e temperatura.

	Gravità	Campi magnetici	Inerzia
	Plasma di formazione stellare	Tokamak	Fusione fasci laser
Valori tipici :	<------ Dimensioni: 10^{19} m ------> Durata del plasma : 10^{15}-10^{18} s	<------ Dimensioni: 10 m -------> Durata del plasma : 10^{-2} - 10^{6} s	<------ Dimensioni: 10^{-1} m ------> Durata del plasma : 10^{-9} - 10^{-7} s
Meccanismi di riscaldimento :	• Compressione • Energia dei prodotti di fusione	• Onde elettromagnetiche • Riscaldamento ohmico (elettricità) • Iniezione di neutri (fasci di atomi di idrogeno) • Compressione • Energia dei prodotti di fusione	• Compressione (mediante fasci laser o di ioni, o mediante i raggi X che questi fasci producono irraggiando materiali opportuni) • Energia dei prodotti di fusione

IL PLASMA QUARTO STATO DELLA MATERIA

CARATTERISTICHE DI PLASMI TIPICI

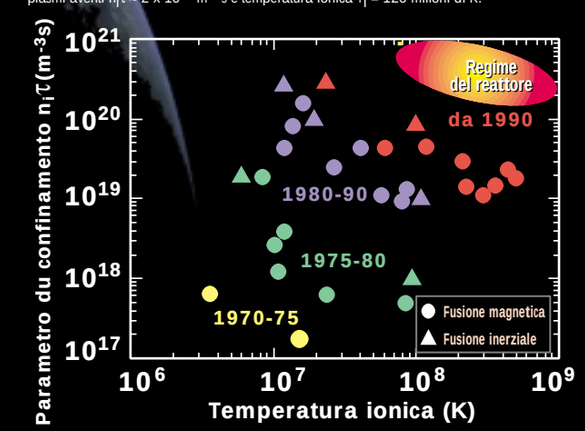
I plasmi sono costituiti da particelle cariche (ioni ed elettroni) libere di muoversi. Essi si formano ad alte temperature, quando gli atomi si dividono in ioni ed elettroni non più legati tra loro. I plasmi sono abbondanti in natura e costituiscono la maggior parte della materia stellare. Possono considerarsi il quarto stato della materia per via delle loro proprietà fisiche peculiari che li distinguono da solidi, liquidi e gas. Essi coprono un dominio di densità e temperature molto esteso.



RAGGIUNGERE LE CONDIZIONE DI FUSIONE

RISULTATI SPERIMENTALI DELLE RICERCHE SULLA FUSIONE

Tanto nella fusione inerziale quanto in quella a confinamento magnetico, gli studi si sono concentrati sulla comprensione dei meccanismi di confinamento e riscaldamento. Queste ricerche hanno consentito di aumentare la temperatura ionica del plasma T_i, la densità ionica n_i ed il tempo di confinamento dell'energia τ. Si prevede che i futuri reattori a fusione produrranno una potenza di circa 1 GW, con plasmi aventi $n_i\tau = 2 \times 10^{20}$ m^{-3} s e temperatura ionica T_i = 120 milioni di K.



Copyright © 1996 Contemporary Physics Education Project (CPEP). Translation by ENEA Frascati and Forschungszentrum Jülich / TEC.

Il CPEP è una orgnizzazione senza fini di lucro, di insegnanti, fisici ed educatori, con una rilevante partecipazione di studenti. I contributi da parte di privati e società ed il finanziamento da parte dei laboratori nazionali sono stati e continuano ad essere vitali per il successo di questa iniziativa. Questo manifesto è stato realizzato dal CPEP in collaborazione con le seguenti organizzazioni: la rivista *Physics of Plasmas* dell'AIP, la Divisione Plasma Physics dell'APS, General Atomics, Lawrence Livermore National Laboratory, Massachusetts Institute of Technology, Princeton Plasma Physics Laboratory, University of Rochester Laboratory for Laser Energetics, U.S. Department of Energy, Trilateral Euregio Cluster e ENEA Frascati. Le immagini sono state fornite da: NASA, the National Solar Observatory, Steve Albers e gli organismi sopra menzionati.