

GIANFRANCO FEDERICI

**RELAZIONE INTRODUTTIVA SULLA FUSIONE
TERMONUCLEARE CONTROLLATA**
stato della ricerca e prospettive per il futuro



Supplemento ai Commentari del 1997
Ateneo di Brescia
Accademia di Scienze Lettere ed Arti

GIANFRANCO FEDERICI

RELAZIONE INTRODUTTIVA SULLA FUSIONE
TERMONUCLEARE CONTROLLATA
stato della ricerca e prospettive per il futuro

Supplemento ai Commentari del 1997
Ateneo di Brescia
Accademia di Scienze Lettere ed Arti

Supplemento ai
COMMENTARI DELL'ATENEO DI BRESCIA
Registrazione del Tribunale di Brescia 21 gennaio 1953 N. 64
Direttore LUIGI LEVI SANDRI
Direttore responsabile GIUSEPPE VIANI

RINGRAZIAMENTO E PREMESSA

L'autore che dal 1996 è anche socio corrispondente dell'Ateneo di Brescia desidera vivamente ringraziare il presidente dell'Ateneo, avvocato Cesare Trebeschi, il vice-presidente, professor Giuseppe Viani, e il segretario, avvocato Luigi Levi Sandri, per il graditissimo invito a tenere questa conferenza sulla fusione termonucleare controllata nell'ambito del ciclo dei "lunedì scientifici dell'Ateneo di Brescia" organizzati dall'Ateneo di Brescia, e dalla Società Italiana di Scienze Matematiche e Fisiche - Sezione di Brescia "MATHESIS".

Questa nota intende fornire un breve quadro di sintesi sul punto della situazione e sullo stato della ricerca in fatto di fusione termonucleare controllata, evidenziando i progressi più significativi avvenuti negli ultimi anni, e gli appuntamenti più impegnativi del futuro. La nota dedica attenzione particolare alla fusione a confinamento magnetico.

*PROFILO

Dott. Ing. Gianfranco Federici

È nato a Salò (Brescia) nel 1960. Ha conseguito la laurea in ingegneria nucleare presso il Politecnico di Milano nel 1985. Si è poi specializzato in ingegneria della fusione nucleare e fisica applicata dei plasmi all'Università di California a Los Angeles dove ha conseguito il master of science nel 1988 e il dottorato di ricerca (Ph.D) nel 1989. Dal 1990 lavora alla progettazione del reattore a fusione cosiddetto di "prossimo-passo", nell'istituto Max-Planck della fisica dei plasmi con sede a Garching in Germania presso Monaco di Baviera. Dal 1994 è agente scientifico della Commissione dell'Unione Europea nel Dipartimento Direzione Generale XII, Scienza, Ricerca e Sviluppo.

GIANFRANCO FEDERICI*

**RELAZIONE INTRODUTTIVA SULLA FUSIONE
TERMONUCLEARE CONTROLLATA**

stato della ricerca e prospettive per il futuro

presentata all'Ateneo di Brescia:

Accademia di Scienze, Lettere ed Arti - 26 maggio 1997

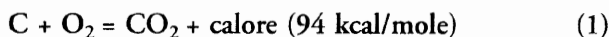
ENERGIA E RISORSE PER IL XXI SECOLO

Il problema dell'inquinamento ambientale

Mentre ci avviciniamo alle soglie del nuovo millennio interrogativi ambientali scottanti stanno suscitando preoccupazioni e dubbi su vasta scala tra la comunità scientifica internazionale, i leader politici e l'opinione pubblica. Il baricentro dell'attenzione in questi ultimi tempi si è andato via via spostando dai problemi classici di approvvigionamento delle risorse energetiche e dai rischi derivanti dal loro esaurimento, ai problemi connessi con la produzione e l'uso di energia e la diminuita capacità dell'ambiente di assorbirne le conseguenze. Oltre all'aumento di emissioni tossiche legate a processi di produzione industriale, alle piogge acide, ai dubbi e le paure suscitate da recenti guasti a impianti di tipo nucleare, il problema che desta le maggiori preoccupazioni rimane il progressivo accumulo di anidride carbonica (CO₂) e di altri gas-serra nell'atmosfera terrestre derivati dalla combustione di enormi quantità di combustibili fossili e dalla deforestazione indiscriminata di vaste aree.

Vediamo meglio di cosa si tratta. Produrre energia bruciando combustibili fossili (vale a dire carbone, gas naturale, petrolio e i suoi de-

rivati) vuol dire produrre calore e prevalentemente anidride carbonica (simbolo chimico CO_2) secondo la seguente reazione chimica:



È ben noto che la CO_2 svolge un ruolo di vitale importanza nel "ciclo del carbonio", che è il ciclo più importante che regola quasi tutte le forme di vita sulla terra. A sua volta le piante consumano anidride carbonica durante la loro crescita, producendo materiale organico e ossigeno nella seguente reazione di fotosintesi:



È chiaro che l'emissione di eccessive quantità di CO_2 è destinata ad alterare sensibilmente questo delicato equilibrio naturale e provocare conseguenze irreversibili sulla biosfera. In particolare uno degli effetti più temuti è quello che va sotto il nome di "effetto-serra". L'effetto serra (raffigurato in figura 1) è un elemento essenziale del bilancio globale di energia sulla terra. Senza di esso la temperatura media sulla terra sarebbe al di sotto dello zero. Anidride carbonica, vapore acqueo e altri gas assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre riscaldata dal sole che viene re-irraggiata sulla terra e ciò mantiene la temperatura media della superficie del nostro pianeta di 10 gradi centigradi. Un'accresciuta presenza di cosiddetti "gas-serra" in atmosfera produce il progressivo riscaldamento globale del pianeta.

La produzione di anidride carbonica nel mondo che deriva dallo sfruttamento dei combustibili fossili è stimata essere di circa 5.5 miliardi di tonnellate (Gt) di carbonio che si trasforma in CO_2 l'anno. Circa 2 miliardi di tonnellate sono assorbite dagli oceani. A causa della deforestazione di vaste aree del pianeta solo 0.2 miliardi di tonnellate vengono assorbiti dalle piante. Le rimanenti 3.3 Gt si accumulano in atmosfera ogni anno. La figura 2 mostra la concentrazione di CO_2 nell'atmosfera nel corso degli ultimi 1000 anni. I valori che si riferiscono al passato sono stati calcolati a partire dalla misurazione della composizione di bolle di aria intrappolate nei ghiacci profondi dell'Antartide. Solo a partire dal 1958 vi è stata una regolare diretta misurazione della CO_2 alle isole Hawaii. Si può notare (1) che il marcato aumento della concen-

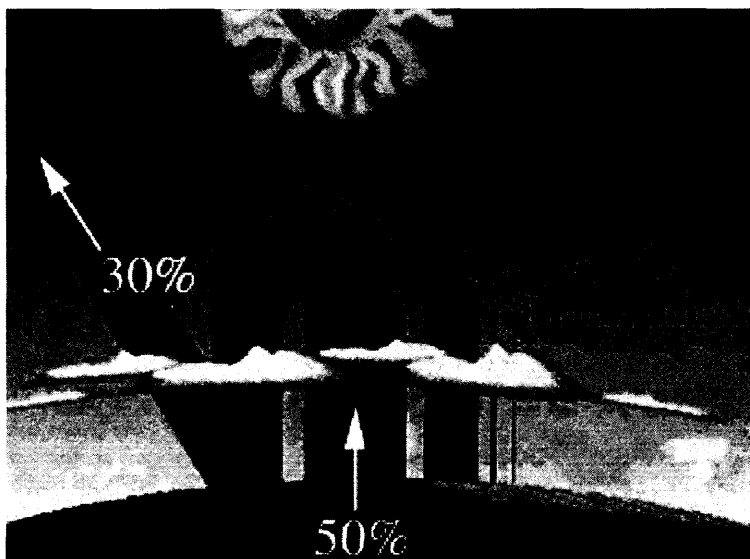


Figura 1 – L'effetto-serra. Della potenza che il sole irraggia sulla terra (1.8×10^{17} watt) circa il 30% viene riflessa dall'atmosfera e il 50% viene assorbita e successivamente irraggiata nello spazio circostante la superficie. Anidride carbonica, vapore acqueo e altri gas assorbono la radiazione infrarossa emessa dalla superficie terrestre riscaldata dal sole e ciò mantiene la temperatura media della superficie del nostro pianeta di 10 gradi centigradi. A causa di un'accresciuta presenza di cosiddetti "gas-serra" quali CO_2 , NO_2 l'atmosfera tende a immagazzinare una maggiore quantità del calore che viene irraggiato sulla sua superficie dal sole analogamente a quanto fa il vetro in una serra per fiori.

trazione di CO_2 in atmosfera coincide con l'inizio dell'era industriale (inizi XIX secolo) e con lo sfruttamento intensivo dei combustibili fossili; (2) che negli ultimi 200 anni la concentrazione di CO_2 è aumentata di circa il 30% dai livelli dell'epoca pre-industriale. Si stima che continuando a bruciare combustibili fossili di questo passo e tenendo conto della crescita della popolazione e dei consumi entro la metà del secolo prossimo si saranno accumulate in atmosfera circa 1000 Gt di CO_2 contro le 750 attuali e la concentrazione di CO_2 sarà di circa raddoppiata rispetto ai valori dell'era pre-industriale. Vale per questo forse la pena citare un'af-

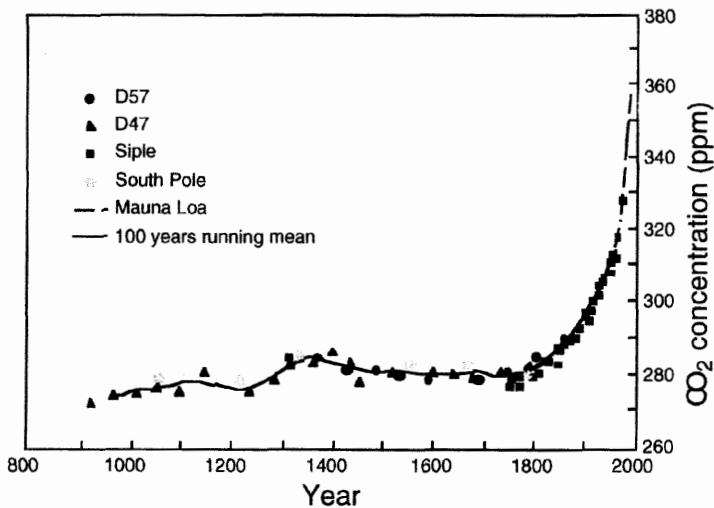


Figura 2 – La concentrazione di CO₂ nell'atmosfera nel corso degli ultimi 1000 anni. I valori che si riferiscono al passato sono stati calcolati a partire dalla misurazione della composizione di bolle di aria intrappolate nei ghiacci profondi dell'Antartide. Solo a partire dal 1958 vi è stata una regolare diretta misurazione della CO₂ alle isole Hawaii (fonte: "Climate change" 1995, ed. by J.T. Houghton et al. Cambridge University Press, 1995). 1 ppm è 1 parte per milione di parti di volume, vale a dire un miliardesimo (10^{-6}) del volume totale.

fermazione fatta nel 1957 da due pionieri dello studio del ciclo del carbonio, R. Revelle e H. Suess. L'umanità sta in pratica conducendo un enorme esperimento geofisico che non si sarebbe mai pensato possibile nel passato e che, a prescindere dai risultati, non potrà più essere ripetuto nel futuro. Esso consiste in parole povere nel trasferire in un periodo di 2-3 secoli nell'atmosfera e negli oceani il carbonio che è stato concentrato nel suolo in centinaia di milioni di anni.

Fatta questa premessa, nonostante vi sia ancora disaccordo sull'entità di questa alterazione del clima e su quelle che saranno le reali conseguenze per il nostro pianeta, il dibattito è in corso su vasta scala in tutti i paesi industrializzati e potrebbe favorire nell'im-

mediato futuro decisioni e prese di posizione tali da modificare sostanzialmente la nostra politica energetica per il futuro e da ridurre considerevolmente il consumo di combustibili fossili e quindi la produzione di CO₂.

Va poi detto che, oltre al problema dell'inquinamento ambientale, non va sottovalutato il fatto che lo sviluppo dell'economia mondiale è stato impostato ed è tuttora impostato sul petrolio, e la gran parte delle risorse disponibili è localizzata nell'area del Golfo Persico, che tutti sappiamo essere una zona geografica con elevata instabilità politica.

Tuttavia, mentre da un lato i problemi contemporanei di carattere ambientale, politico ed economico sulle attuali risorse disponibili e utilizzabili sono tali da incoraggiare azioni che in qualche modo possano ridurre la nostra dipendenza da combustibili fossili e promuovere la ricerca di fonti energetiche alternative, paradossalmente, dall'altro la crescente carenza di capitali sembra compromettere la determinazione e l'incisività per mettere a punto alternative a lungo termine. I problemi vanno affrontati con determinazione e si deve abbandonare quell'atteggiamento di immobilismo assunto erroneamente fino a oggi (in particolare nel nostro paese) e ogni nazione deve avere il coraggio di rispondere con onestà a domande del tipo: Abbiamo sufficienti risorse energetiche per il futuro? Quanto tempo le risorse attualmente sfruttate e utilizzabili nel breve termine dureranno? Quali nuovi fonti energetiche si presentano alle soglie del nuovo millennio? E se queste ci sono, possono essere utilizzate in tempi relativamente brevi? Quali sono le conseguenze tecnologiche e i rischi collegati con lo sviluppo di queste nuove risorse? Rispondere a queste domande non è certo compito facile ed è cosa certa che lo sviluppo di nuove fonti di energia volte a sostituire le attuali tecnologie di sfruttamento dei combustibili fossili richiederà decenni e forti investimenti di capitale.

Domanda energetica e opzioni energetiche disponibili a lungo termine

Circa il 90% dell'energia odierna deriva dai combustibili fossili: petrolio (40%), carbone (27.5%), gas naturale (~22%) e solo il

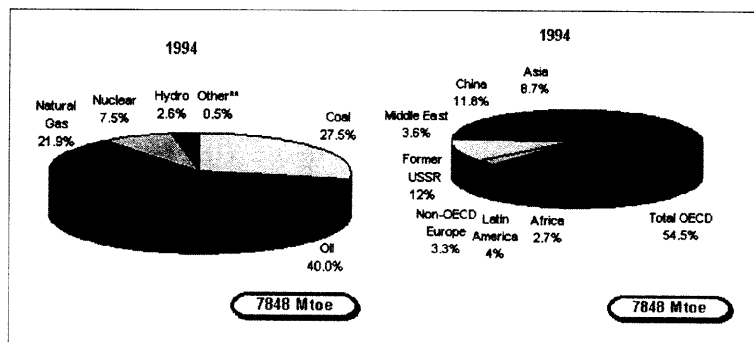


Figura 3 – (a) Raffronto dei consumi percentuali delle varie fonti di energia nel 1994. Consumo totale 7848 milioni di tonnellate di petrolio equivalente (Mtoe); (b) raffronto della ripartizione dei consumi nel mondo. (Fonte: internet - <http://www.ica.org/>).

7.5% proviene da centrali nucleari a fissione (Cfr. figura 3). Tali consumi sono destinati a crescere vertiginosamente a causa della crescita economica e del considerevole incremento demografico nei paesi in via di sviluppo. Secondo stime affidabili, verso la metà del XXI secolo la popolazione mondiale si aggirerà attorno ai 10 miliardi di abitanti, e un tale aumento rispetto agli attuali 5 miliardi e mezzo si produrrà quasi unicamente nei paesi in via di sviluppo. In un simile contesto, il fabbisogno di energia primaria potrebbe raddoppiarsi, se non triplicarsi, verso la metà del prossimo secolo. Malgrado qualche imprecisione sulle stime riguardanti la quantità di combustibili fossili ancora disponibili, è probabile che rimangano la fonte primaria per l'immediato futuro (fino agli inizi del secolo), ma risorse alternative sono indispensabili a lunga scadenza. Nonostante i paesi industrializzati stiano attualmente consumando più dei paesi sottosviluppati, quest'ultimi aumenteranno i loro consumi, e si prevede che tra paesi sviluppati e quelli in via di sviluppo si raggiungerà presto una situazione di equità per quanto concerne i consumi energetici. Stime prudenziali della crescita di energia e dell'aumento della popolazione indicano che entro 100 anni si manifesteranno dei "buchi" di energia e che approssimativamente un'economia di 30-40 terawatt (1 terawatt equivale a mille miliardi di watt) sarà necessaria entro il 2100. Mettere a disposizione poi

tenze elettriche di quest'ordine è un'impresa colossale. Tra le risorse energetiche alternative (di natura non fossile) promettenti per il futuro solo tre potrebbero essere realmente sfruttabili: energia nucleare da fissione, energia solare, ed energia nucleare da fusione.

Va premesso, che attualmente, fatta eccezione per l'energia derivante da centrali nucleari a fissione, nessuna delle altre due fonti è sufficientemente sviluppata da poter essere considerata al giorno d'oggi sia tecnicamente che economicamente praticabile, e che per sviluppare tali risorse su larga scala potrà costare cifre nell'ordine di 30.000-40.000 miliardi di lire.

Per quanto riguarda la produzione di energia nucleare per via fissione, molte perplessità e motivi di preoccupazione rimangono: primo fra tutti i rischi derivanti da un grave incidente (soprattutto dopo quello verificatosi più di 10 anni fa a Chernobyl in Ucraina) e le possibili conseguenze catastrofiche sull'ambiente, la gestione delle scorie radioattive, gli stretti collegamenti con applicazioni di tipo militare. La comunità scientifica internazionale è consapevole di tali problemi e sforzi considerevoli sono in atto per la realizzazione di impianti più sicuri. I tempi si presentano più lunghi del previsto e la penetrazione di tali reattori sul mercato rimane comunque incerta e dipenderà dalla disponibilità dell'opinione pubblica di accettare il rischio di un considerevole aumento della proliferazione nucleare particolarmente in paesi sottosviluppati. Deve essere chiaro comunque, che, per sfruttare appieno le potenzialità dell'atomo, vanno ridotti i rischi d'incidente e quelli legati alla proliferazione nucleare affidando a un organismo sopranazionale la supervisione degli impianti e delle scorie.

Fra i vari metodi di possibile utilizzo dell'energia solare il più promettente è quello che ricorre alle celle fotovoltaiche. In esse l'energia viene prodotta direttamente (anche se l'efficienza della trasformazione è piuttosto bassa - 20%) per assorbimento di fotoni in un materiale semiconduttore, processo che genera una corrente elettrica. La fonte solare però risentirà di tutti quegli svantaggi collegati all'irregolarità dell'esposizione solare su vaste aree del pianeta, e dalla considerevole superficie che è richiesta dalle celle solari per produrre grandi quantità di energia. Tuttavia essa si presenta come un promettente candidato e può rimpiazzare i combustibili

solidi soprattutto per quanto riguarda la produzione di calore per usi residenziali e commerciali, e di energia nel settore delle telecomunicazioni e in parte dell'industria. Va comunque detto che, anche se la percentuale del fabbisogno energetico che la fonte solare e le altre forme di energia rinnovabili (venti, maree, geotermia, biomassa ecc.) è probabilmente destinata ad aumentare, gli esperti concordano che esse potranno far fronte solo in modo marginale (10-20%) al fabbisogno mondiale.

Tra le possibili soluzioni a lungo termine la fusione termonucleare controllata si presenta come un promettente candidato e può costituire un importante ingrediente nell'ambito di una prudente strategia energetica rivolta allo sviluppo di nuove fonti meno soggette ai vincoli e rischi connessi con l'uso di combustibili fossili e la fissione nucleare. La fusione nucleare non è ancora una fonte di energia utilizzabile e c'è ancora parecchia strada da percorrere prima che una centrale a fusione possa essere messa in funzione. L'obiettivo è una fonte energetica che sia tecnologicamente affidabile, ambientalmente accettabile ed economicamente competitiva. La fusione così come per la fissione nucleare non presenta problemi legati all'estrazione del combustibile, all'inquinamento dell'atmosfera, alle piogge acide, e ai cambi climatici connessi con l'uso del carbone. La fusione si presenta come una fonte energetica particolarmente interessante per i seguenti motivi: (1) i combustibili primari della fusione (D, Li) sono abbondanti, poco costosi, con una distribuzione geografica uniforme e non radioattivi, fatta eccezione per il trizio, che verrà impiegato nelle macchine di prima generazione. L'acqua dei laghi e degli oceani contiene l'idrogeno pesante in misura sufficiente a soddisfare i nostri fabbisogni energetici attuali per milioni di anni; (2) una caratteristica intrinseca dell'energia di fusione è la sicurezza: il cuore del reattore contiene combustibile solo per pochi secondi di funzionamento. Inoltre la fusione presenta dei vantaggi dal punto di vista ambientale: non provoca nessun inquinamento atmosferico e quindi né piogge acide né effetto serra; (3) problemi dei residui radioattivi sono limitati: non vi sono ceneri radioattive e i gas non bruciati sono trattati sul sito. Grazie a una selezione rigorosa dei materiali di costruzione del reattore, l'immagazzinamento dei componenti della struttura meccanica interna del reattore attivati dai neutroni po-

trebbe essere inferiore a cento anni. Dal punto di vista economico è prematuro valutare esattamente l'impatto dell'energia di fusione. I costi di investimento saranno certamente più elevati rispetto alle centrali a carbone o a fissione, ma il costo del combustibile sarà molto ridotto. Tra gli obiettivi a breve termine è prevista per gli inizi del secolo prossimo la costruzione di un prototipo di reattore dove sia la fattibilità scientifica che quella tecnologica possano essere dimostrate. L'attività di collaborazione internazionale rivolta a quest'obiettivo sta acquistando un ruolo e un'importanza significativi.

Questa nota intende fornire un breve quadro di sintesi sul punto della situazione e sullo stato della ricerca in fatto di fusione termonucleare controllata, evidenziando i progressi più significativi avvenuti negli ultimi anni, e gli appuntamenti più impegnativi del futuro. La nota dedica attenzione particolare alla fusione a confinamento magnetico.

LA FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA

Il principio

La fusione è il processo nucleare che si colloca all'origine dell'energia di stelle quali il sole. Nelle stelle nuclei di atomi leggeri (prevalentemente idrogeno) si combinano – o “si fondono” – per formare elementi più pesanti (Cfr. figura 4). Il sole è un'enorme massa di fuoco “confinata” dalle forze di gravità, nella quale si producono incessantemente reazioni di fusione. Affinché i nuclei (caricati positivamente) possano essere avvicinati gli uni agli altri (possano cioè sopraffare la forza di repulsione elettrostatica che li allontana), in maniera da produrre delle reazioni di fusione in misura sufficiente, è necessario ottenere in laboratorio temperature sui 100 milioni di gradi centigradi e oltre, corrispondenti a circa dieci volte la temperatura nel centro del sole.

A queste temperature, il gas è allo stato di “plasma”, cioè una miscela di gas ionizzato composto da elettroni liberi che sono sta-

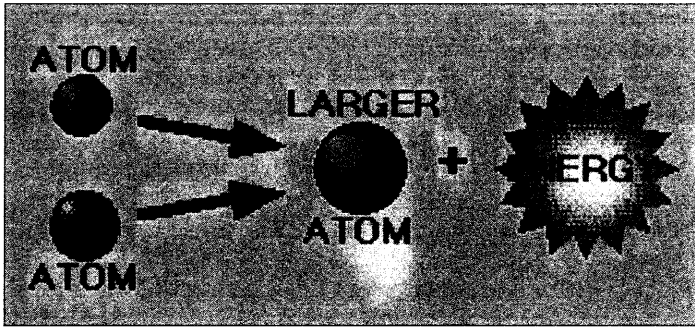


Figura 4 – Nella fusione, due nuclei di atomi leggeri (quali per esempio l'idrogeno) si combinano tra di loro (cioè si fondono) per formare un nuovo elemento, e nel processo viene rilasciata energia.

ti strappati dalle loro orbite intorno ai nuclei e da nuclei ionizzati positivamente (gli ioni e gli elettroni formano globalmente un fluido macroscopicamente neutro). Il plasma non può chiaramente essere a contatto di pareti materiali del contenitore in quanto si raffredderebbe danneggiando la “caldaia” nucleare. Nel caso della fusione cosiddetta a “confinamento magnetico” si ricorre a dei campi magnetici che permette di isolare termicamente il plasma dalle pareti materiali. Il plasma rappresenta il più abbondante stato della materia nell'universo. Esso riempie gli spazi intergalattici e costituisce le stelle e il sole.

Reazioni termonucleari nelle stelle

La fusione è la fonte di energia del sole e delle altre stelle. Una stella comincia a brillare quando la materia della sua parte centrale, sottoposta alle sue forze gravitazionali, raggiunge densità e temperature tali da innescare le reazioni termonucleari, che liberano l'energia, in modo che una parte irraggia verso il cielo (e quindi sulla terra) e l'altra compensa dinamicamente la gravitazione. In

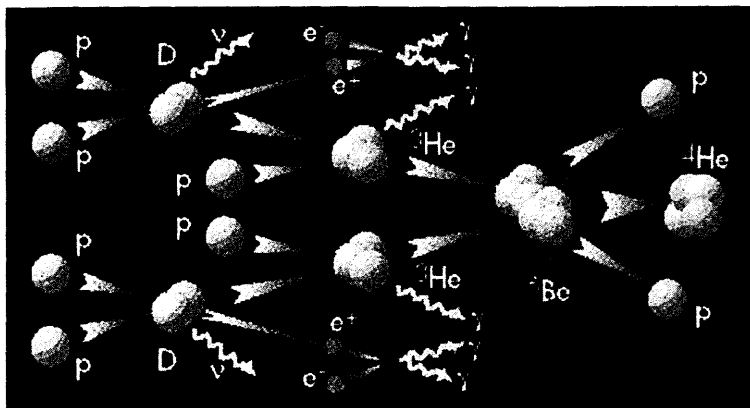
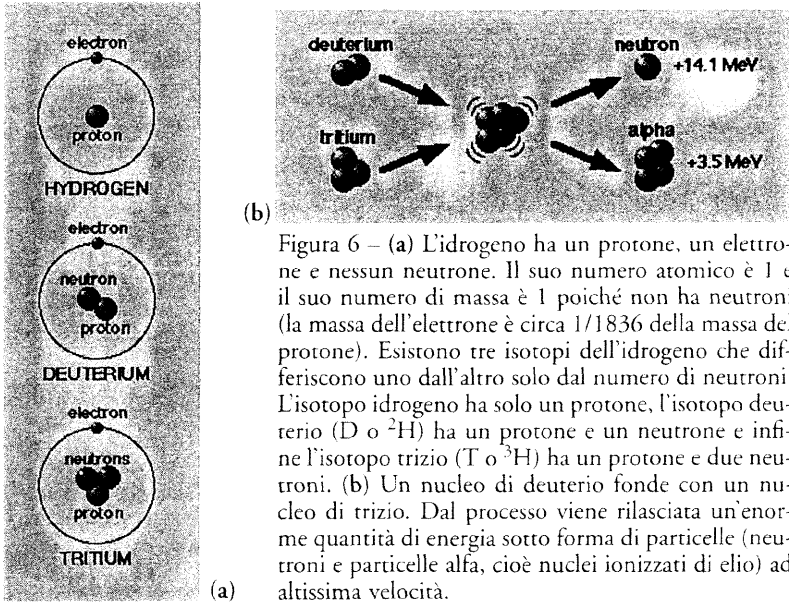


Figura 5 – Sul sole, si ipotizza che avvengono le seguenti reazioni di fusione: (1) quando due nuclei di idrogeno, vale a dire protoni (p) fondono, uno dei protoni è convertito in un neutrone e positrone (elettrone positivo) dando luogo a un nucleo di deuterio (D); (2) il deuterio e un altro protone fondono tra di loro dando luogo a nuclei di elio (^3He) e rilasciano energia sotto forma di radiazione gamma; (3) due nuclei di elio (^3He) (2 protoni e 1 neutrone) si combinano tra di loro (fondono) dando origine all'isotopo di elio più comune ^4He (2 protoni e 2 neutroni) e due protoni liberi (nuclei di idrogeno).

una prima fase, la catena principale di reazioni concerne la fusione di quattro nuclei di idrogeno per ottenerne due di elio con emissione di fotoni, neutrini, elettroni e positroni (Cfr. figura 5). In misura minore, anche l'elio comincia a fondere anche in elementi più pesanti (berillio e boro), dando luogo a un'ulteriore produzione di energia. Nelle stelle di grande massa, finita la combustione totale dell'idrogeno, predomina la gravitazione, che comprime ulteriormente il cuore della stella, dando luogo a reazioni di fusione dell'elio che generano elementi più pesanti. In una successione di contrazioni e di nuove catene di reazioni termonucleari, nel crogiolo stellare si generano e bruciano di volta in volta nuove specie nucleari. Quando le reazioni termonucleari non sono più possibili (nelle stelle con nucleo di ferro, per esempio), il ciclo vitale della stella giunge alla fine. Si produce allora una esplosione, che la trasforma in



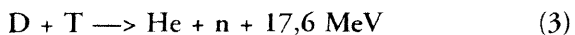
(b)

Figura 6 – (a) L'idrogeno ha un protone, un elettrone e nessun neutrone. Il suo numero atomico è 1 e il suo numero di massa è 1 poiché non ha neutroni (la massa dell'elettrone è circa 1/1836 della massa del protone). Esistono tre isotopi dell'idrogeno che differiscono uno dall'altro solo dal numero di neutroni. L'isotopo idrogeno ha solo un protone, l'isotopo deuterio (D o ^2H) ha un protone e un neutrone e infine l'isotopo trizio (T o ^3H) ha un protone e due neutroni. (b) Un nucleo di deuterio fonde con un nucleo di trizio. Dal processo viene rilasciata un'enorme quantità di energia sotto forma di particelle (neutroni e particelle alfa, cioè nuclei ionizzati di elio) ad altissima velocità.

una cosiddetta nova e l'avvia a una lenta scomparsa tipica di una cosiddetta stella nana.

Fusione termonucleare controllata

La sfida della ricerca sulla fusione è costruire sulla terra reattori che utilizzino, a vantaggio dell'umanità, reazioni termonucleari simili a quelle che avvengono nel sole. Sulla terra la reazione di fusione di interesse più immediato è quella che si verifica fra i nuclei di due forme pesanti (isotopi) dell'idrogeno: il deuterio (D) e il trizio (T) (Cfr. figura 6):

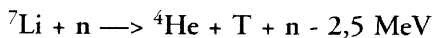
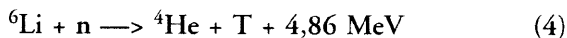


Alla fine, due nuclei di idrogeno si sono combinati, cioè fusi, dando origine a elio e rilasciando energia. Nel processo di fusione, così come nella fissione, i prodotti della reazione hanno una massa complessiva inferiore a quella di quelli di partenza. Nel processo di fusione del deuterio e del trizio che consiste nella trasformazione in elio, una piccola quantità di massa è andata persa (circa 38 parti su 10000). Scompare massa e si produce energia secondo la nota relazione di Einstein: $\Delta E \sim \Delta m \cdot c^2$. Se da un lato tale difetto di massa può sembrare molto piccolo, esso si è convertito in un enorme quantità di energia. Si ottiene in media 2000 volte più energia di quanta se ne deve immettere nel processo. Ne risulta che una minima quantità di combustibile da fusione è necessaria per produrre enormi quantità di energia se confrontata alla fissione, al petrolio e al carbone. Per esempio, se un grammo di uvetta fosse completamente trasformato in energia, il corrispondente rilascio di energia sarebbe di circa 10000 tonnellate di tritolo (TNT).

Di tutti gli elementi noti all'uomo sulla terra, gli elementi leggeri (idrogeno, elio, litio ecc.) liberano energia quando si combinano (fondono) per dare origine a elementi più pesanti. Dal lato opposto della tavola periodica degli elementi, gli elementi pesanti (uranio, plutonio ecc.) liberano energia quando vengono suddivisi (fissione) per formare elementi più leggeri. Il processo di fusione a parità di massa di combustibile, produce più energia della fissione.

Il deuterio è abbondante (30 g/m^3) nell'acqua di mare ma il trizio essendo radioattivo con un tempo di dimezzamento di 12,36 anni non esiste in quantità apprezzabili in natura: deve quindi essere generato.

In un reattore a fusione, i neutroni (n), che trasportano l'80% circa dell'energia prodotta nel processo saranno assorbiti da un "mantello" posto attorno al nocciolo del reattore stesso e contenente litio (Li) che si trasforma in trizio ed elio:



Il litio naturale (composizione isotopica: 92,5% ${}^7\text{Li}$ e 7,5% ${}^6\text{Li}$) abbonda nella crosta terrestre ed è presente, seppure in concentrazione minore, anche negli oceani.

Il mantello deve essere sufficientemente spesso (circa 1 metro) per assorbire i velocissimi neutroni di fusione (14 MeV). In conseguenza del rallentamento dei neutroni, il mantello si riscalda e il calore, trasportato fuori dalla zona del reattore da un fluido convettivo (per esempio acqua) che circola nel mantello stesso, produce vapore e infine, mediante metodi tradizionali, elettricità.

Esistono altri combustibili, diversi da miscele deuterio e trizio che potrebbero alimentare una seconda generazione di reattori. Questi combustibili "avanzati", possibili a lungo termine, producono meno neutroni ad alta energia (per esempio reazioni D - D) o addirittura nessun neutrone (per esempio reazioni D - He^3). Essi non necessitano un mantello rigeneratore del trizio e inducono nelle strutture meccaniche un livello più basso di radioattività. Tuttavia per "bruciare" questi combustibili, sarebbero però necessarie temperature di innesco molto più elevate rispetto al ciclo (D - T). Inoltre, anche se il deuterio è molto abbondante sulla terra, l'elio 3 è presente soltanto in tracce e dovrebbe essere quindi estratto con molta probabilità dalla superficie lunare.

Cenni alla fusione a basse temperature (non termonucleare)

La fusione è anche possibile a temperatura ambiente se gli elettroni negli atomi e nelle molecole di deuterio e di trizio sono sostituiti da particelle negative molto più pesanti. Una di esse è il muone negativo, una particella instabile con una massa pari a 207 volte quella dell'elettrone e una durata di vita di 2,2 μs (milionesimi di secondo). La fisica della fusione catalizzata da muoni è ben nota, ma in base ai risultati attuali, non si può sperare in un bilancio di energia positivo, perché si devono produrre i muoni mediante acceleratori di particelle che consumano molta energia; inoltre un problema è impedire il legame del muone al nucleo di elio

prodotto dalla fusione D-T prima che esso sia riuscito a catalizzare abbastanza reazioni di fusione così da rendere energeticamente redditizio il processo.

Un altro approccio, noto come "fusione fredda", è stato oggetto negli ultimi anni di dichiarazioni spettacolari anche recenti. Si tratta dell'elettrolisi dell'acqua pesante con elettrodi di palladio in cui si concentrerebbero, ad altissima densità, nuclei di deuterio. Molti esperimenti eseguiti per verificare tali risultati elettrochimici inspiegati non hanno avuto esito conclusivo in termini di generazione di energia e di produzione di reazioni di fusione.

Condizioni e approcci sperimentali della fusione termonucleare controllata

La condizione per ottenere un bilancio positivo di potenza del reattore a fusione viene espressa dal cosiddetto criterio di Lawson. Il valore calcolato nel 1957 per una miscela D - T a 100 milioni di gradi (cioè 9-10 keV) è:

$$n \cdot \tau_E > 10^{20} \text{ (m}^{-3} \cdot \text{s)} \quad (5)$$

dove n è la densità di particelle contenute nel plasma, τ_E è il tempo di confinamento dell'energia (costante di tempo di diminuzione esponenziale della temperatura di un ambiente caldo, senza apporto esterno di energia). I risultati più recenti che confermano i considerevoli passi in avanti fatti negli ultimi anni per quanto riguarda la qualità del confinamento del plasma sono rappresentati nella figura 7. In essa il parametro di confinamento del plasma, $n \cdot \tau_E$ (sec/m^3) ottenuto in varie macchine esistenti è rappresentato (e) in funzione della temperatura degli ioni.

Il primo obiettivo è il cosiddetto break-even, cioè la condizione di pareggio tra l'energia fornita e ottenuta dal processo, seguito dalla cosiddetta ignizione, cioè la combustione del plasma mediante l'energia cinetica dei sottoprodotti di confinamento della reazione di fusione. In un reattore che brucia una miscela D-T, le reazioni

PPPL participated remotely in these negative shear experiments.

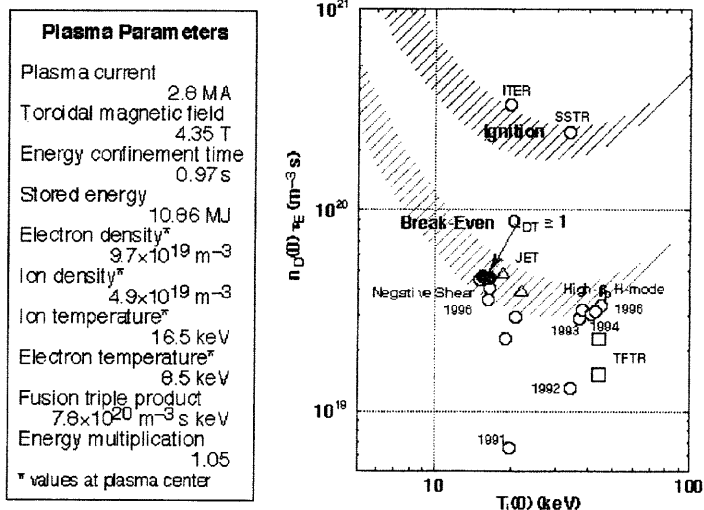


Figura 7 – Qui sono raffigurati i risultati più recenti e il progresso nella qualità del confinamento del plasma (sec/m^3) vs. la temperatura degli ioni. I dati della tabella si riferiscono ai parametri raggiunti alla fine del 1996 nella macchina giapponese JT 60U. In alcune delle macchine odierne siamo alle soglie del breakeven. L'obiettivo delle macchine future sarà l'ignizione.

saranno autosostenute dall'energia cinetica dell'elio (particella alfa) che sarà sufficiente a mantenere la temperatura di combustione (senza la necessità di un apporto esterno di energia).

La condizione di ignizione è espressa dalla formula:

$$n \cdot T_{i0} \cdot \tau_E > 6 \cdot 10^{22} \text{ (m}^{-3} \cdot \text{M K} \cdot \text{s)} \quad (6)$$

dove n e T_{i0} (per 100-200 milioni K) sono rispettivamente, la densità e la temperatura dei nuclei di D-T al centro del plasma e τ_E è il tempo di confinamento dell'energia.

Per realizzare questa condizione si seguono due diversi approcci sperimentali:

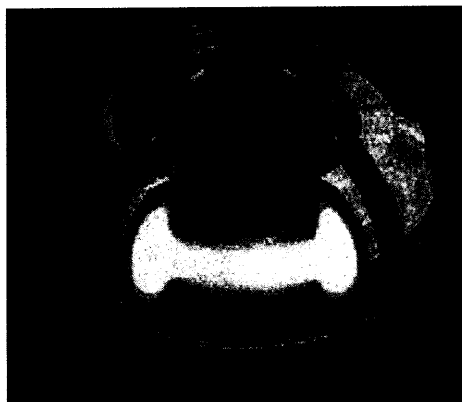


Figura 8 – Schema del principio di confinamento magnetico in un toro (in questo caso un tokamak). Il plasma ha la forma di un anello ed è mantenuto lontano dalla parete del contenitore.

1) **fusione mediante confinamento magnetico:**

il plasma caldo è confinato da campi magnetici che formano una trappola magnetica per le particelle cariche (Cfr. figura 8). In questo approccio, $n_0 \sim 10^{20} \text{ m}^{-3}$ e $\tau_E \sim 1-5 \text{ s}$).

2) **fusione mediante confinamento inerziale:**

Una sferetta di combustibile viene fortemente compressa (a più di mille volte la densità del liquido) fino a che nel suo centro non si innesca la combustione di fusione (ignizione), che si propaga nel combustibile freddo circostante (Cfr. figura 9). L'igni-

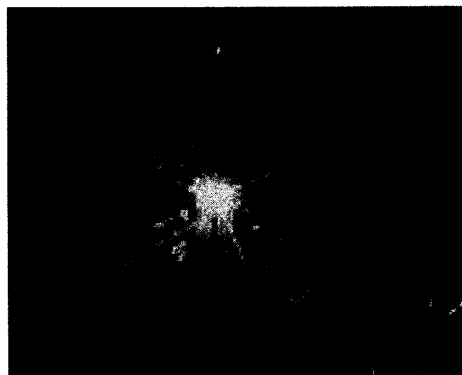


Figura 9 – Schema dell'irradiazione di un bersaglio mediante fasci laser. I fasci comprimono e riscaldano il bersaglio; dopo l'implosione, l'esplosione trasporta l'energia verso la parete.

zione dura fintanto che il combustibile rimane confinato dalla propria inerzia. In questo caso i parametri di densità e confinamento sono rispettivamente $n_0 \sim 10^{31} \text{ m}^{-3}$ e $\tau_E \sim 10^{-11} \text{ s}$.

CENNI STORICI SULLA FUSIONE

Le origini della ricerca sulla fusione risalgono agli studi sulla struttura atomica e al desiderio di comprendere la fonte di energia delle stelle. Verso la fine degli anni '20, Atkinson e Houtermans avanzarono l'idea che l'energia del sole derivasse da reazioni termonucleari; un decennio più tardi, per merito di Bethe, venne postulato il ciclo di fusione nucleare quale origine della produzione di energia del nostro sole. Nel 1932, Rutherford, Walton e Cockroft rilevarono la cattura di un protone da parte del litio 7, che decade in due particelle alfa e libera energia. Due anni più tardi, Rutherford, Oliphant e Harteck ottennero la fusione di due nuclei di deuterio che si trasformano in ^3He e un neutrone, o in trizio e un protone (entrambe le reazioni liberano energia). Negli Stati Uniti e in Unione Sovietica, le ricerche sulla fusione hanno radici nelle ricerche militari sull'energia atomica condotte durante e dopo la seconda guerra mondiale. L'affermazione del dittatore argentino Juan Peron nel 1951, secondo cui il suo paese possedeva un impianto a fusione operativo, fu uno dei fattori che accelerò le ricerche avviate dall'astrofisico Lyman Spitzer a Princeton. Nel 1951, i fisici sovietici Andrei Sakharov e Igor Tamm progettaron quello che più tardi sarebbe stato chiamato un tokamak (toroidalnya kamera ee magnetnaya katushka, ovvero macchina magnetica a geometria toroidale). Nel Regno Unito, ricerche importanti furono condotte ad Harwell, il cui dispositivo più famoso, ZETA, finì sulle prime pagine dei giornali all'inizio del 1958, quando i fisici britannici annunciarono la produzione di neutroni da fusione nucleare, un'affermazione che dovette essere in seguito smentita. Tutte le ricerche furono coperte dal segreto militare fino alla seconda Conferenza di Ginevra "Atomi per la Pace", sull'uso pacifico dell'energia atomica (1958), dove lo scambio di informazioni evi-

denziò la necessità di una conoscenza più approfondita del comportamento del plasma.

La ricerca di base proseguì nel corso degli anni '60. Nel 1968, in Unione Sovietica, fu compiuto un enorme passo in avanti con il tokamak T3 di Kurchatov, e il confinamento magnetico mediante tokamak si diffuse notevolmente nei decenni successivi. Negli anni '70, la ricerca sulla fusione entrò a far parte della cosiddetta "Big Science". I costi e la complessità dei dispositivi ebbero un tal sviluppo da rendere necessaria la cooperazione internazionale per finanziare i programmi e poter disporre di adeguate competenze tecniche. Nel 1978, la Comunità Europea (più Svezia e Svizzera) avviò la costruzione della macchina JET ("Joint European Torus") presso Abingdon, in Inghilterra. Il JET ha prodotto il suo primo plasma nel giugno del 1983 e, dopo aver raggiunto con deuterio l'equivalente del "breakeven" (pareggio scientifico), ha dato inizio, nel novembre 1991, a esperimenti, riusciti, con miscele di deuterio-trizio. Sempre nel 1978, il tokamak PLT (Large Torus di Princeton), negli Stati Uniti, ha raggiunto una temperatura del plasma superiore ai 60 milioni di gradi. Durante gli anni '80 sempre a Princeton, sono stati condotti esperimenti sul tokamak TFTR per prove di fusione (Tokamak Fusion Test Reactor). Sempre qui, nel 1993 sono state realizzate delle prove con una miscela di deuterio-trizio. In Giappone, esperimenti analoghi con il tokamak JT-60, sono stati eseguiti fin dal 1988; la macchina è stata recentemente migliorata diventando la JT-60U (upgrade), nella quale temperature del plasma dell'ordine di 450 milioni di gradi sono state raggiunte.

La prossima tappa richiede un esperimento così grande da non poter essere avviato se non nell'ambito di una cooperazione mondiale. È già stato avviato, con la piena partecipazione della Comunità Europea, degli Stati Uniti d'America, del Giappone e della Russia, uno studio di progettazione di un grande tokamak – "ITER" (International Thermonuclear Experimental Reactor) – che ha l'obiettivo di dimostrare la fattibilità fisica e tecnica, indispensabile per un reattore a fusione. Gli studi sul confinamento inerziale continuano negli USA, in Europa e in Giappone. Occorrono tuttavia vaste estrapolazioni a partire dalla tecnologia disponibile attualmente per il "driver" e per i sistemi del reattore,

prima di poter stabilire la fattibilità tecnica di un reattore basato su questo approccio.

Siamo ancora lontani dall'obiettivo finale? Nell'ottica di oggi, anche se fosse dimostrata la fattibilità fisica e tecnica di ITER, un reattore operativo e affidabile sarebbe probabilmente così complesso da poter essere valutato "non economico". Non è possibile oggi prevedere l'esito finale della ricerca sulla fusione, né il tipo di mondo in cui l'energia da fusione potrebbe apportare il contributo maggiore all'approvvigionamento di energia necessario ai bisogni dell'umanità. Sicuramente, se possiamo immaginare un mondo tecnologico, sostenibile e stabile, in cui le attuali crisi politiche e ambientali siano ragionevolmente sotto controllo, l'apporto di energia grazie alla fusione potrebbe diventare un ingrediente essenziale per il futuro. Si tratta di un'opzione che chiaramente dobbiamo mantenere aperta nei prossimi anni.

IL CONFINAMENTO DEL PLASMA MEDIANTE CAMPI MAGNETICI

Un plasma, come un gas, a causa degli urti fra le particelle, tende spontaneamente a espandersi occupando tutto lo spazio geometrico disponibile. È possibile confinarlo mediante campi magnetici, in quanto gli ioni e gli elettroni che lo costituiscono, elettricamente carichi, percorrono delle traiettorie elicoidali attorno alle linee di forza del campo magnetico (Cfr. figura 10).

In un campo magnetico rettilineo, le particelle del plasma non possono raggiungere le pareti laterali del contenitore ma, fluendo lungo le linee di forza, ne urtano comunque le pareti alle due estremità.

Per evitare questo problema, sono stati studiati due tipi di configurazione magnetica:

- **Le configurazioni lineari:** aumentando l'intensità del campo magnetico alle estremità del contenitore, la maggior parte delle particelle viene riflessa dallo "specchio magnetico" prima di ogni contatto materiale. Le perdite alle estremità (dovute agli urti fra par-

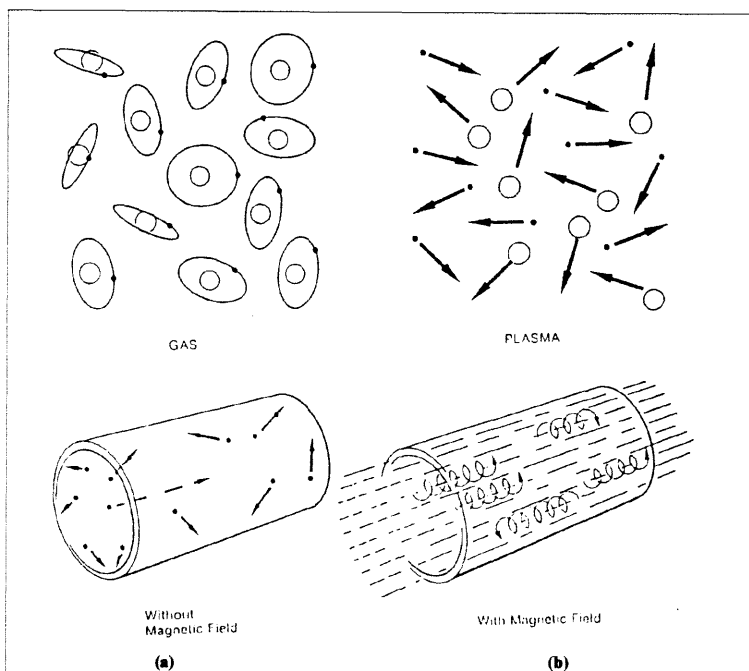


Figura 10 – Nei solidi, liquidi e gas, gli elettroni sono normalmente vincolati su un'orbita intorno al nucleo. Nel plasma, gli elettroni sono stati strappati dalle loro orbite intorno al nucleo. Il confinamento magnetico si basa sul fatto che in presenza di un campo magnetico, le particelle cariche orbitano attorno alle linee di campo magnetico e in questo modo possono muoversi solo lungo le linee di campo magnetico che mediante un'opportuna configurazione possono impedire il contatto con le pareti.

ticelle) sono considerevoli. Questi sistemi, chiamati "specchi", non sono più presi in considerazione nella progettazione dei reattori.

- **Le configurazioni toroidali:** si possono eliminare le perdite alle estremità del campo magnetico chiudendo su loro stesse le linee del campo. Lo studio teorico delle traiettorie di particelle mostra che per il loro confinamento è necessario sovrapporre al campo toroidale una componente di campo perpendicolare (campo poloidale). Le linee del campo risultante diventano traiettorie a spirale (elicoidali) attorno alle quali girano le particelle del plasma.

Si distinguono diversi tipi di sistema di confinamento toroidale, a seconda di come sono prodotte le linee del campo magnetico in forma elicoidale. I sistemi principali sono: 1) il Tokamak; 2) lo Stellarator; 3) il Reversed Field Pinch, RFP (strizione a campo invertito).

In un tokamak, il campo toroidale è creato da una serie di bobine disposte a intervalli regolari attorno al toro e il campo poloidale è creato da una forte corrente che circola nel plasma (Cfr. figura 11).

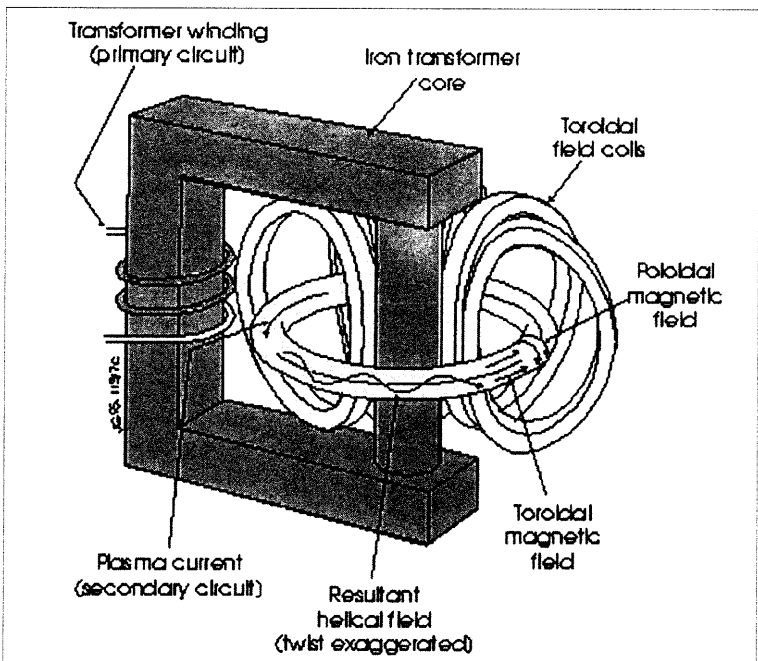


Figura 11 – In un tokamak, il plasma viene riscaldato in una camera a vuoto e viene confinato lontano dalle pareti del recipiente di contenimento mediante dei campi magnetici. Le componenti base del sistema di confinamento magnetico del tokamak sono: il campo magnetico toroidale che viene prodotto dalle bobine poste intorno al recipiente di contenimento; il campo magnetico poloidale prodotto dalla corrente che circola nel plasma. La corrente del plasma che viene indotta per azione di un trasformatore. Esistono altre bobine, che non sono raffigurate nella figura, il cui scopo è di contribuire al controllo della posizione del plasma e alla sua forma.

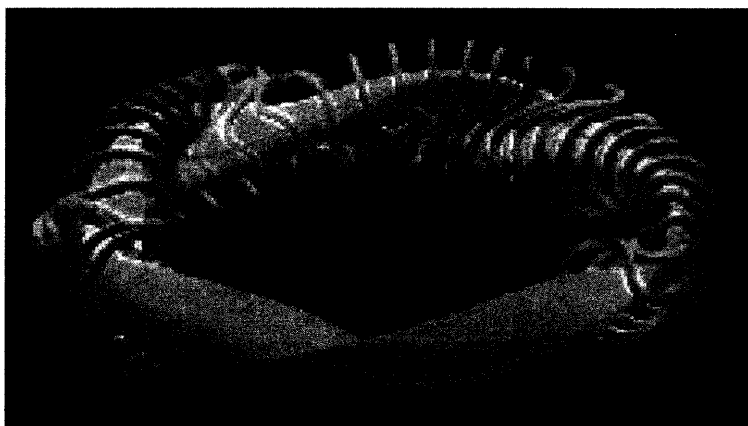


Figura 12 – Schema del plasma e delle bobine di campo magnetico nello Stellarator tedesco Wendelstein 7-X (in costruzione).

In uno Stellarator, l'elicità delle linee del campo magnetico viene ottenuta mediante una serie di bobine anch'esse di forma elicoidale (Cfr. figura 12). Nessuna corrente elettrica è indotta nel plasma.

In un Reversed Field Pinch (RFP), le componenti, toroidale e poloidale del campo, sono create come in un tokamak, con la differenza che la corrente che circola nel plasma è molto più forte che in un tokamak con lo stesso campo toroidale.

Nel tokamak e nella strizione a campo invertito, la corrente che circola nel plasma che crea la componente toroidale del campo magnetico serve anche a riscaldare il plasma mediante l'effetto joule, fino a che venga raggiunta una temperatura di circa 10 milioni di gradi. Al di là di questa temperatura, la resistività del plasma è troppo bassa perché vi sia una dissipazione significativa. Per questo motivo, sono stati messi a punto sistemi di riscaldamento supplementare per portare il plasma alle temperature termonucleari. Nel caso degli stellarator, questi sistemi di riscaldamento devono fornire tutta l'energia necessaria, in quanto nessuna corrente circola nel plasma in questa configurazione magnetica. Sono utilizzati tre metodi di riscaldamento supplementare:

- Riscaldamento mediante iniezione di neutri
Un fascio di ioni, creato e accelerato al di fuori del dispositivo di confinamento, viene neutralizzato prima di entrare nel contenitore a vuoto della macchina. Gli atomi resi neutri riescono facilmente ad attraversare lo spazio del campo magnetico di confinamento e, una volta nel plasma, tornano a ionizzarsi e così vengono confinati dal campo magnetico, cedendo al plasma tutta l'energia acquisita fuori della macchina. Gli urti ridistribuiscono l'energia e la temperatura del plasma aumenta.
- Riscaldamento mediante radiofrequenza
Il plasma può assorbire l'energia delle onde elettromagnetiche alle proprie frequenze caratteristiche (in particolare a frequenze ciclotroniche degli ioni e degli elettroni). Le antenne alimentate da potenti generatori di onde ricoprono una parte della parete interna della camera a vuoto. La frequenza selezionata determina il tipo di particelle che saranno riscaldate e la regione in cui l'onda sarà assorbita e si avrà quindi il riscaldamento.
- Riscaldamento mediante compressione adiabatica
Con questo metodo, aumentando progressivamente la componente verticale del campo magnetico, il plasma è spostato da una regione a campo magnetico debole verso una regione a campo magnetico forte. Dato che ciò implica in funzionamento pulsato con forti sollecitazioni per la macchina, questo metodo è attualmente poco usato.

La ricerca sui tokamak

L'attuale generazione di grandi macchine sperimentali ancora in funzione (JT-60U in Giappone, JET in Europa) è affiancata da un gran numero di dispositivi di taglia media per lo studio dei problemi di:

- Confinamento
Lo studio del trasporto della materia e del calore attraverso il campo magnetico, permette ai ricercatori di analizzare e descrivere il confinamento sia delle particelle che dell'energia. Si trat-

ta di esaminare un grande numero di parametri (campo magnetico, corrente ecc.) e di misurare i profili spazio-temporali di diverse caratteristiche del plasma.

– Purezza del plasma

Le impurezze liberate dalle interazioni plasma parete fanno aumentare le perdite per radiazione e diluiscono il combustibile. Operando con un “limitatore o divertore magnetico”, il plasma può essere tenuto lontano dalle componenti materiali con le quali altrimenti verrebbe a contatto. Il rivestimento della parete con materiali leggeri (B, Be, C) aiuta anche a ridurre la contaminazione del plasma dovuta al rilascio di atomi di metallo pesante dalle strutture di confinamento.

– Disruzioni

Il tokamak funziona in una gamma limitata di parametri, al di fuori della quale si ha un'interruzione istantanea della corrente, cioè una disruzione, con conseguenti forti tensioni meccaniche e termiche nella struttura e sulle pareti. Lo studio dei segni precursori di queste disruzioni consentirà di prendere misure preventive.

– Riscaldamento mediante particelle alfa

Vari esperimenti effettuati l'anno scorso nella macchina americana TFTR hanno permesso lo studio legato ai fenomeni di confinamento di particelle alfa (prodotte insieme a considerevoli potenze termonucleari a causa dell'uso del trizio) e del trasferimento di energia nel plasma. Nella fase D - T del programma JET, tuttora in corso, il contributo delle particelle alfa dovrebbe rappresentare il 20 % della potenza totale di riscaldamento. La presenza di un grande numero di particelle alfa può provocare nuove instabilità e aumentare la diluizione del combustibile. Sarà necessario un sistema efficace di estrazione delle “ceneri” di elio dalla camera di combustione.

Prestazioni attuali dei tokamak

I risultati degli ultimi anni sono molto incoraggianti e siamo adesso in condizione di raggiungere condizioni molto vicine al

breakeven in due macchine tuttora in funzione il JET, e il tokamak giapponese (JT-60U) (Cfr. figura 7). Per quanto riguarda la produzione di potenze termonucleari, va detto che si è passati dai millesimi di watt prodotti nel decennio scorso ai milioni di watt prodotti in alcuni degli esperimenti odierni. Già nel novembre 1991, sono stati fatti nel JET (che è il più grande tokamak del mondo in funzione) i primi esperimenti con una miscela D-T (limitando la concentrazione di trizio all'11%). Furono prodotti in quella occasione per pochi secondi circa 1.7 MW di potenza termonucleare. Tra il 1994 e il 1995 nel tokamak americano di Princeton, TFTR, sono state utilizzate maggiori quantità di trizio (miscela 50% D e 50% T) e si sono ottenute potenze termonucleari record di 10.7 MW, e temperature di circa 510 milioni di gradi (circa 30 volte la temperatura sul sole). Sono in corso nel JET una nuova serie di esperimenti ricorrendo all'uso di trizio e tutto lascia sperare per il raggiungimento della soglia di "breakeven".

Ricerca sugli stellarator

Sono allo studio diversi tipi di stellarator e la differenza principale è data dalla periodicità delle componenti toroidali e poloidali del loro campo magnetico. È difficile calcolare e fabbricare la forma ottimale di questi anelli, di forma elicoidale: solo l'avvento di computer molto potenti e di tecniche di fabbricazione moderne ha consentito la costruzione degli stellarator avanzati a bobine tridimensionali e modulari. Nello stellarator W7-AS (Garching, Germania), il plasma è creato e riscaldato mediante onde elettromagnetiche alla frequenza ciclotronica del plasma. La qualità del confinamento è simile a quello di un tokamak. Gli studi teorici svolti presso i laboratori di fisica del plasma dell'istituto Max-Planck di Garching presso Monaco di Baviera in Germania saranno preziosi per ottimizzare la configurazione dello stellarator W7-X, attualmente in fase di progetto. La costruzione è prevista verso la fine del secolo presso il nuovo centro tedesco di ricerca a Greifswald, nella ex-Germania dell'Est. Un altro stellarator ad avvolgimenti modulari del tipo heliac, il TJ-II è in costruzione a Madrid (Spagna). La

camera a vuoto ha anche una forma molto complessa per corrispondere alla forma del plasma e consentire un buon accesso sia alle strutture che alla diagnostica. Il vantaggio intrinseco degli stellarator è l'assenza di corrente toroidale (senza trasformatore non si hanno disruzioni) che permette un funzionamento continuo. La ricerca segue essenzialmente le stesse linee come per i tokamak.

Ricerca sulle macchine a strizione a campo invertito

Come il tokamak, questo sistema è asse simmetrico. La differenza principale tra il RFP e un tokamak risiede nella distribuzione spaziale del campo magnetico toroidale, che cambia segno al bordo del plasma. La macchina RFX di Padova ha l'obiettivo di studiare i problemi fisici di autoriorganizzazione del campo magnetico, che è la caratteristica intrinseca di questa configurazione, è stabilire le leggi di scala che governano il confinamento della configurazione RFP, per permettere di confrontarla con altre configurazioni toroidali molto più avanzate.

LA FUSIONE MEDIANTE CONFINAMENTO INERZIALE

Principio

Fasci laser o di particelle vengono focalizzati sulla superficie di una capsula di alcuni millimetri di diametro che contiene una piccola quantità di combustibile, nella fattispecie idrogeno pesante allo stato solido (cioè a bassissime temperature). L'evaporazione e la ionizzazione dello strato esterno di materia portano alla formazione di una corona di plasma che si espande verso l'esterno e, come in un razzo, crea un fronte di compressione verso l'interno con un riscaldamento progressivo degli strati interni. La parte centrale del combustibile è compressa fino a mille volte la densità del liquido e l'ignizione avviene quando la temperatura raggiunge cento milioni di gradi. La combustione termonucleare si propaga rapida-

mente attraverso il combustibile compresso, producendo una quantità di energia molte volte superiore a quella depositata dai fasci sulla capsula. Le reazioni termonucleari si verificano per una durata di tempo limitata dall'inerzia del combustibile stesso, per questo si parla di fusione a confinamento inerziale.

Metodi di irraggiamento della capsula

Il sistema più sviluppato è il laser. Impulsi potenti di radiazione laser, di durata e forma variabile e di lunghezza d'onda opportuna, possono essere focalizzati sul ridotto spazio occupato dalla capsula o dalla cavità. Tuttavia, la loro scarsa efficienza energetica (qualche per cento) ne rende poco probabile l'uso in un reattore a fusione a confinamento inerziale, a meno che non si migliori notevolmente il rendimento del pompaggio ottico. L'impianto laser più potente del mondo è il NOVA (Livermore, USA) che produce un'energia di 40 kJ a una lunghezza d'onda di 351 nm (miliardesimi di metro) per 3-4 ns (miliardesimi di secondo). I risultati non più coperti dal segreto militare, più spettacolari sono delle compressioni che raggiungono densità fino a 600 volte superiori alla densità di D - T liquido. Vi sono due metodi per depositare l'energia dei fasci sulla superficie della capsula: l'irraggiamento diretto dove più fasci laser o di particelle cariche sono dirette sulla capsula secondo la migliore simmetria possibile, e l'irraggiamento indiretto dove la capsula è posta all'interno di un rivestimento metallico sulla cui parete interna è depositata l'energia dei fasci, che produce una radiazione di corpo nero che è assorbita dalla capsula. Con questo secondo metodo, l'irraggiamento è isotropo, il che garantisce un'implosione sfericamente simmetrica, molto più difficile da ottenere con l'irraggiamento diretto. Una variante dell'irraggiamento indiretto consiste nel riempire la cavità con materiale a basso numero atomico, che riscaldato a una temperatura superiore a un milione di gradi, diventa trasparente ai raggi X e assicura un'uniformità radiativa del flusso di energia. Un'alternativa ai laser è quella di ricorrere a fasci di ioni accelerati leggeri o pesanti.

I principali temi di ricerca sulla fusione inerziale sono: l'instabilità del processo provocata da un'irraggiamento non uniforme, la tecnologia di fabbricazione di bersagli miniaturizzati e la progettazione di laser e di acceleratori avanzati. I laser a stato solido, in particolare quelli a vetro al neodimio, hanno finora dominato la ricerca, ma laser che utilizzano gas (fluoruro di cripto, iodio) si configurano promettenti, sia in termini di lunghezza d'onda che di resa e sono oggetto di intenso sviluppo in vari laboratori.

Si stanno studiando numerosi sistemi di acceleratori a ioni leggeri e a ioni pesanti per ottenere nello spazio di fase, alte densità di particelle; un metodo esplorato è la sovrapposizione di pacchetti di fasci negli anelli di accumulazione. Nella fase finale, diversi di questi pacchetti (da alcune decine ad alcune centinaia) saranno estratti da questi anelli per essere diretti simultaneamente sul bersaglio.

Gli Stati Uniti hanno da poco varato il progetto della cosiddetta National Ignition Facility (NIF), un progetto analogo è in fase di studio in Francia. Si tratta di un impianto a fusione inerziale basato sull'uso di fasci laser il cui scopo primario è di effettuare dei test per mantenere efficiente l'arsenale termonucleare senza dovere ricorrere esplosioni termonucleari su grossa scala nel sottosuolo che sono proibite da accordi internazionali.

LA FUSIONE TERMONUCLEARE A CONFINAMENTO MAGNETICO IN EUROPA E LA STRATEGIA MONDIALE

Cenni storici

L'attuale Programma Fusione dell'Unione Europea ha la sua origine nel trattato EURATOM (che risale al 1957) dove l'articolo 4 afferma che la Commissione è incaricata di promuovere e facilitare le ricerche nucleari tra cui lo "Studio della fusione con particolare riguardo al comportamento di un plasma ionizzato sotto l'azione di forze elettromagnetiche e alla termodinamica delle temperature estremamente elevate". La fusione termonucleare controllata mediante confinamento magnetico diventa da quel momento un

campo di ricerca europeo e, negli anni successivi, le varie attività nazionali furono riunite in un unico programma europeo. Nel corso degli anni '50 e '60, molte linee di ricerca furono esplorate e sperimentate per stabilirne il potenziale in termini di qualità del confinamento del plasma. A parte qualche eccezione, i dispositivi di quel periodo erano piuttosto piccoli e il plasma prodotto aveva vita breve a causa delle instabilità macroscopiche e delle impurezze che ne determinavano il comportamento. Divenne chiara la necessità di uno sforzo su scala maggiore e di dispositivi più grandi per migliorare le prestazioni del plasma. Fu così varato il progetto del tokamak più grande e potente del mondo, l'impresa Comune JET ("Joint European Torus"). Il JET è entrato in funzione nel 1983, portando l'Europa in testa alle ricerche sulla fusione.

Strategia e attuazione

L'obiettivo a lungo termine del programma della Comunità che comprende tutte le attività di ricerca sulla fusione mediante confinamento magnetico, svolte negli Stati membri dell'Unione Europea (più la Svizzera), è la realizzazione in comune di reattori prototipo sicuri e compatibili con l'ambiente, in vista della costruzione di centrali elettriche economicamente redditizie e rispondenti alle esigenze dei potenziali utilizzatori. La progressione verso questo obiettivo, comune ai quattro grandi programmi mondiali sulla fusione (EURATOM, Giappone, Russia e USA) di importanza analoga, si svolge su un arco di tempo misurabile in decenni. Dopo il JET, la strategia del programma europeo prevede un reattore sperimentale ("Next Step" o prossima tappa) e un reattore dimostrativo (DEMO).

Nel 1992 è stato sottoscritto un accordo quadripartito tra EURATOM, il Giappone, la Federazione russa e gli Stati Uniti per la realizzazione in comune del progetto di questa nuova tappa. Il progetto chiamato ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) ha l'obiettivo di dimostrare la fattibilità scientifica e tecnologica della fusione nucleare a scopi pacifici, realizzando e mantenendo l'ignizione del plasma di deuterio-trizio in impulsi a lunga

durata (circa 1000 secondi), con possibilità di esplorare regimi di funzionamento stazionario. Il reattore sperimentale termonucleare internazionale dovrebbe dimostrare l'integrazione delle tecnologie essenziali per un reattore a fusione e permettere di provare componenti nucleari e componenti resistenti a flussi elevati di calore e neutroni. ITER è concepito come un tokamak, con una geometria simile a quella di JET che rappresenta la base di dati più affidabile disponibile attualmente. I compiti di ricerca, sviluppo e tecnologia, così come una parte della progettazione propriamente detta, sono eseguiti dai gruppi dei quattro partner (cosiddetti Home Teams). L'altra parte della progettazione e l'integrazione di tutti i contributi in un unico progetto coerente sono realizzate da un gruppo centrale comune (cosiddetto Joint Central Team), composto da personale dei quattro partners, distribuito su tre siti comuni di lavoro (cosiddetti Joint Work Sites) di pari importanza che sono ubicati a:

- * Garching presso Monaco di Baviera per i componenti che costituiscono il nocciolo del reattore;
- * Naka presso Tokyo per i magneti, le strutture e i componenti nucleari; e
- * San Diego per l'integrazione di tutti i componenti e lo studio di sicurezza ambientale.
- * Infine Mosca ospita la sede ufficiale del Consiglio ITER.

Le caratteristiche principali (anche se preliminari) di ITER sono indicate qui di seguito (Cfr. figura 13):

– Potenza di fusione	1,5 GW (miliardi di watt)
– Tempo di combustione	1000 secondi
– Corrente del plasma	21 MA
– Raggio del toro	8,1 m
– Raggio del plasma (massimo)	2,8 m
– Rapporto di allungamento del plasma	1,6 m
– Campo magnetico toroidale	5,7 tesla

Secondo, i piani attuali, ITER dovrebbe essere costruito agli inizi del secolo e diventare operativo dopo dieci anni, ma si dovrà attendere la tappa successiva (DEMO) per cominciare a produrre

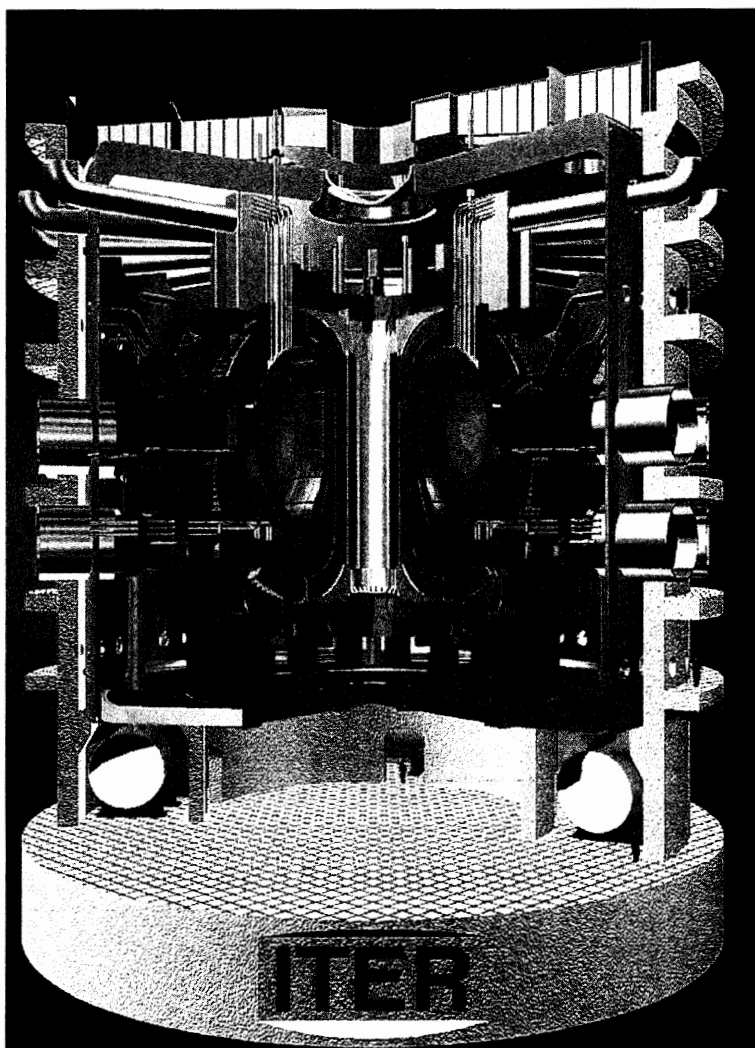


Figura 13 – Cosa ci riserva il futuro sulla fusione? Il progetto internazionale ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) sta studiando il progetto di una macchina di prossima generazione. ITER è un progetto internazionale congiunto tra Europa, Stati Uniti, Giappone e Russia. ITER, se verrà realizzato sarà di gran lunga il più grande tokamak mai costruito: circa 30 metri di diametro e 30 metri di altezza.

elettricità. Un reattore commerciale a fusione potrebbe essere disponibile a metà, del prossimo secolo. Anche se la progettazione del reattore ITER procede bene, i tempi per la sua realizzazione si prospettano più lunghi del previsto. Se la decisione per la costruzione dell'impianto era prevista per la metà del '98, uno slittamento di tale decisione sembra ormai inevitabile. Ciò è dovuto soprattutto alla crescente carenza di capitali (e anche di una precisa volontà politica) nei vari paesi che partecipano al progetto, impegnati al riassetto delle proprie finanze e costretti a ridurre i finanziamenti ai programmi di ricerca.

LA SFIDA TECNOLOGIA DELLA FUSIONE

Non c'è dubbio che le macchine a fusione del futuro, così come in parte già quelle esistenti, opereranno alle "frontiere" della fisica e della tecnologia. Al confronto della fisica della fusione, la fisica che domina i reattori a fissione può sembrare banale, e la corrispondente tecnologia elementare. Nei reattori a fissione la massima densità di potenza è dell'ordine del centinaio di watt per centimetro cubo mentre in quelli a fusione con confinamento magnetico essa risulta forzatamente inferiore almeno di un fattore dieci - cento. Per fare una macchina da 1 milione di chilowatt termici sarà necessario un volume di plasma di almeno un migliaio di metri cubi.

Per fare qualche esempio la temperatura nel caso più "facile" (cioè quando si impiegano miscele combustibile a base di deuterio e di trizio) sarà di 100 milioni di gradi. I campi magnetici saranno così elevati, che per evitare perdite ohmiche proibitive, le bobine degli elettromagneti che li generano, dovranno operare in regime di superconduttività, con adatti materiali tenuti a temperature prossime allo zero assoluto.

La densità della materia reagente sarà dell'ordine delle 10^{14} particelle per centimetro cubo. Non è molto se si pensa che l'aria a pressione atmosferica e temperatura ambiente contiene circa $3 \cdot 10^{19}$ molecole per centimetro cubo (di azoto e di ossigeno). In condi-

zioni standard la pressione nella camera a vuoto sarebbe perciò poco superiore a tre milionesimi di atmosfera. Ma la pressione del plasma, a circa 100 milioni di gradi, è dell'ordine di 100 atmosfere, e questa pressione deve essere bilanciata per effetto dei potenti campi magnetici che confinano il plasma in opportune configurazioni chiuse o semichiusate

Tuttavia si deve provvedere allo smaltimento e al recupero dell'enorme quantità di energia termica depositata dal plasma sulle pareti della camera di combustione, sotto forma di radiazione elettromagnetica e di particelle cariche, oltre all'evacuazione delle ceneri di elio prodotte (sotto forma di particelle alfa) nel processo di fusione, il cui accumulo contaminerebbe il plasma e ne impedirebbe l'autosostentamento. L'energia rilasciata nel plasma dalle particelle cariche, così come la parte delle particelle che costituiscono prodotti e reagenti della reazione non confinati bombarderebbero le pareti artificiali, costruite intorno al plasma stesso. Il mantenimento della purezza del plasma, al fine di minimizzare le perdite radiative dovute agli inevitabili processi di interazione del plasma con le pareti circostanti durante il funzionamento è uno dei requisiti più importanti.

Le regioni più interne saranno attraversate da flussi intensi di neutroni veloci che portano con sé i quattro quinti dell'energia di reazione. Tale energia cinetica verrà dissipata ed eventualmente recuperata sotto forma di calore dal fluido di raffreddamento (acqua, oppure elio o metalli liquidi). Nel caso della fissione, i neutroni devono essere catturati entro la macchina stessa, minimizzando le perdite per tenere in vita il processo a catena. Nel reattore a fusione basato sulla reazione tra deuterio e trizio, i neutroni sono un prezioso "comburente" ma sono anche portatori della massima parte dell'energia di reazione. Essi devono quindi uscire dalla zona del plasma, sia per utilizzarne l'energia cinetica e contemporaneamente per consentire la produzione del trizio, a partire da composti solidi o liquidi a base di litio. L'energia cinetica dei neutroni e l'energia liberata dalle reazioni tra i neutroni e i materiali componenti il mantello rappresenta la sorgente energetica per cui il reattore è stato costruito. Si tratta di flussi neutronici almeno cento volte superiori ai flussi che si riscontrano sulla superficie dei reattori a fissio-

ne. La durata dei materiali investiti da questi flussi sarà pertanto molto più breve. Di qui la necessità di una robotica spinta e di un progetto predisposto e pronto al rapido smontaggio e al successivo rimontaggio delle parti danneggiate.

Qui di seguito sono raggruppati alcuni dei settori più critici della tecnologia collegata alla fabbricazione dei componenti, allo sviluppo di nuovi materiali ecc. per la realizzazione della macchina cosiddetta di "prossimo-passo".

Magneti superconduttori

Quasi tutte le macchine Tokamak esistenti sono costruite con bobine in rame. Nelle macchine del futuro, i campi magnetici saranno così elevati, che per evitare perdite ohmiche proibitive, le bobine degli elettromagneti, devono operare in regime di superconduttività, con adatti materiali tenuti a temperature prossime allo zero assoluto. Le densità di corrente richieste sono intorno ai 500-800 A/mm² e si deve ricorrere ad appositi materiali superconduttori, quali leghe di niobio-stagno e niobio-titanio, che mantenuti al di sotto di una certa temperatura critica subiscono un "cambiamento di stato" che rende nulla la loro resistività elettrica. Con queste leghe vengono realizzati avvolgimenti che, immersi in una matrice stabilizzante di rame, sono poi inglobati in uno speciale conduttore, anch'esso di rame. Come refrigerante, si usa elio liquido (a circa 4 K cioè a 269 °C sotto zero) che viene portato a contatto con la lega tramite apposita canalizzazione. Il comportamento dei magneti superconduttori è largamente influenzato dal danno da irraggiamento neutronico. Negli stabilizzatori, in genere composti di rame o alluminio, l'effetto della radiazione neutronica è quello di aumentare la loro resistenza elettrica, rendendoli inefficienti. Gli isolanti organici sono l'elemento più sensibile alle radiazioni: infatti i pochi neutroni che raggiungono i magneti superando lo schermo e i raggi gamma provenienti dai materiali attivati ne pregiudicano le proprietà chimico-fisiche. È stato osservato che la struttura cristallina viene completamente alterata da qualsiasi tipo di radiazione, rompendone i legami molecolari.

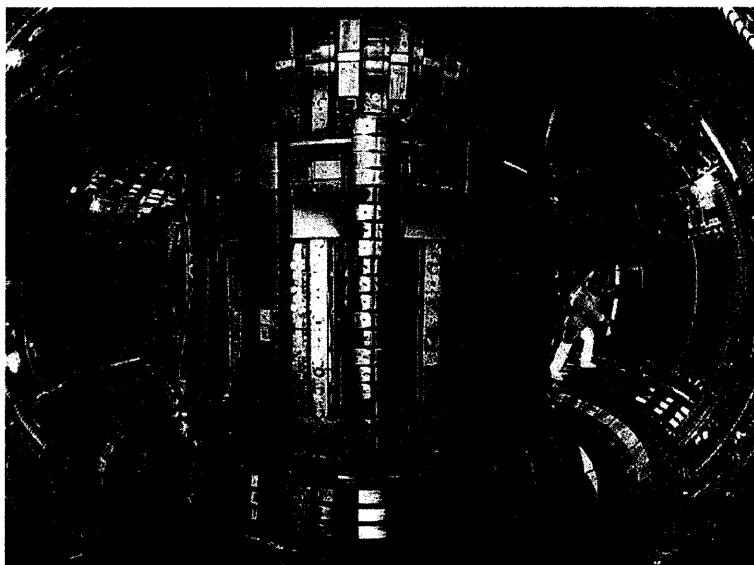


Figura 14 – L'interno del tokamak JET e i componenti esposti al plasma per la protezione della parete. *Fonte JET.*

Componenti esposti al plasma

La **prima-parete** - prospiciente il plasma è la barriera di protezione per gli altri componenti contro i carichi termici (tipicamente la radiazione elettromagnetica emessa dal plasma), è l'erosione dovuta all'impatto con flussi di particelle energetiche prodotta da plasma durante il funzionamento (Cfr. figura 14 dove è raffigurata la prima parete e i componenti prospicienti il plasma nel tokamak JET). La radiazione elettromagnetica deposita sulla superficie della prima parete una quantità sensibile di calore, che deve essere asportato continuamente. La temperatura alla superficie è perciò più alta della temperatura delle altre parti. Questo gradiente di temperatura è causa di sollecitazioni meccaniche dovute all'espansione termica. Per gradienti elevati, queste sollecitazioni possono superare il limite elastico e indurre nel componente delle deformazioni plastiche. In aggiunta, si avranno sulla prima parete degli shock termici

dovuti alle instabilità distruttive e agli elettroni relativistici di “*run-away*”. Il modo di operazione del plasma, almeno nelle macchine di “prossimo-passo”, non sarà continuo ma è previsto pulsato, con una durata media dell’impulso di circa 15 minuti, alternati da una fase di spegnimento del plasma che probabilmente durerà qualche minuto. Come conseguenza il gradiente termico, e le conseguenti tensioni nei componenti, variano nel tempo. La prima parete sarà così soggetta a un ciclaggio termo-meccanico con regole molto simili a quelle della fatica oligociclica (*low cycle fatigue*). Sono in corso grossi sforzi per meglio capire la fenomenologia e migliorare le prestazioni. Per supplire alla mancanza di dati sperimentali sul comportamento dei materiali e di codici necessari per la progettazione in queste condizioni di funzionamento, si stanno infatti eseguendo numerosi esperimenti per raccogliere dati su questo tipo di fatica.

L’erosione della prima parete dovuta a particelle neutre è un fenomeno fondamentale che influisce sulla durata di questo componente. Si deve pertanto ricoprire la parete con materiali protettivi che possano venire erosi senza contaminare eccessivamente il plasma e senza compromettere il funzionamento del componente. Materiali a basso numero atomico, quali berillio, grafite e materiali di fibra di carbonio, vengono attualmente considerati in quanto meglio tollerati dal plasma. Gli effetti derivanti dall’erosione di tali materiali unitamente agli effetti derivanti dal danno neutronico, sembrano essere tali da rendere necessaria una loro sostituzione o rigenerazione periodica.

Il divertore - Il divertore è il componente che nel Tokamak dovrà lavorare nelle condizioni più gravose. La sua funzione è quella di asportare le “ceneri” della reazione, vale a dire i nuclei di elio e al tempo stesso evacuare una considerevole parte della potenza termica associata alle particelle cariche, che si è detto ammontare a circa il 20% della potenza totale generata. Il carico termico dovuto al flusso di particelle del plasma viene dirottato e concentrato sulle piastre del divertore attraverso una regione adiacente alla prima parete (chiamata di *scrape-off*) dove convergono le linee magnetiche che lambiscono il plasma e guidano le particelle cariche in una regione remota collocata nella zona inferiore del Tokamak. L’erosione della parete e l’inquinamento conseguente del plasma nella camera prin-

cipale vengono così drasticamente ridotti. L'inconveniente è che sulle piastre del divertore la concentrazione del flusso termico può arrivare a valori di circa 15-30 milioni di watt per metro quadro. Gran parte delle soluzioni finora proposte consentono una durata di vita del divertore molto ridotta, rendendo necessarie frequenti sostituzioni. Numerosi esperimenti e sforzi di modellizzazione sono tuttora in corso per studiare la praticabilità di una soluzione ingegneristica di divertore che mantenga una densità dei neutri molto elevata nelle zone adiacenti le superfici delle piastre. In tal modo sarebbero favoriti dei fenomeni di dissipazione della potenza termica entrante nella camera del divertore per via radiativa o mediante fenomeni di scambio di carica e di collisione atomica e molecolare, su superfici più ampie e di conseguenza sarebbero evitati o drasticamente ridotti gli intensi carichi termici depositati sulle piastre dalle particelle cariche. Pur essendo il flusso neutronico sul divertore leggermente inferiore rispetto a quello della prima parete, molti dei problemi associati al danno prodotto dai neutroni permangono. I problemi di erosione delle superfici di tale componente durante il normale funzionamento e le instabilità distruttive (nel caso del divertore, le energie in gioco sono circa 500 Joule/cm^2), come pure quelli di fatica termica diventano per questo componente di importanza primaria. Per quanto riguarda la protezione dei sistemi di rimozione del calore (probabilmente in leghe di rame) si pensa a materiali a base di fibre di carbonio, berillio e tungsteno.

Telemanipolazione

Contrariamente a quanto accade nelle macchine attuali dove gli interventi di manutenzione di parti danneggiate nel tokamak vengono effettuate manualmente, ITER sarà una macchina dove la riparazione e la sostituzione dei componenti dovrà essere effettuata in modo robotizzato e remotizzato a causa della forte radioattività indotta all'interno del tokamak che impedirà ogni accesso umano. Va detto comunque che anche nei tokamak attuali dove vengono utilizzate quantità limitate di trizio l'accesso umano è impossibile almeno per un certo periodo di tempo, e cioè fino a quando la ra-

radioattività indotta dai neutroni prodotti nelle reazioni D-T nelle strutture si riduce a livelli tollerabili e il trizio residuo che è rimasto nella macchina viene recuperato. Grossi sforzi e investimenti per lo sviluppo della tecnologia di rimozione remotizzata sono in atto in Giappone e in Europa. Per esempio presso il Centro Comune di Ricerca di Ispra e di Karlsruhe, sono messi a punto dei robot progettati specificamente per la sostituzione dei moduli del mantello di un reattore a fusione di tipo tokamak. Per gli interventi all'interno della camera a vuoto sono stati costruiti presso il JET grandi bracci robotizzati in grado di caricare una tonnellata all'estremo dell'escursione orizzontale di 9 m e 400 kg con un'escursione di 14 m. I lavori di manutenzione e riparazione attorno ai tokamak richiedono telemanipolatori di grande potenza.

Riscaldamento del plasma

Se l'estrapolazione della tecnologia di riscaldamento alla frequenza ciclotronica degli ioni non solleva grandi problemi, lo stesso non vale per i generatori alla frequenza ciclotronica degli elettroni. Per questo motivo, l'Europa sostiene uno sviluppo industriale di sorgenti di onde millimetriche (girotroni) con una forte potenza nominale (> 1 MW), che agisce per molti secondi. Gli iniettori di neutri basati su fasci di ioni negativi, la cui neutralizzazione ad altissima tensione (500-1000 kV) è più efficace che per gli ioni positivi, sono anche oggetto di studi particolari ed è in corso un programma di sviluppo, particolarmente in Giappone.

Il mantello schermante

L'utilizzo di miscele deuterio e trizio in alcune delle macchine esistenti è piuttosto limitato – la maggior parte degli esperimenti viene effettuato con miscele idrogeno deuterio – e comunque tale da non indurre preoccupazioni di schermaggio dei magneti. Tuttavia la macchina di "Prossimo-Passo" e i reattori futuri genereranno enormi quantità di neutroni e il mantello avrà come scopo

fondamentale la protezione dei materiali isolanti dei magneti superconduttori e di ridurre il flusso dei neutroni sui magneti di circa 1 milione di volte rispetto al flusso sulla prima parete.

L'utilizzo e la produzione del trizio

Nelle macchine del futuro è prevista la generazione diretta del trizio necessario al processo di fusione nel plasma, per effetto dell'assorbimento dei neutroni da parte del litio presente sotto forma di composti solidi ceramici, nella fattispecie ossidi di litio come Li_2O , LiAlO_2 , Li_4SiO_4 , Li_2ZrO_3 , più un mezzo moltiplicante come il berillio; o metalli liquidi come il Li puro o leghe contenenti litio. Nella macchina di "prossimo-passo" almeno nella fase iniziale di funzionamento, si sta pensando di utilizzare il trizio che sarà reso disponibile da altre tecnologie (reattori a fissione canadesi ad acqua pesante, smantellamento delle testate nucleari ecc.). L'inventario totale del trizio in un reattore a fusione sarà dell'ordine di 1 kg, mentre gli scarichi nell'ambiente in regime normale dovrebbero essere inferiori a 2 g l'anno. Le dosi ricevute dalla popolazione resterebbero così inferiori all'1% di quella dovuta alla radioattività naturale. L'affidabilità e la manutenzione dei circuiti del trizio pongono quindi problemi notevoli. I processi di depurazione dei gas all'uscita della camera a vuoto, i mezzi di accumulo su appositi "letti" di uranio, i sistemi di pompaggio ad alta capacità ecc. sono sviluppati in laboratori specializzati nella manipolazione del trizio. Il sistema progettato, già applicato presso il JET e il TFTR per immagazzinare, distribuire e ritrattare il trizio, ha portato un fruttuoso insegnamento. In Europa, la gran parte della ricerca sulla tecnologia del trizio viene svolta presso il Centro Comune di Ricerca di Ispra (Italia) e l'impianto FZK di Karlsruhe (Germania).

Sicurezza e impatto sull'ambiente

Gli studi di sicurezza mirano a descrivere le conseguenze dei principali incidenti di riferimento (perdita di raffreddamento, perdita di potenza elettrica, conseguenze di un incidente nel sistema trizio

ecc.). In caso di malfunzionamento accidentale, il plasma si estinguerebbe in brevissimo tempo (< 5 s), senza provocare la fusione dei componenti critici. L'attivazione dei materiali durante la vita di un reattore richiederà il trattamento delle scorie radioattive. Anche se il volume dei materiali attivati è paragonabile a quello delle scorie di un reattore a fissione, il rischio biologico delle scorie della fusione è, dopo 10 anni, mille volte inferiore a quello delle scorie della fissione, grazie all'assenza dei cosiddetti attinidi e alla vita molto più breve dei prodotti attivati dalla fusione.

Il problema dei materiali

I materiali pongono problemi cruciali per il reattore a fusione con confinamento magnetico e per gli aspetti di sicurezza e impatto ambientale a esso connessi. Le condizioni di esercizio dei materiali sono molto gravose e tali che le loro proprietà fisico chimiche si deteriorino rapidamente, limitandone la durata di vita. Tra i principali problemi citiamo quelli relativi all'irraggiamento intenso da flussi di neutroni (che produce surriscaldamento, indurimento della matrice con perdita di duttilità, rigonfiamento, scorrimento viscoso ecc.), e all'irraggiamento da flussi di particelle (che produce surriscaldamento, erosione, accumulo e permeazione del trizio). Inoltre i problemi relativi alle sollecitazioni termiche e alla corrosione nel mantello che circonda la prima parete e nel quale avviene la conversione dell'energia da fusione nucleare in termica, l'autofertilizzazione del litio in trizio; l'attivazione dei materiali strutturali legati alla produzione di nuclei radioattivi indotti sotto irraggiamento con neutroni veloci.

La soluzione di questi problemi, in parte nuovi e comunque spesso diversi da quelli incontrati con i reattori a fissione, richiede l'intervento interdisciplinare di competenze di fisica della materia, di chimica, e di ingegneria. È necessario che si studino i meccanismi di deterioramento dei materiali, spesso non ancora ben noti, che se ne determinino i limiti accettabili di utilizzazione e che si cerchino dei rimedi per estendere le capacità operative di tali materiali. Queste considerazioni sono fondamentali per l'avvio di programmi relativi ai materiali per la fusione. Va detto che tutti i risultati sperimentali

che finora sono stati ottenuti irraggiando con neutroni di reattori a fissione e con particelle provenienti da acceleratori. Il danno generato in questo modo non è del tutto rappresentativo del danno prodotto da uno spettro neutronico tipico di un reattore a fusione, mancando soprattutto gli effetti dei neutroni ad alta energia. Per verificare la validità dei dati ottenuti con questi mezzi di simulazione, sarà necessaria almeno una verifica quantitativa con uno spettro reale di fusione ottenibile con una sorgente intensa di neutroni da 14 MeV.

Un importante problema che si va delineando e che assumerà un ruolo predominante per i reattori commerciali è la radioattività indotta nei materiali impiegati. Per risolvere il problema dell'impatto ambientale, un passo decisivo sarà quello di sviluppare materiali strutturali i cui prodotti di attivazione decadano rapidamente a livelli tali da rendere possibile un riciclaggio o, almeno, uno stoccaggio semplice dei vari componenti. Uno degli obiettivi a lungo termine del programma di sviluppo dei materiali e di utilizzare elementi che possono essere riciclati dopo, al massimo, 50-100 anni.

CONCLUSIONI

Contrariamente a quanto è accaduto per altre fonti, quali il nucleare da fissione e i combustibili fossili, in cui reattori sperimentali di piccole dimensioni, potenze e costi limitati, hanno in tempi brevi spianato la strada alle attuali centrali commerciali, nel caso della fusione a confinamento magnetico, ci si è presto accorti che la fattibilità scientifica non poteva essere dimostrata con esperimenti relativamente semplici, di dimensioni, e quindi di costo contenuto. I vincoli imposti dalla fisica determinano le dimensioni minime e la potenza di un reattore sperimentale la cui "taglia" sembra essere molto simile a quella dei futuri reattori commerciali e pertanto richiede grossi investimenti di capitale e lunghi tempi di realizzazione. Attualmente gran parte degli sforzi sono concentrati verso lo sviluppo della tecnologia e ingegneria di base necessarie alla realizzazione del cosiddetto prossimo passo o "next-step" che prevede la realizzazione di un reattore in cui sia la fattibilità scientifica sia quella tecnologica possono essere dimostrate contemporaneamente. Si tratta di un impianto

di grosse dimensioni e di costi molto elevati. Le dimensioni della sfida e gli sforzi non ultimo quello economico (i costi per la costruzione di tale impianto sono stimati intorno ai 10 miliardi di dollari) rendono questo obiettivo formidabile e sottolineano l'importanza che hanno assunto in questo senso attività di coordinazione e collaborazione internazionale simili a quelle avviate con il progetto ITER per minimizzare gli sprechi e le eventuali duplicazioni, e soprattutto per ottimizzare le diverse risorse nazionali. Anche se la progettazione del reattore ITER procede bene, i tempi per la sua realizzazione si prospettano più lunghi del previsto. Se la decisione per la costruzione dell'impianto era prevista per la metà del '98, uno slittamento di tale decisione sembra ormai inevitabile. Ciò è dovuto soprattutto alla crescente carenza di capitali da destinare alla ricerca nei vari paesi che partecipano al progetto. In un certo senso ci si trova in una situazione di stallo, in quanto se da un lato i problemi contemporanei di carattere ambientale, politico ed economico sulle attuali risorse disponibili e utilizzabili incoraggiano la ricerca di fonti alternative di interesse pratico, e tra queste si è visto che la fusione è uno dei pochi candidati in gioco, dall'altro la crescente carenza di capitali e di determinazione politica sembra compromettere seriamente la determinazione e l'incisività per arrivare in tempo utile al traguardo.

BIBLIOGRAFIA CONSIGLIATA

Sono qui di seguito riportate alcune fonti bibliografiche consigliate per coloro che fossero interessati ad approfondire alcuni dei problemi affrontati in questa nota.

Energia e ambiente

- R.L. McCrory, Jr., "Energy supply and demand in the twenty-first century", *Journal of Fusion Energy*, Vol. 8 N. 1/2, pp. 127-133, giugno 1989 (in inglese).
- "Energia per il pianeta terra", Numero Speciale delle Scienze (edizione italiana di Scientific American), N. 267, novembre 1990.

- L. Gouni, “*The energy scene in the mid-21st century*”, in Safety, Environmental Impact, and Economic Prospects of Nuclear Fusion, pp. 81-94, Plenum Publishing Corporation, New York 1990 (in inglese).
- E. Salpietro, A. Boschi and M. Sironi, “The ultimate energy source: Fusion”, International Journal of Global Energy Issues, Vol. 3, No. 4, (1991) pp. 210-216 (in inglese).
- C.P. Zaleski, “*Clean energy for Europe in transition*”, Atti della Terza Conferenza MIEC, marzo-aprile 1992 (in inglese).
- “*Climate change*” 1995, ed. by J.T.Houghton et.al. Cambridge University Press, 1995 (in inglese).
- “The energy Source Book”, ed. by Ruth Howes and A.Fainberg, AIP, New York 1991, (in inglese).
- E.Linden, “*Warnings from the ice*”, Time, aprile 14, 1997, p 56 (in inglese).
- R.Toschi, “*Nuclear fusion, an energy source*”, Proceedings of the 19th Symposium on Fusion Technology, Lisbon, 16-20 settembre 1996, (in inglese).
- Internet: <http://www.iaea.org/>
- S. Barabaschi (Chairman), F. Fuster Jaume, Sir J. Hill. L. Ingelstam, F. Troyon, H. Van der Laan, J.P. Watteau, “*Fusion Programme Evaluation 1996*”, EUR 17521, dicembre 1996, (in inglese).

La fusione termonucleare controllata

- W.C. Cough, B.J. Eastlund, “*The prospects of fusion power*”, Scientific American, 824, pp. “50-64”, 25, 1971, (in inglese).
- W. M. Stacey, “*Fusion plasma analysis*”, John Wiley & Sons Inc., 1981, (in inglese).
- P. Caldirola, R. Pozzoli, E. Sindoni, “*Il fuoco della fusione termonucleare controllata*”, Biblioteca della Est, 1 ed., novembre 1984.
- R. Herman, “*Fusion, the search for endless energy*”, Cambridge University Press 1990 (in inglese).
- Il rapporto del Fusion Programme Evaluation Board per la Commissione CEE, riportato integralmente in Energia Nucleare, Anno 7, N. 3, settembre-dicembre 1990, pp. 7-52 (in inglese).

- E. Sindoni “*Fusione nucleare: la sorgente d’energia del terzo millennio*”, La Nuova Secondaria, No. 4 del 15 Dicembre 1992.
- R. Pozzoli “*La sfida della fusione*”, La Nuova Secondaria, No. 4 del 15 dicembre 1992.
- G. Federici, R. Toschi, R. Matera, “*Alla ricerca del fuoco inesauribile: la sfida della fusione termonucleare controllata*” Quaderni Fondazione SIPEC QFS/3, 1993.
- G. Federici: “*Fusione termonucleare controllata a confinamento magnetico: lo stato della ricerca e le prospettive del futuro*” Nuova Secondaria No. 3, 15 novembre 1994, anno XII, pp. 35-48.
- “*Addomesticare l’energia delle stelle*” - Pubblicazione divulgativa della Commissione dell’Unione Europea: Expo Fusione: Brochure 008-It.

La fisica del plasma termonucleare

- L.A. Artsimovich, “*Fisica elementare del plasma*”, Editori Riuniti, Roma, 1975.
- R. Pozzoli, “*Fisica del plasma termonucleare e astrofisico*”, CLUED, 1984.
- F. Chen, “*Introduction to plasma physics and controlled fusion*”, 2nd ed. - Plenum Press, 1984 (in inglese).
- L.E. Pasinetti “*Plasmi astrofisici*”, La Nuova Secondaria, No. 4 del 15 Dicembre 1992.
- G.M. Proserpi “*Il plasma e la fusione nucleare*”, La Nuova Secondaria, No. 4 del 15 dicembre 1992.

Macchine a fusione a confinamento magnetico

- C.C. Baker, G.A. Carlson, R.A. Krakowski, “*Trends and developments in magnetic confinement fusion reactor concepts*”, Nucl. Technol./ Fusion, 1, 1981, pp. 5-78.
- C. Casci, U. Carretta, F.R. Casci, “*Introduzione ai problemi della fusione termonucleare controllata*”, Masson Italia Editori, 1983 (in inglese).

- W. M. Stacey, “*Fusion: an introduction to the physics and technology of magnetic confinement fusion*”, John Wiley & Sons Inc., 1984 (in inglese).
- E. Bertolini e il JET Team, “*The JET project*”, Energia Nucleare, Anno 8, N. 3, settembre-dicembre 1991, pp. 5-26 (in inglese).
- J.G. Cordey, R. Goldston, R. Parker, “*Progress toward a tokamak fusion reactor*”, Physics Today, gennaio 1992, pp. 22-30 (in inglese).
- M. Ferrari, G. Simbolotti, V. Zampaglione, “*Dimensionamento dei reattori a confinamento magnetico di tipo tokamak*”, Energia Nucleare/ Anno 12/ N.2/ maggio-agosto 1995, pp. 32-57.

La strategia del prossimo-passo e il reattore internazionale ITER

- R. Aymar and the ITER Team, “*Progress of the ITER EDA*”, Fourth International Symposium on Fusion Nuclear Technology, Tokyo, Japan, aprile 6-11, 1997, (in inglese).
- R.W. Conn, V.A. Chuyanov, N. Inoue, D. Sweetman, “*The International Thermonuclear Experimental Reactor*”, Scientific American, aprile 1992, pp. 75-80 (in inglese).
- Internet: <http://www.itereu.de>.
- Serie di articoli sulla rivista Nature, vol. 388 -10 luglio 1997 (in inglese).

La fusione a confinamento inerziale

- M.J. Lubin and A. P. Fraas, “*Fusion by laser*”, Scientific American, Vol. 224, N. 6, giugno 1971, pp.21-33 (in inglese).
- A. Caruso, “*Stato della ricerca sulla fusione a confinamento inerziale*”, Energia Nucleare, Anno 8, N.3, settembre-dicembre 1991, pp. 27-33.
- J.D. Lindl, R.L. McCrory, E.M. Campbell, “*Progress towards ignition and burn propagation in inertial confinement fusion*”, Physics Today, settembre 1992, pp. 32-40 (in inglese).

- W. J. Hogan, R. Bangerter, G.L. Kulcinski, “*Energy from inertial fusion*”, *Physics Today*, settembre 1992, pp. 42-50 (in inglese).
- S. Atzeni, “*La fusione a ioni pesanti*”, Atti del convegno tenutosi a Frascati il 25-28 maggio, 1993, *Il Nuovo Cimento A*.

La fusione fredda

- J. Rafelski and S. E. Jones, “*Cold nuclear fusion*”, *Scientific American*, luglio 1987, pp. 66-71 (in inglese).
- E.F. Mallove, “*Fire from ice: searching for the truth behind the cold fusion furor*”, Wiley, New York 1991 (in inglese).
- J. R. Huizenga, “*Cold fusion: the scientific fiasco of the century*”, Oxford University Press 1993 (in inglese).

I problemi dei materiali per i reattori a fusione

- Atti del convegno “*Ricerca, sviluppo e tecnologie dei materiali per i reattori a fusione*”, tenuto a Frascati 4-6 dicembre 1990 e organizzato dall'Associazione Italiana di Metallurgia (AIM) e dal Comitato Nazionale per la Ricerca e Sviluppo dell'Energia Nucleare e delle Energie Alternative.
- P. Schiller, “*Fundamental problems o materials research for fusion*”, *Materials Science Forum* Vols. 97-99, (1992) pp. 397-406 (in inglese).

