

IGNIZIONE DI UN PLASMA: UNA TAPPA PRIORITARIA NEL CAMMINO VERSO L'ENERGIA DA FUSIONE

di Raffaele Conversano, Franca Magistrelli

In questo articolo viene messo in chiaro come la realizzazione, in laboratorio, di un plasma in condizioni di ignizione sia un passo indispensabile, urgente e assolutamente prioritario se veramente si vuole procedere verso l'ottenimento di energia da fusione nucleare. Descrivendo lo svolgimento della ricerca fusionistica nel mondo viene peraltro evidenziato come, purtroppo, questa esigenza sembri non essere recepita. Infatti, le linee di ricerca prevalentemente seguite consistono nella progettazione di dispositivi, giganteschi e costosissimi, che non permettono il raggiungimento dell'ignizione. Mentre la linea delle macchine compatte ad alto campo magnetico, che, passando per l'ignizione del plasma, potrebbe veramente portare alla realizzazione di un reattore a fusione, viene non solo ostacolata, ma spesso anche occultata. Quali che siano le motivazioni per questa condotta, è comunque evidente che esse devono essere di natura politico-economica, non certo scientifica; come se a livello di "decisori" esistesse la precisa volontà di non procedere verso l'ottenimento di energia da fusione.

INTRODUZIONE

Scorrendo la letteratura riguardante la ricerca sulla fusione termonucleare controllata capita, ormai ricorrentemente da molti anni, di leggere che il tempo che occorrerà per giungere alla realizzazione di un reattore a fusione è di circa 30 anni. Come se un $\Delta t=30$ anni fosse una sorta di costante caratteristica della fisica della fusione, indipendente dall'istante dal quale si inizia a contare il tempo. E naturalmente ciò viene rilevato da più parti con comprensibile ironia. La realtà è purtroppo un'altra. E cioè: se la ricerca fusionistica nel mondo continuerà ad essere condotta secondo le linee finora prevalentemente seguite, tendendo alla costruzione di grandi macchine (quali ad esempio ITER di cui si parlerà in seguito), il tempo necessario per la realizzazione di un reattore diventerà comunque uguale ad infinito. Quanto detto verrà chiarito nei seguenti paragrafi. Ma fin da subito è opportuno stabilire, per poi tener sempre ben presente, che, comunque si possa pensare di realizzare un reattore a fusione, esso dovrà necessariamente contenere un plasma (ossia un gas completamente ionizzato) mantenuto almeno per un certo tempo in condizioni di ignizione; quelle condizioni cioè in cui esso è in grado di autosostenersi, così come capita in natura nel sole e nelle stelle.

Ne segue quindi che se si vuole arrivare alla produzione di energia da fusione è indispensabile prima ottenere e studiare in laboratorio le condizioni di ignizione di un plasma. Ogni programma che non tenda direttamente all'otteni-

mento dell'ignizione dovrebbe essere lasciato da parte per non sottrarre tempo, denaro ed energie a programmi che hanno notevole probabilità di successo in termini di raggiungimento dell'ignizione.

Se la realizzazione di una macchina gigantesca fosse il solo modo per procedere verso l'energia da fusione sarebbe certamente meglio rinunciare alla ricerca fusionistica per dedicarsi ad altri campi di ricerca più promettenti. Ma come gli scienziati nella comunità fusionistica internazionale sanno molto bene, può essere possibile portare un plasma all'ignizione in un dispositivo più piccolo, e più economico, che impieghi però campi magnetici più elevati di quelli che vengono normalmente usati per contenere il plasma nelle grandi macchine. Un dispositivo di questo tipo è Ignitor, progetto guidato dal professor Bruno Coppi del *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) di Boston. Proposto e progettato ben prima che iniziassero gli studi di ITER, e malgrado i tanti ostacoli interposti, Ignitor è a tutt'oggi l'unico dispositivo inteso per la produzione dell'ignizione del plasma.

Sfortunatamente però l'informazione che sulla ricerca fusionistica viene fornita ai non addetti ai lavori, anche da stampa qualificata, assai spesso ignora questa realtà. L'ottenimento dell'energia da fusione viene cioè strettamente collegato alla realizzazione di una macchina gigantesca del tipo di ITER. Per cui i tanti che, con ragione, sono scettici circa la riuscita di ITER sono portati a credere, erroneamente, che di conseguenza non sia possibile giungere alla produzione di energia da fusione.

Con questo articolo si vuole fare un po' di chiarezza su questo argomento riferendo, sia pure molto brevemente, sullo sviluppo e sulla situazione attuale della ricerca fusionistica nel mondo, in particolare in Europa. Per poter fare questo è però necessario fornire alcuni cenni generali sul problema della fusione termonucleare controllata; cosa che verrà fatta nel prossimo paragrafo.

IL PROBLEMA DELLA FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA

È noto che se si fornisce sufficiente energia a dei nuclei di elementi leggeri essi possono "fondersi" e che in questo processo si libera energia che può quindi venire utilizzata. Le reazioni di fusione che realisticamente vengono considerate ai fini pratici coinvolgono gli isotopi dell'idrogeno (il deuterio e il trizio) e elio-3. Fra queste reazioni quella che ha più possibilità di essere innescata a temperature raggiungibili in un ipotetico reattore a fusione è la reazione deuterio-trizio, che genera neutroni con un'energia di circa 14 MeV e particelle α con un'energia di circa 3,5 MeV.

Per risolvere il problema della fusione termonucleare controllata si può quindi pensare di realizzare un plasma di deuterio-trizio avente una densità di particelle n elevata ($\geq 10^{13} \text{cm}^{-3}$) e una temperatura T sufficientemente alta (100-1000 milioni di gradi centigradi) per dare ai nuclei di deuterio e trizio l'energia necessaria per vincere la repulsione elettrostatica, e di confinarlo per un tempo τ sufficientemente lungo per dare modo alle reazioni di fusione di verificarsi. I neutroni generati nelle reazioni di fusione deuterio-trizio sfuggono dal plasma. In un reattore essi verrebbero catturati in un mantello posto attorno al plasma stesso, nel quale essi rigenererebbero il trizio per reazione con il litio contenuto nel mantello. Infatti il trizio, essendo radioattivo con un tempo di dimezzamento piuttosto breve (~12 anni), non esiste in natura in quantità significative. Il calore da essi prodotto verrebbe prelevato e usato per produrre elettricità con un convenzionale ciclo termico. Le particelle α , elettricamente cariche, possono invece essere confinate all'interno del plasma e quindi cedergli la loro energia, riscaldandolo ulteriormente. Se questa energia viene prodotta in quantità sufficiente, cioè se il numero delle reazioni è abbastanza ele-

vato, è possibile superare le perdite di energia che il plasma subisce verso l'esterno. La situazione in cui la potenza di fusione prodotta ugualia quella che si deve iniettare per riscaldare e confinare il plasma viene detta pareggio ("breakeven"). Naturalmente questa condizione va superata perché ciò che conta ai fini pratici è la produzione netta di energia. La situazione da raggiungere in definitiva è quella in cui la potenza fornita al plasma dalle particelle α (che è circa 1/5 della potenza totale di reazione) è sufficiente per compensare le perdite di energia. In queste condizioni di ignizione il plasma è in grado di autosostenersi. Per raggiungere questa situazione è necessario, come è logico e come sopra accennato, che la temperatura, la densità e il tempo di confinamento siano sufficientemente grandi, o lo sia qualche loro combinazione. Esiste a questo riguardo il ben noto *criterio di Lawson* che, in base a considerazioni di bilancio energetico e tenendo conto delle perdite, stabilisce per il prodotto $n\tau$ un valore non inferiore a circa $10^{14} \text{cm}^{-3}\text{s}$, ferma restando l'esigenza di una temperatura elevata.

Dimostrare la *fattibilità scientifica* della fusione termonucleare controllata significa riuscire a portare il plasma in condizioni di ignizione in una esperienza di laboratorio. Raggiunto questo traguardo si potrebbe pensare al reattore prototipo e successivamente al reattore commerciale.

Da anni nelle macchine a fusione esistenti nel mondo e operanti con solo deuterio si producono reazioni di fusione alle quali è ovviamente associata una produzione di energia. Però la fattibilità scientifica della fusione termonucleare controllata resta ancora da dimostrare, nel senso che l'ignizione, come pure il pareggio, non è stata a tutt'oggi realizzata.

Il confinamento di un plasma, che ha luogo spontaneamente nelle stelle a causa della rilevante forza di gravità connessa con le enormi masse in gioco, può ottenersi il laboratorio con due diversi sistemi:

a) *Confinamento inerziale*- In questo sistema si comprime a densità elevatissima (maggiore di circa mille volte la densità del liquido) una pallina di deuterio-trizio per mezzo di fasci laser o di particelle cariche. I tempi di compressione sono brevissimi, per modo che il combustibile, vincolato dalla sua stessa inerzia, brucia prima di potersi disperdere. Il *criterio di Lawson* viene soddisfatto con densità di plasma

maggiori di 10^{24}cm^{-3} e con tempi di confinamento minori di 10^{-10}s .

b) *Confinamento magnetico*- Qui il plasma, essendo una miscela di particelle cariche, viene tenuto lontano dalle pareti del contenitore da opportuni campi magnetici. In questo caso si può avere, tipicamente, un tempo di confinamento dell'ordine di 1s con una densità dell'ordine di 10^{14}cm^{-3} .

In considerazione delle difficoltà tecnologiche prevedibili per il sistema a confinamento inerziale, i ricercatori nel mondo hanno scelto di orientarsi prevalentemente sul confinamento magnetico. C'è comunque da tenere presente che la ricerca sul confinamento inerziale comporta delle implicazioni belliche, ed è quindi in buona parte coperta da segreto militare.

Nell'ambito del confinamento magnetico il grosso degli sforzi nel mondo si sono indirizzati su quel tipo di macchine a forma toroidale chiamate *tokamak*. Esistono però altri dispositivi a confinamento magnetico che potrebbero fornire risultati interessanti.

Per quanto riguarda il dispositivo *tokamak* vengono seguite due diverse linee per ottenere l'ignizione del plasma; linee che corrispondono a due diversi modi per ottenere valori elevati di $n\tau$.

Si può infatti cercare di realizzare tempi di confinamento lunghi con densità basse. Ciò richiede macchine di grandi dimensioni e conduce di conseguenza a tempi di costruzione e a costi molto elevati. Inoltre le incognite a cui si va incontro in termini di comportamento fisico del plasma e di probabilità di ignizione sono rilevanti.

La linea alternativa è quella di realizzare tempi di confinamento più brevi con densità elevate. Le minori dimensioni del dispositivo rendono qui possibile l'applicazione di campi magnetici più alti; si possono quindi sostenere maggiori densità della corrente che circola nel plasma, da cui la possibilità di ottenere più elevate densità di plasma.

Si può fra l'altro vedere che valori elevati del campo magnetico e dimensioni compatte per la macchina rendono possibile spingere la corrente di plasma a valori piuttosto elevati senza incorrere in instabilità.

È poi di grandissima importanza il fatto, verificato sperimentalmente, che in macchine ad elevata densità il grado di impurezza del plasma (cioè la percentuale di elementi pesanti in esso

presenti) è praticamente trascurabile. Poiché prevalentemente agli elementi pesanti sono collegate le perdite di energia per irraggiamento, una presenza apprezzabile di questi elementi può, da sola, pregiudicare il raggiungimento delle condizioni di ignizione.

Naturalmente la necessità di operare con campi magnetici e con correnti elevate comporta problemi tecnologici che divengono importanti qualora si abbia a che fare con un reattore anziché con una macchina sperimentale. D'altra parte è logico assumere come obiettivo prioritario la dimostrazione della fattibilità scientifica della fusione nonché lo studio del comportamento, attualmente incognito, di un plasma ignito, rimandando ad una fase successiva la trattazione dei problemi reattoristici. E in questa strategia è evidente il vantaggio delle macchine compatte.

Per quanto riguarda poi il combustibile da impiegare, è ragionevole pensare all'impiego del trizio, utilizzando la reazione DT, solo per una fase sperimentale in una macchina progettata per l'ignizione. La ragione per cui è importante adoperare il trizio è che in un plasma DT è più facile ottenere l'ignizione che non in DD o in altre miscele (D^3He , p^6Li , p^{11}B , etc.). Però nella reazione DT vengono prodotti neutroni di alta energia (~14 MeV) che, come si è detto, essendo neutri sfuggono dal plasma e arrivano sulle strutture della macchina attivandole e dando così luogo a problemi di sicurezza ed ambientali. Per cui non si può parlare di energia pulita (senza con questo voler fare confronti con l'energia da fissione). E quanti più neutroni si producono, e quanto più essi sono energetici, tanto meno pulita è l'energia che si produce.

Si può pensare però di raggiungere temperature più grandi, cioè sufficienti a portare all'ignizione una miscela D^3He . La reazione D^3He , oltre a non coinvolgere il trizio, non origina neutroni (se non quelli, in numero minore, generati in reazioni collaterali e secondarie) ma solo particelle α e protoni che come particelle cariche potrebbero essere utilizzati direttamente per ricavare energia elettrica (conversione diretta), senza passare per un ciclo termico con la conseguente perdita di rendimento della macchina.

In questo tipo di reattore non occorrerebbe più quindi circondare il plasma con un mantello e si otterrebbe così una riduzione notevole delle difficoltà tecnologiche. Inoltre, poiché il processo

di conversione diretta richiede di convogliare le particelle cariche verso un qualche dispositivo apposito, il carico termico sulle pareti risulterebbe alleggerito.

L'ignizione di un plasma di D^3He potrebbe essere facilitata usando un plasma DT come innesco. Si tratterebbe cioè di sostituire il trizio con l'elio nel plasma ignito DT. La difficoltà si trasferirebbe allora al fatto che l'elio-3 è molto scarso in natura e bisogna produrlo partendo da altri elementi. Per esempio, si può ottenere l'elio-3 dal decadimento del trizio presente nelle testate nucleari; e questo sarebbe sufficiente per sostenere un programma sperimentale. Per

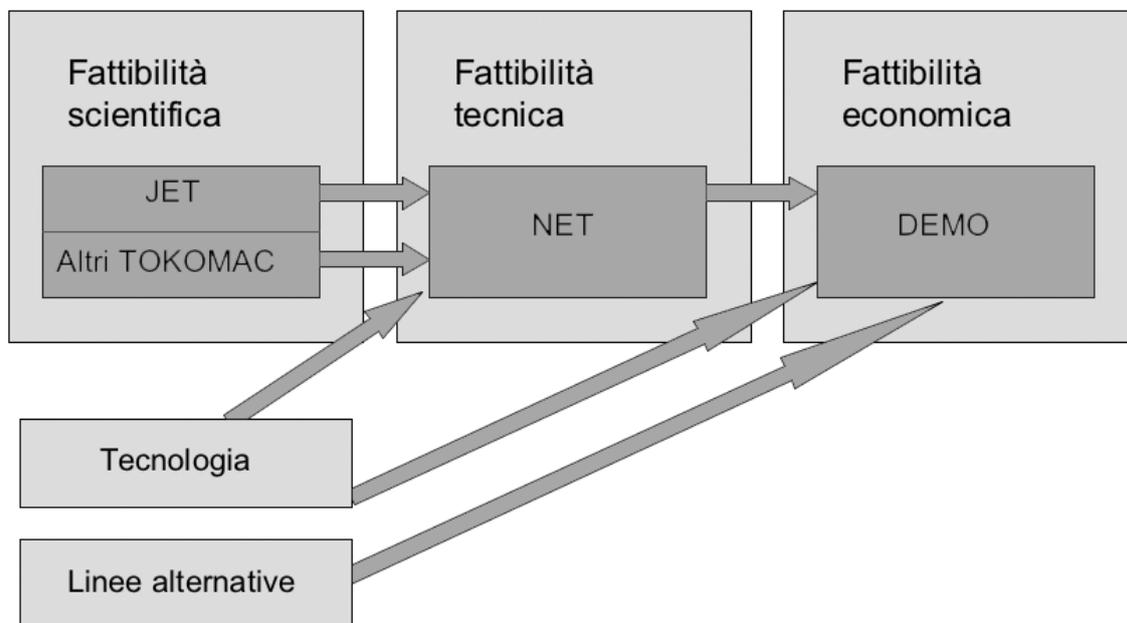
quanto riguarda il lungo termine, può essere interessante accennare al fatto che da tempo sono in corso in America, in particolare alla NASA, degli studi per il prelievo dell'elio-3 dalla superficie lunare.

SVILUPPO DELLA RICERCA FUSIONISTICA

a) Linea programmatica dei grandi tokamak

Nel 1986 il prof. D.Palumbo, allora direttore del programma fusione dell'Euratom, dava il seguente schema rappresentante la linea programmatica Euratom per la ricerca fusionistica (1):

Figura 1. Schema sulla fattibilità



Secondo questo schema il dispositivo *Ignitor*, inseribile nelle "linee alternative", era da considerarsi al più come un buon esperimento i cui risultati potevano eventualmente giovare nel proseguimento secondo l'unica linea data per possibile: la linea cioè delle grandi macchine a deuterio-trizio.

Trascorsi ormai tanti anni, vediamo di riassumere quello che è poi stato lo svolgimento effettivo della ricerca fusionistica Euratom. L'unica macchina finora realizzata è stata il JET dei laboratori di Culham, che fu iniziata nel 1972. La successiva macchina NET, il cui studio ebbe inizio nel 1978, fu accantonata per passare allo studio di INTOR, a sua volta abbandonato per pas-

sare al progetto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*). Questo progetto, scaturito da un incontro fra Reagan e Gorbaciov nel 1985, considerava la costruzione di una macchina gigantesca (raggio maggiore uguale a circa 6 metri) con un costo dichiarato di 10 miliardi di dollari, ed era stata presentata dai proponenti come capace di raggiungere l'ignizione. Però gli studi successivi hanno dimostrato che ciò sarebbe stato impedito dall'insorgere di instabilità (2),(3). Gli studi successivi si sono allora spostati su un nuovo dispositivo chiamato ITER-FEAT, versione ridimensionata dell'originale ITER, che però non era concepito per l'ottenimento dell'ignizione; il che naturalmente trasformava a

priori questa impresa in un grosso spreco di tempo e di denaro.

E veniamo ora ai tempi più recenti. In data 29/6/05 il giornale francese *Le Monde* (4) annunciava la decisione di costruire un ITER (ormai con questo acronimo si indica un qualunque *tokamak* purché abbastanza grande e abbastanza costoso) in Francia nel centro nucleare di Cadarache. Questo ITER, avente un raggio maggiore di 6,2 m, con un riscaldamento ausiliario di circa 50 Mwatt dovrebbe produrre una potenza di circa 500 Mwatt (5). Quindi il rapporto fra la potenza rilasciata e quella fornitagli dall'esterno sarebbe $Q = 10$ (per l'ignizione si dovrebbe avere $Q = \infty$). Il costo dell'impresa è stabilito al momento in 12 miliardi di dollari. La comunità europea, nel cui territorio la macchina dovrebbe essere costruita, si vedrà attribuito il 50% della somma, laddove agli altri partners internazionali (USA, Giappone, Cina, Russia, Sud Corea) dovrebbe andare il 10%.

La decisione di costruire ITER a Cadarache è stata accolta in Francia con notevole entusiasmo da parte di varia stampa filo governativa e lo stesso presidente Chirac la ha definita un enorme successo. Molto meno entusiasta è stata però la reazione, in ambito scientifico, anche nella stessa Francia (6), (7), (8), (9), (10). In particolare C. Allègre, già ministro per la scienza e la tecnologia, ha definito questa impresa "*just another prestige project with very few chances of success*" (8).

E tuttavia è purtroppo da notare che anche in tutta questa letteratura la possibilità di procedere per la strada dei *tokamak* compatti ad alto campo magnetico viene completamente ignorata.

b) *Linea programmatica dei tokamak compatti ad alto campo magnetico*

Vediamo adesso come finora è stata condotta la ricerca fusionistica secondo la linea dei *tokamak* compatti ad alto campo magnetico.

L'esperimento Ignitor, ideato e proposto fin dal 1976 dal prof. Bruno Coppi per essere costruito in Italia, rappresenta il naturale passo evolutivo dopo le macchine Alcator A del MIT - della quale Coppi è stato ideatore, progettista e guida - ed FT di Frascati, anche questa da lui proposta e impostata. Ignitor è attualmente l'unica macchina in grado di raggiungere e studiare sperimentalmente le condizioni di ignizione di un plasma di deuterio-trizio. Essa si pone nel filone delle macchine compatte ad alto campo magne-

tico, che si differenziano in modo sostanziale dalle grandi macchine a campo magnetico più basso (JET, NET, ITER). Il raggio maggiore di Ignitor è infatti $R_0 = 1,32$ m. Il costo stimato dall'industria italiana per la costruzione del nocciolo di Ignitor è di 70 milioni di euro. Dagli esperimenti di accensione, di cui Ignitor è il prototipo, possiamo attenderci, sulla base di passate esperienze, anche importanti contributi alla comprensione di fenomeni di rilievo in astrofisica, per esempio nell'ambito dei brillamenti solari e della dinamica dei plasmi con alte energie che costituiscono la principale componente di materia luminosa negli ammassi di galassie.

Nella prospettiva di identificare e costruire un reattore che produca energia è evidente che la "Fisica del Reattore" (usando una terminologia ben nota nel campo dei reattori a fissione) che emergerà dagli esperimenti con Ignitor sarà direttamente applicabile al reattore di potenza. Una prospettiva simile esiste per le soluzioni tecnologiche trovate e adottate per Ignitor nel suo insieme (per esempio il sistema di riscaldamento applicato dall'esterno). Basti pensare al sistema per la produzione dei campi magnetici poloidali (noto come "*air core transformer*") inventato e costruito per Alcator ed ora adottato su tutte le macchine per esperimenti avanzati di confinamento magnetico dei plasmi.

Rifacendosi poi a quanto detto al secondo paragrafo, la reazione deuterio-trizio, più facile da innescare, può non essere la più adatta sul piano pratico qualora, usciti da una fase sperimentale, la si dovesse impiegare per la realizzazione di un reattore.

Ad un successo dell'esperimento Ignitor, cioè all'ottenimento dell'ignizione, dovrebbe quindi seguire la realizzazione di un *tokamak* compatto ad alto campo magnetico capace di operare con combustibili avanzati, quale ad esempio il CANDOR con deuterio-elio3, attualmente allo studio da parte del prof. Coppi. Se anche questo dispositivo avesse successo, si potrebbe procedere alla realizzazione di un reattore di potenza con attraenti caratteristiche.

Il valore dell'esperimento Ignitor è stato più volte riconosciuto su piano nazionale, e in particolare da parte dell'ENEA. A questo proposito citiamo:

RUBBIA: "*Programma triennale ENEA 2001-2003*", paragrafo 4. Il Progetto Ignitor: "...con il compito di produrre e studiare, per la prima volta al mondo, l'accensione controllata di pla-

smi termonucleari, impossibile sulle macchine attuali. Questo è il primo fondamentale passo per lo sviluppo dell'energia nucleare da fusione, una fonte energetica con notevole grado di compatibilità ambientale".

ENEA: "Elementi per la relazione al Parlamento del Ministro delle Attività Produttive sull'attività" svolta nel 2001 da ENEA e dalla Società e Consorzi Partecipati, maggio 2002: "Ignitor è fra i tre progetti più significativi attualmente considerati per definire le caratteristiche di un'esperienza sui plasmi in regime di ignizione termonucleare, gli altri due essendo ITER e FIRE". (È però falso che ITER -in realtà si trattava qui di ITER-FEAT- e FIRE siano previsti per l'ignizione).

Il programma Ignitor dispone fra l'altro di un leader come il prof. B.Coppi il quale, come è noto, è il massimo studioso della fusione italiano e uno dei massimi mondiali. Il suo valore è stato più volte riconosciuto, oltre che in campo internazionale (Premio APS 1983, Premio Maxwell 1987, etc.), anche in Italia. Citiamo ad esempio il Premio Cultura del Presidente del Consiglio italiano 1993, nella cui motivazione si legge: "Il programma Ignitor, iniziato da Bruno Coppi, è stato il primo a concepire una macchina sperimentale basata su tecnologie esistenti e conoscenze di fisica acquisite mediante le macchine Alcator e FT, capace di raggiungere le condizioni di accensione per la fusione nucleare". Nonché il più recente conferimento della Laurea in Fisica "Honoris Causa" da parte dell'Università degli Studi di Milano, 13 novembre 2003.

A tutto ciò avrebbe dovuto corrispondere, secondo logica, un rapido ed efficiente impegno dell'Italia in questo programma. Ma ben diversamente, sappiamo, sono andate le cose, come si può dedurre anche soltanto considerando i lunghissimi tempi intercorsi. L'ENEA, che si è posto di fatto come gestore di tutti i programmi italiani nella fusione, si è sempre coperto dietro le larghe e comode spalle dell'Euratom, mettendo in atto una serie di slittamenti interminabile e sovrastimando i costi dell'impresa, facendo così credere indispensabile una collaborazione internazionale. Mentre in realtà un programma della consistenza di Ignitor potrebbe essere benissimo sostenuto su piano nazionale, anche semplicemente tagliando gli sprechi, nonché i programmi poco utili o sbagliati. A questo proposito si vuole ricordare che in una conferenza stampa dell'8/4/1988 nella quale fu comunicata la costi-

tuzione di un Consorzio Ignitor, l'allora presidente dell'ENEA, prof. U. Colombo aveva promesso uno "strappo" con la comunità europea se questa avesse opposto eccessive difficoltà(11), (12), (13).

Peraltro, mentre il Governo Italiano aveva stanziato nelle varie leggi finanziarie (1994, 1997, 1998, 1999, 2000) delle somme consistenti per il programma Ignitor, è un fatto che queste somme in buona parte a Ignitor non sono mai arrivate.

CONCLUSIONI

Da quanto detto finora risulta evidente quale avrebbe dovuto e quale dovrebbe essere la linea da seguire nella ricerca della fusione termonucleare con dispositivi a confinamento magnetico. Si tratta infatti di scegliere fra dispositivi enormi, con enormi tempi e costi di realizzazione e con scarsa possibilità di successo dal punto di vista dell'ottenimento dell'ignizione, e dispositivi compatti comportanti tempi e costi di realizzazione molto più contenuti e con notevole probabilità di raggiungimento dell'ignizione. Un confronto lucido ed esaustivo di queste due linee è contenuto in una lettera che B.Coppi ha scritto ad Allègre in data 15/7/05 e che riportiamo integralmente in Appendice.

Ma - si vuole ancora ribadire - l'informazione che prevalentemente raggiunge i non addetti ai lavori non prende in considerazione l'esistenza della linea delle macchine compatte, linea che peraltro occupa uno spazio rilevante nella letteratura specializzata e nei congressi. Come conseguenza, essere scettici nei riguardi delle grandi macchine comporta automaticamente scetticismo nei riguardi della fusione nucleare in genere.

Ci si domanda allora: perché? Perché questo atteggiamento, che si protrae ormai da decenni, e che costituisce in sostanza un pesante ostacolo all'ottenimento dell'energia da fusione? Perché questo danno al progresso scientifico e alla cultura? Perché tutto questo spreco di denaro mentre d'altra parte in Italia si lamenta la scarsità dei fondi destinati alla ricerca? Una risposta a questo quesito potrebbe essere quella data, in apertura della Conferenza Europea sulla Fusione e la Fisica del Plasma alla Fondazione Cini di Venezia del marzo 1989, dal prof. U.Colombo(14), il quale avanzò l'ipotesi che questa resi-

stenza fosse da attribuirsi a *lobbies* del petrolio e del nucleare da fissione.

Quali che siano le vere motivazioni, è comunque evidente che esse devono essere di natura politico-economica, non certo scientifica; come se a livello di "decisori" esistesse la precisa volontà di non procedere verso l'ottenimento dell'energia da fusione.

E a questo punto viene però spontaneo domandarsi come si possa spiegare la mancanza di ribellione a questo stato di cose da parte di tanti ricercatori della fusione e non, in particolare in Europa. Una risposta a questo interrogativo potrebbe essere quella fornita da un passo dell'articolo di Glanz e Lawler(3): "*Planning a*

future without ITER", laddove gli autori riportano un'osservazione fatta in proposito da Navratil della Columbia University e che si riporta testualmente: "*We can have frank discussions in private with people in Europe; but it's almost impossible to get them to talk about it even with few others present. They can get into serious difficulty if they take positions out of line with the official policy*".

E tuttavia una informazione corretta e completa, ed una conseguente e coraggiosa presa di coscienza da parte dei ricercatori, sono condizioni necessarie, anche se non sufficienti, per rimuovere gli ostacoli cui è soggetta da tempo la ricerca nel campo della fusione termonucleare.

RAFFAELE CONVERSANO

Nato a Roma nel 1938, laureato in fisica nel 1963. In ENEA, ha svolto attività di ricerca nella fisica dei reattori nucleari a fissione fino al 1982. Dopo lo smembramento del Laboratorio di Fisica e Calcolo Reattori della Casaccia, si è occupato di modellistica econometrica e di elaborazione dati presso la Direzione Centrale Studi dell'ENEA. Nel 1999 è tornato a svolgere attività di ricerca nel settore della fusione termonucleare, progetto Ignitor. Ora è in pensione.

Contatti:

Email conversano.raffaele@tiscali.it

FRANCA MAGISTRELLI

Laureata in Fisica presso l'Università di Roma nel 1951. Libera docenza in Fisica Generale nel 1966. Attualmente pensionata. All'Istituto di Fisica, dal 1951 al 1957 si è occupata di datazione di materiali archeologici con il metodo del C^{14} e ha svolto un'attività sperimentale riguardante l'ottica elettronica con il prof. E. Persico. Dal 1957 ha poi collaborato strettamente con il prof. B. Brunelli nella fondazione dei Laboratori Gas Ionizzati che si sono trasferiti a Frascati nel 1960. In questi laboratori ha svolto un'attività sperimentale riguardante la fisica del plasma. Dal 1981 collabora con il prof. B. Coppi nel contesto del progetto Ignitor. Dal 1983 fino al pensionamento è stata Direttore Responsabile della rivista VUOTO, Scienza e Tecnologia, organo ufficiale dell'AIV (Associazione Italiana Vuoto).

BIBLIOGRAFIA

- 1) Notiziario ENEA, novembre-dicembre 1986
- 2) GLANZ, J., Science 274(1996)1600
- 3) GLANZ, J., LAWLER, A., Science 279(1998)20
- 4) Le Monde, 29/6/05
- 5) BORBA, D., PAMELA, J., ONGENA, J., Analysis, n°3(2005)2
- 6) ALLEGRE, C., L'Express, 30/5/05
- 7) LE HIR, P., Le Monde, 9/7/05
- 8) GODOY, J., Inter Press Service News Agency, 12/7/05
- 9) Réseau "Sortir du Nucléaire" ~ www.sortirdunucaire.org
- 10) DAUTRY, R., Lettera a C. Allègre, 29/7/05
- 11) La Nazione, 9/4/88 .
- 12) Paese Sera, 9/4/88
- 13) Il Resto del Carlino, 10/4/88
- 14) La Nuova Venezia, 14/3/89

APPENDICE

Massachusetts Institute of Technology, Cambridge (MA), le 15 Juillet 2005

Cher M. Allègre,

Me souvenant de votre venue au MIT et de notre rencontre à Paris lors de la conférence en mémoire de René Pellet, j'ai lu avec beaucoup d'intérêt votre chronique concernant Iter «Beaucoup de bruit pour rien». Je voudrais vous reprocher amicalement d'avoir pensé seulement au préjudice qu'Iter, comme il est conçu actuellement, peut porter à la recherche française. Avant tout, il faut prendre en compte tous les effets que cette entreprise peut avoir au niveau international.

Par exemple, le coût d'une participation des États-Unis à la construction d'Iter pendant les huit premières années, correspondant à 10% du coût de la construction, a été estimé par le Ministère de l'Énergie (*Department of Energy*) entre 1.2 et 1.3 milliards de dollars. Il faut tenir compte du fait que la construction ne sera pas terminée pendant cette période et que, sur la base des rapports présentés à la dernière conférence de l'AIEA en novembre 2004, le projet ne semblait pas être définitif. Si on ajoute les coûts de fonctionnement, de gestion, etc., il est logique de s'attendre à ce que les coûts totaux soient bien plus élevés que le montant global que vous aviez annoncé. Pour cette raison, la pluie d'or illusoire s'abattant sur la région de Cadarache, indissociablement liée à un appauvrissement de la recherche fondamentale internationale sur la fusion, pourrait s'avérer beaucoup plus généreuse que vous ne l'imaginez.

Deuxièmement, il faut comprendre comment la communauté scientifique française veut faire face au problème du financement pour toute la durée de la construction et du fonctionnement d'Iter. Aux États-Unis, la Chambre et le Sénat ont voté un budget pour 2006 refusant que l'allocation des fonds à Iter ne se fasse au détriment du programme de recherche nationale. Les États-Unis devraient donc trouver des fonds supplémentaires pour couvrir le montant prévu pour le huit premières années. Selon un communiqué russe, La Russie n'a pas approuvé les fonds pour Iter en 2006.

De plus, quel est le coût supplémentaire de la compensation décrochée par le Japon grâce à leur négociations avec le gouvernement Chirac, tout en tenant compte d'oppositions au sein de la communauté scientifique japonaise ? Mon ami Atsuo Iiyoshi qui a fondé le National Institute for Fusion Studies et a dirigé la construction de la grande machine supraconductrice LHD craint, comme moi, qu'Iter puisse avoir un effet dévastateur sur la respectabilité que la physique de plasmas (une branche relativement jeune de la physique qui concerne les recherches sur l'espace, l'astrophysique et la fusion nucléaire) s'était acquise au niveau international. En effet, on ne connaît pas, parmi les gens ayant fait des recherches sérieuses dans ce domaine, de personnes prêtes à promettre une centrale nucléaire à fusion avec des dates qu'on puisse définir.

Ce dont nous sommes capables pour l'instant est la désignation d'un éventail d'expériences pour explorer la physique des plasmas où les effets de la fusion nucléaire sont dominants.

L'une des plus urgentes, à mon avis, est le projet Ignitor conçu pour atteindre l'ignition (allumage), qui a été élaboré avec un esprit universitaire plutôt que celui d'un grand projet, comme vous l'avez qualifié, de prestige. En effet, la physique de l'ignition est une étape indispensable pour prouver la faisabilité scientifique de la fusion contrôlée. Pour justifier la nécessité de conduire des expériences de base, à ce stade de la recherche, on devrait se souvenir de la découverte des neutrons retardés dans le processus de fission qui a permis de résoudre assez simplement le problème du contrôle des réacteurs à fission.

Iter, même en admettant qu'on parvienne à obtenir les principaux paramètres de la machine tels qu'ils ont été publiés, ne peut pas réaliser l'ignition, ni donc permettre d'étudier le phénomène connu sous le nom d'instabilité thermonucléaire, ce qui est nécessaire pour apprendre à contrôler la «combustion» dans un réacteur à fusion. Même en supposant que les conditions de stabilité des plasmas qui ont été proposés pour Iter soient satisfaites (ce qui n'est pas le cas), pour maintenir sa température et sa densité constantes, il faut ajouter de l'extérieur un tiers de l'énergie nécessaire au chauffage du plasma. C'est une condition inacceptable pour qu'un réacteur puisse produire de l'énergie de façon économiquement rentable. En effet, il faut minimiser la puissance injectée pour le chauffage, essentiellement car cette injection est très onéreuse (dans les conditions d'ignition, la combustion s'auto-entretient, et il n'y a pas besoin d'injecter de l'énergie de chauffage).

Étant donné tous les problèmes technologiques (durée des plasmas de densité suffisante qui dans Iter serait limitée à environ 7 min, propriétés des matériaux, production du tritium, conversion en énergie électrique, coûts, etc.) et relatifs à la physique des plasmas de fusion qui restent à résoudre, il est inenvisageable que sur la base des résultats d'Iter, on puisse procéder immédiatement à la construction d'une centrale de démonstration. Faut-il donc envisager une autre expérience onéreuse entre Iter et la centrale prototype?

A mon avis, la stratégie doit être différente, et doit reposer sur l'éventail d'expériences relatives aux problèmes physiques et technologiques que l'on peut pointer du doigt dès à présent. La stratégie «une seule grande expérience à la fois» comporte des retards le progrès des recherches sur la fusion nucléaire. Enfin, les fonds et le temps requis pour le projet Iter devraient être réexaminés en termes d'informations physiques pouvant être obtenues, en ayant à l'esprit le « rendement » de l'éventail d'expériences qu'on doit conduire.

Cordialement,

B. Coppi