

**RELAZIONE
DEL PROFESSOR ROMANO TOSCHI**

PAGINA BIANCA

"STATO E PROSPETTIVE DELLA FUSIONE NUCLEARE"

Romano Toschi, Direttore Progetto NET
Max Planck Institut für Plasmaphysik, Garching - RFT

Sintesi dell'intervento alla Commissione Industria della Camera - Roma, 26.11.1986

1. OBIETTIVI E STATO DELLE RICERCHE FISICHE SULLA FUSIONE

L'obiettivo nel medio termine (circa 15 anni) é la dimostrazione completa della fattibilità sia fisica che tecnologica della fusione. Per questo obiettivo é necessaria una macchina in cui una miscela di deuterio e trizio non solo raggiunga l'ignizione (1) ma la reazione di fusione si autosostenga per tempi lunghi (centinaia di secondi). In Europa questa macchina sarà il **NET (Next European Torus)** (v. fig. 1). E' importante che questa dimostrazione venga data con una macchina estrapolabile ad un reattore.

L'obiettivo nel breve termine (4-5 anni) é quello di definire le relazioni (leggi di scala) che permettano di individuare i parametri di questa macchina che sarà del tipo TOKAMAK. Le conoscenze attuali non sono ancora adeguate a definire leggi

(1) *Una miscela di deuterio-trizio raggiunge le condizioni di ignizione quando le reazioni di fusione, che sono state innescate con l'ausilio di una sorgente esterna di riscaldamento, sono sufficienti a sostenere la reazione: in queste condizioni l'energia della sorgente esterna é sostituita da quella associata ai nuclei di elio che si producono nella reazione di fusione. Perché ciò avvenga occorre che il parametro di ignizione, cioè il prodotto della densità \times tempo di confinamento \times temperatura del plasma raggiunga un certo valore. E' quindi possibile ottenere l'ignizione con diverse combinazioni di questi parametri, che dipendono principalmente dalle caratteristiche dell'approccio usato.*

di scala sufficientemente affidabili. A questo fine i **problemi fisici piu' importanti** sono il confinamento dell'energia che viene immessa nella miscela deuterio-trizio per riscaldarla (e trasformarla quindi in plasma) e il controllo della sua composizione e stabilità durante la reazione.

I risultati migliori sul **confinamento e riscaldamento del plasma** sono sinora quelli raggiunti nel 1986 dal JET (Joint European Torus) ove si é migliorato di circa cinque volte il parametro di ignizione (cioé il prodotto densità del plasma x tempo di confinamento x temperatura) rispetto alle macchine della generazione precedente di piu' piccole dimensioni. I risultati del JET confermano le leggi di scala sul confinamento che premiano le dimensioni e le configurazioni magnetiche aperte al bordo (a divertore); in queste ultime infatti il confinamento non é penalizzato dal riscaldamento effettuato con sorgenti di energia esterne.

Su queste basi si può anticipare, con notevole fiducia, che il **JET alle prestazioni massime previste nel 1988 - 1989, raggiungerà il pareggio globale dell'energia e condizioni equivalenti all'ignizione nel cuore del plasma**. Nel 1991-1992 il JET, operando con miscela di deuterio e trizio, riprodurrà le suddette condizioni in un plasma reagente quindi realmente termonucleare. A partire dal 1987 si affiancheranno al JET cinque nuovi TOKAMAK in Europa (FTU, Asdex Upgrade, Tore Supra, Compass, TVC) di medie dimensioni con obiettivi fisici molto specifici. Negli stessi anni si attendono importanti contributi dai programmi americano, giapponese e sovietico, ciascuno dei quali dedica alla linea Tokamak uno sforzo confrontabile a quello europeo.

Partendo da questo quadro generale in Europa si é giunti alla **conclusione che, senza avviare nuove iniziative sulla fisica della fusione, nel 1993 si sarà formata una solida base scientifica per avviare la costruzione del NET (Next European Torus)**.

Un grosso problema che potrebbe rivelarsi l'ostacolo maggiore, piu' dell'ignizione, verso la fattibilità della fusione come sorgente di energia é il **controllo del plasma e della sua composizione durante la reazione**. In questo caso gli aspetti fisici e tecnologici non sono separabili. Infatti, un plasma

termonucleare e le pareti contenitrici interagiscono fortemente e si condizionano reciprocamente. La prima parete (v. fig. 1) é soggetta, oltre che a forti flussi termici e di neutroni, anche a bombardamenti di atomi e ioni: la forte erosione che ne consegue, da un lato, limita la vita della prima parete e, dall'altro, puo' inquinare il plasma spegnendo la reazione. **Solo una macchina con plasma termonucleare di lunga durata, come é il NET, può affrontare questo problema.**

2. OBIETTIVO E STATO DELLE RICERCHE TECNOLOGICHE

La ricerca tecnologica europea ha per obiettivo lo sviluppo entro il 1993 delle nuove tecnologie necessarie alla realizzazione della macchina NET (magneti superconduttori, materiali resistenti ad alte fluenze di neutroni, atomi e ioni, materiali per la generazione del trizio, robotica per la gestione a distanza, tecnologia del trizio, etc). Il NET stesso servirà da banco di prova di quei componenti quali il mantello (v. fig. 1) per la produzione del trizio, che solo in una macchina di questo tipo trovano le condizioni operative indispensabili. Nel NET i problemi tecnologici più nuovi e difficili vengono imposti dall'obiettivo di realizzare un plasma di interesse reattoristico, in cui cioè la reazione nucleare si autosostenga per periodi lunghi (centinaia di secondi) e ripetuti. Questi problemi verranno affrontati, e per la prima volta, nel progetto NET: essi sono affrontati solo marginalmente nelle macchine attualmente proposte per lo studio dell'ignizione, nelle quali l'impulso sarebbe di alcuni secondi e ripetuto poche volte (100-1000) nella vita della macchina; queste macchine avranno quindi una rilevanza molto modesta per la tecnologia reattoristica.

3. CONTRIBUTO ITALIANO ALLE RICERCHE SULLA FUSIONE

I laboratori di Frascati (ENEA) hanno una riconosciuta e solida esperienza nello studio dei plasmi, in particolare ad alta densità e riscaldati con radiofrequenza. Il Tokamak FT é stato per diversi anni l'esperimento di punta della Comunità Europea; esso sarà presto sostituito da una versione potenziata, FTU, i cui parametri risultano

da un impiego ottimizzato dei campi magnetici elevati combinati con riscaldamento a radiofrequenza (sulla stessa linea si é posta la proposta americana di un esperimento di ignizione CIT). Il tipo di radiofrequenza perseguito a Frascati già da molti anni (frequenza ibrida inferiore) é oggi largamente adottato per la generazione di corrente nel plasma. FTU é importante per NET perché allarga lo spazio dei parametri studiati da JET, consentendo previsioni più accurate sul comportamento del plasma in NET. Al programma di Frascati contribuirà l'Istituto di Fisica del Plasma di Milano (CNR) applicando su plasmi di interesse termonucleare prodotti in FTU, la lunga esperienza acquisita nel campo della radiofrequenza.

L'Italia si é poi fatta carico di studiare la fisica di una delle due linee europee alternative al Tokamak detta Reversed Field Pinch. E' in corso di realizzazione l'esperimento RFX affidato all'Istituto Gas Ionizzati di Padova (impresa comune CNR-ENEA), noto internazionalmente per la qualità dei risultati raggiunti con precedenti esperimenti. I pregi potenziali della linea Reversed Field Pinch risiedono nelle ottime proprietà di stabilità del plasma e quindi nella possibilità di raggiungere l'ignizione senza riscaldamento esterno e senza impiegare campi magnetici altissimi come nel caso Tokamak.

I laboratori di Frascati vantano una lunga tradizione nella fusione con laser. Questo approccio é stato perseguito con sforzi limitati sia per ragioni di compatibilità con le risorse nazionali sia perché bloccato nell'ambito comunitario, per presunte interferenze con in programmi militari, a pochi percento del programma globale.

Per quanto riguarda la tecnologia, l'Italia ha una posizione adeguata nei superconduttori, sviluppati a Frascati in una fruttuosa collaborazione con l'industria: negli altri campi, salvo contributi singoli (ad esempio i servomanipolatori), l'insufficienza di competenze (ad esempio nei materiali) o di risorse, non ha ancora consentito al Paese di dare un contributo importante al programma europeo.

E' opportuno sottolineare che fino ad ora tutte le imprese italiane sulla fusione (FT, FTU, RFX, superconduttività) avendo superato rigorosi esami scientifico-tecnici hanno ricevuto un supporto finanziario EURATOM privilegiato pari al 45% delle spese di investimento.

4. MODI E TEMPI VERSO LA DIMOSTRAZIONE DELLA FUSIONE

La strategia europea verso la fusione ha un obiettivo ben individuato e cioè la realizzazione del NET: tutto il programma di fisica e di tecnologia è mirato a soddisfare i requisiti posti dalla realizzazione di questa macchina. Tutti i paesi europei hanno posto in comune le loro risorse, suddividendosi i compiti in un programma integrato. Questa strategia prevede che nel 1993 i dati di base fisici e tecnologici siano sufficienti per avviare la costruzione del NET da completarsi entro lo stesso decennio. **Il NET perciò dovrebbe dare entro il 2005 la dimostrazione completa della fattibilità della fusione.** La compressione dei tempi è tecnicamente possibile ma limitatamente a qualche anno; **in ogni caso la strategia europea che prevede di passare direttamente dal JET al NET è certamente la più rapida e la meno costosa.** Essa è anche la più efficace tecnicamente, poichè affronta simultaneamente problemi fisici e tecnologici ottimizzando il sistema e riequilibrando le difficoltà nei due campi. **Una macchina tipo NET è unanimemente** (cioè anche da americani, giapponesi e russi) **considerato il passaggio obbligato per la dimostrazione della fusione** ma l'Europa, grazie soprattutto alle grandi potenzialità del JET, ha ottime chances (da verificare definitivamente entro il 1989) di realizzarla senza ulteriori passi intermedi. Imprese intermedie, con obiettivi fisici limitati e tecnologici non rilevanti, potrebbero dare risultati solo con alcuni anni di anticipo rispetto al NET (6 anni nel caso della macchina americana d'alto campo CIT) ritardando però il raggiungimento dell'obiettivo completo.

La dimostrazione di produzione di energia competitiva con altre fonti potrebbe richiedere due passi ulteriori (reattore dimostrativo e reattore commerciale) e quindi essere raggiunta intorno al 2030.

5. RISORSE DEDICATE ALLA FUSIONE

Il finanziamento complessivo del programma fusione nei paesi della

Comunità Europea ammonta nel piano 1985-1989 a circa 2700 miliardi di lire (escluso il JET che riceve ulteriori 600 miliardi circa). Circa il 75% di queste risorse vanno all'attività di fisica e il 25% a quella di tecnologia (quest'ultima orientata al progetto NET). La distribuzione dell'impegno finanziario tra i singoli paesi (incluse risorse nazionali e contributi EURATOM) é approssimativamente la seguente: RFT 35%, FRANCIA e ITALIA circa il 22% ciascuno, altri paesi circa 20%.

I programmi americano, giapponese e sovietico hanno dimensioni confrontabili con quello europeo.

Per quanto riguarda l'Italia le risorse finanziarie dedicate alla fisica della fusione sono certamente adeguate ma insufficiente é il personale scientifico: due delle quattro grosse macchine in costruzione in Europa sono italiane (2) e l'Italia copre ben il 30 per cento dello sforzo europeo nella fisica, al pari della Francia, appena al di sotto della RFT. Ma mentre la RFT e la Francia coprono insieme il 70 per cento del programma tecnologico europeo, in questo l'Italia arriva appena al 5 per cento. Ciò consegue principalmente dalla distribuzione interna delle risorse, che in Italia vanno quasi esclusivamente verso la fisica. Questo squilibrio va urgentemente corretto pena l'esclusione, soprattutto dell'industria italiana, dalla partecipazione alle imprese di interesse reattoristico, quali il NET. Pertanto eventuali nuove risorse nazionali dovrebbero essere incanalate verso queste tecnologie che, oltre ad essere le sole rilevanti per il reattore, sono largamente innovative rispetto a quelle delle macchine odierne (ivi comprese quelle proposte per l'ignizione) e possono quindi avere larghe ricadute in altri campi di interesse industriale.

(2) Queste macchine sono: FTU, un Tokamak ad alto campo a Frascati per lo studio dei plasmi ad alta densità; RFX a Padova, sulla linea Reversed Field Pinch per lo studio di plasmi ad alta stabilità con possibilità di ignizione senza riscaldamento supplementare; Asdex Upgrade, un Tokamak con divertore a Garching (RFT) per lo studio del controllo della composizione del plasma e dei regimi ad alto confinamento; Tore Supra, un Tokamak a Cadarache (Francia), per lo studio dei plasmi di lunga durata: questa macchina, l'unica del programma francese, unisce agli obiettivi di fisica un grosso contenuto tecnologico, avendo adottato magneti superconduttori.

6. RAPPORTO TRA FUSIONE E FISSIONE

E' un dato di fatto che i contratti dati dal NET per la tecnologia (circa 150 negli ultimi tre anni per un importo di circa 300 miliardi di lire) sono stati in gran parte attribuiti ai Centri di ricerca sulla fissione europei. Ciò perchè il reattore a fusione è fondamentalmente una macchina nucleare, che ha quindi in comune con le tecnologie di fissione problemi tecnologici, dati di base, metodologia, strumentazione, controlli di qualità, complessità e problemi di sicurezza.

E' quindi difficile ipotizzare un ruolo rilevante in futuro sulla fusione per un Paese che non abbia mantenuto una solida tradizione nelle tecnologie nucleari nell'ambito sia della ricerca che dell'industria.

7. COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE

La fusione rappresenta un esempio unico di reale collaborazione fra i paesi della Comunità Europea: in essa il ruolo dei paesi é basato principalmente sul valore scientifico e tecnico del loro contributo ed é posto al riparo, almeno fino ad ora, da influenze o pressioni dei singoli governi. **L'Italia é ben inserita in questo contesto altamente competitivo che le ha assicurato: validità scientifica degli investimenti, qualità e rispetto dei tempi nei risultati ed infine importanti contributi finanziari della Commissione, di tipo privilegiato.** Percorrere vie alternative dove la mancanza di supporto scientifico (e quindi finanziario) dei paesi della Comunità viene compensata da un supporto solo nazionale non sarebbe giustificato e sarebbe dannoso soprattutto all'Italia in quanto allenterebbe i legami con il resto della Comunità.

Una collaborazione più vasta tra Europa, USA, Giappone, URSS si va delineando per una impresa comune del tipo NET. I risvolti tecnici di questa collaborazione, incoraggiata dal Summit di Ginevra, sono sicuramente positivi per l'intensificarsi dello scambio di informazioni ma rimangono forti dubbi sul realismo di detta proposta. Perplessità sorgono anche sull'opportunità tecnico-scientifica che ci si

concentri, a livello mondiale, su un solo apparato rinunciando alle complementarità fra apparati diversi, che renderebbero più completa la dimostrazione: d'altronde il costo di uno di questi apparati, compreso fra 1500 e 3000 miliardi di lire, non appare incompatibile con le risorse di ciascuno dei quattro grossi programmi mondiali.

8. PROSPETTIVE DI SICUREZZA PASSIVA NEI REATTORI A FUSIONE

Le modeste densità di potenza tipiche della linea attuale di sviluppo della fusione (tipicamente JET-NET) pongono le premesse per una sicurezza passiva dell'impianto, cioè l'impossibilità, per malfunzionamenti e guasti, di rilasci pericolosi di radioattività anche in assenza di intervento dei sistemi di emergenza. Condizione essenziale per soddisfare questo criterio è la possibilità di dissipare "passivamente" (cioè senza intervento di sistemi di raffreddamento attivi) il calore che si continua a produrre a reattore spento nelle strutture attivate dal bombardamento neutronico: si evita così la fusione di dette strutture e la volatilizzazione di sostanze radioattive nell'ambiente. La possibilità di dissipazione passiva viene meno nelle macchine compatte poiché in esse il calore residuo è altamente concentrato.

I vantaggi intrinseci della fusione sono inoltre l'impossibilità di una escursione di potenza nucleare (in caso di guasto la reazione nucleare si interrompe e comunque non si può superare la potenza nominale) ed un rischio biologico della radioattività accumulata relativamente basso (non sono infatti presenti prodotti ad alta radiotossicità quali gli attinidi e i prodotti di fissione). Il rilascio nell'atmosfera di radioattività è quindi principalmente legato ad eventuali rilasci di trizio che si trova nell'impianto in quantità vulnerabili di alcune centinaia di grammi. Le valutazioni finora eseguite con il supporto di recenti esperimenti condotti per conto del NET, escludono che il rilascio di simili quantità di trizio provochi danni acuti alle popolazioni, sicché sembra anche esclusa la necessità di evacuazione della popolazione in prossimità dell'impianto.

Nel lungo termine la fusione può sfruttare il fatto che la radioattività è indotta nei materiali strutturali e non è intrinseca al processo. Si possono quindi sviluppare nuovi

materiali nei quali i costituenti responsabili della radioattività a lungo termine sono eliminati o comunque largamente ridotti. In tal modo il problema della sistemazione delle scorie radioattive, presenti in notevole quantità nel reattore a fusione, può essere ridimensionato poiché dopo un periodo compreso fra 30 e 100 anni dette scorie possono essere sistemate a livelli superficiali o addirittura riciclate.

9. PROSPETTIVE ECONOMICHE DELLA FUSIONE

Le analisi economiche sono da considerarsi necessariamente molto preliminari e qualitative: esse indicano che, senza tenere conto di miglioramenti nella fisica e nella tecnologia rispetto alle ipotesi attuali, il costo dell'elettricità sarebbe circa il doppio di quello dei reattori a fissione attuali. Tuttavia la fusione potrà giovare, per diventare competitiva, di costi più ridotti, per esempio dei sistemi di sicurezza, del combustibile e del suo ciclo e del trattamento dei rifiuti.

Il reattore di tipo Tokamak (v. fig. 1) è una macchina complessa in particolare per la sua geometria chiusa a strati concentrici che rende laboriosa la manutenzione e la sostituzione dei componenti più interni. Da un punto di vista economico è estremamente importante la disponibilità dell'impianto (ore annue di funzionamento) e quindi l'affidabilità dei componenti diventa un requisito di primaria importanza. Alle densità di potenza corrispondenti a parametri di plasma già oggi raggiunti sperimentalmente si pongono seri problemi di affidabilità e di vita soprattutto dei componenti che interagiscono con il plasma. Queste difficoltà tecnologiche diventerebbero forse insuperabili in reattori compatti (ad esempio quelli a campo magnetico elevato) la cui affidabilità e sicurezza sarebbero, in ogni caso, estremamente incerte.

10. CONCLUSIONI

Il programma europeo sulla fusione è fornito di impianti (alcuni in via di ultimazione) adeguati per acquisire una conoscenza approfondita del comportamento di un plasma termonucleare e per fornire quindi le basi scientifiche per la

realizzazione entro il prossimo decennio del NET. I progressi compiuti in Europa nella fisica, soprattutto con il JET, e nella tecnologia di preparazione al NET, sono tali da confermare **la strategia europea, che prevede di giungere entro 15 anni circa ad una dimostrazione completa, fisica e tecnologica della fusione con la macchina NET.**

L'Italia compie già un grosso sforzo nel campo della fisica della fusione, ma non è riuscita ancora ad inserirsi in misura significativa nel programma tecnologico: nuove risorse, se disponibili, vanno perciò dedicate con assoluta priorità alla tecnologia. Occorre un lavoro sistematico e programmato sul lungo termine che sarà più utile al Paese ed alla sua industria che non ulteriori singole imprese di ricerche fisiche. Ciò vale per l'approccio Tokamak che ha raggiunto uno stadio avanzato di maturità: per altri approcci, quale ad esempio quello a confinamento inerziale, poco sviluppato in Europa, lo spazio per indagini fisiche è più ampio ma anch'esso richiede un grosso sforzo di tecnologia avanzata.

L'Italia si è molto giovata dell'integrazione del proprio programma in quello europeo e non dovrebbe in alcun caso allentare questi legami: sarebbe contro gli interessi del Paese tentare di evitare gli obblighi, e quindi rinunciare ai benefici, che da questa integrazione derivano. La dimostrazione della fusione può essere fatta solo su scala europea; l'Italia può allargare il suo ruolo globale ma nell'ambito del programma europeo e in tal modo contribuire alla realizzazione, nei tempi previsti, della strategia europea.

Il reattore a fusione è fondamentalmente una macchina nucleare, e pertanto un Paese che non abbia una buona tradizione in tecnologie nucleari non potrà aspirare ad un ruolo rilevante nello sviluppo della fusione.

Le prospettive di utilizzo della fusione come sorgente di energia elettrica sono buone se si considerano contestualmente gli aspetti economici, di sicurezza e di impatto ambientale; per quanto riguarda i tempi, la dimostrazione di fattibilità data NET, prevista entro il 2005, aprirà la strada alla realizzazione di reattori di potenza che probabilmente già alla seconda generazione, cioè intorno al 2030, potrebbero competere con le sorgenti di energia elettrica convenzionali. (R.T.)

Fig. 1. - Schema della macchina NET (Next European Torus) per la dimostrazione delle fattibilità scientifica e tecnologica della fusione: 1) mantello, 2) prima parete, 3) schermo, 4) criostato, 5-6 pompaggio, 7) bobine toroidali, 8) solenoide centrale, 9) plasma, 10) piastre divertore, 11) bobine poloidali.

