

**RELAZIONE
DEL PROFESSOR UMBERTO COLOMBO**

PAGINA BIANCA

11 dicembre 1986

COMMISSIONE INDUSTRIA DELLA CAMERA

INDAGINE CONOSCITIVA SULLA FUSIONE NUCLEARE CONTROLLATA

Relazione introduttiva del Prof. Umberto Colombo

Desidero anzitutto esprimere, anche a nome dell'ENEA, il piu' vivo compiacimento alla Commissione Industria della Camera per aver deciso di indire questa indagine conoscitiva sul problema della fusione nucleare controllata, anche in vista della prossima Conferenza Nazionale sull'Energia.

E', questo, un tema articolato in diverse linee programmatiche ed estremamente complesso, sotto il profilo sia della fisica sia della tecnologia. Il tema coinvolge anche implicazioni economiche, ambientali, radiobiologiche.

Il Prof. Rubbia, che avete ascoltato il 25 novembre, ha illustrato i principi fisici della fusione con estrema

chiarezza, e non e' qui necessario ripetere una descrizione che sarebbe a questo punto fuori luogo.

D'altra parte, abbiamo ritenuto che fosse piuttosto il nostro compito in questa occasione illustrarvi il programma italiano sulla fusione nucleare, collocandolo nel quadro del programma di ricerca e sviluppo comunitario e in quello piu' ampio internazionale, e dichiararci pronti a rispondere alle domande che gli Onorevoli Commissari vorranno farci.

Come negli altri maggiori paesi europei, l'interesse per la fusione nucleare controllata nasce in Italia nel 1956. Due anni dopo, nel 1958, grazie agli sforzi del Prof. Edoardo Amaldi, viene creato un gruppo di fisica del plasma presso l'Universita' di Roma, e ne viene posto a capo il Prof. Bruno Brunelli. Nel 1960 l'attivita' di ricerca si sposta in un nuovo laboratorio creato nel Centro di Frascati, e viene incorporata nell'associazione sulla fusione fra l'EURATOM e il CNEN. A questa attivita' si aggiungera', nel 1973, un altro contratto di associazione fra EURATOM e CNR nel quale il compianto Prof. Piero Caldirola ha giocato un ruolo guida.

Negli anni '60 l'attivita' di ricerca a Frascati sulla fusione si concentra in esperimenti caratterizzati da alta

densita' di energia, con una linea principale dedicata alle scariche implosive veloci ("plasma focus"). A questa linea si aggiungono altri programmi di ricerca originali, come la prima applicazione dei laser e degli alti campi magnetici alla fusione controllata.

Gli anni '70 sono quelli della grande scelta strategica a livello comunitario, e questa scelta cade sul programma Tokamak, che proprio allora emerge come la configurazione di confinamento magnetico del plasma piu' promettente. Il CNEN, col suo gruppo di Frascati, sceglie la linea Tokamak ad alti campi magnetici e alta densita', che caratterizza ancora oggi in modo prevalente il programma dell'Ente. Il successo a livello internazionale delle ricerche impostate in Italia in quegli anni e' illustrato dal fatto che per molto tempo Frascati ha detenuto il record mondiale del parametro di confinamento del plasma, prima con l'esperimento "plasma focus", poi col Tokamak FT tuttora in funzione. Questo successo e' dovuto alla scelta strategica dell'Ente di concentrare la massima parte delle sue risorse su un solo obiettivo.

Le conoscenze sulla fisica della fusione acquisite attorno al Tokamak FT permettono al personale ENEA di Frascati di inserirsi attivamente in tutti i progetti europei e internazionali nel campo della fusione a confinamento magnetico.

In particolare, l'Italia ha conferito al JET, la grande macchina sperimentale comunitaria in funzione a Culham, presso Oxford, non solo l'apporto determinante di alcuni suoi esperti, ma la realizzazione di indispensabili apparati sperimentali. Va aggiunto che il Direttore del programma europeo NET, che sta progettando la macchina della nuova generazione (la quale arrivera' a essere costruita negli anni '90) e' il Prof. Romano Toschi, distaccato a Garching dall'ENEA.

E' opportuno ricordare che il programma comunitario di ricerca e sviluppo sulla fusione nucleare e' basato su un progetto principale gestito direttamente dalla Comunita' (ed e' questa, appunto, la linea JET-NET) e su una serie di programmi complementari, che i diversi paesi della Comunita' definiscono con la Commissione, e che sono passati al vaglio di un comitato scientifico consultivo prima di avere accesso al contributo finanziario della Comunita'.

L'Italia conferisce al programma comunitario, oltre al gia' citato progetto FT, ora in fase di conclusione delle esperienze, il progetto FTU (costruzione iniziata nel febbraio 1983), una macchina piu' potente, e dotata di un riscaldamento ausiliario a media frequenza, tale da

portare la temperatura del plasma a valori compresi fra 50 e 90 milioni di gradi.

Questa delle macchine Tokamak a medio-alto campo magnetico non e' l'unica linea perseguita dall'Italia nell'ambito del programma comunitario: grazie allo sforzo del gruppo del CNR di Padova, che si e' avvalso nelle fasi iniziali della collaborazione del gruppo del CNR presso l'Universita' di Milano, si sta realizzando ora una macchina per sperimentazioni sui plasmi, sempre basata sul confinamento magnetico, ma con una geometria alternativa rispetto ai Tokamak: e' il progetto RFX (Reverse Field Pinch) che studia plasmi con alte densita' di energia termica ed elevate correnti in campi magnetici relativamente bassi.

C'e' poi il progetto Ignitor, una macchina volta alla dimostrazione della fattibilita' fisica della fusione nucleare controllata, attraverso il raggiungimento dell'ignizione del plasma trizio-deuterio e basata su una configurazione Tokamak molto compatta e con campi magnetici molto elevati.

Come e' noto, il proponente del progetto Ignitor e' il Prof. Bruno Coppi, un valente fisico italiano che da molti anni svolge ricerca all'MIT americano e che aveva ideato e

attuato precedentemente una macchina ad alto campo magnetico di piccole dimensioni, l'Alcator, che puo' essere considerato il precursore di Ignitor.

Il Prof. Coppi, che da parecchi anni e' consulente dell'ENEA, ci ha presentato una prima proposta di Ignitor nel 1979. Inizialmente, vi sono state da parte ENEA alcune perplessita' sul progetto, sia per considerazioni tecniche (le prestazioni elevatissime richiedono di sfruttare i materiali al limite della resistenza meccanica) e di valutazione che il proponente faceva dei costi (giudicata eccessivamente ottimistica), sia soprattutto perche' appariva difficile inserire questo progetto nell'ambito del programma comunitario, che prevede di raggiungere gradualmente le condizioni di accensione del plasma in macchine piu' rappresentative dei futuri reattori a fusione.

La successiva azione dell'ENEA e' stata pertanto diretta in due direzioni: l'approfondimento progettuale e di costo dell'Ignitor attraverso studi di fattibilita' e progettazione preliminare; e il tentativo di inserire il progetto Ignitor nel programma fusione della Comunita' Europea, che ha portato all'esame del progetto da parte di una serie di gruppi di esperti scelti dalla Commissione, oltre che dagli uffici della Commissione stessa. Entrambe

queste linee hanno portato a risultati positivi: da una parte si dispone oggi di un progetto preliminare considerato fattibile, e valutato in ambito industriale; d'altra parte, la Commissione ha deciso di assumere a proprio carico l'onere del 25% del costo della fase di progettazione esecutiva, nominando al tempo stesso un nuovo gruppo di esperti che deve valutare, anche alla luce degli esperimenti tecnologici effettuati su commessa e con partecipazione diretta dell'ENEA, la validità delle soluzioni proposte.

Nel frattempo, risultati scientifici ottenuti nelle sperimentazioni sui Tokamak hanno mostrato incertezze nella teoria che a nostro parere motivano maggiormente l'utilità di un esperimento di ignizione anche se in condizioni non direttamente rappresentative del futuro reattore, purché consenta di raccogliere dati parametrici sul fenomeno dell'ignizione. Anche per questo motivo, Ignitor va corredato di ulteriori diagnostiche e modificato in alcune scelte progettuali perché sia in grado di eseguire un numero di prove più elevato rispetto alla concezione iniziale. Questo duplice processo, di approfondimento della fattibilità tecnologica e di inserimento del progetto in ambito comunitario, ha preso un tempo complessivo di circa 7 anni, come è illustrato schematicamente in un documento allegato. Questo non è

però un caso anomalo e non deve destare stupore, perché è costume - peraltro corretto - della comunità scientifica approfondire obiettivi e modalità di realizzazione quando sono in gioco grosse entità di risorse finanziarie e umane. Del resto, nell'iter di elaborazione degli studi di fattibilità del progetto Ignitor i parametri caratteristici e la stessa concezione della macchina hanno subito numerose sostanziali modifiche, illustrate nel testo allegato.

Si è fin qui parlato dei progetti principali che l'Italia persegue nell'ambito dei programmi europei nel confinamento magnetico. Tali progetti non esauriscono però lo sforzo complessivo, scientifico e tecnologico che l'ENEA, in collaborazione prevalentemente col CNR ma anche con diverse università, svolge sul fronte della fusione. Anzitutto, le stesse macchine sperimentali internazionali cui si è fatto cenno costituiscono un'occasione di qualificazione della nostra industria in settori ad alta tecnologia, con riferimento sia alle immediate forniture di componenti, sia alla preparazione di un sistema industriale nazionale in grado di competere al momento in cui, fra qualche decennio, la fusione diventerà, auspicabilmente, un importante settore produttivo. In questo ambito rientra il successo ottenuto da Ansaldo (Genova) anche in collaborazione con FIAT e da Metalli

Industriali (Firenze) nelle forniture europee di magneti anche superconduttori ad alto campo e di cavi per la superconduttività. In un opuscolo che illustra il contributo italiano al JET sono indicati alcuni altri esempi di significative forniture industriali. Incidentalmente, osserviamo che il JET è equipaggiato da robot per manipolazione a distanza forniti su brevetto e progetto dell'ENEA da imprese italiane. Tutto questo ha richiesto al nostro Ente un notevole impegno, che sta dando validissimi e apprezzati frutti, anche al di fuori del ristretto ambito della fusione, in quanto determinano applicazioni di tecnologie avanzate in altri settori produttivi, sia di punta sia maturi. Fra le più significative tecnologie possiamo citare: i laser; i magneti e altri componenti superconduttori; la robotica; i materiali avanzati e in particolare i ceramici; i sistemi di elettronica di potenza e radio-frequenza. È in queste tecnologie ad ampio spettro di utilizzazione che l'ENEA ha finora prioritariamente destinato l'impegno sugli aspetti tecnologici della fusione, anche perché ha ritenuto prematuro un impegno di ampie dimensioni su tecnologie esclusive del futuro reattore a fusione ancor prima che siano definite le opzioni impiantistiche di fondo.

Sulla strada alternativa al confinamento magnetico, quella del confinamento inerziale, si è già accennato

all'attività pionieristica del CNEN fino dagli anni '60, da cui sono derivate alcune fra le prime pubblicazioni a livello mondiale sulla fusione laser. Indipendentemente dalle previsioni su quale linea abbia migliori prospettive di successo, problema sul quale gli esperti non hanno una opinione univoca, la scelta italiana di concentrare l'attività sul confinamento magnetico e' stata dettata soprattutto dalla possibilità di inserire questa attività in un programma comunitario per il quale si sono poi aperte intese e collaborazioni anche extraeuropee. Mancando una analoga possibilità per il confinamento inerziale, il nostro Ente si e' limitato ad attuare una strategia volta a creare e mantenere competenze scientifiche e tecnologiche con un programma sperimentale contenuto ma significativo, e di alto livello scientifico. L'ENEA ha ottenuto anche in questo campo risultati di notevole valore, pur con le limitate risorse disponibili. Il laser a neodimio sviluppato a Frascati ha già ottenuto importanti risultati nello studio dell'interazione laser-materia, e sarà presto in grado di essere usato per esperienze di compressione e accelerazione di bersagli piani, rilevanti ai fini fusionistici. I laser a eccimeri e a elettroni liberi, pure sviluppati dall'ENEA, costituiscono strumenti fra i più avanzati messi a punto in Europa, e sono ora oggetto di attenzione anche ai fini di altre applicazioni tecnologiche (ad esempio in ambito Eureka).

Forse e' giunto il momento di verificare se non esistano le condizioni per una larga cooperazione internazionale nella fusione a confinamento inerziale. Il Giappone ha gia' un consistente programma interamente civile in questo campo, e anche la Germania lo segue su questa strada. Vi sono ragioni di ritenere che i principali motivi che imponevano un tempo ai paesi nuclearmente armati una riservatezza su questi argomenti abbiano perso gran parte della loro validita'. Peraltro, nel clima distensivo verso cui auspicabilmente si dovrebbe andare, una iniziativa politica per una estesa collaborazione internazionale in questo campo potrebbe avere successo.

Si tratta di un programma di grande complessita'. Devono infatti essere realizzati: una sorgente di energia potente ed efficiente, sotto forma di radiazione laser o, in alternativa, di fasci di ioni accelerati; una tecnologia per il trasferimento dell'energia dalla sorgente alla miscela pellettizzata di combustibile; infine, un reattore con funzioni di contenimento del combustibile e dei prodotti radioattivi della reazione, e di trasferimento dell'energia di fusione a un sistema di scambio termico per l'ottenimento di vapore.

Il primo passo per l'auspicabile collaborazione

internazionale dovrebbe essere un impegno volto a integrare a livello europeo le iniziative a diverso titolo già in corso sul confinamento inerziale e sulle tecnologie connesse. Nel quadro di un nuovo programma europeo aperto anche a più ampie collaborazioni internazionali, il nostro livello di sforzo sulla fusione a confinamento inerziale potrebbe convenientemente essere incrementato. Riteniamo di avere acquisito, con l'attività fin qui svolta anche al di fuori del settore strettamente fusionistico, le premesse sufficienti per rendere fattibile un tale sviluppo.

In tale prospettiva dovrebbe essere attentamente valutata la proposta avanzata in questa sede dal Prof. Rubbia, volta a definire e a lanciare una grande iniziativa internazionale per la fusione a confinamento inerziale. L'ENEA è pronto a collaborare con il Prof. Rubbia fin dal necessario studio iniziale di fattibilità'.

L'ENEA ha mantenuto attraverso gli anni una linea coerente e determinata di sviluppo della fusione nucleare, nel contesto del programma Comunitario. Anche quando, all'inizio degli anni '80, ci è stato chiesto da Parlamento e Governo un impegno prevalente per l'attuazione del programma elettronucleare nazionale, oltre a una diversificazione verso le energie rinnovabili e il risparmio energetico, l'ENEA non ha rallentato, ma

piuttosto ha intensificato, lo sforzo sulla fusione. Dati sugli impegni finanziari e di personale per la fusione sono riportati in allegato.

Noi riteniamo che sia necessario mantenere ed eventualmente progressivamente accrescere il nostro impegno nella fusione, anche se e' sempre opportuno tener presente che la fusione ha bisogno di tempi molto lunghi. E' ancora da dimostrare la fattibilita' scientifica dell'ottenimento di un bilancio energetico positivo dalla fusione, obiettivo che auspicabilmente sara' raggiunto nella prima meta' degli anni '90. Lo sviluppo delle complesse tecnologie necessarie per i reattori a fusione, la loro integrazione per ottenere dall'intero sistema (plasma e sistemi ausiliari) piu' energia elettrica di quella spesa per alimentarlo pervenendo in tal modo alla industrializzazione della fusione, richiedera' tempi che si protrarranno oltre il 2010. Soltanto allora sara' possibile progettare un prototipo di reattore a fusione, e valutarne realisticamente gli aspetti economici, di affidabilita' e quelli ambientali. Un confronto dei progetti concettuali di reattori a fusione con sistemi gia' sviluppati (e in particolare con i reattori nucleari a neutroni veloci), basato sull'analisi dei componenti similari, del peso dei materiali, ecc., non fa comunque ritenere che la fusione nucleare sara' una fonte energetica a basso costo.

In complesso, il programma fusione segue oggi quello sui reattori veloci con circa quaranta anni di ritardo. E', questo, un intervallo di tempo che a nostro parere e' difficilmente riducibile, se si pensa che il solo mantenere questo ritardo senza aggravarlo significa disporre, nel 2025, di una capacita' produttiva di energia elettrica di fusione di alcuni miliardi di kWh/anno. La disponibilita' praticamente inesauribile di combustibile, e la minore gravita' dell'impatto ambientale previsto rispetto alla fissione, fanno della fusione nucleare un obiettivo da perseguire con fermezza, nonostante i costi elevati e i tempi lunghi.

Non si fa un servizio alla fusione facendo credere che questa nuova fonte energetica sia un obiettivo vicino, ne' che esistano facili scorciatoie. Creare speranze non realistiche produrrebbe fatalmente delusioni che prima o poi si rifletterebbero negativamente sul futuro di questa fonte. La crescita del programma italiano puo' avere un forte impulso, ma deve essere in qualche modo commisurata a quella del programma mondiale, una crescita che avverra' naturalmente man mano che la priorita' passa dall'obiettivo di comprendere i fenomeni fisici a quello di realizzare prototipi e impianti dimostrativi per produrre energia da fusione in condizioni significative da un punto di vista industriale.

La fusione rappresenta oggi in Italia un momento di grande interesse, che puo' preludere a un rilancio. L'ENEA e' pronto a svolgere il suo ruolo anche in questa fase. E', questo, un discorso di costruzione del futuro energetico di lungo termine, che non deve pero' in alcun modo sostituirsi alle azioni, per le quali il contributo dell'ENEA puo' essere determinante, che sono tuttora drammaticamente necessarie, volta a far uscire l'Italia in tempi ragionevoli da una situazione di vulnerabilita' che oggi la differenzia pericolosamente dagli altri paesi industriali.

CRONOLOGIA DEI PRINCIPALI EVENTI RELATIVI ALL'INIZIATIVA IGNITOR NEL
QUADRO DELLE ATTIVITA' ITALIANE SULLA FUSIONE

- 1979 - Il Prof. Bruno Coppi durante una serie di seminari propone alla comunità scientifica italiana, interessata alla fisica dei plasmi, la realizzazione di una macchina sperimentale di tipo Tokamak denominata IGNITOR funzionante con miscela Deuterio-Trizio per raggiungere il regime di ignizione e studiare il comportamento di un plasma in questo regime.
- 1980 - (gennaio 30) Dato l'interesse dei risultati conseguiti con macchine ad alto campo (ALCATOR A e poi ALCATOR C negli USA, FT dell'ENEA a Frascati), l'ENEA decide di finanziare, con uno stanziamento di 110 milioni a favore della Scuola Normale Superiore di Pisa, uno studio di fattibilità dell'esperimento.
- 1981 - (maggio) La Scuola Normale Superiore di Pisa consegna all'ENEA il documento contenente lo studio di fattibilità del Progetto IGNITOR. Il progetto prevede prestazioni di materiali e soluzioni tecnologiche al limite della fattibilità e non ancora dimostrate. La configurazione di campo magnetico non è rappresentativa, a quanto è possibile prevedere, dei parametri di funzionamento del futuro reattore che darà energia da fusione. Nondimeno l'obiettivo di studiare il plasma come sopra indicato rende interessante l'esperimento qualora siano superate le suddette incertezze tecnologiche.
- 1981 - (novembre) L'ENEA, esaminato lo studio di fattibilità, lo sottopone al parere scientifico e tecnico della Commissione della CEE al fine di un eventuale inserimento del progetto nel programma pluriennale della Comunità, in applicazione della scelta di fondo adottata dall'Italia di operare in questo settore solo nel quadro delle iniziative comunitarie.
- 1982 - (dicembre) Il Comitato Consultivo per il Programma Fusione dell'Euratom (CCPF) nomina un Gruppo di Lavoro internazionale presieduto da Sir J. Adams (CERN) e composto da autorevoli esperti mondiali della fisica del plasma (Rosenbluth, Reardon -U.S.A.-, Bickerton -G.B.-, Rebut -F-), con il compito di esaminare gli elaborati del Progetto IGNITOR e formulare un parere sulla fattibilità fisica e tecnologica dell'esperimento.
- 1982 - (dicembre 22) Il CIPE dà mandato al Ministro per la Ricerca Scientifica e Tecnologica di formulare una linea programmatica aggiornata sulle attività di ricerca nel settore della fusione al fine di definire una strategia nazionale di intervento in questo settore. A questa data tra le più significative iniziative sono: la macchina FTU - parte del IV Piano Quinquennale dell'ENEA e in corso di realizzazione a Frascati -; la macchina RFX del CNR di Padova - approvata dalla CEE, ma ancora da finanziare -; gli studi avviati dall'ENEA sul Progetto IGNITOR.

- 1983 - (febbraio) Il Gruppo di Lavoro "Adams" conclude che la base fisica di IGNITOR è ben ponderata ed almeno altrettanto valida di quella di altre macchine quali JET (Joint European Torus) e TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor, USA). Il Gruppo pone l'accento sul fatto che l'interesse di IGNITOR risiede nella sua capacità di esplorare plasmi (D + T), in regime di ignizione, o almeno in regimi molto prossimi all'ignizione, con una macchina a costi relativamente moderati e realizzabile in tempi abbastanza brevi.
- Il Gruppo tuttavia sottolinea la natura preliminare degli elaborati sottoposti, l'evoluzione di alcune importanti specifiche intervenute successivamente alla presentazione degli elaborati stessi e solleva alcune riserve sulla fattibilità tecnica, suggerendo anche i necessari approfondimenti.
- I principali rilievi formulati dal Gruppo "Adams" si possono così riassumere:
- necessità di prevedere il riscaldamento addizionale del plasma mediante radiofrequenza modificando in tal modo sensibilmente la proposta originaria;
 - scarsa accessibilità per le diagnostiche alla zona del plasma;
 - riserve sulla capacità dei sistemi isolanti di resistere alle forti sollecitazioni meccaniche indotte dagli elevati campi magnetici;
 - riserve sulla capacità della camera a vuoto di resistere alle possibili disruzioni del plasma ed alle sollecitazioni termiche.
- 1983 - (ottobre 19) Il CIPE approva la proposta programmatica complessiva presentata dal Ministro per la Ricerca Scientifica e Tecnologica d'intesa con il Ministro per l'Industria. Conseguentemente mentre è confermata la realizzazione di FTU e viene approvato l'inserimento del progetto RFX tra gli obiettivi programmatici dell'ENEA con inizio nel IV Piano Quinquennale 1980-'84 dell'Ente, è raccomandato all'ENEA di elaborare uno studio complessivo di fattibilità per il Progetto IGNITOR.
- 1983 - (novembre) Il C.C.R. di Ispra produce uno studio di installazione di Ignitor nel Centro stesso che prevede l'utilizzo dell'edificio del reattore ESSOR, edificio inutilizzato, in quanto decaduto il progetto Super SARA. Lo studio dimostra, oltre all'abbattimento dei costi per le infrastrutture esterne alla macchina, il fatto che ad Ispra è disponibile direttamente dalla rete ENEL la potenza elettrica richiesta da IGNITOR.
- 1984 - Proseguono le attività tecniche di un gruppo misto con partecipazione anche di personale ENEA per approfondire vari aspetti scientifici e tecnologici del Progetto IGNITOR. Relativamente alle successive fasi di progettazione costruttiva e di realizzazione, l'ENEA nella formulazione del V Piano Quinquennale 1985-'89 propone che l'esperimento, venga

inserito nell'ambito del programma comunitario, come attività diretta dei Centri CEE, in particolare del Centro di Ispra, ovvero come impresa comune.

Il Piano ENEA inoltre prevede che a questo scopo dovranno essere condotte le necessarie azioni anche in sede politica perchè IGNITOR sia inserito nel Piano CEE relative al periodo 1985-'89, sotto condizione di esito positivo degli esperimenti da condurre per dimostrare la sua fattibilità.

- 1985 - (marzo 1) Il CIPE delibera l'approvazione del Piano Quinquennale 1985-'89 dell'ENEA impartendo la direttiva che la realizzazione dei progetti FTU e RFX sia proseguita nel quadro della collaborazione europea, costituendo anche opportunità di qualificazione e promozione dell'industria nazionale per lo sviluppo di tecnologie avanzate con un campo di applicazione più ampio del settore nucleare. Per quanto riguarda IGNITOR il CIPE puntualizza che gli studi di fattibilità in corso, dovranno essere completati in modo che si possa disporre di una base concreta per la realizzazione dell'esperimento, come progetto comune CEE, nell'ambito dei programmi da svolgere presso il Centro comune di ricerche di Ispra con eventuale collaborazione di Stati Uniti e Canada.
- 1985 - (aprile-luglio) L'ENEA, in collaborazione con il Prof. Coppi, elabora le specifiche per l'assegnazione di un contratto per lo studio di fattibilità del progetto IGNITOR con la completezza e l'organicità necessarie per un pronunciamento della CEE e identifica nella Soc. Tecnomasio Italiano Brown Boveri di Milano (TIBB), che aveva già collaborato al precedente studio affidato alla Normale di Pisa, il gruppo industriale più adatto a organizzare l'esecuzione del lavoro avvalendosi anche dell'apporto, oltre che di personale ENEA, anche di esperti del CNR, di varie Università italiane e di numerose industrie del settore e con il contributo scientifico del Prof. Coppi.
- 1985 - (settembre 11) La Giunta Esecutiva dell'ENEA delibera di stipulare, con la Soc. TIBB, un contratto per la stesura definitiva dello studio di fattibilità del Progetto IGNITOR, per un importo di 500 milioni di lire e di svolgere alcune attività tecniche di valutazione e verifica direttamente all'interno dell'Ente.
- 1985 - (dicembre 31) La Soc. TIBB consegna all'ENEA il rapporto contenente la stesura definitiva dello studio di fattibilità del Progetto IGNITOR.
Il costo della macchina, stimato dal gruppo di lavoro che ha prodotto lo studio ammonta, nell'ipotesi di installazione ad Ispra, a 180 miliardi di lire (di cui 15 miliardi per imprevisti) ed il tempo richiesto per la sua realizzazione è di 4 anni; il costo del programma sperimentale è stimato in 130 miliardi di lire su un arco di tempo di 5 anni.

- 1986 - (febbraio 25) La Giunta Esecutiva dell'ENEA esamina, con la partecipazione della struttura dell'Ente e gli esecutori dello studio, il rapporto prodotto. Viene confermata l'esigenza indicata nel rapporto di avviare alcune verifiche sperimentali per la validazione dello studio.
- 1986 - (maggio) L'ENEA predispone, in collaborazione con le industrie italiane interessate e con l'apporto della Brown-Boveri svizzera di Baden e del Prof. Coppi il programma delle verifiche sperimentali per la validazione dello studio.
- 1986 - (giugno 18) Il Consiglio di Amministrazione dell'ENEA delibera:
- di autorizzare l'esecuzione del programma di verifiche sperimentali, mediante la stipula dei relativi contratti, per un ammontare complessivo di 1.885 milioni di lire;
 - di sottoporre alla Comunità Europea, in adempimento alla delibera del CIPE, la proposta che il Progetto IGNITOR sia realizzato sotto forma di conduzione diretta della Comunità. Lo studio è affidato sotto committenza ENEA, a una associazione di imprese formata dalle Società ANSALDO, FIAT-TTG e TIBB che è previsto si avvalgano anche di ulteriori contributi da parte di altri operatori.
- 1986 - (luglio) La pianificazione di dettaglio delle prove, lo stato di avanzamento della definizione del programma CEE sulla fusione e il risultato di consultazioni con la Commissione e con rappresentanti di paesi comunitari, inducono ad attivare formalmente il processo decisionale CEE anche prima che il programma di verifiche sperimentali sia completato.
- 1986 - (settembre 16) Il Presidente dell'ENEA trasmette il rapporto descrittivo dello Studio di fattibilità del Progetto IGNITOR alla Commissione delle Comunità Europee. In tale rapporto, che costituisce un notevole progresso rispetto alla documentazione precedentemente prodotta, è descritta una macchina con specifiche congruenti per le sue diverse parti e con un adeguato livello di approfondimento in relazione a soluzioni tecniche, tempi e costi di realizzazione.
- 1986 - (ottobre 15) Il Ministro Granelli propone alla Commissione, con lettera diretta al Vicepresidente Narjes, di realizzare IGNITOR presso il Centro di Ispra attraverso un'impresa comune con la partecipazione dell'Italia e dell'Euratom, aperta anche ad altri Paesi membri interessati, ed eventuali Paesi terzi. Secondo le indicazioni del Ministro il contributo della Commissione può avvenire anche in natura (messa a disposizione del sito e delle infrastrutture nonché di esperti da associare al progetto ed alla condotta sperimentale della macchina).
- 1986 - (ottobre 30) I rappresentanti della Commissione comunicano al Comitato Consultivo Programma Fusione l'intenzione di avviare, nell'ambito della associazione Euratom-ENEA per la fusione, la progettazione di dettaglio della macchina IGNITOR: durata

prevista 18 mesi, costo 10 MECU. La Commissione intende farsi carico del 25% della spesa in applicazione della prassi in atto per tutte le attività relative a fasi di progettazione. Parallelamente verrà istituito un Comitato ad hoc di esperti con il compito di valutare nei prossimi mesi, anche alla luce dei risultati delle prove sperimentali in corso, la validità delle specifiche soluzioni tecniche da adottare.

Gli esiti delle azioni indicate dalla Commissione, assieme ad una proposta su modalità di finanziamento e condizioni tecnico-organizzative per la realizzazione della macchina, verranno sottoposte al CCPF per un parere definitivo.

Per quanto riguarda più ampie collaborazioni internazionali va rilevato che il programma U.S.A. sulla Fusione prevede la realizzazione di una macchina compatta ad alto campo denominata CIT con caratteristiche simili ad IGNITOR. Sia CIT che IGNITOR si prefiggono l'obiettivo di studiare il comportamento di plasmi in regime di ignizione consentendo di acquisire, entro tempi relativamente brevi ed a costi contenuti, dati importanti per la progettazione dei grossi reattori da realizzare nella seconda metà degli anni '90 in ambito internazionale. Le due iniziative CIT e IGNITOR dovranno comunque essere condotte in modo coordinato ed il più possibile complementare e non si può escludere che si realizzino anche partecipazioni incrociate.

L'Italia sta operando attivamente per inserire IGNITOR in una collaborazione internazionale più ampia, estesa anche agli U.S.A. Questa azione, a cui l'ENEA ha dato un particolare contributo, si sviluppa nell'ambito dell'iniziativa Tecnologia, Crescita, Occupazione dei Sette Paesi del Vertice Economico, che ha portato ad istituzionalizzare una sede permanente di consultazione per definire collaborazioni nel settore della Fusione.

IL PROGRAMMA ITALIANO SULLA FUSIONE NUCLEARE.

1. Il programma italiano nella cornice europea
2. I primi anni della ricerca sulla fusione a Frascati
3. La macchina FT e il progetto di fisica della fusione
4. Il progetto della nuova macchina Tokamak FTU
5. Il progetto delle nuove macchine RFX
6. Il progetto ingegneria del reattore a fusione
7. Fusione a confinamento inerziale

IL PROGRAMMA ITALIANO SULLA FUSIONE NUCLEARE

1. IL PROGRAMMA ITALIANO NELLA CORNICE EUROPEA.

Le ricerche italiane sulla fusione nucleare, demandate all'ENEA da una delibera del CIPE del 19 ottobre 1983, sono svolte prevalentemente presso il Centro ricerche energia dell'ENEA a Frascati e, mediante opportuni accordi con il CNR, nei laboratori del CNR di Padova e Milano. Esse sono parte integrante e significativa del programma europeo sulla fusione. Va osservato che per decisione - piu' volte ribadita - del Consiglio dei Ministri della Comunita' Economica Europea "il Programma Fusione Comunitaria e' il progetto di cooperazione a lungo termine che comprende tutte le attivita' svolte negli Stati Membri nel campo della fusione termonucleare controllata".

Relativamente alle linee principali del programma europeo - che di seguito si elencano - il contributo italiano puo' essere cosi' caratterizzato:

- Sfruttamento scientifico della principale esperienza Tokamak europea, il JET: l'ENEA, che ha gia' recentemente in modo consistente alla fase di progetto e costruzione, ha recentemente sviluppato e montato al JET due tra le principali diagnostiche, e i suoi ricercatori partecipano attivamente al programma scientifico.
- Costruzione e sfruttamento delle tre nuove macchine Tokamak europee a media grandezza, TORE SUPRA (Francia), ASDEX Upgrade (Germania), FTU (Frascati): l'ENEA contribuisce con la macchina FTU che viene descritta piu' avanti.
- Definizione e pre-progettazione di una macchina tipo Tokamak volta alla dimostrazione della fattibilita' scientifica della fusione, il NET, e sviluppo organico di tecnologie di interesse reattoristico: il Progetto ingegneria del reattore e fusione dell'ENEA (descritto piu' avanti) partecipa attivamente all'impresa NET.
- Studio di una macchina compatta ad alto campo denominata IGNITOR proposta dal Prof. B. Coppi che dovrebbe consentire entro tempi relativamente brevi e a costi contenuti di

studiare il comportamento di un plasma D-T in regime di ignizione. La progettazione dettagliata della macchina, la cui futura realizzazione e' prevista presso il Centro di Ricerche della Comunita' ISPR, iniziera' prossimamente nell'ambito della associazione Euratom-ENEA per la fusione.

- Costruzione e sfruttamento delle due principali macchine a geometria toroidale alternative alla linea principale Tokamak, lo Stellarator Wendelstein VII AS (Germania) e la macchina Reverse field pinch, RFX (Padova): l'Italia da' un contributo fondamentale con la macchina in costruzione a Padova. La realizzazione della macchina e' sotto la responsabilita' diretta dell'Istituto Gas Ionizzati del CNR di Padova, cui e' affidata la Direzione Tecnica dell'Impresa. L'ENEA, oltre ad assicurare il finanziamento per la quota italiana agli investimenti, collabora con la consulenza tecnica e fornisce il supporto dei propri servizi tecnico-amministrativi per l'emissione e la gestione dei principali contratti.
- Sviluppo di metodi di riscaldamento del plasma per i futuri impianti a confinamento magnetico. Il programma italiano contribuisce con:
 - a) ricerche e sviluppo di sistemi di riscaldamento con onde elettromagnetiche alla frequenza ciclotronica elettronica presso l'Istituto CNR di Milano;
 - b) ricerche e sviluppo di sistemi di riscaldamento con onde elettromagnetiche alla frequenza ibrida inferiore presso l'ENEA, Frascati;
 - c) collaborazione tra ENEA, Frascati e IPP Garching (RF) per studi ed esperimenti con l'ibrida inferiore su Asdex.
- Sviluppo delle competenze relative al confinamento inerziale: nell'ambito comunitario, uno degli sforzi principali europei e' rappresentato dal Progetto divisionale fusione inerziale dell'ENEA a Frascati.

Il programma italiano sulla fusione e' quindi presente in modo significativo in tutte le principali linee programmatiche, europee, con le attivita' svolte nei laboratori ENEA, in particolare quelli del dipartimento fusione di Frascati, e negli istituti CNR di Padova e Milano sulla base dell'accordo ENEA-CNR. Una caratteristica principale del programma fusione ENEA e' l'importante promozione delle capacita' dell'industria nazionale che risulta sia dalle commesse affidate all'industria

nazionale per la realizzazione di componenti qualificati dalle macchine sperimentali italiane e piu' in generale europee sia dal trasferimento all'industria di tecnologie derivate dalla fusione e di piu' ampia valenza.

I grafici e le tabelle allegate forniscono un'indicazione delle risorse finanziarie destinate dall'ENEA al programma nazionale sulla fusione nucleare nel periodo 1974-89, nonche' l'ammontare dei contributi Euratom a tale programma.

2. I PRIMI ANNI DELLA RICERCA SULLA FUSIONE A FRASCATI

Come per gli altri maggiori paesi europei, l'interesse per la fusione controllata nasce in Italia nel 1956. Due anni dopo, grazie soprattutto agli sforzi del Prof. E. Amaldi, viene creato un gruppo di fisica del plasma presso l'Universita' di Roma, guidato dal Prof. B. Brunelli. L'attivita' di ricerca nel 1960 si sposta in un nuovo laboratorio creato nel Centro di Frascati e viene inclusa nell'Associazione sulla fusione tra l'EURATOM e l'allora CNEN. A questa si aggiungera' nel 1973 un altro contratto di associazione tra l'EURATOM e il CNR.

Negli anni sessanta l'attivita' di ricerca a Frascati sulla fusione si concentra su esperimenti caratterizzati da alte densita' di energia, "theta pinch". A questa si aggiungono diversi programmi di ricerca originali, come la prima applicazione dei laser e degli alti campi magnetici alla fusione controllata.

Gli anni settanta sono caratterizzati da una conversione di quasi tutte le attivita' di ricerca sul programma Tokamak che stava emergendo allora come la configurazione di confinamento magnetico piu' promettente. Frascati scelse la linea Tokamak ad alti campi e alte densita' che ne caratterizza ancora oggi il programma. Il successo della ricerca di quegli anni puo' essere espresso dal fatto che per diversi anni Frascati ha tenuto il record mondiale del parametro di confinamento, prima con l'esperimento plasma focus e poi con il Tokamak FT.

3. LA MACCHINA FT E IL PROGETTO DI FISICA DELLA FUSIONE

Il Tokamak FT attualmente operativo al Centro ENEA di Frascati e' una macchina caratterizzata dagli alti campi magnetici (10 Tesla sull'asse toroidale) che permette di ottenere scariche ad alte densita' di plasma con parametri di interesse per la fusione termonucleare. Con questa macchina e' stato prima studiato il regime di riscaldamento ohmico ad alte densita' di corrente e poi il riscaldamento addizionale con l'immissione di onde elettromagnetiche alla frequenza cosiddetta della "ibrida inferiore", un regime di riscaldamento che verra' esteso a maggiore potenza nella nuova macchina FTU. Tale sistema di riscaldamento e' di notevole interesse per i futuri reattori. Nel primo caso sono state ottenute importanti informazioni per quanto riguarda il confinamento durante il riscaldamento ohmico. In particolare, sono stati ottenuti valori record relativi al parametro di confinamento (cioe' al prodotto densita' per tempo di confinamento dell'energia). Per quanto riguarda il riscaldamento addizionale si e' studiato soprattutto l'effetto di riscaldamento degli elettroni e degli ioni relativo all'immissione di radiofrequenza a 2.5 GHz con potenze dell'ordine dei 0,5 MW.

Sulla base di questa esperienza e' stato costruito ed e' in corso di installazione un sistema di riscaldamento alla frequenza aumentata a 8 GHz che anticipa il sistema che verra' applicato sulla futura macchina FTU.

L'esperienza di fisica della fusione acquisita attorno al Tokamak FT permette al personale di Frascati di partecipare attivamente a tutti i progetti europei e internazionali nel campo del confinamento magnetico.

In particolare, si puo' citare la partecipazione all'esperienza JET (con lo spettrometro di particelle neutre e lo spettrometro ad alta risoluzione a raggi X, ambedue per la misura della temperatura ionica) e l'esperimento congiunto ENEA-IPP, Garching, alla frequenza ibrida inferiore in progetto per la macchina ASDEX.

4. IL PROGETTO DELLA MACCHINA TOKAMAK FTU

FTU e' un Tokamak a campo magnetico medio-alto con 8 Tesla sull'asse (a confronto: 3.4 Tesla in JET) che sara' una delle tre principali macchine Tokamak in funzione in Europa nei prossimi anni assieme al JET.

Con questa macchina si intende estrapolare i plasmi ottenuti con FT verso livelli di confinamento e temperatura di diretto interesse termonucleare. Cio' e' reso possibile dall'incremento delle dimensioni degli accessi che permettono l'aggiunta di una notevole potenza di riscaldamento addizionale alle gia' ottime caratteristiche di confinamento di una macchina del tipo FT.

Un sistema di riscaldamento addizionale a radiofrequenza di 8 MW a 8 GHz dovrebbe portare la temperatura del plasma fino a valori di 4-8 keV (50-90 milioni di gradi).

Con questo riscaldamento addizionale e un miglioramento del tempo di confinamento rispetto a FT, FTU potrebbe operare nel regime di "breakeven". Questo significa che, ove venisse immessa una miscela di deuterio-trizio la macchina potrebbe produrre una potenza di fusione uguale alla potenza immessa per mantenere la scarica al regime termonucleare.

La costruzione della macchina FTU si basa in modo determinante sull'esperienza tecnologica acquisita con FT. L'intero sistema di bobine e' raffreddato alla temperatura dell'azoto liquido (-196°C) per ridurre la potenza elettrica richiesta per la generazione degli alti campi magnetici. L'equilibrio della colonna di plasma durante la scarica e' assicurato in FTU, oltre che dalla presenza dei campi magnetici toroidali e verticali, anche da una componente di campo magnetico regolata in controreazione.

- La costruzione di FTU e' iniziata nel febbraio 1983, dopo l'approvazione dell'EURATOM e il conferimento del supporto prioritario. I costi di realizzazione della macchina FTU per il periodo del V Piano Quinquennale 1985-89 sono valutati in circa 125 miliardi dei quali 96 costituiscono la quota ENEA e circa 29 il contributo Euratom attribuito secondo i criteri riportati nella apposita tabella.

Il costo complessivo di realizzazione dal 1980 e' di circa 150 miliardi.

Entro la fine del corrente anno saranno stati presi tutti gli impegni relativi alla costruzione della macchina base, fatta eccezione di contratti nuovi per sistemi ausiliari e di buona parte dei contratti di montaggio. Nel 1987 comincerà l'emissione dei contratti per la radiofrequenza.

Si prevede il funzionamento della macchina con riscaldamento ohmico nel 1988 e con riscaldamento addizionale a radiofrequenza con 1 MW di potenza nel 1989.

Sono attualmente allo studio ulteriori sistemi di riscaldamento con onde elettromagnetiche che sfruttano la risonanza ciclotronica elettronica, anch'essi di notevole interesse e prospettive per il reattore. Per ottenere le frequenze richieste (140 : 250 GHz) è previsto l'uso di sorgenti opportune; potranno essere sia un gruppo di gyrotron non convenzionali (esperimento proposto da CNR, Milano), sia un nuovo tipo di Free Electron Laser (FEL) ad alta corrente (proposta ENEA).

5. IL PROGETTO DELLA MACCHINA RFX

Accanto al Tokamak la Comunità Europea persegue la sperimentazione di linee alternative capaci di offrire in prospettiva migliori soluzioni per il reattore. Tra queste è il Reverse Field Pinch, macchina toroidale a prevalente riscaldamento ohmico. Nel programma in corso di attuazione è inclusa la costruzione di una macchina RFP di grandi dimensioni (raggio minore 0,5 metri raggio maggiore 2 metri, corrente massima 2 milioni di ampere) denominata RFX, realizzata dall'associazione EURATOM-ENEA attraverso l'Istituto Gas Ionizzati del CNR nel quadro della collaborazione ENEA-CNR sulla fusione.

RFX ha l'obiettivo di estendere le conoscenze sui Reverse Field Pinch a un livello di approfondimento confrontabile con quello dei Tokamak oggi in esercizio o costruzione.

La possibilità di operare a rapporti tra raggio maggiore e raggio minore della camera da vuoto (aspect ratio) elevati e con correnti di plasma più alte che nei Tokamak, a parità di campo magnetico toroidale, dovrebbe consentire al Reverse Field Pinch di raggiungere l'ignizione con riscaldamento ohmico senza la necessità di altri campi.

RFX
PARAMETRI PRINCIPALI

RAGGIO MAGGIORE	2.0 m
RAGGIO MINORE	0.5 m
CORRENTE MASSIMA NEL PLASMA	2.0 MA
MASSIMO VOLTAGGIO INDOTTO	700 V
TEMPO DI SALITA DELLA CORRENTE	15-50 ms
ENERGIA IMMAGAZZINATA NELLO AVVOLGIMENTO MAGNETIZZANTE	72 MJ
FLUSSO MAGNETICO	15 Wb
CAMPO TOROIDALE MASSIMO	0.7 T
ENERGIA IMMAGAZZINATA NEL BANCO DI CONDENSATORI	4.8 MJ
POTENZA TOTALE INSTALLATA (AC/DC)	340 MVA
VELOCITA' DI POMPAGGIO DELLA CAMERA DA VUOTO	5.000 1/s

La costruzione di RFX é iniziata a fine 1984 e dovrebbe essere completata entro il 1989. I costi di realizzazione di RFX sono previsti in 85 miliardi circa dei quali 10 per le opere civili che rappresentano la quota CNR, 44 di quota ENEA e 31 di contributo Euratom.

Sono gia' in corso i contratti relativi alla costruzione degli edifici, della sottostazione di trasformazione e di alcune delle parti principali dell'impianto.

6. IL PROGETTO INGEGNERIA DEL REATTORE A FUSIONE

L'attivita' dell'ENEA nel campo tecnico-ingegneristico della fusione si colloca pure nella cornice europea ed é valutabile per ora intorno al 6% dello sforzo complessivo europeo, ma notevoli sviluppi sono previsti per i prossimi anni. Il programma si avvale di competenze disponibili all'ENEA nei suoi centri di Frascati e Casaccia, in diverse universita' e industrie; inoltre, interazioni avvengono anche con il Centro Comune di Ricerca di Ispra e altri centri europei.

Le attivita' vengono condotte dal Progetto ingegneria del Reattore a Fusione di Frascati e si sviluppano lungo quattro direzioni principali:

- a) Supporto al gruppo NET
- b) Ricerca e sviluppo relativo al mantello del reattore
- c) Ricerca e sviluppo nel campo della superconduttivita'
- d) Ricerca e sviluppo sui sistemi ausiliari.

* Per quanto concerne il punto a), il contributo dell'ENEA comprende l'esecuzione di contratti in appoggio alla progettazione NET, e sostegno e consulenza all'industria italiana per contratti di sviluppo assegnati dalla Comunita' per la componentistica NET.

* L'attivita' relativa al mantello (punto b) comprende gli studi concettuali, la sperimentazione su componenti di prima parete e "blanket" e la fabbricazione del materiale "breeder".

Negli studi concettuali si analizzano i vari aspetti del progetto: l'interazione plasma-parete, la neutronica con codici Montecarlo 3D, l'analisi di termomeccanica col sistema Castem e la dinamica del Trizio.

Parallelamente all'attivita' di progetto sono in corso

esperimenti di irraggiamento in reattori a fissione francesi del CEA per studiare la produzione e l'estrazione del Trizio da materiale ceramico triziogeno fabbricato da ENEA. Sono previsti irraggiamenti analoghi nei reattori a fissione della Casaccia.

Verranno eseguite al Centro Comune di Ispra prove di termomeccanica ciclica su campioni di prima parete preparati da Ansaldo.

Per inserire ENEA e l'Industria nazionale nella fase di progetto dettagliato del NET (1990-1995) occorre lanciare un programma di fabbricazione di prototipi di blanket e prima parete e di progettazione e costruzione di circuiti e impianti di prova.

La fabbricazione del ceramico ternario Triziogeno viene sviluppata nel centro ENEA della Casaccia con vari metodi per ora applicati alla produzione di alluminato di litio. E' stata sviluppata una catena completa di caratterizzazione chimica e fisica di questa classe di prodotti. Sono in corso irraggiamenti di tali campioni in reattori a fissione (termici e veloci) europei ed americani per studiarne il danneggiamento neutronico e i conseguenti limiti di durata in servizio.

- * La attivita' relativa alla superconduttivita' (punto c) si sviluppa coerentemente alle linee di attivita' previste per il NET e precisamente:
- sviluppo di materiale superconduttore A15 e realizzazione entro il 1987 di prototipi di conduttori per magneti toroidali del NET.
- Sempre entro il 1987, e' previsto il completamento dell'impianto Sultan a 12T. Il conduttore A15 usato per Sultan e' da considerarsi come un passo intermedio significativo verso il conduttore per il NET.
- Detto sviluppo e' condotto nell'ambito di una consolidata collaborazione tra ENEA e "La Metalli Industriale" (LMI) che ha portato quest'ultima a una posizione di rilievo tra i produttori Europei di materiali superconduttori. Importanti le forniture per l'impianto SULTAN e la macchina acceleratrice tedesca Hera per ricerche di fisica fondamentale, per la quale l'industria italiana ha ricevuto una commessa di circa 80 miliardi dallo INFN; per tale realizzazione l'industria ha utilizzato tecnologie ENEA.
- Qualora lo sviluppo porti a risultati positivi, la LMI sara' coinvolta nella fabbricazione del cavo per un avvolgimento di prova da affidare alla industria manifatturiera. A tale proposito vale la pena di citare qui l'esempio dell'Ansaldo che, anche sulla base dell'esperienza acquisita in collaborazione con i progetti di Frascati, ha vinto le gare internazionali per la costruzione dei tre principali magneti tokamak europei: TORE SUPRA (magnete superconduttore), FTU (criogenico), ASDEX Upgrade (a temperatura ambiente).

- * Le attività di ricerca e sviluppo sui sistemi ausiliari (punto d) attualmente riguardano:
- la definizione dell'architettura del sistema di controllo, interfaccia uomo-macchina, con il teleoperatore Mascot V.
 - L'analisi degli scenari incidentali del reattore nel suo complesso con particolare attenzione al mantello: viene applicato il metodo del "Semiprobabilistic Risk Assessment" già applicato da ENEA per altri sistemi.
 - Le tecnologie legate al ciclo del combustibile verranno sviluppate prevalentemente nell'ambito del "laboratorio Trizio" in via di allestimento presso il Centro comune di Ispra.

7. FUSIONE A CONFINAMENTO INERZIALE

Le attività sono concentrate sul confinamento inerziale mediante applicazione di luce laser. Anche qui si tratta di un progetto inserito nel programma europeo, e inteso soprattutto a mantenere nell'Ente una competenza critica in un campo di ricerca che viene perseguito con sforzi notevolmente superiori in altri paesi (USA, URSS, Giappone).

Esso si concentra oggi attorno all'esperienza con il laser a neodimio ABC. Si tratta di un sistema a due fasci, capace di produrre 70 joules per fascio a lunghezza d'onda di $1,054 \mu m$ e circa 100 joules complessivi a $0,527 \mu m$ con impulso di durata $2 - 3 ns$.

Questo impianto verrà usato per esperienze di compressione e di accelerazione di bersagli piani con la tecnica ISI (Induced Space Incoherence).

Notevole l'esperienza acquisita anche dall'industria nazionale sia nella fase di costruzione del complesso sistema ottico, sia nel campo della robotizzazione del sistema di posizionamento dei bersagli.

Esperienze preliminari eseguite su un laser a neodimio da 10 joule, hanno consentito ricerche originali, permettendo inoltre lo sviluppo e messa a punto di sistemi diagnostici sofisticati e

di concetti nuovi quali l'ISI. L'attività teorico-numerica ha già consentito lo sviluppo di codici abbastanza complessi che permettono studi quantitativi della fluidodinamica della materia irradiata da laser.

Un graduale allargamento del programma dovrebbe essere previsto in futuro, tenendo in particolare presente una possibile apertura ad una stretta collaborazione tra Giappone, attualmente impegnato in maniera ben più significativa e la Comunità Europea, che potrebbe di conseguenza superare le difficoltà politiche passate ad allargare il proprio campo d'azione su questa linea.

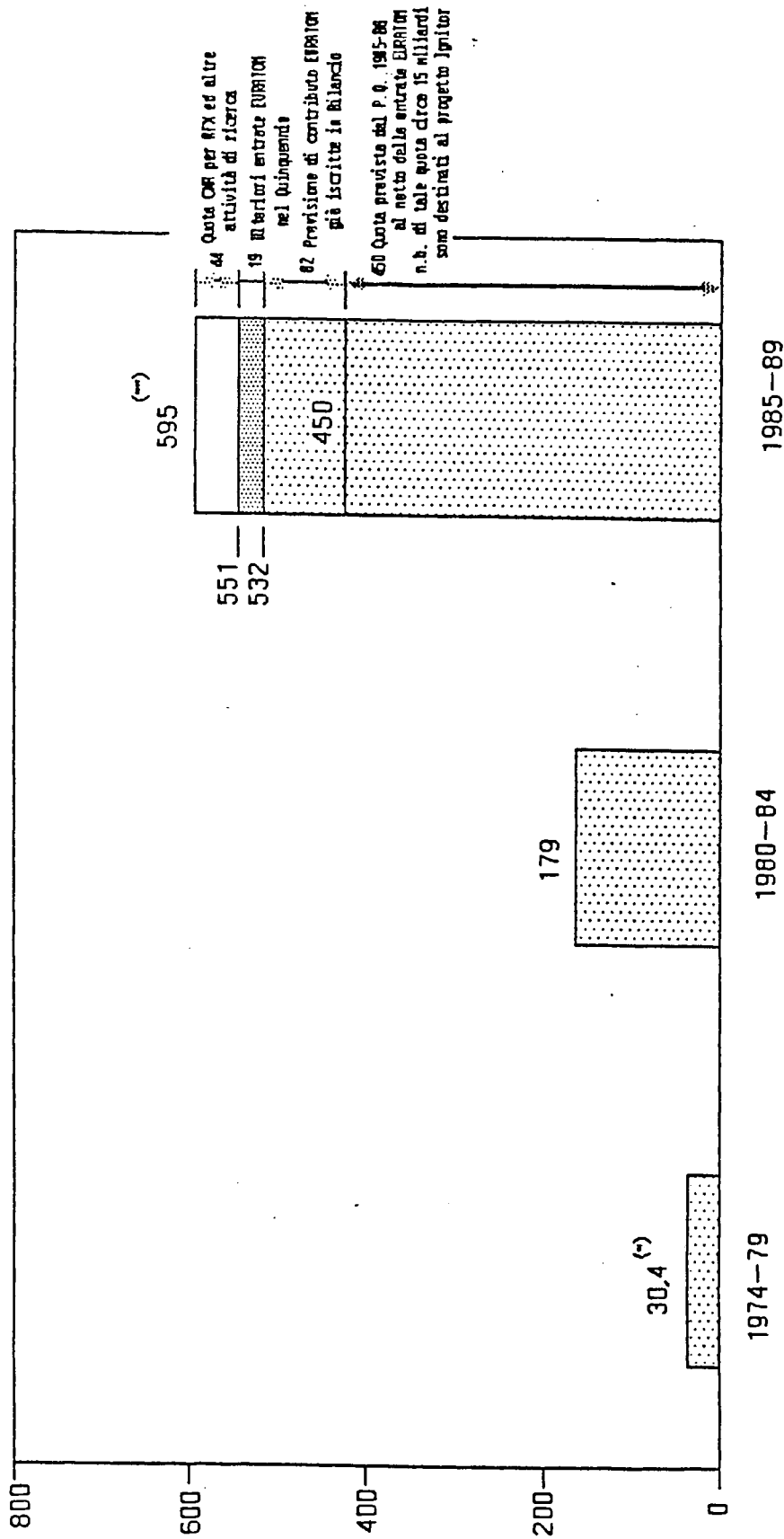
Notevole rilevanza può assumere in prospettiva futura l'attività di sviluppo di laser ad eccimeri e del FEL (Free Electron Laser) condotte in parallelo all'interno dell'ENEA, oggi prevalentemente per altre applicazioni.

RISORSE FINANZIARIE DESTINATE ALLA FUSIONE NUCLEARE NEL PERIODO 74-89

E NEGLI ULTIMI DUE PIANI QUINQUENNALI DELL'ENEA

IMPEGNI GLOBALI DELL'ITALIA NEL PERIODO 85-89

Miliardi di Lire
(in nona corrente)



(*) Dati desunti dai consuntivi inviati all'Euratom

(**) Questo importo, applicando i criteri Euratom (v.scheda), risulta di 391 miliardi di lire che rappresentano circa 1/5 del programma comunitario come valutato dagli organi comunitari

CRITERI EURATOM

L'EURATOM dà un contributo ai programmi nazionali basandosi sui seguenti criteri:

- 45% dei costi delle macchine per le quali viene riconosciuto il supporto prioritario ad esclusione delle opere civili e non considerando, in prima istanza, i tassi inflattivi.

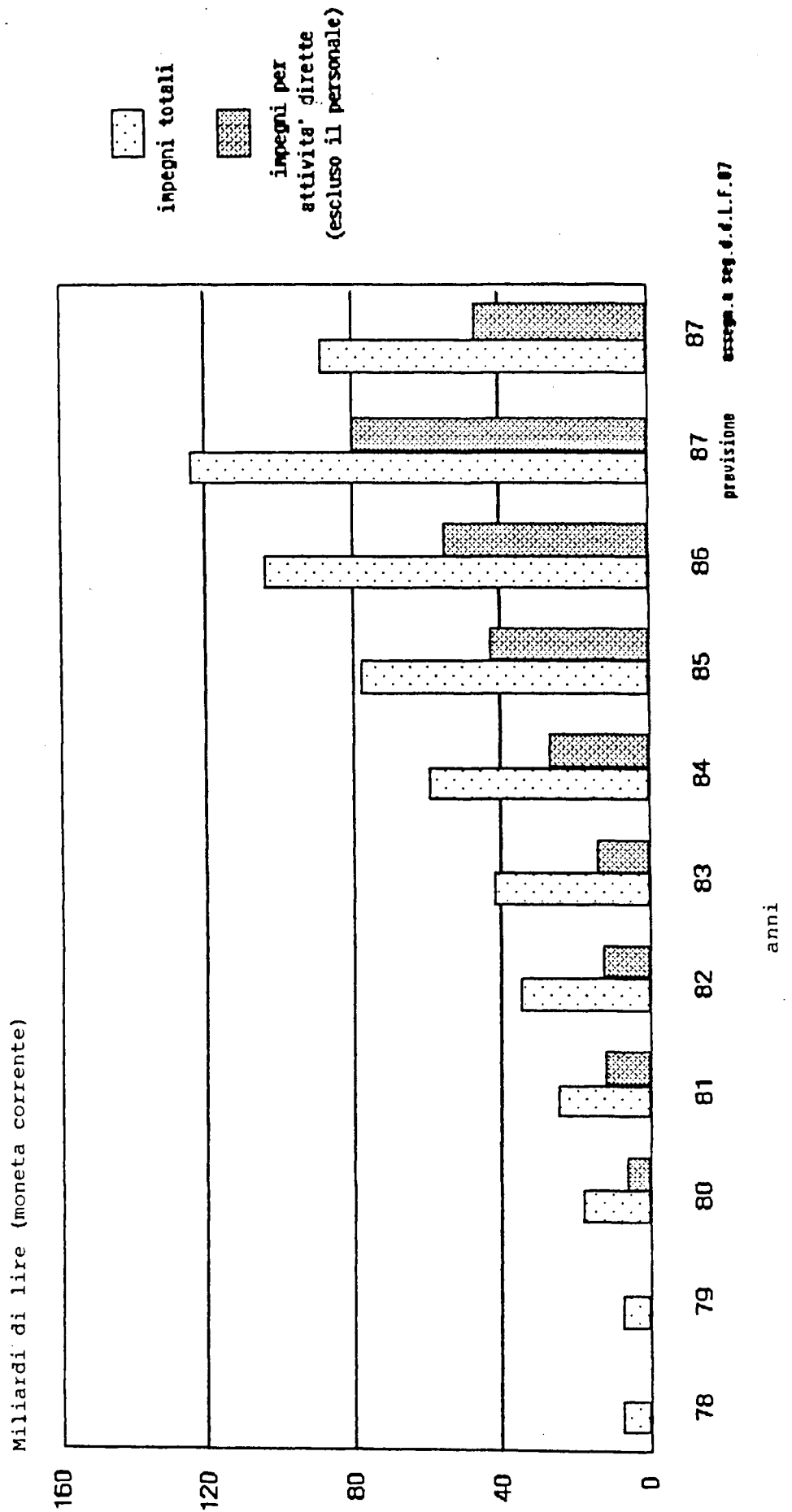
- 25% delle spese del personale tecnico impegnato sulla realizzazione delle macchine ed in attività di ricerca, delle spese di ricerca e sviluppo, delle spese generali del Centro nel quale avvengono le ricerche; anche per queste spese non vengono valutati, in prima istanza, i tassi inflattivi.

Gli importi totali del programma italiano nel quinquennio 1985-'89 a cui si applicano questi coefficienti sono di 391 miliardi.

CONTRIBUTI EURATOM
PER IL PROGRAMMA FUSIONE
(milioni di lire)

1982	3.200
1983	3.650
1984	4.150
1985	7.150
1986	<u>19.000</u>
	37.150
previsione 1987	15.000

RIPARTIZIONE ANNUALE DEGLI IMPEGNI DI SPESA ASSUNTI E PREVISTI
 NEI PIANI ANNUALI DELL'ENEA



RIPARTIZIONE ANNUALE DEGLI IMPEGNI DI SPESA
SULLA FUSIONE

(miliardi di lire in moneta corrente)

	SPESE GLOBALI	SPESE PER ATTIVITA' DIRET. (escl. personale)	
80	17,9	6,1	
81	24,6	12	
82	34,9	13	
83	42,1	14	
84	59,5	26,4	
TOT 80-84	179	71,5	
85	78,4	42,5	
86	104,2	55,5	
87	124,6	80	-previsione
87	94,6	50	-assegnazione a seguito d. d. L.F. '87

CONSIDERAZIONI GENERALI SULLE ATTIVITA' DI RICERCA E SVILUPPO RELATIVE
ALLA FUSIONE NUCLEARE A LIVELLO MONDIALE

I. INTRODUZIONE

I.1 Considerazioni generali sulle attivita' di ricerca e sviluppo relative alla fusione nucleare a livello mondiale

I.2 I diversi approcci alla fusione

I.3 Le risorse impegnate su scala mondiale

II. IL CONFINAMENTO MAGNETICO

II.1 L'attuale strategia europea nella fusione a confinamento magnetico

- . Elementi della strategia
- . Il JET
- . Le macchine complementari europee
- . Le attivita' relative alle tecnologie

II.2 Il quadro mondiale delle maggiori macchine sperimentali

II.3 Aspetti ancora aperti della fisica delle macchine a confinamento magnetico

II.4 Altri possibili passi verso i reattori dimostrativi

III. IL CONFINAMENTO INERZIALE

III.1 Confinamento inerziale mediante laser

III.2. Altre linee di attivita'

IV. ASPETTI DI SICUREZZA E DI IMPATTO AMBIENTALE

IV.1 Considerazioni generali

I. INTRODUZIONE

I.1 CONSIDERAZIONI GENERALI SULLE ATTIVITA' DI RICERCA E SVILUPPO RELATIVE ALLA FUSIONE NUCLEARE A LIVELLO MONDIALE

La fusione nucleare e' il processo nel quale nuclei di elementi leggeri, in particolare gli isotopi dell'idrogeno (deuterio D e trizio T), si fondono per formare nuclei piu' pesanti, elio per esempio, con un difetto di massa che viene trasformato in energia secondo l'equivalenza di Einstein.

Per ottenere la fusione di due nuclei occorre fornire ad essi (p.e. attraverso riscaldamento) una energia tale da vincere la forza di repulsione elettrostatica che si manifesta quando i due nuclei si avvicinano; alle temperature necessarie per permettere questo processo la materia si trova nello stato di plasma, in cui nuclei ed elettroni sono liberi.

I problemi da risolvere vanno affrontati in sequenza e richiedono tempi legati ai tempi di realizzazione e impiego a fini di ricerca e sperimentazione delle macchine di prova via via realizzate per ciascuna delle fasi sequenziali, i cui obiettivi possono essere cosi' definiti:

- ottenere produzione netta di energia e cioe' piu' energia dal plasma di quella depositata nel plasma stesso (dimostrazione di fattibilita' scientifica, ancora da conseguire);
- ottenere dall'intero sistema (plasma e sistemi ausiliari) piu' energia elettrica di quella spesa per alimentarlo e rigenerare il trizio necessario per l'impianto;
- ottenere energia elettrica per un controvalore superiore ai costi di realizzazione dell'impianto e a condizioni di continuita' e affidabilita' accettabili.

Solo a questo punto la fusione sara' un fatto economico.

Si e' evidenziato, nel settore della fusione, un effetto osservato anche in altre attivita' di ricerca ad elevata complessita' concettuale e tecnologica che porta a far ritenere tanto piu' breve il tempo di raggiungimento degli obiettivi, quanto meno e' approfondito lo stato delle conoscenze. E' stato cosi' con le prime applicazioni del confinamento magnetico, piu' di venti anni fa, che avevano fatto ritenere possibile la realizzazione dei primi prototipi di reattori a fusione per la fine degli anni ottanta. Esiste il rischio che lo stesso errore di valutazione sui tempi stia ora avvenendo per gli approcci (quali il confinamento inerziale) che ora vengono proposti come piu' promettenti per il raggiungimento della fusione.

1.2 I DIVERSI APPROCCI ALLA FUSIONE

Per arrivare al primo obiettivo sono in corso diverse linee di approccio illustrate nella fig. 1. Lo stadio di maturazione delle varie linee e' molto diverso.

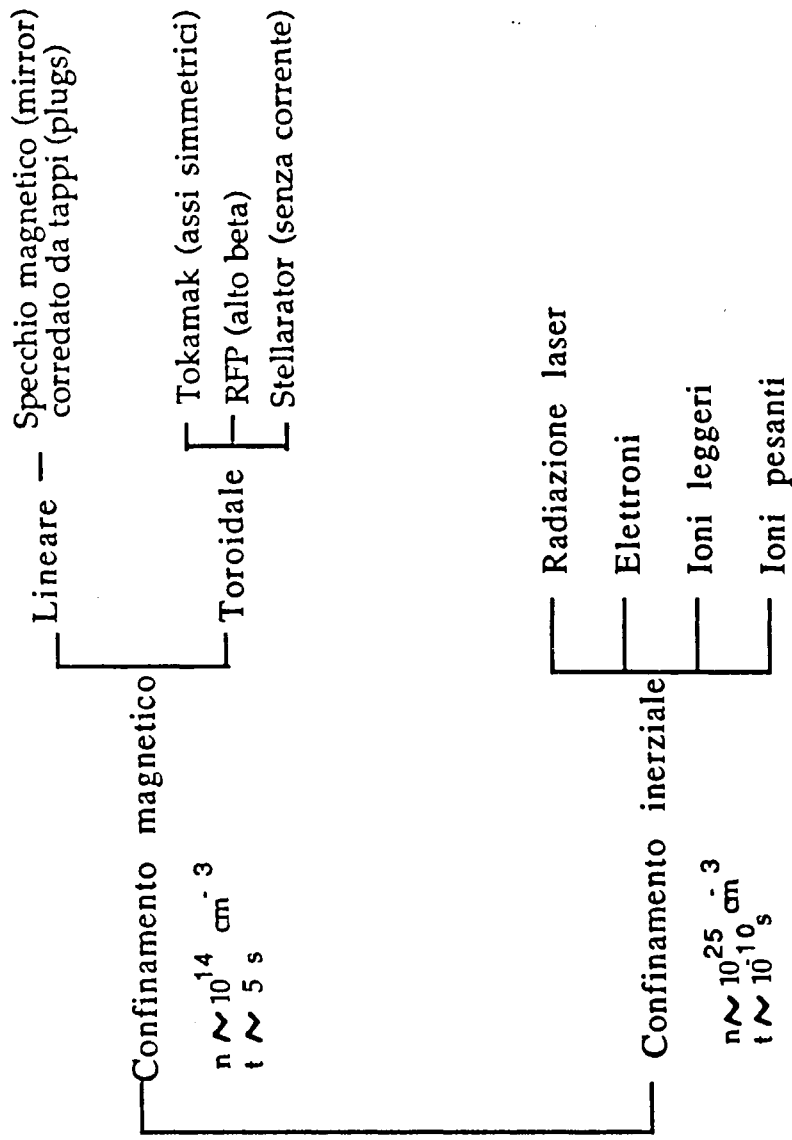
A. Fusione termonucleare

Utilizzando per vincere la repulsione elettrostatica l'energia cinetica di natura termica e' necessario allo scopo di ottenere una produzione netta di energia (perdite minori delle produzioni) soddisfare le due condizioni sulla temperatura T e sul prodotto densita' n per tempo di confinamento τ : $T \gtrsim 10$ KeV, $n\tau \gtrsim 5 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$.

Queste condizioni si possono ottenere in due modi diversi:

- 1) con l'elevato tempo di confinamento fornito da un campo magnetico ($\tau \gtrsim 5$ s) e densita' relativamente bassa;
- 2) con il confinamento fornito dalla inerzia del materiale compresso che richiede tempi brevissimi ($\tau \leq 10^{-10}$ s), ma necessita di una densita' 1.000 volte piu' alta di quella di un solido normale ($n \sim 10^{25} \text{ cm}^{-3}$).

QUADRO SCHEMATICO DELLE LINEE PROGRAMMATICHE DI RICERCA E SVILUPPO SULLA FUSIONE NUCLEARE CONTROLLATA



Termonucleare

$T = 10^8 \text{ K}$
 $n = 5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
 $p \sim 10 \text{ atm}$
 plasma

Mesonica

necessarie 1000 fusioni per mesone in D,T gas
 $T = 500 - 1000 \text{ }^\circ\text{K}$
 $p = 2000 - 10000 \text{ atm}$

FUSIONE

- fig 1 -

A.1 Il confinamento magnetico. Alle enormi temperature dell'ordine di decine di milioni di gradi, che corrispondono all'energia termica necessaria per la fusione, i nuclei e gli elettroni costituenti il plasma si muovono ad altissima velocita' (alcune migliaia di km/s) cosicché se non si prendessero le opportune precauzioni sfuggirebbero rapidamente senza che i nuclei incontrino altri nuclei con i quali fondersi, quindi senza produrre energia. Nelle macchine a confinamento magnetico, per evitare la dispersione del plasma si sfrutta una proprieta' delle particelle cariche in moto che, quando immerse in un campo magnetico, percorrono traiettorie elicoidali avvolte intorno alle linee di forza del campo.

Il confinamento puo' essere fornito da una struttura magnetica lineare, in cui le linee di campo non sono chiuse all'interno della camera (in questi casi sono necessari due "tappi" alle estremita' costituiti per esempio, nella configurazione denominata tandem mirror, da plasmi ausiliari con requisiti meno stringenti).

L'altra possibilita' e' una configurazione toroidale e quindi senza estremita'.

Sono state escogitate molte configurazioni toroidali che permettono un equilibrio stabile.

Tra queste le piu' importanti sono il Tokamak, il Reverse Field Pinch (RFP) e lo Stellarator per il loro potenziale di costituire la base di un reattore a fusione.

Il Tokamak e' la configurazione piu' studiata e quella che a tutt'oggi ha dato le prestazioni migliori. Essa e' di grande semplicita', essendo costituita essenzialmente da un solenoide toroidale (che crea un campo magnetico toroidale semplice), da un trasformatore che permette di indurre una corrente toroidale nel plasma (la quale produce il campo magnetico poloidale e contribuisce al riscaldamento del plasma) e da alcune bobine ausiliarie, per il controllo della posizione del plasma. Richiede un campo magnetico relativamente alto (superiore a 3 Tesla).

Dovendo usare un trasformatore e' previsto anche per il reattore Tokamak un funzionamento ciclico, anche se, con particolari accorgimenti, (uso di onde elettromagnetiche) non e' da escludere un funzionamento continuo.

Il Reverse Field Pinch e', come il Tokamak, una configurazione toroidale assisimmetrica che pero' richiede, oltre alla corrente toroidale, anche una corrente poloidale, in un modo che complessivamente la corrente nel plasma ha una struttura elicoidale.

Queste correnti vanno indotte con due circuiti induttori di una certa complessita' e in questo caso e' piu' problematico pensare ad un funzionamento continuo. Il RFP opera con campi relativamente bassi (1 Tesla) e puo' sostenere pressioni di plasma relativamente alte.

Lo Stellarator ha una configurazione magnetica interamente creata da correnti nei conduttori esterni al plasma. Offre quindi il vantaggio diretto di non richiedere correnti nette nel plasma e di poter quindi operare in continua. Tuttavia la struttura topologica delle bobine e' assai complessa, richiedendo per esempio bobine non piane e di forma diversa l'una dall'altra, creando una configurazione non assisimmetrica. I campi finora usati sono bassi (non superiori a 2 Tesla).

A.2 Il confinamento inerziale richiede la compressione di una pallina di combustibile (ad esempio D-T) di un fattore 10 sul diametro per ottenere un aumento della densita' di un fattore 1.000.

L'agente (driver) della compressione, che avviene per ablazione (asportazione rapida e conseguente compressione per rinculo), puo' essere: radiazione laser, fasci di elettroni, fasci di ioni leggeri oppure fasci di ioni pesanti.

Ciascuno dei sistemi suddetti - citati in ordine di approfondimento decrescente in termini di sperimentazione effettuata e dati acquisiti - presenta vantaggi e svantaggi: il laser e' facile da focheggiare ma e' piu' difficile ottenere con esso efficienze alte; i fasci di elettroni anche se si e' prossimi a raggiungere la intensita' di corrente necessaria si sono dimostrati poco efficaci nel processo di compressione; i fasci di ioni leggeri sono difficili da focheggiare ma potrebbero consentire maggiori efficienze; gli ioni pesanti presentano difficolta' intermedie di focheggiamento, buona efficienza, costi maggiori degli ioni leggeri; per gli ioni pesanti si e' ancora lontani dai livelli di corrente necessari.

B. Fusione mesonica

La sostituzione dell'elettrone atomico con un mesone riduce la repulsione coulombiana e rende pertanto meno elevate le temperature necessarie per l'innesco del processo di fusione.

Se in una mistura deuterio-trizio (D-T) vengono iniettati muoni, ci si aspetta la formazione di molecole mesiche (D-T) che dopo avere subito il processo di fusione renderebbero il mesone disponibile per catalizzare una nuova reazione.

Poiche' la produzione di ciascun mesone ha un costo in termini energetici, si ha guadagno di energia nel processo solo se si riesce a ottenere per ogni mesone circa 1.000 fusioni (oggi si e' raggiunto il valore 150). Il requisito simultaneo della densita' tipica del deuterio liquido e di temperature nell'intervallo fra 500 e 1.000 °K impone pressioni nell'intervallo fra 2.000 e 10.000 Atm.

I risultati sperimentali finora ottenuti sembrano lasciare adito ad un certo ottimismo sulla possibilita' di raggiungere, in una prospettiva di lungo termine, tali condizioni, anche se potrebbero esservi limiti insuperabili legati alla brevitaa della vita media del muone (2,2 microsecondi).

Le principali difficoltaa sono:

- . la cattura del muone da parte delle particelle alfa; pertanto dovrebbero essere studiati metodi efficienti per consentire il "rilascio" del muone da parte delle particelle alfa;
- . la realizzazione di fasci muonici di sufficiente intensita'.

Sono infine necessari studi teorici e sperimentali sulla spettroscopia delle meso molecole D-T.

Questa linea di ricerca e' su scala mondiale concordemente ritenuta come secondaria.

1.3 Le risorse impegnate su scala mondiale

La ricerca sulla fusione viene condotta in modo abbastanza diffuso su base mondiale.

Si possono peraltro considerare quattro grossi programmi che rappresentano praticamente nel loro insieme lo sforzo mondiale totale:

- | | | |
|----|---------------------------|--|
| a) | U.S.A. | bilancio 1987 ~ 700x10 ⁹
lire
laureati impegnati ~ 1800 (anno 82) |
| b) | Europa (Paesi Comunitari) | prev.bilancio '87 ~ 700x10 ⁹
lire
laureati impegnati ~ 1200 (anno 86) |
| c) | Giappone | bilancio 1986 ~ 400x10 ⁹ lire
laureati impegnati ~ 900 (anno 1982) |

- d) URSS (mancano dati precisi)
 si stima l'ordine di grandezza dei finanziamenti pari a qualche centinaio di miliardi di lire annui
 laureati impegnati: si stima l'ordine di grandezza uguale a quello americano.
- Programma mondiale 2.100-2.500x10⁹ lire/annuo
 laureati impegnati 5.000-6.000

Bisogna peraltro ancora osservare che:

- circa il 30% del bilancio americano e' dedicato al confinamento inerziale nell'ambito del programma di ricerca della difesa;
- il programma europeo include praticamente solo il confinamento magnetico, oltre ad attivita' di base, corrispondenti a circa l'1% del totale, sul confinamento inerziale in Italia e in Germania (tali attivita' escludono lo sviluppo di driver). Vengono peraltro condotte, in Francia e nel Regno Unito, attivita' sul confinamento inerziale al di fuori del coordinamento comunitario, parzialmente classificate e di entita' non valutabile;
- il programma Giapponese ed il programma U.R.S.S. comprendono attivita' significative nel campo del confinamento inerziale anche se non facilmente quantificabili in modo percentuale; in particolare il programma Giapponese e' interamente civile con ampia informazione dei risultati scientifici raggiunti;
- le ricerche sulla fusione mesonica sono del tutto esplorative e impegnano su scala mondiale circa una sessantina di ricercatori.

II. IL CONFINAMENTO MAGNETICO

II.1 L'attuale strategia europea sulla fusione a confinamento magnetico

Elementi della strategia

Va messo in evidenza che, per decisione del Consiglio dei Ministri della Comunità Europea "Il programma Fusione Comunitario e' un progetto di cooperazione a lungo termine che comprende tutte le attivita' svolte negli Stati Membri nel campo della fusione termonucleare controllata"; tale decisione e' stata pienamente rispettata per quanto riguarda il Confinamento Magnetico.

Fin dall'inizio degli anni settanta il programma della Comunità Europea si e' concentrato sul Tokamak come linea principale.

La strategia generale, come raccomandata dal Beckurts Panel ancora nel 1981, e' illustrata nella figura 2.

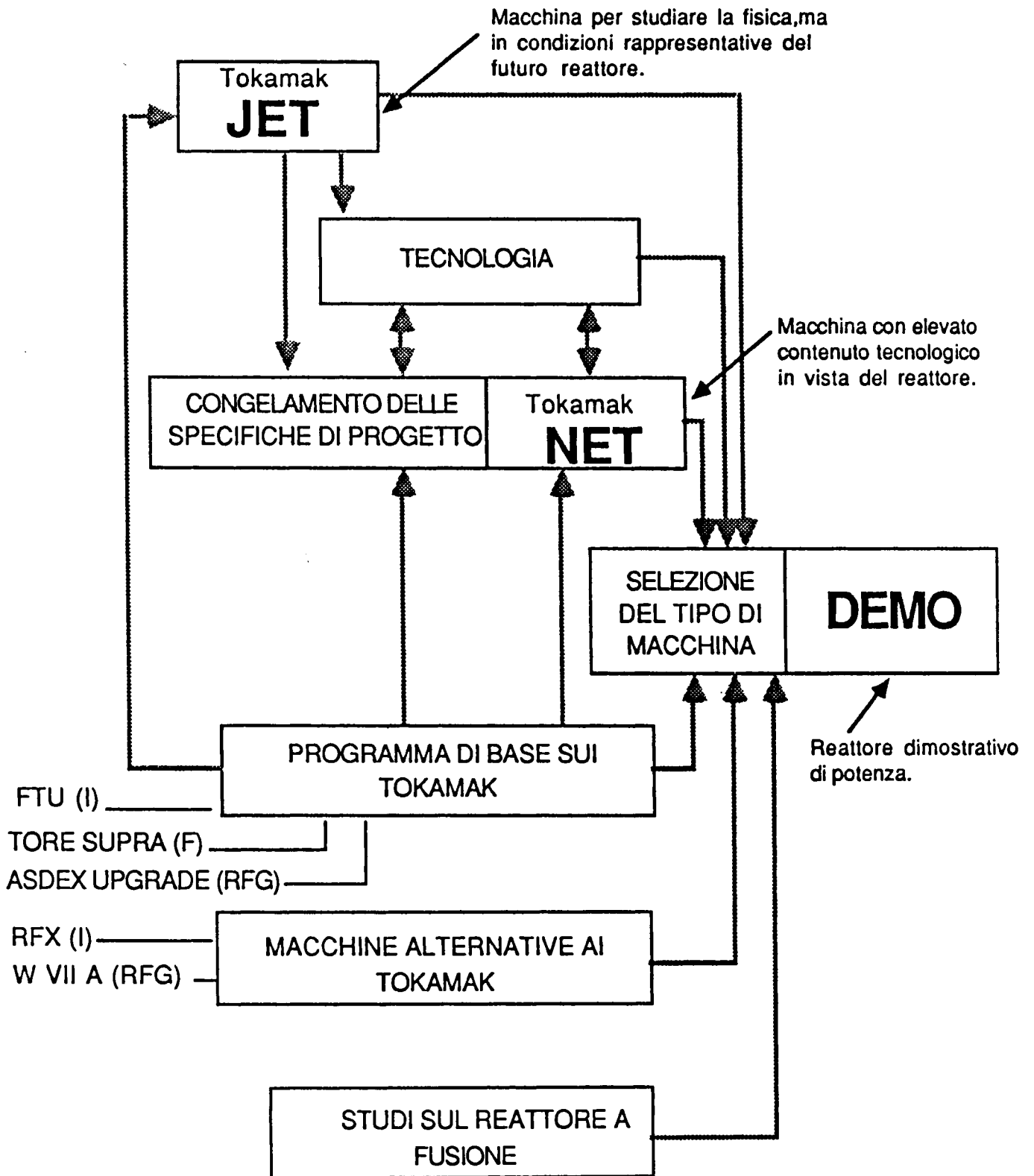
Si e' riconosciuto che tra l'attuale impianto sperimentale della CEE (il JET) e il reattore dimostrativo DEMO e' necessario almeno un passo intermedio.

Si spera che, con i risultati che forniranno il JET e gli altri impianti della Comunità, un solo passo intermedio sia anche sufficiente. Su questa base il NET e' stato definito come un Tokamak, con una forte componente tecnologica, che debba anche affrontare i problemi della rigenerazione del trizio.

Tra il 1990 e il 1992 i risultati di JET con operazione in trizio e quelli provenienti dagli altri Tokamak specializzati (FTU, Tore Supra, Astex U) saranno la base per la decisione di avviare il progetto dettagliato e la costruzione di NET (si veda fig. 2). Tuttavia gia' oggi il NET Team costituito nel 1983 e guidato dal Prof. Toschi dell'ENEA ha in corso lo sviluppo di progetti preliminari esplorativi per NET.

Il programma Tokamak europeo e quello della tecnologia della fusione lavorano in appoggio al JET e contribuiscono alla definizione del NET.

L'attivita' europea sulle linee alternative Reverse Field Pinch e Stellarator hanno la potenzialita' a lungo termine di contribuire delle opzioni per il DEMO, alternative al Tokamak, che potrebbero avere vantaggi sia per le implicazioni tecnologiche che per quelle economiche.



- fig 2 -

IL JET

L'obiettivo fondamentale del JET e' di ottenere e studiare plasmi di dimensioni e in condizioni vicine a quelle necessarie al funzionamento di un reattore a fusione.

Le attivita' di ricerca sono rivolte a studiare:

- Il comportamento del plasma quando i parametri di funzionamento si avvicinano a quelli di un reattore;
- L'interazione tra plasma e parete in queste condizioni;
- Il riscaldamento del plasma;
- La produzione e il confinamento delle particelle alfa (nuclei di elio) e il riscaldamento del plasma che ne risulta.

La macchina e' entrata in funzione nel giugno 1983. Il programma di sperimentazione di svolgera' per fasi successive.

E' stata ultimata la fase di riscaldamento puramente ohmico con correnti di plasma di 5 milioni di ampere.

Nell'attuale fase, la macchina funziona con sistemi di riscaldamento del plasma per studiarne l'aumento di temperatura e i problemi di confinamento. Si e' raggiunta ad oggi una potenza iniettata di 15 MW su un totale previsto di 25 MW.

Nel 1989/90 il JET dovrebbe raggiungere i regimi di funzionamento piu' prossimi al reattore mai raggiunti al mondo. Secondo le ultime proposte presentate al Consiglio dei Ministri della Comunita', il periodo di funzionamento dell'impresa, originariamente limitato al 1990, dovrebbe essere prorogato a tutto il 1992, avviando nel 1991 la sperimentazione con miscele di deuterio e trizio per studiare il riscaldamento con particelle alfa.

Nella tabella seguente sono date le principali caratteristiche di progetto del JET e i dati finanziari di costo estrapolati fino alla fine dell'impresa (prevista per la meta' del 1993 con la restituzione del sito al paese ospite).

Parametri principali di progetto del JET.

-	Raggio minore del plasma (la sezione del plasma ha la forma di una D)	1.25	m
-	Raggio minore del plasma (verticale)	2.10	m
-	Raggio maggiore del plasma	2.96	m
-	Campo magnetico toroidale	3.4	T
-	Durata della piattabanda del campo toroidale	20	sec.
-	Peso della camera da vuoto che racchiude il plasma	100	t
-	Peso del magnete toroidale	384	t
-	Peso del nucleo trasformatore che produce il campo magnetico poloidale	2800	t
-	Corrente di plasma		
	a sezione circolare	3.2	MA
	a sezione allungata	4.8	MA
-	Potenza di riscaldamento addizionale	25	MW
-	Potenza di alimentazione del magnete toroidale	380	MW
-	Flusso magnetico disponibile per innescare e mantenere la corrente del plasma	34	Vs

Costo del progetto JET per il periodo 1977-1992 in moneta corrente (stima inflazione 4% dopo il 1986);

a) Investimenti

Costruzione della macchina per le prestazioni di base (funzionamento a regime ohmico)	233	MUC
Estensione alle prime prestazioni (riscaldamento addizionale, funzionamento a trizio)	197	MUC
Investimenti per migliorie di prestazioni	75	MUC
	<hr/>	
TOTALE	505	MUC

b) Costi di operazione	495	MUC
c) Costi di personale	308	MUC

TOTALE	≈	1.300	MUC
--------	---	-------	-----

Le macchine complementari europee

In Europa sono in funzione un numero considerevole di impianti Tokamak e alcuni RFP e Stellarator, mentre diverse nuove macchine sono in costruzione ed entreranno in funzione entro i prossimi due anni (si vedano le tabelle allegate). I Tokamak hanno un ruolo di appoggio alla sperimentazione di JET e contribuiscono alla definizione del NET soprattutto nei settori dei sistemi di riscaldamento ausiliario del plasma e dei sistemi di controllo delle impurezze.

RFP e Stellarator sono linee alternative al Tokamak che sono sviluppate come opzioni per il DEMO.

Gli impianti piu' importanti oggi in costruzione sono i seguenti:

FTU (Italia). Un Tokamak compatto, ad alto campo magnetico, destinato allo sviluppo di un nuovo sistema di riscaldamento a radiofrequenza (gia' esplorato su un impianto piu' piccolo, FT) che utilizzerà livelli di potenza (8Mw) e condizioni di accoppiamento elettrone-ione di interesse per un reattore.

Tore Supra (Francia). Un Tokamak a magneti superconduttori; permetterà impulsi di corrente lunghi; studierà diversi sistemi di riscaldamento. Oltre che esperimento di fisica della fusione e' un esperimento di tecnologia dei superconduttori.

Asdex Upgrade (RFG). Un Tokamak fornito di divertore per il controllo delle impurezze. La configurazione aperta del divertore e i livelli di potenza specifica sono di interesse diretto per NET e simili a quelli di un reattore.

RFX (Italia). E' il piu' grande Reverse Field Pinch oggi in costruzione. Permetterà di estendere le conoscenze (e in particolare il confronto con il Tokamak) a livelli di corrente significativamente superiori a quelli usati fino ad oggi.

W VII AS (RFG). E' uno dei piu' grandi Stellarator del mondo, che dovrà dare informazioni sui limiti di pressione di plasma e sul confinamento. E' stato usato un nuovo approccio alla struttura delle bobine che faciliterà l'estensione ad un reattore della complessa topologia richiesta.

Le attivita' relative alle tecnologie

Il programma comunitario sulla tecnologia é pressoché interamente orientato al NET.

Col piano quinquennale EURATOM varato nel 1982 é radicalmente cambiata la percentuale dello sforzo finanziario dedicato dalla Comunita' nel campo delle tecnologie della fusione. E' stata presa la decisione strategica che il passo successivo al JET sara' una macchina ad alto contenuto tecnologico (dimostrativa della fattibilita' tecnologica oltre che scientifica di un reattore a fusione in tutte le sue componenti). E' stato costituito il gruppo NET con l'incarico di definire le caratteristiche e di eseguire il progetto di riferimento di tale macchina. A tale progetto é stato affidato il coordinamento delle varie attivita' tecnologiche sostenute dalla Comunita' in associazione con i paesi europei.

I tre principali componenti del reattore e i sistemi ausiliari su cui convergono le tecnologie sono (vedi fig. 3):

- a) Camera da vuoto e prima parete: i materiali strutturali devono sopravvivere al danno da neutroni e alla fatica.
- b) Mantello; produzione di calore e di trizio (materiali "breeder", fattore di breeding = 1)
 - Estrazione del calore
 - Estrazione del trizio
 - Schermaggio del magnete superconduttore
 - Problema dello smontaggio
 - "Remote Handling"
- c) Magnete superconduttore: deve produrre e tollerare circa 6 Tesla (12 Tesla sul conduttore); il volume toroidale occupato dal campo é di almeno 1000 m³. Il superconduttore deve essere un materiale A15, per esempio Nb₃Sn oppure Nb₃Al in corso di sviluppo presso ENEA in collaborazione coll'industria.
- d) Sistemi ausiliari per le operazioni a distanza, per il ciclo del combustibile e per la sicurezza.

I programmi di sviluppo delle tecnologie del reattore vengono proposti con processo "roll-back" in modo che esse siano disponibili per l'inizio della costruzione del NET che é stata tentativamente ipotizzata per il 1992.

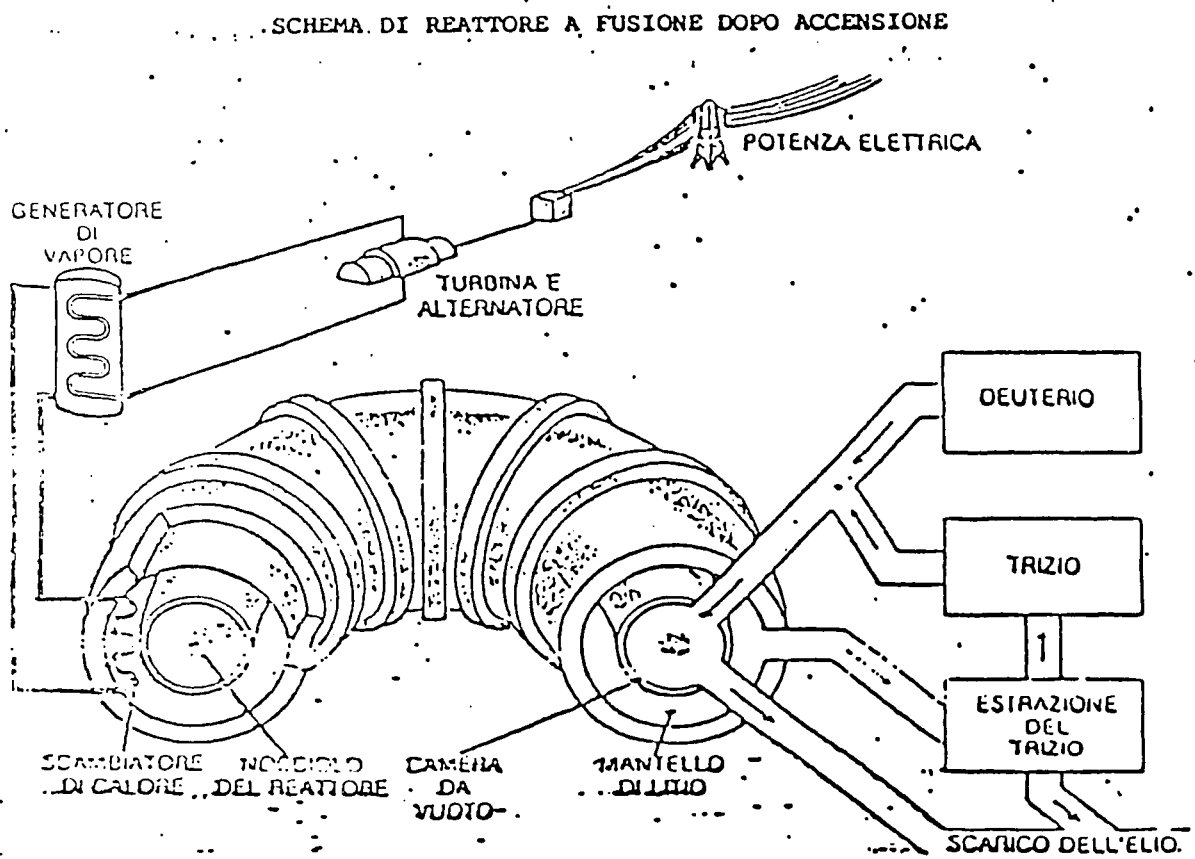


Fig. 3

In particolare per i componenti interni della macchina (prima parete, divertore e mantello), l'architettura sara' definita entro il 1986, la scelta delle soluzioni progettuali avverra' entro il 1989, mentre la fabbricazione di prototipi iniziera' nel 1990, con relativo programma di prove tecnologiche.

Per il sistema magnetico superconduttore toroidale la scala dei tempi e' la seguente:

entro il 1989 l'industria su commessa NET dovra' fornire entro il 1989 l'industria su commessa NET dovra' fornire tre partite di 1 Km ciascuna di conduttore prototipo con le quali verranno costruiti entro il 1990 tre avvolgimenti di prova. A seguito dei risultati di prove verra' scelto il cavo per la costruzione del sistema toroidale.

Le tecnologie per i sistemi ausiliari mutuano il know how dal nucleare di fissione.

Le diverse aree tecnologiche in cui e' suddiviso il programma ed una stima indicativa dello sforzo europeo richiesto nelle diverse aree e' dato nella tabella presente:

-	Magneti superconduttori	19%
-	Materiali strutturali	16%
-	Materiali di fertilizzazione	20%
-	Tecnologie del Trizio	16%
-	Ingegneria del Blanket	13%
-	Remotizzazione	10%
-	Sicurezza e ambiente	6%

11.2 Il quadro mondiale delle maggiori macchine sperimentali

Su scala mondiale i Tokamak di grande dimensione, oltre al JET, sono:

TFTR (USA), caratterizzato da forte iniezione di atomi neutri in campo magnetico medio alto, 5 Tesla.

JT-60 (Giappone), caratterizzato da divertore orizzontale, molti sistemi di riscaldamento.

Entrambi questi Tokamak sono in funzione.

T15 (URSS), caratterizzato da magnete superconduttore, impulsi lunghi (in costruzione).

Nelle tabelle 1-4 sono elencate le principali macchine a confinamento magnetico nei quattro settori: Tokamak, Stellarator, Reverse Field Pinch, Mirror (configurazione lineare).

Tabella 1

Macchine a confinamento magnetico

TOKAMAK

Paese	Macchina	Vol. (m ³)	B(T)	Commento
CEE	○ JET	150	3.45	Operazione con trizio/Q~1
Italia	○ FT	0.65	8	Confinamento, riscaldamento
Italia	◻ FTU	1.6	8	Riscaldamento RF, confinamento
Italia-CEE	△ IGNITOR	5.7	12.4	Ignizione (DT)
Francia	◻ TS	25	4.5	Superconduttore, impulsi lunghi
RFG	○ ASDEX	5.2	2.8	Divertore poloidale, riscaldamento
RFG	○ TEXTOR	8.6	2	Interazione plasma/parete
RFG	◻ ASDEX-U	26	4	Divertore reattoristico
UK	○ DITE	1.6	3	Divertore localizzato (bundle), riscaldamento
UK	◻ COMPASS	0.9	1.9	Riscaldamento a frequenza elettronica ciclotronica (ECRH)
USA	○ TFTR	34	5.2	Operazione con trizio/Q~1
USA	○ DIII-D	30	2.2	Confinamento, alto beta
USA	○ PLT	4.2	3.2	Confinamento, riscaldamento
USA	○ PBX	4.7	2	Alto beta
USA	△ CIT	7.3	10.4	Riscaldamento alfa, ignizione (DT)
USA	△ ALCATOR-C-MOD	1.7	10	Confinamento, riscaldamento
GIAPPONE	○ JT 60	54	4.5	Divertore orizzontale, riscaldamento
GIAPPONE	○ JFT-2M	4	1.6	Confinamento, riscaldamento
GIAPPONE	○ JIPPT-2U	1	3	Confinamento, riscaldamento
USSR	◻ T-15	27	4.5	Superconduttore, impulsi lunghi
USSR	○ T-10	4.5	5	Confinamento, riscaldamento
USSR	○ T-7	3	3	Superconduttore, current drive
CEE	▽ NET	(400)	(5)	} Long burn (DT), breeding T, componenti reattore
GIAPPONE	▽ FER			
USA	▽ TIBER 2			

○ in operazione

△ in progetto

◻ in costruzione

▽ in preprogetto

N.B. Mancano alcune macchine importanti, non più in operazione, e diverse macchine minori.

Tabella 2

STELLARATOR

(Configurazione magnetica toroidale senza
corrente di plasma)

Macchina	Paese	Vol(m ³)	B (T)
W VII A	o RFG	0.35	4
W VII AS	□ RFG	1.2	3
MELIOTRON E	o Giappone	1.7	0.6
CLEO	□ UK	0.2	2
ATF	o USA	2.5	-
URAGAN III	o URSS	0.4	3
L-2	o URSS	0.25	1.5

Tabella 3

REVERSE FIELD PINCH (RFP)

(Configurazione magnetica toroidale
ad alto β e bassissimo q)

Macchina	Paese	Vol(m ³)	I (MA)
ETA BETA II	o Italia	0.2	0.25
ZT-40 M	o USA	0.9	0.6
HBTX-IB	o UK	1.1	0.5
REPUTE	o Giappone	0.6	0.22
ONTE	o USA	0.9	0.5
TPE-15	□ Giappone	0.3	0.25
RFX	□ Italia	9.9	2
ZT-II	Δ USA	6.8	2÷4

o in operazione

□ in costruzione

Δ in progetto

B campo magnetico espresso in Tesla

Tabella 4

MIRROR

(Configurazione magnetica lineare con "plugs" per ridurre perdite assiali)

Macchina	Paese	L(m)	Vol(m ³)	B (T)
GAMMA 6	o Giappone	7	0.03	0.4
GAMMA 10	o Giappone	27	1.7	0.53
TMX-U	o USA	8	0.7	0.5
MFTF-B	* USA	56	38	1
TARA	o USA	5	23	0.2
AMBAL	o USSR	11	0.3	0.15

o in operazione

* Costruito, con una spesa di 354 M\$, e sospesa indefinitamente l'operazione per mancanza di fondi

B campo magnetico espresso in Tesla

11.3 Aspetti ancora aperti della fisica delle macchine a confinamento magnetico

Il panorama dell'evoluzione dei programmi sulle macchine tipo Tokamak e' stato alquanto variabile negli ultimi anni in relazione a problemi fisici non previsti ne' prevedibili a priori, la cui comprensione e' ancora in molti casi di tipo fenomenologico.

In relazione quindi all'evolversi della situazione, alla convinzione finora unanime che il prossimo passo (tipo NET) avrebbe dovuto essere di tipo tecnologico e di studio di un comportamento ipotizzato senza sorprese, e' subentrata la convinzione diffusa che restino da risolvere significativi problemi di tipo fisico, soprattutto quando al riscaldamento ohmico si sono aggiunti altri metodi (essenziali per aumentare le prestazioni delle macchine) quali onde elettromagnetiche nel campo della radiofrequenza, o fasci di atomi neutri.

Il degrado nel tempo di confinamento dell'energia determinato dall'introduzione dei metodi di riscaldamento addizionali ha richiesto, per una comprensione anche solo fenomenologica, lunghe campagne di ricerca. L'interpretazione delle cause e lo sviluppo di un rimedio non sono ancora del tutto acquisiti. Promettente per esempio appare l'impiego di una separatrice magnetica.

Queste indagini sono state compiute utilizzando oltre al JET e al TFTR, anche le macchine complementari (incluse quelle USA quali DIII e PLT). In particolare TFTR ha esplorato alcuni mesi fa un nuovo regime caratterizzato da forte riscaldamento con fasci di neutri a bassa densita' del plasma che ha permesso di raggiungere temperature molto elevate. Piu' recentemente il JET ha ottenuto risultati di grande rilevanza utilizzando una separatrice interna. Detti nuovi risultati tendono a considerare superate le preoccupazioni da piu' parti espresse sul degrado del confinamento.

Le macchine della prossima generazione dovranno avere un ulteriore riscaldamento (quello delle alfa) che presumibilmente richiederà un'analogha campagna di ricerca che potrà essere effettuata solo su macchine di elevate prestazioni, cioè con riscaldamento alfa significativo.

La fig. 4 rappresenta un panorama aggiornato dei risultati ottenuti ad oggi.

ESPERIMENTI DI FUSIONE CHE PROGREDISCONO
VERSO L'OBIETTIVO DELL'IGNIZIONE

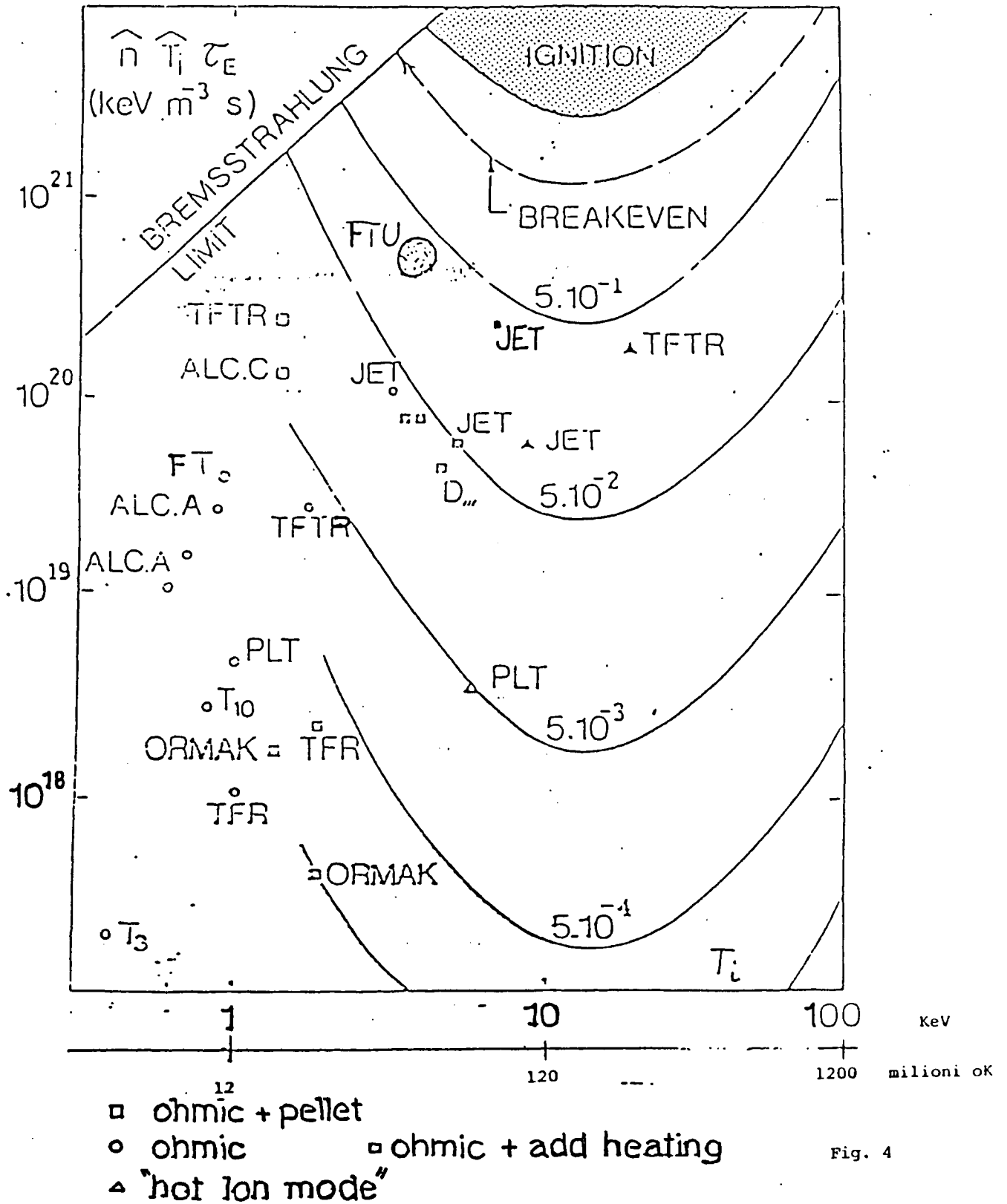


Fig. 4

Gli effetti delle difficoltà incontrate nel perseguire rapidamente un cammino attraverso una sequenza di macchine a prestazioni crescenti sono duplici:

- da una parte ha rilanciato il significato ed il peso di esperimenti di dimensioni ridotte o più fortemente mirati;
- dall'altra ha indotto il JET a introdurre accorgimenti per ridurre il degrado del confinamento cioè per dotarsi di strumenti di intervento sul plasma che diano maggiore flessibilità all'esperimento.

Sinteticamente si può dire che è diminuita la confidenza che l'obiettivo di un forte riscaldamento ottenuto con le particelle alfa (e quindi ovviamente, l'ignizione) possa essere raggiunto in modo "brutale". Il panorama quindi si allarga alla ricerca di soluzioni di costo limitato che permettano però lo studio e la comprensione del comportamento del plasma dei nuovi regimi.

In questa ottica, è opportuno ricordare che in macchine ad alto campo fino ad oggi i fenomeni fisici osservati sono della stessa natura ed estrapolabili a quelli successivamente ritrovati in macchine con campi più vicini a quelli ipotizzati per un reattore. Quindi l'alto campo, come via sperimentale meno costosa, ha notevoli prospettive ove però permetta lo studio adeguato dei problemi ancora aperti.

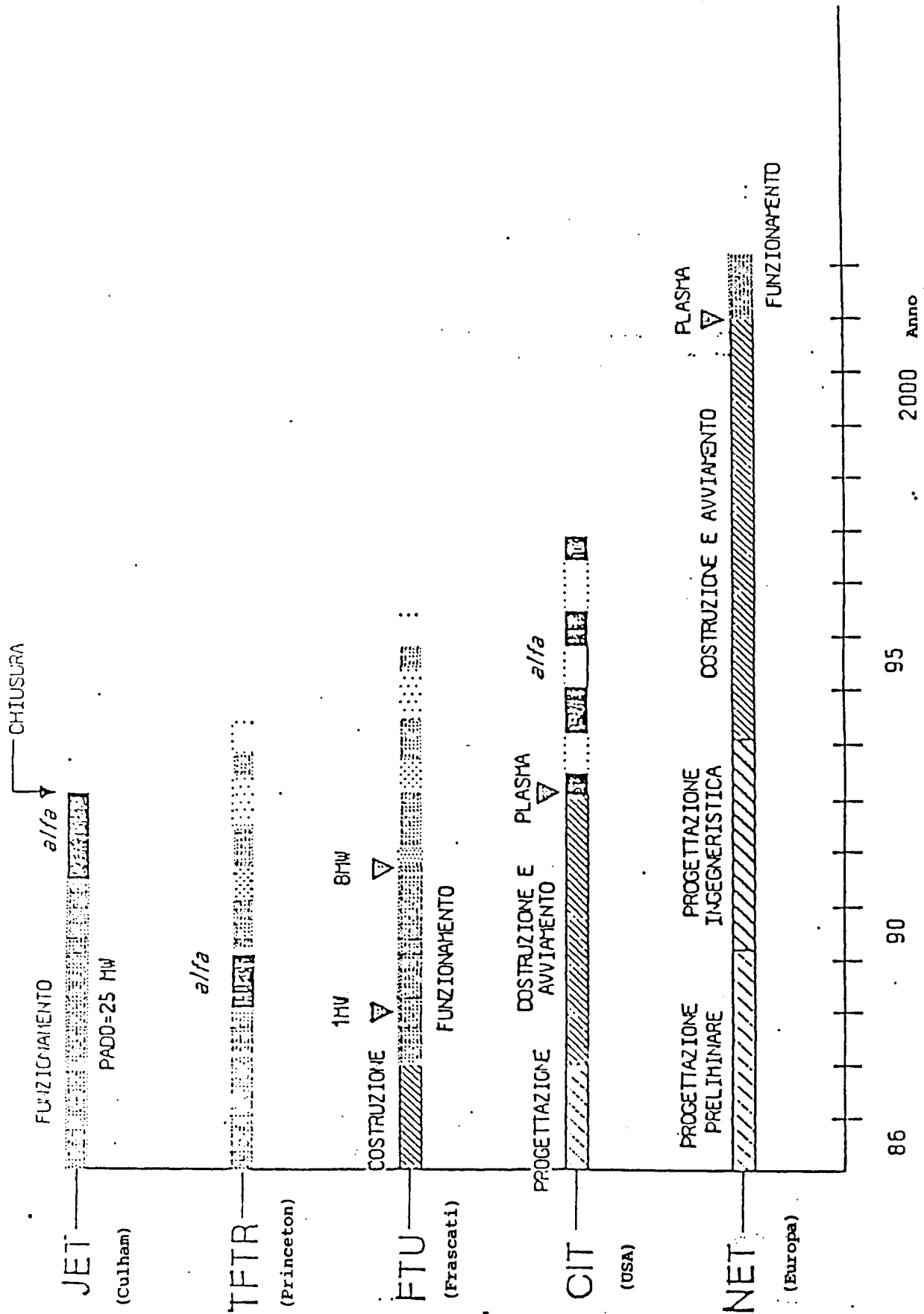
In conclusione il quadro complessivo del confinamento magnetico si presenta in modo molto articolato e richiede una diversificazione di sforzi che vanno dalla comprensione dei fenomeni fisici alla soluzione dei problemi tecnologici per le macchine della generazione NET e successive (magneti superconduttori, prima parete, mantello). La vastità del fronte (ed il conseguente impegno economico) richiede la continuazione del coordinamento a livello europeo ed il suo eventuale ampliamento a livello mondiale.

Il programma americano, sia per problemi di bilancio che in conseguenza delle considerazioni sopra esposte, sembra per ora aver rinviato la costruzione di una macchina (tipo NET), con forte contenuto tecnologico, per realizzare un CIT (Compact Ignition Tokamak), ad alto campo magnetico, teso allo studio dei fenomeni fisici in presenza di un forte tasso di produzione di alfa.

Anche in Italia e' allo studio una macchina compatta ad alto campo denominata IGNITOR che dovrebbe consentire, entro tempi relativamente brevi e costi contenuti, di studiare il comportamento di un plasma D-T in regime di ignizione. La progettazione dettagliata della macchina, la cui futura realizzazione e' prevista presso il Centro di Ricerche della Comunita' di ISPRA, iniziera' prossimamente nell'ambito della associazione Euratom-ENEA per la fusione.

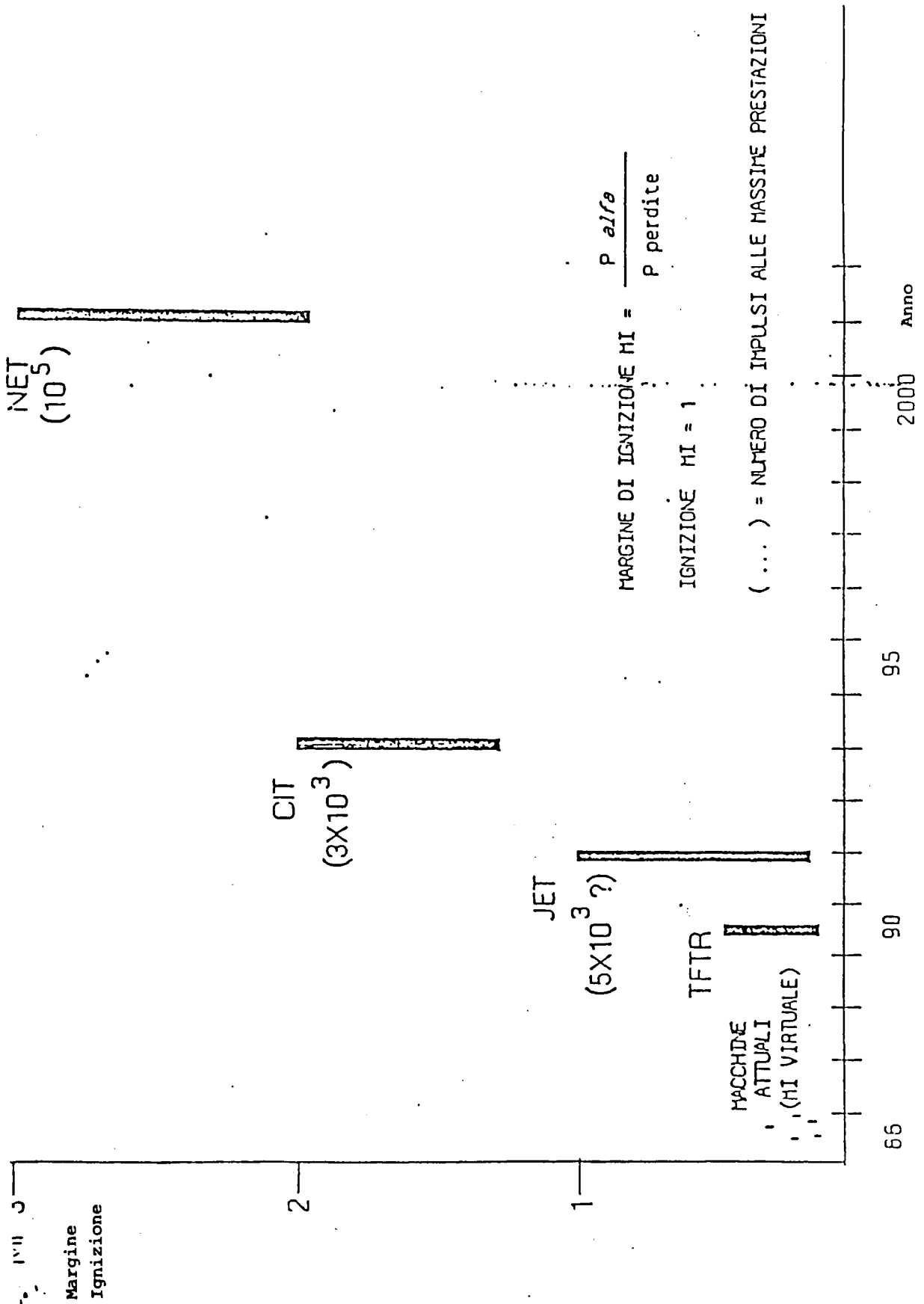
Date le affinita' fra le due iniziative CIT e IGNITOR e' necessario che esse procedano in modo coordinato e il piu' possibile complementare.

Nei diagrammi di fig. 5 e 6 sono riportate le tappe temporali piu' significative delle macchine Tokamak esistenti e di quelle in fase di progetto o di costruzione come oggi programmate.



PROGRAMMA TEMPORALE DI ALCUNE MACCHINE PER LA RICERCA SULLA FUSIONE NUCLEARE

Fig. 5



EVOLUZIONE TEMPORALE PREVISTA PER IL CONSEGUIMENTO DI OBIETTIVI DI MARGINE DI IGNIZIONE

Fig. 6

II.4 Altri possibili passi verso i reattori dimostrativi

Pur con le incertezze indicate al punto precedente, va registrato che al momento sono in corso almeno altri due progetti concettuali oltre al NET per il prossimo passo, sia pure ad un diverso stato di avanzamento, il FER in Giappone e il TIBER 2 negli USA. Tutte e tre mirano ad una dimostrazione anche di tipo tecnologico della fattibilita' della fusione a confinamento magnetico. E' inoltre in corso, in ambito IAEA (collaborazione C.E.E. - U.S.A. - GIAPPONE - U.R.S.S.), un progetto preliminare equivalente denominato INTOR.

Recentemente si sono avuti segnali di interesse in occasione dei vertici Est-Ovest per un forte rilancio della collaborazione su scala mondiale in questo settore col fine di arrivare alla realizzazione di una sola macchina di questo tipo a livello mondiale: E.T.R.. I primi passi da svolgersi nell'ambito AIEA dovrebbero riguardare la definizione di specifiche tecniche di progetto concordate tra i quattro programmi che gia' hanno collaborato in INTOR, e lo sviluppo comune del progetto concettuale.

Questa azione, e' stata particolarmente discussa con riferimento al Gruppo di Lavoro Tecnologia, Crescita, Occupazione istituito al Vertice di Versailles dei sette paesi maggiormente industrializzati dell'Occidente, che ha portato a istituzionalizzare una sede permanente di consultazione per definire collaborazioni ad ampio raggio nel settore della Fusione.

III. IL CONFINAMENTO INERZIALE

III.1 Confinamento Inerziale mediante laser

Tra le linee di approccio alla fusione basate sul confinamento inerziale, il laser e' quella di gran lunga piu' sperimentata. Negli ultimi cinque anni sono stati conseguiti grandi progressi nella comprensione dei fenomeni fisici fondamentali associati all'interazione luce materia.

Sono stati introdotti nuovi metodi per ottenere uniformita' ottimale di illuminazione e per controllare possibili effetti negativi quali il self-focusing della radiazione laser (tecniche note come ISI, Induced Space Incoherence).

Un mezzo strumentale particolarmente valido per flessibilita' e prestazioni (tempi brevi o lunghi, pulse shaping, etc.) e che ha permesso progressi notevoli e' stato il laser a neodimio convertito in frequenza. 4 sistemi gia' esistenti in Giappone ed USA hanno permesso esperimenti di "performance" significativi:

$n\gamma = 2 \times 10^{14} \text{ cm}^{-3} \times \text{s}$, $T_i = 1.5 \text{ Kev}$, al LLNL (Livermore), USA;

2×10^{12} neutroni, $n\gamma \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3} \times \text{s}$, $T_i \approx 9 \text{ Kev}$ all'Universita' di Osaka.

Al fine di minimizzare l'energia laser richiesta per un dato guadagno ($G = \text{rapporto energia termonucleare/energia dell'impulso laser}$), i futuri studi dovranno essere indirizzati verso:

- . ottimizzazione della geometria di illuminazione
- . scelta geometrico-strutturale del bersaglio.

Dovranno inoltre essere sviluppate sorgenti laser ad alta energia di fascio e ad alta efficienza (η).

Per quanto riguarda il processo vengono seguite due linee principali:

- . illuminazione diretta: la luce laser illumina uniformemente il bersaglio provocandone l'implosione
- . illuminazione indiretta: la luce laser viene convertita in raggi dentro una cavitaa, in cui e' posto il bersaglio da implodere.

Per quanto riguarda la sorgente laser (driver) le previsioni attuali circa l'energia laser necessaria per ottenere l'ignizione sono:

- . circa 50-200 KJ per il metodo diretto, il valore esatto essendo determinato dalla geometria di illuminazione;
- . 0,5-1 MJ per il metodo indiretto.

Queste stime vanno intese con un'incertezza di un fattore pari a qualche unita'; in questo senso sono rimaste costanti negli ultimi tre anni.

Le energie sopra indicate sono raggiungibili con le piu' avanzate tecnologie attuali o con tecnologie ragionevolmente estrapolabili, che possono portare a una riduzione di costi di realizzazione delle sorgenti dell'ordine di un fattore 10.

L'uso di confinamento inerziale in un reattore richiede un laser con alta frequenza di ripetizione (1-10 Hz) ed efficienza η tale che

$$\eta G \approx 10$$

dove G e' il guadagno term nucleare definito in precedenza; poiche' G puo' essere 200, e' necessario $\eta \approx 5\%$.

Un laser a gas (laser a eccimeri) adatto allo scopo e' in sviluppo a Los Alamos ed e' stato sperimentato a livello di 10 KJ. A Livermore e' in sviluppo un sistema misto eccimeri-FEL (free electron laser) ad alta efficienza.

In generale i centri di ricerca piu' avanzati considerano come driver del reattore la linea a eccimeri la piu' promettente tra le tecnologie acquisite e la linea FEL come una linea da verificare (problemi di pulse shaping).

In tabella 5 sono illustrati i vari esperimenti in corso in campo mondiale.

La CEE destina nella bozza di programma 1987-91, attualmente all'esame degli organi decisionali comunitari, circa l'1% delle sue risorse finanziarie sulla fusione alle attivita' di confinamento inerziale concepito essenzialmente come mantenimento di competenza e capacita' di seguire i progressi in questo campo.

I due laboratori europei che hanno supporto finanziario CEE sono:

- Garching (RFG)

- Frascati-ENEA: in particolare e' stato realizzato un sistema laser al Neodimio da 140joule, interamente progettato in Italia con la collaborazione dell'industria nazionale.

Sul piano tecnologico (in particolare per lo sviluppo del driver) l'Italia puo' contare su una base di competenze avanzate in ambito ENEA.

All'ENEA, infatti, esistono competenze e realizzazioni sperimentali sui laser ad eccimeri di potenza, lo stesso Ente e' anche leader per l'Italia di un progetto Italia-Francia-Germania-Inghilterra in ambito EUREKA con larga partecipazione industriale, volto allo sviluppo di laser di potenza per diverse applicazioni.

- Tab. 5 -

Sistemi Laser per confinamento inerziale in operazione

LASER	N° FASCI	λ (μm)	ENERGIA emessa in 1ns (KJ)	USO
<u>USA</u>				
Novette LLNL	2	1.054 0.527 Neodimio	9.2 5.0	Esperimenti di interazione Implosione di bersagli per via indiretta (RX): compressione -100x, densità DT liquido; laser a RX
Nova LLNL	10	1.054 0.527 0.351 Neodimio	65 25	Vedi Novette; non ha raggiunto 100KJ ($\lambda = 1.054$) per impurezze di platino nel vetro. Costo della sostituzione 5 M\$ su 176 M\$ del costo totale. Compressione stimata 180x
Antares	24	10 CO_2	40	Esperimenti di interazione; compressione. Risultati sfavorevoli: $\lambda = 10 \mu\text{m}$, troppo lunga
Aurora	96	0.25 Eccimeri	10	Laser dimostrativo, potenzialmente da reattore. Nella prima fase i 96 fasci danno energia in impulsi di 5 ns per una durata di 480=5x96. Seconda fase demultiplexing
Omega LLE, U.R.	24	1.054 0.351 Neodimio	4 2.5	Esperimenti di interazione, compressione di bersagli sferici con il metodo diretto, 2×10^{11} neutroni da DT
N.R.L.	2	1.054 0.527 Neodimio	0.1+0.2	Esperimenti di interazione su bersagli piani: ISI (Induced Space Incoherence) in illuminazione diretta
KMS	2	1.054 0.527 Neodimio	0.5	Esperimenti di compressione diretta; compressione 100x
<u>GIAPPONE</u>				
Gekko XII U.Osaka	12	1.054 0.527 Neodimio	20 8(700ps)	Esperimenti di interazione; implosione di bersagli, metodo diretto, metodo indiretto; 2×10^{12} neutroni con quello diretto
Lekko VIII	8	10 CO_2	10	Esperimenti di interazione, controllo elettroni veloci
<u>FRANCIA</u>				
Octal Limeil	8	1.054 0.351	2 1.5	Esperienze di implosione diretta, interazione luce-materia
Phebus Limeil	2	1.054 0.351 Neodimio	20 9	Esperimenti di compressione indiretta, probabilmente laser RX
Ecole Poly	6	1.054 0.527 0.264 Neodimio	0.3	Esperimenti di interazione, compressione di bersagli sferici a $0.264 \mu\text{m}$, neutroni

(segue)

- Tab. 5 - (segue)

LASER	N° FASCI	λ (μm)	ENERGIA emessa in 1ns (KJ)	USO
<u>U.K.</u>				
Sprite, Rutherford	1	0.25 Eccimeri	0.14 (50 ns)	Studi di interazione
Vulcan, Rutherford	12	1.054 0.527 Neodimio	0.3	Esperimenti di implosione, laser a RX
Aldermas				
<u>RFT</u>				
Asterix (Garching)	1	1.3 0.66 0.44 Iodio	0.5	Esperimenti di interazione, studi per il metodo indiretto (isotropia RX in cavità, $T = 200\text{ev}$)
<u>USSR</u>				
Delphin, Lebedev	108	1.054	2	Esperimenti di compressione, record nella compressione di volume. Introduzione di Induced Space Incoherence (ISI)
<u>ITALIA</u>				
ABC Frascati	2	1.054 0.527 Neodimio	0.14 0.1 (3 ns)	Esperimenti di interazione, compressione, ISI

La linea FEL, che rappresenta l'attivita' piu' avanzata e innovativa nei laser di potenza, si e' concretizzata nella realizzazione di sette sorgenti operanti nel mondo secondo diverse tecnologie. Una sorgente e' stata realizzata in Italia dall'ENEA su concezione e tecnologia originali. Essa costituisce l'unica realizzazione europea di FEL "a singolo passaggio", su una linea di sviluppo simile a quella di Los Alamos e Livermore, di eventuale potenziale interesse per applicazioni fusionistiche in vista di uno sviluppo di un driver per impianti di potenza a confinamento inerziale.

III.2 Altre linee di attivita'

La situazione per ciascuno dei diversi approcci e' descrivibile come segue:

- . Elettroni (1 Mev, 100 MA): linea abbandonata a causa della sfavorevole fisica di accoppiamento con il plasma. Le macchine sono state trasformate in generatori di ioni leggeri.
- . Ioni leggeri (5-10 Mev, 10-20 MA): esperimenti significativi potranno essere effettuati a livello di 1 MJ al laboratorio Sandia con PBFA II. In questo caso i problemi sono la lunga durata dell'impulso (70ns), la difficolta' di raggiungere l'adeguata forma temporale e la difficolta' di focalizzazione a distanza maggiore di qualche centimetro dal generatore. L'uso di questo acceleratore in un reattore richiedera' lo sviluppo di tecniche semplici di focalizzazione a distanze di 5-10 m.
- . Ioni pesanti (ioni di U, 5-20 Gev, 5-20 KA); non esistono esperimenti di interazione. Infatti, poiche' il costo degli acceleratori cresce come l'energia con un esponente di 0,4 essi sono convenienti solo a livello di reattore. E' comunque previsto negli anni 90 negli USA un esperimento di interazione (HTE, High Temperature Experiment). Attualmente gli studi teorici riguardano in larga maggioranza gli acceleratori ed il problema della focalizzazione del fascio.

IV. ASPETTI DI SICUREZZA E DI IMPATTO AMBIENTALE

IV.1 Considerazioni generali

Allo stato attuale del confronto tra i reattori a fissione e quelli a fusione, necessariamente generale dato il livello del tutto preliminare di definizione di un possibile reattore a fusione, non e' possibile definire in modo quantitativo vantaggi e svantaggi di un sistema sull'altro. I reattori a fusione presentano comunque caratteristiche potenziali piu' favorevoli di quelli a fissione, anche se le necessarie convalide sul piano realizzativo debbono ancora essere conseguite. Tra queste le piu' importanti sono:

- l'impossibilita' di perdere il controllo del livello di potenza del reattore;
- la bassa densita' di potenza nella struttura sia in condizioni di funzionamento sia dopo lo spegnimento (nel caso di Tokamak circa 1/100 rispetto ai reattori a fissione nucleare);
- l'assenza dei nuclidi transuranici e dei prodotti di fissione;
- il tempo di dimezzamento (fisico e biologico) relativamente breve del trizio;
- i minori problemi posti dal condizionamento a medio e lungo termine dei rifiuti radioattivi;
- la concentrazione nel sito del reattore di tutti gli impianti di trattamento del combustibile;
- il piu' contenuto impatto ambientale associato ad incidenti di gravita' estrema.

Inoltre:

- a - Un vantaggio intrinseco nei reattori a fusione rispetto alla eventualita' di verificarsi di incidenti gravi e' la impossibilita' di escursioni di potenza incontrollate in plasma confinati magneticamente. I quantitativi

relativamente piccoli di trizio nella zona di combustione (ordine del grammo) e la caratteristica del plasma di estinguersi spontaneamente in caso di perdita di equilibrio, sono alla base di questa importante caratteristica. Non puo', per contro, essere escluso il verificarsi di situazioni di instabilita' del plasma con danneggiamento della prima parete.

- b - Il rischio piu' importante per la popolazione da un reattore a fusione di potenza basato sulla reazione fra i nuclei di deuterio e trizio e' riferibile ai grandi quantitativi di trizio radioattivo presenti nell'impianto, dell'ordine di 10 Kg di trizio corrispondenti a circa 10^{18} Bq.. La maggior parte di tale quantitativo rimane tuttavia immobilizzato come solido. Per limitarne il rilascio all'ambiente nel corso del normale funzionamento a valori dell'ordine di 10^{12} Bq/giorno e' necessario realizzare un efficace sistema di contenimento e controllo.

L'esperienza di esercizio acquisita con le centrali a fissione ad acqua pesante, dove il trizio e' contenuto in quantita' paragonabile, fa ritenere tale obiettivo tecnicamente conseguibile. La riduzione del quantitativo di trizio presente e' un altro obiettivo possibile.

- c - Gli attuali progetti di reattori a fusione prevedono la formazione di grandi quantita' di prodotti di attivazione neutronica nelle strutture della prima parete e del mantello, dell'ordine di 10^{20} Bq. In termini di attivita' totale i valori sono dello stesso ordine di grandezza di quelli relativi alle centrali a fissione, ma la natura dei radionuclidi presenti comporta effetti biologici sensibilmente inferiori. Inoltre la quantita' e la qualita' dei radionuclidi non sono intrinseche al processo di fusione ma dipendono dalle scelte dei materiali e di progetto, con possibilita' di futuri netti miglioramenti.

- d - I rifiuti radioattivi prodotti sono volumetricamente paragonabili nei due sistemi, ma sostanzialmente differenti rispetto ai relativi rischi biologici potenziali. Un parametro indicativo e' costituito dai tempi di dimezzamento fisici dei principali nuclidi presenti, compresi tra 1 e 100 anni nei reattori a fusione e tra 10 e 100.000 anni in quelli a fissione. Nel lungo termine resta la possibilita' di ridurre il volume dei rifiuti introducendo materiali speciali per la struttura della prima parete e del mantello per limitare le sostituzioni durante la vita dell'impianto.

- e - Le grandi dimensioni e complessità, almeno nel caso del confinamento magnetico, dei reattori a fusione rendono necessaria l'adozione di particolari provvedimenti (in sede di progettazione e di procedure di manutenzione ordinaria e straordinaria) al fine di ridurre le dosi di esposizione al personale di operazione.
- f - Il calore generato dal decadimento dei prodotti di attivazione pone la necessità di disporre di un sistema di refrigerazione operante dopo l'arresto del reattore. Le quantità di calore in gioco sono confrontabili con quelle di un reattore a fissione a mezz'ora dallo spegnimento (2% della potenza nominale), anche se le minori densità di potenza tipiche del reattore a fusione costituiscono un vantaggio non trascurabile. Resta comunque importante l'analisi degli incidenti di perdita di refrigerazione, in particolare lo studio della loro evoluzione, dei meccanismi di propagazione ad altri sottosistemi e delle relative conseguenze complessive (fuochi di litio, rilascio di trizio, ecc.). Anche in questo caso importanti benefici sono conseguibili sia sul piano della corretta progettazione sia su quello della scelta dei materiali (ad es. con l'adozione di composti di litio meno reattivi in luogo del litio metallico).
- g - Il quantitativo di energia (50 GJ) immagazzinata nel campo magnetico toroidale di un reattore tipo Tokamak è tale che una sua conversione, anche parziale, in energia cinetica porterebbe ad effetti importanti, al limite alla rottura delle strutture di contenimento. Solo lo sviluppo di un progetto completo potrà dimostrare la credibilità o meno di questo evento.
- h - Nel caso di un massimo rilascio di trizio, a seguito di un incidente grave con perdita di contenimento, è prevedibile un effetto sull'uomo e sull'ambiente alquanto inferiore a quello relativo ad un analogo incidente in un reattore a fissione.

Nell'ipotesi di rilasci di trizio nell'ambiente esterno in casi sia di normale funzionamento sia di incidente va tenuto presente il particolare ciclo ambientale di questo isotopo dell'idrogeno che, una volta rilasciato nell'ambiente e ossidato ad acqua triziata (HTO), segue per la maggior parte il ciclo dell'acqua, anche se una piccola frazione di trizio può formare composti organici in matrici ambientali. Il trizio, immesso nell'ambiente, può

irraggiare l'uomo praticamente solo a seguito della contaminazione interna causata dall'inalazione e ingestione di campioni contaminati. La distribuzione del trizio nei tessuti umani dipende principalmente dal metabolismo dell'acqua triziata; questo però non esclude una concentrazione intracellulare del trizio in fase organica con tempi di dimezzamento biologico molto più lunghi di quelli previsti per l'acqua triziata. La dose di irraggiamento esterno da trizio risulta invece praticamente nulla a causa della bassa energia (18,6 Kev massima) delle particelle da esso emesse.

In conclusione sarebbe un grave errore sottovalutare gli effetti biologici del trizio limitandoli solo all'irraggiamento esterno o al metabolismo dell'acqua triziata; il metabolismo del trizio in uomo è infatti complesso e comunque, una volta incorporato nei tessuti, la sua radiazione può essere depositata per tempi anche di qualche mese entro le cellule con possibili conseguenze sul loro nucleo e sul DNA in esse contenuto.

In estrema sintesi questa analisi conferma le ipotesi di rischi nei reattori a fusione attualmente allo studio tutt'altro che trascurabili ma comunque potenzialmente inferiori, soprattutto quelli riferibili agli incidenti più gravi rispetto a quelli dei reattori a fissione.

Le caratteristiche dei reattori a fusione meritano due ultime riflessioni:

- Lo sviluppo della fusione dimostrerà se ulteriori, importanti vantaggi dal punto di vista della sicurezza potranno essere conseguiti nei prossimi decenni. In particolare, se l'umanità in futuro potrà disporre di un processo, basato su reazioni di nuclei non radioattivi e senza produzione di neutroni, eliminando di fatto gli attuali rischi da radioattività della fonte nucleare.
- Man mano che il processo di fusione passerà dalla fase di dimostrazione fisica a quella tecnologico/ingegneristica e, in seguito, a quella di realizzazione di impianti industriali su larga scala, si evidenzieranno e dovranno essere risolti aspetti di sicurezza e di impatto ambientale, alcuni già identificati sul piano concettuale, altri riferibili alla sempre più completa definizione dei sistemi, sottosistemi e componenti.

Da questo punto di vista la strada appare non dissimile da quella percorsa nel caso dei reattori a fissione, anche se le prospettive sono potenzialmente più favorevoli.

TERMINOLOGIA

T	Temperatura del plasma: °K o eV (1 eV \approx 11.600 °K)
T	Unita' di misura della intensita' del campo magnetico: Tesla (1 Tesla = 10 Kgauss)
n	Densita' del plasma (numero ioni/cm ³)
τ	Tempo di confinamento del plasma (s)
G	Rapporto tra energia termonucleare e energia dell'impulso laser
η	Rapporto tra energia dell'impulso laser ed energia fornita al laser
MI	Margine di ignizione = rapporto tra potenza generata dalle particelle alfa e la potenza associata con le perdite
MI virtuale	Margine di ignizione, ma in assenza di particelle alfa, considerando la potenza che si produrrebbe dalle alfa qualora si introducesse il Trizio.