

**RELAZIONE
DEL PROFESSOR ENZO BERTOLINI**

PAGINA BIANCA

INDAGINE CONOSCITIVA SULLA FUSIONE NUCLEARE PER USI PACIFICI DELLA XII COMMISSIONE INDUSTRIA DELLA CAMERA DEI DEPUTATI

Intervento di ENZO BERTOLINI (18 dicembre 1986)

1. INTRODUZIONE
2. LA FUSIONE TERMONUCLEARE
3. IL PROGRAMMA EUROPEO
4. IL PROGETTO JET
5. LE QUESTIONI POSTE DALLA XII COMMISSIONE
INDUSTRIA DELLA CAMERA DEI DEPUTATI
 - 5.1 STATO DELLE RICERCHE
 - 5.2 LINEE DI RICERCA
 - 5.3 QUADRO MONDIALE E COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE
 - 5.4 TEMPI DI REALIZZAZIONE E RISORSE
 - 5.5 PERCHE' LA FUSIONE?
6. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI

INDAGINE CONOSCITIVA SULLA FUSIONE NUCLEARE PER USI PACIFICI DELLA XII COMMISSIONE INDUSTRIA DELLA CAMERA DEI DEPUTATI

(Intervento di Enzo Bertolini, Roma 18 dicembre 1986)

Signor Presidente, Onorevoli Deputati!

Vorrei iniziare con un ringraziamento per questo invito a parlare, di fronte ad una udienza tanto prestigiosa, del mio lavoro, la ricerca sulla fusione termonucleare controllata, cui ho dedicato, a tempo pieno, la maggior parte della mia vita professionale.

Dopo alcune considerazioni di INTRODUZIONE, richiamerò brevemente i concetti base della FUSIONE TERMONUCLEARE solo nella misura che ritengo necessaria al discorso che andrò facendo, poichè assumo che questo tema sia già stato ampiamente trattato in questa sede; parlerò poi del PROGRAMMA EUROPEO, anche qui principalmente per mettere in evidenza la collocazione del progetto JET nell'ambito del programma stesso.

La parte principale della mia relazione riguarderà, come credo Loro da me si attendano, il ruolo del PROGETTO JET nel campo delle ricerche sulla fusione ed una mia prima risposta alle QUESTIONI POSTE DALLA XII COMMISSIONE INDUSTRIA DELLA CAMERA DEI DEPUTATI, con tanta precisione e pertinenza riassunte nel telex che mi è stato inviato; terminerò con le CONCLUSIONI e con alcuni SUGGERIMENTI dettati dalla mia esperienza e dalle riflessioni che sono andato facendo sull'argomento.

1. INTRODUZIONE

Per consentire Loro una più accurata valutazione della attendibilità e dei limiti del mio intervento, vorrei brevemente precisare quale sia il mio impegno professionale e quale sia il mio 'background'. Dopo la laurea in ingegneria elettrotecnica e la specializzazione in fisica nucleare applicata, ho lavorato per alcuni anni al CERN di Ginevra in esperimenti di fisica delle particelle elementari, poi per dieci anni all'ENEA di Frascati in esperimenti di fisica del plasma orientati verso la fusione termonucleare e verso la conversione diretta di energia termica in energia elettrica per via magnetoidrodinamica. Nel 1973 quando, grazie alla decisione presa di rendere più stretta la collaborazione europea sulle ricerche nel campo della fusione (gestita da tempo dalla Comunità Europea, Euratom), fu avviata la progettazione in comune di un esperimento molto ambizioso, il JET (Joint European Torus) per dimostrare la fattibilità scientifica della fusione termonucleare controllata, sono stato richiesto di rappresentare il nostro Paese nella Direzione del Progetto. Fu così che,

sotto la 'leadership' del francese Paul Henry Rebut iniziai a lavorare insieme a colleghi di altri Paesi europei a questa impresa, che come spero di riuscire a mettere in evidenza nella mia relazione, rappresenta per i risultati scientifici e tecnici ma anche manageriali già raggiunti, non solo l'esperimento leader al mondo in questo tipo di ricerche, ma anche un esempio unico di collaborazione nell'ambito delle strutture della Comunità Europea.

Il mio ruolo nel JET è di Direttore della Divisione Sistemi Elettromagnetici, che fa parte del Dipartimento Macchina e Sviluppo, di cui sono anche Vicedirettore. La mia attività si divide tra compiti legati alla Direzione del Progetto e compiti di progettazione, costruzione ed operazione di pertinenza alla mia Divisione; soddisfo infine i miei interessi per l'oggetto proprio delle nostre ricerche, partecipando in posizione di responsabilità alla conduzione degli esperimenti con la macchina JET. Infine, ad intervalli regolari, insegno per brevi periodi all'Università di California, su argomenti connessi al mio lavoro di ricerca.

Prima di entrare nel vivo dell'argomento vorrei fare ancora una importante, anche se ovvia, precisazione riguardante la veste in cui sono qui. E' chiaro che quando parlerò di JET, cioè dei risultati tecnici e scientifici raggiunti, quanto dirò sarà pertinente alle mie funzioni nel Progetto. Quando invece, sia nel corso della relazione che in fase di discussione risponderò alle domande della Commissione di prospettiva più vasta, esporrò con la maggiore franchezza ed efficacia possibili le mie convinzioni personali maturate in vent'anni di lavoro in questo campo, sulle quali non intendo coinvolgere in maniera automatica la Direzione del JET ed il Progetto nel suo insieme, perchè, in genere, non si tratta di temi riguardanti il nostro lavoro in comune, che ripeto, è quello della dimostrazione sperimentale della fattibilità scientifica della fusione.

Intendo sviluppare questa relazione in base alle mia conoscenza diretta dei problemi e dei fatti, evitando, e semmai precisandolo quando fosse necessario, l'utilizzo di conoscenze apprese solamente dalla letteratura, anche scientifica. Quindi le mie risposte potranno apparire incomplete e parziali. Ad esempio, quando parlerò di che cosa succede fuori dell'Europa, mi baserò su quanto ho visto e capito visitando laboratori e discutendo con colleghi, in tempi recenti, negli Stati Uniti e più limitatamente in Unione Sovietica.

Eventuali noiose ripetizioni saranno dovute al fatto che conosco solo in parte molto limitata quanto in questa sede è stato già detto, fatta eccezione per gli interventi di Fasella e Toschi, dato il comune impegno nell'ambito del programma europeo.

2.LA FUSIONE TERMONUCLEARE

C'è il sole, ci sono le stelle, quaggiù abbiamo la bomba 'H': l'obiettivo delle ricerche sulla fusione termonucleare per usi pacifici è quello di imparare a rilasciare questa energia in maniera controllata (fusione termonucleare controllata, appunto). Non è una cosa ovvia, ci si lavora da oltre trent'anni, è uno squisito e tremendamente complesso problema di fisica, cioè di fattibilità scientifica.

Come avranno sentito ripetere sino alla noia, si tratta di far 'fondere' insieme due tipi (isotopi) di nuclei di atomi di idrogeno, deuterio e trizio, producendo un nucleo di atomo di elio ed un neutrone: in più una certa quantità di energia, per un quinto associata al nucleo di elio e per quattro quinti al neutrone. La somma delle masse del neutrone e dell'elio è minore della somma delle masse del deuterio e del trizio (FIGURA 1): una parte della massa del combustibile si è trasformata in energia.

Come l'energia di fissione dell'uranio, anche l'energia di fusione dell'idrogeno è ENERGIA NUCLEARE.

Vedremo in seguito che esistono altri tipi di reazioni di fusione, ancorchè più allettanti, certamente ancora più difficili da realizzare: perciò oggi pensiamo che i primi eventuali reattori a fusione si baseranno sul ciclo combustibile deuterio e trizio.

Affinchè, in una miscela di deuterio e trizio, avvengano nell'unità di tempo reazioni in numero sufficiente affinchè la 'combustione' si possa autosostenere con l'energia associata ai nuclei di elio prodotti (particelle alfa) e si possa contare su di una potenza netta in uscita (da convertire poi in energia termica e quindi in elettrica in una centrale), è necessario che il prodotto della densità del combustibile n , della sua temperatura T e del tempo τ_E per il quale queste condizioni sono mantenute (tempo

di confinamento) sia $n \tau_E T > 10^{28} \text{ m}^{-3} \text{ s } ^\circ\text{K}$ (TABELLA I). Poichè è necessaria una temperatura di almeno 100 milioni di gradi (equivalenti a circa 10 keV nelle nostre unità) affinchè la probabilità di collisione per far 'fondere' assieme due nuclei di deuterio e trizio sia sufficientemente elevata, ne consegue che il prodotto $n \tau_E$ deve essere maggiore di $10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$.

Ci sono due approcci per realizzare queste condizioni: densità estremamente elevate (molto superiori alla densità del piombo) e tempi brevissimi (frazioni di miliardesimo di secondo) per il cosiddetto CONFINAMENTO INERZIALE; oppure densità moderate (centomila volte inferiori alla densità dell'aria che ci circonda) e tempi relativamente elevati (dell'ordine del secondo), per il cosiddetto CONFINAMENTO MAGNETICO. Del primo approccio, oggi condotto prevalentemente con fasci di luce laser, ne ha parlato diffusamente, a quanto mi è stato detto, Carlo Rubbia: per questo motivo, ma anche perchè non fa parte di conoscenze dirette acquisite con il mio lavoro, ne farò solo un accenno in relazione alle questioni poste dalla Commissione. Ritengo invece opportuno spendere qualche parola sul secondo approccio, poichè esso è quello dell'esperimento JET, del programma europeo e della maggior parte del programma mondiale.

Poichè alle temperature necessarie alla fusione, il gas di deuterio e trizio è allo stato di PLASMA, cioè composto di nuclei di isotopi di idrogeno, con carica elettrica positiva e di elettroni, con carica elettrica negativa, il moto di queste particelle è largamente influenzabile da campi magnetici: appunto con particolari configurazioni magnetiche si possono realizzare vari tipi di 'BOTTIGLIA MAGNETICA', che consentono di intrappolare le particelle di plasma, isolandole dalle pareti del

contenitore e, quando si raggiungessero le condizioni di fusione, confinandole per il tempo necessario (dell'ordine del secondo, come si è detto).

Sono stati sperimentati principalmente due tipi di bottiglia magnetica, l'una cilindrica, detta a SPECCHIO, perchè le particelle che tendono a sfuggire dalle estremità vengono riflesse, almeno in parte, verso il centro della camera, l'altra invece di forma chiusa ad anello. Di quest'ultima sono state sperimentate varie configurazioni, quasi tutte di forma TOROIDALE (FIGURA 2).

Delle varie configurazioni magnetiche, quella che ha dato, di gran lunga i risultati migliori in assoluto (cioè più vicini alle condizioni di fusione), è la configurazione detta TOKAMAK, inventata, negli anni sessanta, dai nostri colleghi sovietici dell'Istituto Kurchatov di Mosca: oggi, non solo il JET è un tokamak, ma sia il programma europeo che quello mondiale sono centrati su questa linea.

La configurazione tokamak (si veda la figura 2) è realizzata dalla combinazione del campo magnetico (toroidale) prodotto da avvolgimenti (bobine) esterni e dal campo magnetico prodotto dalla corrente che, mediante un particolare tipo di trasformatore (alimentato, come le bobine toroidali, da una sorgente di energia esterna), si fa fluire nell'anello di plasma stesso, che è un buon conduttore elettrico, perchè contiene elettroni 'liberi'. Questa corrente, come per ogni conduttore elettrico, tende a riscaldare il plasma, portandolo sino a temperature che, nel JET, sono arrivate ad oltre un terzo di quelle necessarie ad avviare il processo di fusione (vicine a 40 milioni di gradi a fronte dei 100 necessari, come si è detto): questo tipo di riscaldamento è chiamato 'riscaldamento ohmico'. L'energia necessaria per colmare la differenza è fornita dai cosiddetti sistemi di riscaldamento addizionale, essenzialmente fasci di atomi di isotopi di idrogeno ad alta energia (attorno ai 100 keV, cioè di energia dieci volte maggiore di quella corrispondente alla temperatura di plasma necessaria per la fusione, si veda la tabella I) e metodi basati su sistemi alimentati a radiofrequenza.

Le dimensioni del tokamak (in sostanza il volume del plasma), la corrente nel plasma ed il campo magnetico toroidale giocano un ruolo fondamentale nelle prestazioni di 'fisica' della macchina: tanto più alti sono i loro valori, tanto migliori sono queste prestazioni. Essi però non possono essere scelti arbitrariamente, dipendenti come sono da condizioni di fisica e da limiti di ingegneria: pertanto la scelta ottimale dipende essenzialmente dagli obiettivi del tokamak in questione.

Per ragioni di fisica e di ingegneria il tokamak funziona ad impulsi, di durata dell'ordine della decina di secondi nelle macchine attuali come il JET, intervallati da periodi molto più lunghi, di durata dell'ordine di alcuni minuti. Nel reattore il rapporto tra questi tempi va invertito: gli impulsi saranno di alcuni minuti ad intervalli dell'ordine del centinaio di secondi.

Il problema della fattibilità scientifica della fusione è quello di realizzare contemporaneamente le condizioni necessarie di densità, temperatura e tempo di confinamento. In trent'anni di ricerche, ma particolarmente, come vedremo, negli ultimi anni con l'entrata in funzione dei grandi tokamak (TFTR negli Stati Uniti, JET in Europa e più recentemente JT-60 in Giappone) si sono fatti progressi enormi, realizzando per

la prima volta con la stessa macchina per ciascun dei tre parametri valori molto vicini a quelli richiesti per le condizioni di fusione seppur in esperimenti (impulsi) diversi. Il problema che abbiamo di fronte ora è quello di realizzare contemporaneamente, cioè nello stesso esperimento (impulso), i valori di densità, temperatura e tempo di confinamento necessari: come cercherò di spiegare non è un problema semplice, la soluzione del quale richiede una più approfondita comprensione di processi fisici molto complessi nonché l'efficace realizzazione di alcune felici intuizioni sperimentali.

3.IL PROGRAMMA EUROPEO

Del programma europeo, dei suoi obiettivi e della sua organizzazione, ha parlato Loro, in maniera esauriente il Professor Fasella, quale responsabile di tutto il programma di ricerca della Comunità, nel cui bilancio la fusione rappresenta una piccola parte (circa il 10%) e di questa il JET rappresenta un quarto. Perciò qui ne farò solo qualche cenno utile per il seguito del mio intervento.

Il programma di collaborazione sulla fusione in Europa è iniziato verso la fine degli anni cinquanta ed è stato concepito e diretto per 25 anni da un italiano, Donato Palumbo, che ha da poco lasciato l'incarico per raggiunti limiti di età. Durante questi anni il programma è stato portato avanti in maniera sempre più integrata e di questa integrazione il JET è oggi il pilastro portante.

Lo scopo del programma è stato definito con chiarezza da una risoluzione del CONSIGLIO DE MINISTRI della Comunità, già nel 1971 ed in varie forme successivamente ribadito: "IL PROGRAMMA FUSIONE COMUNITARIO E' UN PROGETTO DI COLLABORAZIONE A LUNGO TERMINE E COMPRENDE TUTTO IL LAVORO CONDOTTO DAGLI STATI MEMBRI NEL CAMPO DELLA FUSIONE TERMONUCLEARE. E' CONCEPITO PER PORTARE, NEI TEMPI DOVUTI, ALLA COSTRUZIONE IN COMUNE DI REATTORI PROTOTIPO IN VISTA DELLA SUCCESSIVA PRODUZIONE INDUSTRIALE E COMMERCIALIZZAZIONE".

La sostanza di questa formulazione ci dice tre cose. Primo che tutto ciò che si fa in Europa in questo campo, sia nei Laboratori nazionali che in imprese comuni è integrato e coordinato nel programma. Secondo, che quanto per varie e forse non del tutto giustificate ragioni, non è stato possibile fare per la fissione, si tenti di farlo per la fusione: sviluppare e possibilmente commercializzare come Europa, una filiera europea di eventuali reattori a fusione (e questa non mi sembra cosa di poco conto anche da un punto di vista politico). Terzo, che gli esperimenti che si costruiranno in comune (il primo dei quali è poi stato il JET) debbono avere una logica orientata verso il reattore, cioè uno spettro di parametri ed una configurazione complessiva estrapolabili ad esperimenti successivi sino al reattore (anche questa 'lettura' mi sembra significativa).

Per questo, come hanno già sentito, il programma prevede tre macchine (FIGURA 3), da costruire e gestire in comune, i cui obiettivi sono definiti in maniera

semplice e chiara.

Il JET deve mostrare la FATTIBILITA' SCIENTIFICA così definita: mostrare sperimentalmente, usando il vero combustibile termonucleare deuterio-trizio, che le reazioni di fusione si sviluppano in maniera controllata ed in misura sufficiente a verificare la capacità di autosostentamento del processo: questo significa realizzare almeno la condizione che, nel nostro gergo, chiamiamo 'breakeven'. Vale la pena chiarirne il significato: tale condizione si realizza quando la potenza di fusione prodotta eguaglia la totale potenza immessa nel plasma ($Q=1$, dove Q è appunto il rapporto tra queste due potenze). In altre parole, per quanto detto in precedenza, ciò significa che le particelle alfa (gli atomi di elio risultanti dalle reazioni di fusione) contribuiscono, con la loro energia, per almeno un quinto al sostenimento delle condizioni di fusione.

Il NET deve mostrare la FATTIBILITA' INGEGNERISTICA E TECNOLOGICA (il cui significato è stato chiaramente definito dal Professor Toschi), utilizzando un plasma in condizioni di autosostentamento totale delle reazioni di fusione, che nel nostro gergo si chiama 'ignition' ($Q = \text{infinito}$). Anche qui ne chiarisco il significato: l'energia necessaria a mantenere le condizioni di fusione è completamente fornita dalle particelle alfa prodotte, i sistemi di riscaldamento 'esterni' servono solo ad avviare il processo (come la batteria della nostra automobile).

Il DEMO deve mostrare la FATTIBILITA' INDUSTRIALE E COMMERCIALE, producendo energia elettrica in una vera e propria centrale a fusione ed immettendola in rete, consentendo di verificare l'operabilità e di valutare l'economicità della fusione termonucleare quale sorgente primaria di energia.

Ma attorno a queste grosse imprese non c'è il deserto, perchè il programma europeo, ora centrato attorno a queste tre macchine, è stato reso possibile dal lavoro svolto negli anni precedenti da significativi ed importanti esperimenti realizzati nei Laboratori nazionali (FIGURA 4) ed è oggi sostenuto dal lavoro scientifico e tecnico che vi si continua a svolgere, anche con nuove macchine: il Presidente dell'ENEA Professor Colombo avrà certamente messo in evidenza il ruolo primario che l'Italia svolge nell'ambito del programma, nei Laboratori dell'Ente ma anche presso i Laboratori del CNR a Padova ed a Milano, partecipando inoltre attivamente alle imprese comuni.

Il programma comune, articolato esclusivamente sul confinamento magnetico con macchine toroidali, è condotto utilizzando principalmente la configurazione tokamak: nella FIGURA 5 sono indicati i parametri più significativi dei tokamak in funzione ed in costruzione, di cui il JET, sia come dimensioni che come obiettivi (è l'unico che dovrà operare con il vero combustibile termonucleare) rappresenta l'impresa principale. Come gli esperimenti con le macchine che hanno preceduto JET hanno dato importanti contributi al successo del programma, alcuni dei quali sono stati propriamente utilizzati nel JET, così ci si attende dai tokamak oggi in avanzato stato di costruzione. Non va infine dimenticato anche che il grosso nucleo dei fisici e degli ingegneri, che oggi lavorano al JET e nel gruppo di progetto NET, provengono dai Laboratori nazionali.

4. IL PROGETTO JET

Nel settembre 1973 abbiamo iniziato (ospiti del Laboratorio di Culham in Inghilterra) il lavoro di progettazione del JET. Ci siamo trovati di fronte ad un sintetico documento che definiva gli **OBBIETTIVI** del JET, e cioè lo studio di:

- 1 Processi nel plasma e leggi di scala in regimi operativi prossimi a quelli del reattore;
- 2 Interazione del plasma con le pareti della camera toroidale e controllo della purezza del plasma;
- 3 Metodi per riscaldare il plasma a temperature prossime a quelle richieste dal reattore (riscaldamento ohmico, ad iniettori di neutri ed a radiofrequenza);
- 4 Produzione e comportamento delle particelle alfa prodotte nel processo di fusione di atomi di deuterio e trizio e conseguente riscaldamento del plasma.

Ci siamo subito focalizzati sul **PUNTO 4**: infatti, mentre i primi tre obiettivi si possono trovare nei documenti programmatici di ogni tokamak in funzione od in costruzione, il punto 4 così espresso, è oggi peculiare del solo JET. Ritengo importante spiegarne il perchè.

Si tratta infatti di studiare con il dovuto rigore scientifico un nuovo tipo di plasma, che in laboratorio, chi si occupa di fusione a confinamento magnetico, non ha mai 'visto'. E' un plasma formato di nuclei di deuterio, di trizio e di elio (particelle alfa), questi ultimi risultanti dalle reazioni $D + T$: dopo aver studiato per anni in decine di macchine diverse e per centinaia di migliaia di esperimenti complessivi ('impulsi') plasmi di idrogeno e di deuterio, non possiamo 'liquidare' il tipo di plasma che più ci interessa (orientati come siamo al reattore $D + T$), con poche decine di impulsi, pur avendo imparato molto con i plasmi più 'semplici'. Abbiamo perciò valutato che se per portare la macchina in idrogeno (H) ed in deuterio (D) alle prestazioni necessarie per poter condurre significativi esperimenti in $D + T$, sarebbero state necessarie alcune decine di migliaia di impulsi (come peraltro è il caso degli altri tokamak), per studiare seriamente un plasma reagente di deuterio e trizio sarebbero state necessarie alcune migliaia di impulsi.

Abbiamo così cominciato a progettare la macchina, scelta dei parametri, configurazione, topologia, ecc, ponendoci come obiettivo la possibilità di fare sino a diecimila impulsi in $D + T$: la macchina avrebbe dovuto poter funzionare per circa due anni con accesso precluso al personale nella sala tokamak, **dato il livello di radiazione indotto dai neutroni risultanti dalle reazioni di fusione nei materiali strutturali**. Ogni dettaglio del tokamak e dei suoi sistemi ausiliari è stato progettato e costruito, affinché i necessari interventi per modifiche, riparazioni e manutenzioni, possano essere fatti con **SISTEMI DI MANIPOLAZIONE A DISTANZA** ('robots'), la cui progettazione e costruzione doveva procedere di pari passo con la realizzazione della macchina: appunto come, ed in misura maggiore, sarà necessario per NET e DEMO.

Seppur la scelta dei parametri e della configurazione magnetica ha delle solide ragioni di fisica (come i recenti risultati presentati alla Conferenza di Kyoto, Giappone, nel novembre scorso, hanno dimostrato), la scelta di privilegiare un GRANDE VOLUME DI PLASMA, rispetto ad un più elevato campo magnetico toroidale, gioca un ruolo favorevole per la fase di operazione D + T, in quanto la macchina è più affidabile per gli sforzi elettromagnetici relativamente modesti, ed è anche, ovviamente, più accessibile per le operazioni a distanza sopra citate. Infine la scelta della lunghezza dell'impulso (sino a 20 secondi alle prestazioni massime e proporzionalmente maggiore a prestazioni ridotte), la più alta tra i tokamak in funzione, oltre ad essere dettata da ragioni di fisica (stabilizzazione delle condizioni del plasma), consente di verificare il controllo del plasma per tempi relativamente lunghi, di un solo fattore tra 10 e 20 inferiore ai tempi di impulso ritenuti necessari per il NET.

La FIGURA 6 mostra il JET come appare oggi, più di dieci metri in altezza e più di altrettanti in larghezza: tra il groviglio di cavi e tubi (peraltro disposti in maniera ordinata, perchè dovranno essere in seguito rimossi e sostituiti, all'occorrenza, dai 'robots') si notano le colonne ed i bracci del circuito magnetico del trasformatore, mentre il tokamak vero e proprio sta più all'interno, ed a sinistra uno dei due sistemi di iniettori di neutri. La FIGURA 7 mostra il montaggio del circuito magnetico, mentre nella FIGURA 8 si vede una fase del montaggio delle bobine di equilibrio, la cui funzione è quella di controllo dei campi magnetici per mantenere l'anello di plasma nella corretta posizione all'interno del contenitore toroidale (detto camera da vuoto perchè per avere una miscela pura di atomi di isotopi di idrogeno, va fatto preventivamente un vuoto molto spinto nel contenitore).

La macchina è composta di 8 settori, ciascuno formato da 1/8 della camera da vuoto, da 4 delle 32 bobine toroidali con la relativa struttura meccanica, necessaria per contenere gli sforzi elettromagnetici, peraltro ridotti date le scelte fatte (FIGURA 9). L'assemblaggio dell'ultimo ottavo ('ottante') della macchina è mostrato nella FIGURA 10. E' importante dire che di questi ottanti ne abbiamo nove, uno cioè è di riserva, perchè se, anche durante il funzionamento della macchina in D + T, dovesse svilupparsi un guasto grave, riteniamo di aver messo a punto le necessarie tecniche convenzionali e robotizzate per sostituire, seppur con uno strenuo lavoro di alcuni mesi, l'ottante in questione: la scelta di questa topologia è ancora dettata, in una certa misura, dalla lunga fase D + T in programma. Anche questo ha una certa rilevanza per il NET, dove naturalmente, la parcellizzazione dei componenti sarà ancora più spinta.

Non posso lasciare il tokamak JET senza mostrare l'interno della camera da vuoto (FIGURA 11) che può contenere plasmi di oltre 150 metri cubi (il volume di plasma del presente disegno di NET è solo di alcune volte maggiore), dove si notano in montaggio le antenne per il riscaldamento a radiofrequenza e sulla sinistra una delle porte di accesso (per il pompaggio da vuoto, per gli iniettori di neutri per il riscaldamento e per sistemi di misura diagnostici del plasma), nonché la copertura (per ora parziale) con piastrelle di grafite per proteggere le pareti metalliche della camera da vuoto dagli intensi flussi di energia che in certe condizioni si determinano e per ridurre la quantità di impurezze che dalla parete possono contaminare il plasma.

Come si vede dalla FIGURA 12, la sezione del plasma, della camera da vuoto e delle bobine toroidali non è circolare, come per la stragrande maggioranza dei tokamak in funzione od in costruzione, ma allungata in direzione verticale. Questa scelta, che ha solide basi ingegneristiche e di fisica, tanto è vero che la stessa scelta è stata fatta non solo per NET, ma per ogni disegno concettuale di reattore a fusione (tra cui DEMO), ed anche per il nuovo progetto americano CIT, quando fu proposta per il JET nel 1973 dal Direttore del gruppo di progetto P H Rebut, era ritenuta dai più non motivata, perchè le informazioni preliminari ottenute con il (piccolo) tokamak americano Doublet non apparivano molto rilevanti. E' stata invece questa scelta che ha consentito, assieme all'alta corrente ed al grande volume di plasma di ottenere con il JET, come vedremo, gli importanti risultati presentati a Kyoto.

Per dare vita ad un tokamak necessita una grande varietà di impianti ausiliari, e soprattutto un sovraccarico insieme di alimentazioni elettriche, che come si vede dalla FIGURA 13, occupano una rilevante porzione della superficie edificata: è bene notare che il tokamak vero e proprio (che più sopra ho brevemente descritto) occupa una superficie che è inferiore al 10% della superficie totale richiesta per alloggiare tutti gli impianti necessari. Senza entrare in ulteriori dettagli vorrei mettere in evidenza che anche nella topografia del sito e nella struttura degli edifici un peso notevole ha avuto il punto 4 degli obiettivi del JET, cioè l'operazione in D + T definita in precedenza (tecnologia costruttiva e spessore delle pareti, pavimenti e soffitti dell'edificio tokamak, sala intermedia tra tokamak e sala di assemblaggio, distanza delle alimentazioni elettriche e dei sistemi di misura diagnostici dal tokamak, ecc).

Molto tempo sarebbe necessario per illustrare tutte le apparecchiature che sono state sviluppate per la lunga fase in D + T, principalmente il cosiddetto IMPIANTO DEL TRIZIO per il riprocessamento dei prodotti della combustione termonucleare e le apparecchiature per la manipolazione a distanza già menzionate. Si tratta di tecnologie che hanno un diretto interesse per il NET e per il reattore a fusione, naturalmente con i dovuti sviluppi: pertanto queste tecnologie, oltre ad essere una necessità per il JET, sono anche parte della strategia del programma europeo, ed a mio avviso daranno un contributo non trascurabile a ridurre i tempi complessivi per arrivare al reattore a fusione. Voglio solo mostrare a titolo esemplificativo (FIGURA 14), il braccio articolato con il servomanipolatore comandati a distanza (cioè dal di fuori della sala tokamak), per montaggi, riparazioni e manutenzioni all'interno della camera da vuoto.

Mi piace mettere in evidenza che il JET è stato costruito e messo per la prima volta in funzione con solamente alcuni giorni di ritardo rispetto al tempo di cinque anni stabilito nel 1978, quando ne è stata approvata la costruzione e con costi che non arrivano al 10% in più rispetto ai costi stimati nel 1975, durante la fase di progetto. Il merito di questo successo (perchè tale lo ritengo e con pochi esempi di confronto per imprese del genere anche al di fuori della fusione) di tipo direi tecnico-organizzativo, va diviso in varia misura tra il 'management' del team, il team stesso, l'organizzazione del programma comunitario e l'industria europea, nell'ambito

della struttura scelta per la costruzione e per l'operazione del JET: il JET JOINT UNDERTAKING, schema previsto dai Trattati di Roma per imprese comuni, poco o punto usato prima. Questa struttura legale ci ha consentito tre cose che io ritengo sostranziali, anche per altre imprese, per fare un lavoro tecnico di alto livello, nei tempi e nei costi previsti.

La prima si riferisce al fatto che non deve esistere alcuna 'quota' preconstituita di contratti attribuiti ad una particolare nazione, ma invece una rigorosa competizione sui costi a fronte di specifiche tecniche e condizioni contrattuali precise. Per indicare quanto ciò sia stato importante per contenere i costi, cito a mo' di esempio una valutazione da me fatta tempo fa su 100 miliardi di lire di investimenti per alimentazioni elettriche (che nel JET sono di mia pertinenza): se si fosse stabilito in precedenza di assegnare questo complesso di apparecchiature ad un solo Paese (Francia o Germania o Italia o Inghilterra, i quattro Paesi dalle cui industrie avevo avuto offerte per tutte le apparecchiature in questione), il costo per il JET sarebbe stato tra il 20 ed il 30% superiore, qualsiasi fosse stato il Paese scelto a priori. Voglio anche mettere in grande evidenza che meno del 2% di tutti gli investimenti fatti dal JET per componenti e sistemi molti dei quali richiedono sofisticate ed avanzate tecnologie, sono finiti al di fuori dei Paesi europei membri del JET Joint Undertaking (i dodici della Comunità, Svezia e Svizzera).

La seconda si riferisce al fatto che non deve esistere nessuna 'quota' di personale prestabilita per ciascun Paese membro, ma le assunzioni vanno fatte invece per ciascun posto in base ad una selezione tra vari candidati, in possesso delle qualificazioni richieste, fatta da una Commissione precesieduta, in genere, dal Direttore della Divisione per cui il posto era stato bandito.

La terza, la Direzione del JET Joint Undertaking è stata messa in grado di decidere nell'ambito di una struttura, che vista nel suo insieme è complessa e può apparire burocratica, ma che invece si è dimostrata disegnata per fare e non per impedire che venga fatto!

C'è un altro dettaglio che ritengo interessante menzionare: il JET è finanziato con piani pluriennali, per l'80% dalla Comunità, mentre il rimanente è a carico diretto degli Stati Membri che partecipano al programma fusione europeo, rendendo così il sostegno al JET più pertinente ed impegnativo, grazie anche alla rappresentanza che ogni Paese ha nel Consiglio di Amministrazione del JET ('JET Council').

Vorrei fare ora un commento sui COSTI, riportati nella TABELLA II. L'obbiettivo qualificante del JET è la dimostrazione sperimentale che le reazioni di fusione $D + T$ possono essere, almeno in parte, sostenute dall'energia associata alle particelle alfa prodotte dalle reazioni stesse, provando così il principio dell'autosostenimento delle reazioni di fusione, come si è detto, ed in maniera tale che i risultati scientifici e tecnici siano trasferibili alla 'fisica' ed alla 'ingegneria' del NET: come si vede dalla tabella il costo della realizzazione di questo obbiettivo si aggira attorno al miliardo di Unità di Conto Europee (i costi sono dati al valore del 1981, poichè una parte sostanziale degli investimenti è stata fatta prima di questa data, ma la

tabella dà anche il fattore di conversione per attualizzare i costi ad oggi). Questo costo è confrontabile (ed inferiore) ai costi, definiti in maniera analoga, degli altri due grandi tokamak in funzione TFTR (USA) e JT-60 (Giappone). Ma questa tabella ci dà anche altre importanti informazioni: il costo degli investimenti complessivi è inferiore al 50% del costo globale ed il costo del tokamak (come appare nella figura 6, ovviamente senza i sistemi di riscaldamento ausiliario) è inferiore al 10% del costo globale. Vale anche la pena notare che il costo del personale è inferiore al 30% del totale, e questo mi sembra un buon biglietto da visita per valutare la dedizione e l'impegno del team del Progetto. Voglio ancora ribadire che il costo globale è onnicomprensivo, dal tokamak sino al mio stipendio ed alle fotografie che sto Loro illustrando! E' bene tener conto di questi valori percentuali e del loro significato quando si vogliono valutare seriamente i costi reali di una impresa scientifica.

Voglio anche mettere in evidenza che circa il 20% degli investimenti complessivi (perciò quasi 100 milioni di Unità di Conto) è attribuibile alle necessità della fase di operazione in D + T: meno del 50% di questa cifra però si riferisce alle apparecchiature specifiche per il trizio e la manipolazione a distanza, mentre il rimanente riguarda importanti dettagli del tokamak, delle alimentazioni elettriche, dei sistemi di riscaldamento del plasma, delle diagnostiche e degli edifici. E' ovvio che non si tratta di dettagli che possono essere aggiunti 'dopo' e perciò sono stati incorporati nel progetto iniziale di questi sistemi.

Colgo qui l'occasione per mettere in evidenza il contributo dell'industria italiana, che ha ottenuto, in competizione serrata con il resto dell'industria europea, contratti ammontanti a circa il 10% del totale, come la Francia e più della Svizzera, dove l'industria elettromeccanica è particolarmente valida. Inoltre, come appare dalla FIGURA 15, molti di questi contratti riguardano tecnologie complesse, come i servomanipolatori, il circuito ohmico per l'innescò della corrente nel plasma, le lavorazioni relative alla struttura meccanica del tokamak, parte delle alimentazioni per gli iniettori di neutri, ecc.

Concludo questa parte del mio intervento illustrando con la TABELLA III la sequenza degli eventi relativi al Progetto JET: dall'inizio del lavoro di progettazione (1973) a quando speriamo fermamente di poter mostrare la realizzazione dell'ambizioso obiettivo del JET, la fattibilità scientifica della fusione termonucleare (1992), corrono 20 anni, dei quali meno di due possiamo considerare 'persi' durante la disputa per la scelta del sito per la costruzione del JET. Poichè vi assicuro che abbiamo e stiamo lavorando molto sodo, questi vent'anni danno una prima seria misura dei tempi necessari a sviluppare la fusione nucleare come sorgente primaria di energia per produrre energia elettrica.

5. LE QUESTIONI POSTE DALLA XII COMMISSIONE INDUSTRIA DELLA
CAMERA DEI DEPUTATI

Vengo ora alle questioni contenute nel telex inviatomi dalla Segreteria della Commissione. Voglio precisare ancora che non pretendo di avere risposte esaurienti e che tratterò le diverse questioni in misura diversa seguendo le mie competenze e le opinioni che mi sono fatte in tanti anni di lavoro in questo campo di ricerca.

5.1. Stato delle ricerche

Come abbiamo detto si lavora sulla fusione da circa trent'anni ed all'inizio, forse per l'euforia del successo avuto con la bomba 'H', si pensava che fosse ovvio il riuscire a controllare quel tipo di reazioni, realizzate tanto 'facilmente' in maniera esplosiva: invece il cammino è stato molto impervio, ricco di emozioni comunque, cioè di entusiasmi e di delusioni in sequenza. La fisica del plasma da fusione controllata si è rivelata molto complessa ed ostica ad una comprensione chiara dei numerosi fenomeni concomitanti. Solo ora, guardandoci indietro, ci rendiamo conto di quanto cammino abbiamo fatto, solo ora, guardando avanti, abbiamo l'impressione di essere abbastanza vicini alla meta, la dimostrazione sperimentale della fattibilità scientifica della fusione controllata come definita in precedenza. Voglio ribadire ancora che questo è il passo chiave, poichè quando si realizzasse il 'breakeven' e si studiasse a fondo questo tipo di plasma, passare in una macchina più grande (si veda NET) alle condizioni di 'ignition', passare cioè dal 20% al 100% di autosostenimento delle reazioni termonucleari, non dovrebbe comportare importanti sorprese di fisica. Dopo di che la parola passa all'ingegneria, complessa, sofisticata e nuova quanto si voglia, ma affrancata finalmente dalla ipoteca della fisica ancora da provare: solo a questo punto si potrà parlare seriamente di tempi e di rapporti tra investimenti e tempi.

Probabilmente è già stato Loro mostrato il diagramma di FIGURA 16, che illustra in maniera piuttosto chiara il PROGRESSO fatto e quello da fare per arrivare prima alle condizioni di 'breakeven' ($n T \tau_E \cong 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$) e poi alle condizioni di 'ignition' ($n T \tau_E \cong 5 \cdot 10^{21} \text{ m}^{-3} \text{ keV s}$): con i recenti risultati di JET ed in certa misura con quelli di TFTR siamo oggi di un solo fattore 5 lontani dal valore di breakeven che è l'obiettivo dei grandi tokamak JT-60, TFTR e JET (ma, lo ripeto, solo per il JET è prevista una reale fase sperimentale con il vero combustibile termonucleare D + T). Riusciremo a colmare questo 'gap' nei prossimi tre o quattro anni in D + D (che alle sopra citate condizioni di plasma produce un numero estremamente basso di reazioni termonucleari al secondo) e successivamente con combustibile D + T (per il quale le condizioni sopra citate consentono un abbondante numero di reazioni termonucleari al secondo, si vedano le tabelle I e IV)? Noi al JET pensiamo di sì, alla condizione che le nostre richieste di modifica e miglioramento del nostro apparato sperimentale con conseguente estensione temporale del JET Joint Undertaking dal 1990 al 1992, ora ferme a Bruxelles nel blocco del 'budget' comunitario per la ricerca, vengano presto rese operative.

All'importante progresso che si evince dalla figura 16, tutti hanno contribuito:

questo è il risultato complessivo degli investimenti umani e finanziari fatti. Oggi la spesa annuale mondiale per le ricerche sulla fusione si può valutare attorno ai 2000 milioni di dollari ed il numero di fisici ed ingegneri dovrebbe essere vicino ai 4000, un migliaio dei quali in Europa.

Alla più volte citata conferenza di Kyoto dell' IAEA, ci siamo fatti la convinzione che la sperimentazione con i grandi tokamak (praticamente appena iniziata) ci ha permesso di fare un salto quantitativo nelle prestazioni sperimentali ed un salto qualitativo nella comprensione dei fenomeni e quindi nel definire le strategie per superare gli ancora temibili ostacoli che abbiamo di fronte. E per restare al JET, cito una frase dell'invitato della nota rivista inglese di informazione scientifica "New Scientist": 'The news from JET completely overshadowed all other papers presented at the meeting in Kyoto'. Vorrei perciò sintetizzare questo progresso, tenacemente cercato, limitandomi al JET. Ma come abbiamo ottenuto questi risultati e quali sono questi risultati?

Innanzitutto siamo riusciti a portare la macchina a funzionare sistematicamente ai parametri di progetto (cosa non usuale per i tokamak della generazione precedente), grazie ai criteri progettuali adottati e di cui ho già parlato. Di questi parametri quello più significativo è la corrente di plasma: 5 milioni di Ampère (FIGURA 17), un valore che nessuno dei tokamak in funzione od in costruzione potrà raggiungere (e noi con le modifiche sopra accennate pensiamo di andare oltre, come vedremo).

Il grande volume di plasma, la sua sezione allungata e la grande corrente sono alla base del nostro successo di oggi: abbiamo raggiunto temperature degli ioni e degli elettroni tra i 30 ed i 40 milioni di gradi (3 - 4 keV nelle nostre unità) con il solo riscaldamento dovuto alla corrente (ohmico), valori mai raggiunti prima d'ora e che anni fa sembravano appannaggio (mai realizzato) piuttosto di macchine di piccolo volume e di alto campo magnetico (che però consentono di raggiungere densità elevate) con tempi di confinamento, in queste condizioni, di 0.7 secondi (con un record sino a 0.9 s), cioè di circa 10 volte maggiori rispetto a quelli realizzati con i tokamak precedenti.

Ma ecco che, quando andiamo a riscaldare il plasma verso le temperature termonucleari necessarie, utilizzando i nostri sistemi di riscaldamento addizionale (iniettori di neutri e radiofrequenza), la temperatura massima tipicamente raddoppia (pur con il limitato riscaldamento addizionale che ora abbiamo a disposizione) e riusciamo anche a fare aumentare sensibilmente la densità del plasma, ma il tempo di confinamento crolla (tipicamente si dimezza): in sostanza si guadagna da una parte e si perde dall'altra, mentre per arrivare al reattore dobbiamo riuscire a 'guadagnare' su tutti e tre i parametri, densità n , temperatura T e tempo di confinamento t_E . E' questo il fenomeno tipico e più allarmante in tutti i tokamak, oggi. In sostanza non avviene quello che si sperava di ottenere sino ad alcuni anni fa: la temperatura del plasma non è un parametro indipendente, che si può aggiustare dopo aver raggiunto il

valore richiesto per $n \tau_E$, poichè all'aumentare della temperatura il tempo di confinamento cala drasticamente. Abbiamo anche capito che questo fenomeno si verifica in maniera, anche quantitativamente, analoga sia che si tratti di riscaldamento ohmico che ad iniettori o a radiofrequenza.

L'importanza dei risultati che abbiamo portato a Kyoto è legata alla efficacia quantitativa dei DUE METODI che abbiamo adottato per contrastare questo effetto.

Il primo è evidenziato nella FIGURA 18: aumentando la corrente (praticamente a parità di volume di plasma) da un milione di Ampère (1 MA) a 5 MA, il tempo di confinamento, pur calando con l'aumentare della potenza immessa nel plasma (e quindi con l'aumentare della sua temperatura al centro), aumenta di molto. Ecco perchè riteniamo che l'aumento ulteriore della corrente nel JET sino a 7 o 8 MA (valori che ci sembra possibile realizzare con le modifiche citate) possa contribuire in maniera significativa al raggiungimento delle condizioni di plasma necessarie per il 'breakeven'.

Il secondo è evidenziato nella FIGURA 19 che mostra la cosiddetta configurazione magnetica aperta di un tokamak (mentre i risultati citati sono stati ottenuti con una configurazione magnetica chiusa): si è mostrato sperimentalmente che in queste condizioni i valori del tempo di confinamento sono sensibilmente maggiori che non quelli ottenuti a pari volume di plasma ed a pari corrente con la configurazione chiusa (confrontare in figura 18 le due curve a 3 MA, dove la superiore si riferisce appunto alla configurazione magnetica aperta che noi chiamiamo in gergo 'X-point'). E' per questo che, sempre nelle modifiche citate, abbiamo incluso la possibilità di aumentare ulteriormente la corrente in configurazione aperta, per sommare gli effetti benefici dei due aspetti, corrente e configurazione magnetica: pensiamo di poter arrivare, in questo caso, a valori di 4 -5 MA.

Per correttezza voglio precisare che da un punto di vista qualitativo questi effetti erano già noti da esperimenti condotti con altri tokamak del programma europeo ed anche con quelli di altri Paesi: ma al JET abbiamo quantizzato questi effetti in plasmi in condizioni prossime a quelle termionucleari, così da farci ben sperare nel superamento del 'gap' che ancora ci separa dal 'breakeven'. Perchè, è bene notarlo, si può illuminare la strada verso il reattore con i risultati qualitativi, ma per arrivarci sono necessari risultati quantitativi sia nel campo della fisica che in quello dell'ingegneria: è questo quello che cerchiamo di fare al JET, destreggiandoci tra le numerose difficoltà scientifiche e tecniche ed a volte anche 'politiche' in senso lato.

Altri risultati interessanti sono stati presentati a Kyoto: qui voglio solo citare la temperatura di 200 milioni di gradi (20 keV) raggiunta (peraltro solo per gli ioni e non per gli elettroni) con il TFTR, il grande tokamak americano, risultato che è anche riportato nel diagramma di figura 16.

Per noi del programma europeo, questi risultati di JET rivestono una particolare importanza, perchè ci suggeriscono che con JET, NET e DEMO siamo sulla strada giusta per sperare di arrivare al reattore in un tempo ragionevolmente breve,

come indicato nella figura 3: infatti, come avrà detto il Professor Toschi, essi vanno a sostegno del disegno concettuale del NET e cioè grandi volumi di plasma, correnti elevate, sezione di plasma allungata con configurazione magnetica aperta, campi toroidali forzatamente limitati (per contenere gli sforzi) attorno a valori medi (5 Tesla) e tempi di impulso lunghi.

Con il JET intendiamo proseguire su questa strada e, come ho più volte detto, abbiamo messo a punto un PROGRAMMA DI SVILUPPO (approvato dagli organi direttivi del JET, ma per ora legato alle vicissitudini politiche del programma globale di ricerca della Comunità), per portare su queste linee la macchina ben oltre i valori di progetto: che si possa anche solo concepire di fare questo (ma noi riteniamo di essere in grado di farlo) è un chiaro indice della attenzione e della flessibilità con cui il JET è stato progettato.

Con l'aumento delle correnti di plasma, sia in configurazione magnetica chiusa che aperta, intendiamo soprattutto aumentare il tempo di confinamento τ_E ; rivestendo gran parte della parete metallica della camera da vuoto con piastre di grafite prima ed eventualmente di berillio poi, intendiamo aumentare il grado di purezza del combustibile (riducendo così uno dei meccanismi di perdita di energia cui è soggetto il plasma); montando sulla macchina un sistema di iniezione di sferette di deuterio solido a velocità tra i 5 ed i 10 Km/s, intendiamo (come abbiamo già sperimentato in via preliminare) aumentare la densità n ; installando un nuovo sistema a radiofrequenza (nel nostro gergo noto con l'acronimo LHRH), intendiamo controllare la distribuzione di densità di corrente nel plasma, eliminando o almeno riducendo l'effetto di certe instabilità che si determinano ora nella zona centrale del plasma; infine, portando come già stabilito la potenza di riscaldamento addizionale ai livelli di progetto (installando il secondo sistema di iniettori e le 5 rimanenti antenne a radiofrequenza, in aggiunta alle 3 ora disponibili), intendiamo aumentare ulteriormente la temperatura T .

Con la realizzazione di questo programma, pensiamo di poter aumentare il parametro di fusione $n T \tau_E$ di almeno cinque volte rispetto al valore già raggiunto e portarci così in zona 'BREAKEVEN', per poter poi iniziare la lunga fase di operazione con deuterio e trizio, dove le tecnologie della operazione a distanza e del trizio che stiamo rapidamente sviluppando saranno strumenti essenziali per l'ulteriore successo del nostro lavoro.

5.2. Linee di ricerca

Abbiamo sempre parlato di tokamak, sia perchè è lo schema di maggior successo oggi, sia perchè è anche quello su cui si lavora di più (e probabilmente tra le due cose c'è una seppur parziale correlazione). Come sarà stato Loro detto, nell'ambito del programma europeo si studiano altri due tipi di configurazione magnetica toroidale su dimensioni confrontabili con quelle dei tokamak dei Laboratori

nazionali, lo 'Stellerator' in Germania ed il 'Reverse Field Pinch' in Italia (ENEA - CNR - Università di Padova): avendo ciascuno dei due schemi, in linea di principio, vantaggi e svantaggi rispetto ai tokamak, saranno i risultati sperimentali dei prossimi anni che ci diranno in che misura queste configurazioni possano rappresentare linee parallele o alternative al tokamak per l'eventuale reattore, ma non mi attendo assolutamente che i risultati siano tali da modificare la linea JET - NET.

Come ho detto all'inizio, esiste un'altra linea a confinamento magnetico, che anzi è stata tra le prime ad essere perseguita, perchè apparentemente semplice: la configurazione a SPECCHIO (si veda la figura 2). Dico apparentemente perchè quando ci si è posti il problema di costruire uno specchio sufficientemente efficiente la configurazione magnetica di estremità si è andata complicando in maniera notevole (FIGURA 20).

Questa linea è stata abbandonata in Europa in concomitanza con l'arrivo sulla scena del tokamak, ma è continuata, su scala più o meno importante altrove, soprattutto negli Stati Uniti, dove, in parallelo con la costruzione di TFTR presso l'Università di Princeton, è stata completata lo scorso anno, presso i Laboratori di Livermore, la più grande macchina a specchio del mondo, MFTF - B, del costo complessivo in soli investimenti di 360 milioni di dollari. E' con una certa tristezza che, visitando qualche settimana fa quei Laboratori ho appreso dai miei colleghi che è stato deciso di 'mettere in naftalina' questa macchina. Questo per due fatti concomitanti, i risultati non brillanti ottenuti con un modello più piccolo (MFX) e l'ulteriore riduzione del bilancio fusione negli Stati Uniti previsto. La fotografia di FIGURA 21 mostra appunto l'interno del camera metallica di 4000 m^{-3} , nella quale è contenuta la macchina, prima della...doppia chiusura!

Mi sembra di poter dire, almeno a posteriori, che la decisione presa in Europa di abbandonare questa linea sia stata saggia o almeno fortunata!

L'altra linea di ricerca riguarda il cosiddetto CONFINAMENTO INERZIALE, sul quale sino ad ora gli esperimenti sono stati principalmente condotti usando fasci di luce LASER quale sorgente di energia per comprimere e riscaldare il combustibile termonucleare. Anche questo tipo di attività non fa parte del programma europeo: non ne conosco i motivi anche se li posso immaginare. Infatti, a causa del mio lavoro di insegnamento all'Università di California, che gestisce i Laboratori di Livermore (dove, come è noto, sono state sviluppati e si continuano a sviluppare praticamente tutti i tipi di armamenti più sofisticati), ho qualche conoscenza diretta di quanto avviene in questo campo di ricerca presso quei Laboratori. Come appare dalla FIGURA 22, tratta da un documento pubblico di Livermore, l'interesse prevalente di queste ricerche è rivolto alla 'weapon physics' e solo in secondo ordine alla fusione termonucleare per la produzione di energia elettrica; lo stesso avviene in Francia, in Inghilterra ed in Unione Sovietica, mentre l'unico Paese che mi risulta avere un importante programma 'pacifico' in questo campo è il Giappone. Al di là delle mie poche conoscenze dirette, lo stesso quadro si ricava anche dai congressi internazionali sulla fusione termonucleare controllata, dove poco o nulla viene presentato in questo settore da chi

è certamente molto più avanti nelle ricerche. So da documentazione ufficiale che negli Stati Uniti, mentre il confinamento magnetico appare nel bilancio del Dipartimento dell'Energia (DOE) sotto la voce ricerche per usi pacifici (per circa 350 milioni di dollari per il 1987), il confinamento inerziale appare sotto la voce ricerche militari (per circa 150 milioni di dollari per il 1987).

L'esperimento più importante di confinamento inerziale al mondo è NOVA, dove un sistema multiplo di fasci di luce laser porta a concentrare la loro energia su una sferetta di isotopi di idrogeno contenuta in un massiccio contenitore sferico. Nella FIGURA 23 si vedono alcune di queste linee laser. Ci sono altri impianti per il confinamento inerziale ('weapon physics') a Livermore: NOVA è per il momento solo il maggiore.

L'interesse per la 'weapon physics' di queste ricerche è ovvio ed è descritto nel documento da cui ho tratto la figura 22: studiare la fisica di una seppur piccolissima bomba 'H' senza tutta la 'sporcizia', anche radioattiva, associata alla bomba a fissione che è l'usuale 'fiammifero' con cui si fa esplodere la bomba 'H'. Anche questo fatto ci suggerisce qualcosa sulla 'pulizia' realtiva tra fissione e fusione. Credo che questo tipo di approccio si sia sviluppato anche come conseguenza di trattati internazionali che hanno fermato in Unione Sovietica e negli Stati Uniti gli esperimenti nucleari nell'atmosfera.

E' mia convinzione personale che, in questo quadro, difficilmente Francia ed Inghilterra consentiranno il varo di un impegnativo programma comune europeo sul confinamento inerziale ('pacifico' e perciò non classificato). Se si addivenisse invece alla decisione di varare un importante programma nazionale (come sarà già stato detto Loro alcune attività significative sono in corso all'ENEA), ritengo che ci si dovrebbe garantire la pubblicità dei risultati anche se potessero essere tali da avere interessi di tipo militare: difficoltà di questo genere mi risulta ci siano già state in passato in settori analoghi di ricerca. Personalmente poi non mi piacerebbe lavorare in un campo di ricerca dove non posso accedere allo scambio di informazioni tecniche e scientifiche con la maggior parte dei colleghi che in questo campo lavorano, soprattutto se so che sono già molto avanti!

Per concludere su questo punto voglio ribadire che non ho sufficienti conoscenze dirette sul confinamento inerziale per confrontarlo con quello a confinamento magnetico sul quale da tanto tempo lavoro: di una cosa però per ora non mi preoccuperei, della complessità ingegneristica dell'eventuale reattore tokamak, perchè ho visto i miei studenti lavorare su tesi di master e di dottorato a Livermore su dei concetti di reattori a confinamento inerziale, contenenti sufficienti acrobazie ingegneristiche da non farmi affatto spaventare di più dal mio tokamak!

5.3 Quadro mondiale e collaborazione internazionale

Da quanto ho esposto appare un quadro internazionale piuttosto sbilanciato, poichè ho molte conoscenze dirette di quanto si fa in Europa e negli Stati Uniti, più limitate invece per quanto riguarda Unione Sovietica e Giappone.

Vorrei ora espandere un po' di più questo quadro e parlare di COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE, sempre nell'ambito delle mie conoscenze dirette.

Innanzitutto voglio precisare l'atteggiamento della Comunità Europea a questo riguardo, ricordando la decisione del Consiglio dei Ministri della Ricerca dell'8 aprile 1986: "LA PARTECIPAZIONE DELLA COMUNITA' EUROPEA AD EVENTUALI 'JOINT VENTURES' INTERNAZIONALI...DEVE SODDISFARE I SEGUENTI CRITERI: a) LA COMUNITA' PARTECIPA COME UNO DEI QUATTRO MAGGIORI PARTNERS ED E' RICONOSCIUTA COME TALE b) LA COMUNITA' MANTIENE IL SUO PROGRAMMA INDIPENDENTE AL LIVELLO PREVISTO, FINO A QUANDO NON SIANO RAGGIUNTI IMPEGNI PRECISI SU DI UN PROGRAMMA COMUNE CHE COINVOLGA GIAPPONE, STATI UNITI ED UNIONE SOVIETICA".

Questa formulazione si riferisce all'idea, proposta nei cosiddetti incontri al vertice, dimenticata ed ancora riproposta, di costruire assieme la macchina della prossima generazione, un NET per internderci.

Al di là di ogni 'appeal' di tipo politico, io vedo parecchie difficoltà (anche se non insormontabili in linea di principio) a mettere seriamente in cantiere, nella presente situazione, una iniziativa del genere dovute ad importanti differenze organizzative, finanziarie ed anche culturali, che in varia misura, soprattutto le prime due, sono afferibili a tutti i nostri tre partners potenziali. Metterei invece più attenzione nel mantenere e rafforzare la collaborazione europea, che è pur sempre collaborazione internazionale e che con JET e NET ha assunto una configurazione solo apparentemente solida, perchè non ancora al riparo da possibili ripensamenti a livello politico (si vedano le presenti difficoltà per raggiungere un accordo sul 'budget' della ricerca a livello comunitario): prima di considerare seriamente collaborazioni più vaste abbiamo ancora del cammino da fare per ribadire con i fatti in maniera sufficientemente efficace la risoluzione del Consiglio dei Ministri della Comunità, appena citata (punto b).

Vorrei invece menzionare brevemente le collaborazioni oggi possibili ...perchè già in atto.

La prima, patrocinata dalla IAEA, è stata avviata nel 1974, quando si stava iniziando il lavoro di progettazione dei cosiddetti grandi tokamak (si veda la tabella III), che erano TFTR (USA), JET (CEE), JT-60 (Giappone) e T-20 (URSS). Abbiamo avuto molti utili incontri di natura tecnica e scientifica tra il '74 ed il '78, durante la fase di progettazione; poi il T-20 è stato abbandonato e sostituito con il progetto T-15 molto più piccolo rispetto a T-20 ma anche molto sfasato come realizzazione rispetto agli altri tre (è infatti ancora in costruzione). La collaborazione è perciò proseguita tra questi ultimi ed è ora governata da un accordo CEE - USA - Giappone ('Threeilateral Agreement') sotto gli auspici della IEA (International Energy Agency): in questo quadro scambiamo personale, abbiamo incontri su temi specifici più volte l'anno (con tre o quattro esperti per gruppo, quindi molto efficaci) ed in futuro, utilizzando questi tre

tokamak, simili ma anche complementari ed ora tutti in funzione, potremo fare degli esperimenti insieme, mentre stiamo cercando di organizzare in comune anche una banca dati per tutti i risultati scientifici.

Il JET lo abbiamo già visto (figura 6), mentre la FIGURA 24 mostra il TFTR e la FIGURA 25 il JT-60 nella fase finale di assemblaggio. Di questi tre tokamak il JET è quello con il volume di plasma maggiore (5 volte TFTR e quasi 3 volte JT-60) ed anche se JET ha un campo magnetico toroidale di circa il 25% più basso, dovrebbe (come si è già visto a Kyoto) consentire prestazioni apprezzabilmente maggiori, sia per la molto più elevata corrente di plasma che per la sezione del plasma allungata ed appunto per il grande volume. Inoltre JT-60 è progettato per lavorare con idrogeno (H) e deuterio (D), TFTR programma solo un centinaio di impulsi in D + T, mentre solo JET si pone il problema di studiare a fondo il plasma D + T in condizioni termonucleari, con parecchie migliaia di impulsi, come si è più volte detto.

L'IAEA ha però continuato a rimanere attiva con il gruppo di lavoro INTOR (International Torus) con sede a Vienna, dove esperti dei quattro programmi prima citati si incontrano periodicamente da vari anni attorno ad uno studio concettuale di macchina del tipo NET, da costruire eventualmente in comune invece di NET e degli altri progetti equivalenti: ritengo questo lavoro molto utile per tener vivi gli scambi, soprattutto con i colleghi sovietici, che per ora non partecipano alla citata collaborazione tra i grandi tokamak, ma non lo considero un vero progetto da costruire invece di NET, sia per le ragioni che ho menzionato all'inizio di questo capitolo, sia perchè oggi il progetto di NET è molto più avanzato ed a mio giudizio, più attendibile sia come fisica che come ingegneria.

La stessa Agenzia organizza inoltre gruppi di lavoro su temi generali e specifici riguardanti la tecnologia della fusione e sulle prospettive dei reattori, come quello cui ho partecipato nel giugno scorso a Yalta e dove, tra l'altro, abbiamo discusso in dettaglio i quattro progetti concepiti per provare la fattibilità tecnologica ed ingegneristica della fusione, ora allo studio in Europa (NET), in Unione Sovietica (OTR), in Giappone (FER) e negli Stati Uniti (TIBER II): ritengo utile iniziare ora (come ho già proposto alla Agenzia) una collaborazione specifica tra questi quattro progetti, in maniera analoga a quanto è a suo tempo avvenuto per i grandi tokamak a partire dal '74. Ciò darebbe una base tecnica e scientifica più solida anche per una eventuale alternativa comune, qualora maturassero in tempo anche le condizioni socio-politiche. Però continuo ad avere dei dubbi sull'opportunità di andare al passo successivo con una sola macchina per tutto il mondo. Infatti ciò potrebbe avvenire, almeno sul piano tecnico-scientifico, solo quando ci fosse una ragionevole certezza sperimentale sulla fattibilità scientifica della fusione, obiettivo che, come spesso ho ripetuto, è quello della presente generazione di grandi macchine. Ma in questo caso la motivazione dei costi per l'impresa comune dovrebbe cadere, poichè penso che ognuno dei quattro programmi dovrebbe facilmente reperire i due miliardi di dollari necessari (il costo di alcune centinaia di chilometri di autostrada) per costruire una macchina che verifichi l'ingegneria e le tecnologie per la fusione. Come abbiamo visto è proprio questo che dice la risoluzione del Consiglio dei Ministri del 1971 a proposito

del programma europeo. Penso inoltre che tre o quattro macchine di questo tipo al mondo, come è il caso dei grandi tokamak della presente generazione, possano essere non solo utili ma necessarie per tenere una velocità elevata verso il reattore a fusione. D'altra parte, nel campo della fisica delle alte energie, a livello di investimenti simili, abbiamo il CERN in Europa, il FERMI LAB negli Stati Uniti e SHERPUKOV in Unione Sovietica.

A questo punto vorrei mettere l'accento su di un punto importante, anche se credo a tutti noto. SOLO IN ITALIA, dopo Chernobyl, c'è stato un dibattito sulla fusione e la sollecitazione a livelli di responsabilità molto alta ad aumentare gli investimenti per arrivare rapidamente al reattore a fusione e ad abbandonare nel contempo i reattori a fissione. In tutti gli altri Paesi del mondo, compresi quelli europei, tutto è rimasto come prima. In Inghilterra la fusione termonucleare continua ad essere esclusa dalle strategie energetiche per il prossimo secolo, secondo le posizioni assunte dal Governo Thatcher e dal Central Electricity Generating Board e non mi risulta che ci siano altri Paesi in Europa in procinto di assumere maggiori impegni sulla fusione. Anzi la citata mancanza di accordo a livello comunitario sul programma di ricerca comune non è sul 'se' il bilancio debba essere ridotto ma su 'di quanto' debba essere ridotto: questa riduzione toccherà anche la fusione (che rappresenta circa il 10% del totale) e quindi anche JET e NET: altro che accelerare i tempi! E questo è in armonia con quanto avviene altrove, certamente negli Stati Uniti, dove il bilancio fusione è in continua riduzione già da qualche anno (si veda la FIGURA 26 per quanto riguarda il confinamento magnetico).

Quindi se l'interesse del nostro Governo e del mondo politico italiano per la fusione è reale, mi pare che non manchino né i canali né il peso politico per fermare a Bruxelles, almeno questa SPINTA A RIDURRE GLI INVESTIMENTI SULLA FUSIONE: perchè, onestamente ritengo non ragionevole ed oserei dire forse velleitario avviare un autoconsistente programma solo italiano per realizzare il reattore a fusione, sia dal punto di vista delle risorse tecniche, che scientifiche ed alla fine anche finanziarie (basti pensare che per arrivare alla commercializzazione dell'energia di fusione per la produzione di energia elettrica si stima una spesa tra i 20 ed i 30 miliardi di Unità di Conto Europee, come immagino sarebbe il caso per ogni altra nuova forma di energia della stessa portata).

E' questo anche il momento, quando a Bruxelles si decidono gli investimenti per i prossimi anni, per avviare una vigorosa opera di convincimento rivolta agli altri Governi della Comunità sulla opportunità di affrontare le ricerche sulla fusione in maniera più convinta e più aggressiva, il che non vuol dire necessariamente finanziamenti sostanzialmente maggiori di quelli proposti dalla Commissione della Comunità Europea.

5.4. Tempi di realizzazione e risorse

Quando, qualche settimana fa, il Presidente della Repubblica Francesco Cossiga ci ha onorato della sua visita al JET, la questione importante era: 'a quando

l'energia elettrica di fusione?' Non c'è dubbio che sia per Loro che mi ascoltano che per chi deve decidere delle strategie energetiche la questione importante è proprio questa.

Sarei tentato di rispondere: "non so", perchè fino ha che non abbiamo in mano la fattibilità scientifica è quanto meno azzardato fare previsioni, ma facendomi un po' trasacinare dall'entusiasmo per i recenti risultati raggiunti ed in precedenza sinteticamente descritti, mi sentirei di considerare possibili i tempi del programma europeo (si veda la figura 3: 2020 per avere DEMO in funzione) che oggi mi sembra quello più in salute di tutti, anche se qualche minaccia si sta profilando a livello di finanziamenti, come detto prima.

Non vedo certamente possibile, anche nella irrealistica ipotesi di investimenti molto più sostanziosi, una accelerazione del piano JET - NET di qualche significato. Certamente non possiamo correre di più con il JET, anzi c'è qualche pericolo che ci facciano correre un po' meno veloci e ridurre il numero e la qualità delle informazioni da provvedere per il NET. La fase di progetto costruttivo del NET è prevista iniziare nel 1990, però sulla base di un risultato preciso di JET, la chiara, ripetuta e ripetibile prova sperimentale del raggiungimento in duterio di un prodotto di fusione attorno a 10^{21} (5 volte o più il valore attuale), mentre l'inizio della fase di costruzione è fissato per il 1993, però sulla base dei risultati della lunga sperimentazione in JET ai livelli di prodotto di fusione sopra indicati con D + T, mostrando in maniera riproducibile la produzione di parecchi MW di energia di fusione: infatti se questo avviene, passare da una reazione parzialmente autosostenuta ('breakeven', JET) ad una completamente autosostenuta ('ignition', NET) non dovrebbe, come si è già detto, riservare alcun significativo imprevisto di fisica. Ridurre questi tempi avviando la realizzazione di NET senza avere tutte queste informazioni mi sembra voler correre rischi di investimenti errati per risparmiare al più un paio di anni, perchè i tempi di costruzione di NET, dati gli investimenti maggiori rispetto al JET, mi sembrano già piuttosto stretti e lo stesso vale per i tempi di sperimentazione, perchè dai relativi risultati dovremmo trarre tutte le indicazioni scientifiche, tecniche, operazionali ed in certa misura anche di costo, per la progettazione della prima centrale termoelettrica ad energia di fusione (il reattore prototipo DEMO). Inoltre questo programma è già stato, in un certo senso, accelerato con l'avvio di un impegnativo programma tecnologico senza sapere in anticipo tutto quello che ci servirà per costruire il reattore (per questo programma, di cui Toschi ha già parlato, si spendono più di 50 milioni di unità di conto all'anno).

Ovviamente non credo a scorciatoie che possano alterare apprezzabilmente questi tempi per arrivare alla centrale elettrica a fusione che immetta in rete centinaia di MW, anche con nuove macchine, le quali possono, a mio avviso, al più portare ulteriori utili, e magari molto utili, informazioni per il difficile compito che abbiamo davanti.

In conclusione se nel 2020 con DEMO (che, ripeto, non sarà ancora un reattore commerciale) riusciremo ad immettere alcune centinaia di MW elettrici nella rete ad alta tensione europea, io direi che avremo compiuto l'impresa più difficile e

forse (positivamente, mi auguro) più sconvolgente che l'Uomo della società industriale ha affrontato: perciò, a mio giudizio, qualche anno in più o in meno non ha una reale importanza, l'importante è prima credere alla possibilità, come noi ci crediamo, e poi di arrivare a questa realizzazione assolutamente fantastica (si veda il paragrafo 5.5).

Passando alla questione risorse, in aggiunta a quanto già detto, vorrei subito mettere in evidenza che le risorse più difficili da reperire sono quelle umane. La lunga esperienza di JET e quella più recente di NET ne sono una prova: non siamo mai riusciti a riempire tutti i posti disponibili ed in certe fasi del nostro lavoro, anche di molto. I motivi sono molteplici e non ritengo di analizzarli qui. E' certo comunque che gli specialisti in questo campo si formano nei Laboratori nazionali anche perchè la fisica del plasma orientata alla fusione ha ancora uno scarso peso accademico in Italia, in Europa ed in certa misura anche negli Stati Uniti, mentre invece mi sembra abbia un ruolo accademico più solido in Unione Sovietica.

Tanto per esemplificare, se si decidesse di raddoppiare l'impegno finanziario nelle ricerche sulla fusione in Europa, lo scoglio che riterrei a breve scadenza insormontabile è quello di trovare altri 1000 fisici ed ingegneri con competenze specifiche sufficienti a spendere questi soldi con giudizio, efficienza e profitto.

E di risorse finanziarie ne abbiamo abbastanza? Come ha detto Loro Fasella in Europa si sta cercando, con le difficoltà prima citate, di attestarsi su di un 'budget' annuale di circa 400 milioni di Unità di Conto e quindi non si prevedono incrementi, anzi si parla di qualche taglio. Non considero perciò realistico un aumento dei finanziamenti: al più posso dire che se avessimo, diciamo un 20% in più, da utilizzare per migliorare le macchine esistenti, per fare più tecnologia e forse per fare, se considerato necessario, una macchina in più per studiare qualche problema specifico, tale incremento potrebbe essere utilizzato con profitto per dare al nostro lavoro basi ancora più solide, più che per ridurre i tempi in proporzione.

Se questa stessa domanda mi fosse stata fatta dieci anni fa, la risposta avrebbe potuto essere diversa, nel senso che si sarebbe potuto modificare un po' la strategia: che so, non ci ho pensato seriamente, ma ad esempio si sarebbero potuti concepire in parallelo due JET, di caratteristiche e parametri opportunamente diversi per acquisire informazioni sulla fattibilità scientifica da un più ampio spettro di tipi di plasma D + T.

Vale la pena a questo punto spendere qualche parola sulla presente strategia del programma americano per il confinamento inerziale. Come appare dalla FIGURA 27 è allo studio una nuova macchina tokamak, CIT, il cui scopo dichiarato è quello di arrivare alla 'ignition'. E' una macchina ad alta corrente con sezione di plasma allungata e configurazione magnetica aperta, ma con volume di plasma piuttosto piccolo ed invece campo magnetico toriodale alto (circa 10 Tesla) con tempi di funzionamento piuttosto brevi (qualche secondo, molto meno di JET): a detta degli stessi proponenti del Laboratorio di Princeton questa configurazione non è estrapolabile al reattore (come lo sono invece JET e NET) e la scelta ottimale dei parametri è stata determinata dal tentativo di ridurre i costi, riducendo le dimensioni

complessive della macchina. In effetti, solo due anni fa era stata proposta dallo stesso Laboratorio, TFCX, che era invece un tokamak a grande volume e campo magnetico toroidale medio (circa 5 Tesla) con tempi di funzionamento (impulso) lunghi (dell'ordine del centinaio di secondi come NET) e quindi con una configurazione estrapolabile al reattore: non fu approvata per ragioni di costo.

Ora il motivo per il quale negli Stati Uniti si ritiene necessario costruire un'altra macchina, che seppure con una configurazione non proprio reattoristica, possa mostrare la condizione di 'ignition' è a mio avviso legato anche al fatto che con TFTR non è possibile studiare appropriatamente il plasma D + T, poichè si possono fare al più un centinaio di impulsi. Se CIT verrà approvato, i suoi risultati, che dovrebbero permettere agli americani di passare alla costruzione di TIBER II (il nome attuale del loro NET), possono arrivare al più presto negli anni 1995-96, tenuti in conto i tempi necessari per sviluppare il programma sperimentale di un tokamak.

Il programma europeo così come è concepito è, come si è visto, più veloce: infatti la costruzione di NET dovrebbe poter partire nel 1993, perchè anche se con JET non è previsto di raggiungere la condizione di 'ignition' ma solo di 'breakeven', il plasma reagente D + T, con reazioni termonucleari almeno parzialmente autosostenute, si può studiare accuratamente avendo a disposizione la possibilità di migliaia di impulsi. Se il piano è corretto sul piano scientifico, dovrebbe essere necessaria una macchina in meno rispetto al programma americano e ciò grazie alla saggia e lungimirante scelta dei parametri e della configurazione del JET fatta nel 1973.

5.5 Perché la fusione?

Vorrei cominciare modificando la domanda così: 'perchè l'energia nucleare?'

Quando si parla di fabbisogni energetici, più che le proiezioni per Stati Uniti o per l'Unione Sovietica o per l'Europa o per l'Italia, vorrei vederte proiezioni che includano i rimanenti quattro quinti della popolazione mondiale, per la quale il consumo di energia è oggi da 20 a 50 volte inferiore a quello dei maggiori Paesi industrializzati, per porsi poi il problema del FABBISOGNO ENERGETICO A LIVELLO MONDIALE: riterrei questo almeno altrettanto appropriato che i lodevoli interventi estemporanei ed anche pianificati per 'aiutare' i cosiddetti Paesi in via di sviluppo. Penso infatti che, lasciando da parte i vari significati sociologici e culturali che alla parola sviluppo si vogliono dare, sviluppo significa portare questi 4/5 di umanità a livelli di vita ed in parte anche modi di vita simili ai nostri: basta girare un po' per constatare questa tendenza. Ebbene favorire lo sviluppo significa allora fornire istruzione, ovvero informazioni e conoscenze, e mettere a disposizione energia. Ora, se ci si ponesse il problema di ridurre nei prossimi 50 o 100 anni questo 'gap' da un fattore 50 ad un fattore 5 per portarlo successivamente vicino a zero, credo che il discorso sulle varie fonti di energia andrebbe sostanzialmente modificato, perchè i 'conti' risulterebbero certamente diversi.

Leggo che agli inizi degli anni 2000 saremo 6 miliardi: ecco, per quanto

detto a me sembra irrealistico abbandonare le fonti di energia primaria, di gran lunga a più alto contenuto energetico per unità di peso: ENERGIA NUCLEARE, appunto. Energia di fissione oggi ed energia di fusione domani: la prima esiste, la seconda deve ancora nascere, ma ci sono segni evidenti che siamo almeno alle prime settimane di gravidanza. Perciò se pensiamo di necessitare di una sorgente di energia ad alta resa, teniamoci il nucleare di oggi, i reattori a fissione. Anche perchè l'ultima cosa che vorrei vedere sarebbe, niente reattori a fissione in Italia con l'industria italiana impegnata, in competizione con quelle degli altri Paesi industrializzati, a vendere questi reattori, appunto ai Paesi in via di sviluppo, dove forzatamente il livello di competenza tecnica ed organizzativa è per ora, in genere, inferiore al nostro: non è un problema morale, lo considererei piuttosto un serio problema di sicurezza, che ci riguarda indirettamente ma anche direttamente, come abbiamo visto con Chernobyl.

Serve la tecnologia nucleare per l'eventuale reattore a fusione? Poichè sia la fusione (D + T e D + D) che la fissione producono neutroni e modificano le strutture dei nuclei del combustibile, c'è una ovvia analogia sia per quanto riguarda la necessaria conversione dell'energia nucleare in energia termica sia per la tecnologia dei materiali soggetti a radioattività indotta dai neutroni. Ma per restare all'oggi, dirò che al JET, circa il 15% dei nostri ingegneri vengono da anni di lavoro nel campo della fissione (perchè di questa competenza avevamo bisogno) ed al NET questa percentuale è ancora maggiore, già in fase di progetto preliminare ed è destinata a crescere in fase di costruzione.

Avendo fatto queste precisazioni, vorrei ora analizzare, seppur brevemente, quelle che a mio giudizio sono le più **ATTRAENTI CARATTERISTICHE DELLA FUSIONE** quale sorgente di energia, che oggi, poichè siamo ancora molto lontani dal reattore, considero solo potenziali, da utilizzare a tempo debito, contando sulla intelligenza e fantasia degli ingegneri che dovranno progettare il reattore a fusione. Nondimeno le conoscenze che abbiamo sino ad oggi acquisite ci permettono non solo di elencare queste attraenti caratteristiche ma anche di valutarne l'enorme importanza.

a) Innanzi tutto non ci sono ceneri radiattive, poichè si tratta di elio, che è il più innocuo degli elementi, mentre le ceneri della fissione, pur arrivando da lontano, ci hanno tolto latte ed insalata per molti giorni.

b) La radioattività è solo quella indotta dai neutroni nei materiali strutturali del reattore e quindi è in essi bloccata per così dire (non è associata a sostanze volatizzabili). Di volatile c'è un effetto il trizio che con il deuterio costituisce il combustibile: ora il deuterio è tranquillo come l'elio mentre il trizio è radioattivo anche se con vita media relativamente molto corta (circa 12 anni) rispetto ai prodotti della fissione, però è prodotto all'interno del reattore nel mantello di litio che avvolge il contenitore del plasma e non deve essere trasportato poichè serve 'in loco' come combustibile. Il contenimento del trizio all'interno dell'edificio del reattore è un problema reale ma appare essere un problema molto meno complesso e pericoloso che non quello del trasporto dei prodotti di fissione e del loro contenimento in caso di incidente.

c) La quantità di combustibile nel reattore è limitata all'ammontare necessario per alcuni minuti di funzionamento e può essere introdotto secondo necessità, mentre nel caso della fissione l'ammontare di combustibile nel reattore corrisponde a molti mesi di funzionamento.

d) Circa l'80% dell'energia è associato ai neutroni (mentre il rimanente serve ad autosostenere la combustione) e ciò dovrebbe consentire una certa flessibilità nelle soluzioni ingegneristiche per convertire l'energia nucleare in energia termica nella maniera più opportuna; nel reattore a fissione invece più del 95% dell'energia sta nelle barre di combustibile che contengono le ceneri altamente radioattive ed è perciò lì che si deve andare a raffreddare per estrarre l'energia termica.

e) Non è possibile quello che per i reattori a fissione si chiama 'nuclear run away', che è la situazione più pericolosa, perchè comporta un improvviso aumento di potenza ben al di sopra del valore di progetto, che può determinare la cosiddetta fusione del nocciolo (cioè in sostanza delle barre di combustibile). Infatti non conosco alcun incidente operativo in un tokamak che non porti ad uno 'spegnimento' del plasma, cioè ad una rapida riduzione di potenza.

f) Soprattutto se si progetta un reattore a limitata densità di potenza, cioè, per una data potenza in uscita, abbastanza grande (si veda la linea JET - NET del programma europeo), si ritiene sia abbastanza facile arrivare ad un reattore dove il cosiddetto 'afterheat' (che è l'energia rilasciata dal reattore dopo lo spegnimento) sia così limitato da rendere assolutamente impossibile la fusione di elementi strutturali del reattore: contrariamente al reattore a fissione, il circuito di raffreddamento ausiliario non è necessario.

g) Ho più volte detto che non vedo come la prima generazione di reattori possa non essere basata sul combustibile deuterio e trizio, dove il deuterio è ricavato facilmente dall'acqua ed il trizio è prodotto nel reattore stesso dalla interazione dei neutroni di reazione con il litio che circonda il cuore del reattore; il litio si trova in natura e se ne trova molto nell'acqua stessa (più difficile però da estrarre rispetto al deuterio). Il motivo per il quale si dovrà partire dal reattore $D + T$ è mostrato nella TABELLA IV, dove sono presentati anche gli altri cicli possibili: per $D + T$ le condizioni di plasma necessarie sono di circa 100 volte meno severe che per il ciclo deuterio - deuterio ($D + D$) e per quello deuterio - elio 3 ($D + {}^3\text{He}$). Però questi ultimi hanno considerevoli vantaggi, perchè ci si libera, in linea di principio del trizio (che è radioattivo) e nel secondo dei due anche dei neutroni e quindi della notevole attivazione delle strutture del reattore. E' ragionevole pensare che dopo una filiera iniziale di reattori $D + T$, sia possibile imparare a realizzare condizioni di plasma più severe e pertanto sviluppare la filiera $D + D$ e magari anche quella $D + {}^3\text{He}$. In sostanza, mentre lo sviluppo di filiere con cicli di combustibile più avanzati, ci ha portato con la fissione ai reattori autofertilizzanti, cui, accanto alla nota 'economicità' del ciclo del combustibile, sono associate condizioni di radioattività certamente più severe che non nei reattori termici, lo sviluppo della fusione verso cicli di combustibile più avanzati porta, accanto ad una maggiore economicità del combustibile (almeno per $D + D$), ad una riduzione della radioattività complessiva (con $D + D$, per la mancanza del trizio e per la minore energia dei neutroni) ed alla sua pratica

eliminazione (con $D + He^3$). In effetti sia con $D + D$ che con $D + He^3$, data la presenza del deuterio, come si vede dalla tabella, saranno presenti in una certa misura tutte le reazioni, ma la tendenza ad un drastico miglioramento dal punto di vista della radioattività, dell'eventuale reattore che usi i cili di combustibile più avanzati, rimane sostanzialmente valida.

h) Come per la fissione, anche per la fusione ci si libera della contaminazione associata ai processi chimici legati all'uso dei combustibili fossili: sarebbe interessante conoscere le statistiche delle malattie irreversibili legate ai prodotti di questi processi prima di sancire certe scelte di strategia energetica!

Se ci focalizziamo un momento sul **COBUSTIBILE DEL REATTORE A FUSIONE**, possiamo notare altri interessanti potenziali vantaggi che, in qualche modo, trascendono lo stesso aspetto tecnico.

a) Il combustibile si ottiene in sostanza dall'acqua e quindi è disponibile laddove vive l'uomo, rovesciando completamente la situazione attuale dove il reperimento dei vari combustibili che ora usiamo, ha un grosso effetto di condizionamento sui rapporti politici e sociali, perchè essi sono invece geograficamente concentrati.

b) Il combustibile è da considerarsi inesauribile poichè se per il ciclo $D + T$ si parla di centinaia di migliaia di anni (il limite è dovuto alla quantità di litio esistente che si pensa utilizzabile), per il ciclo $D + D$, assumendo che ogni abitante della terra abbia a disposizione una quantità annuale di energia eguale alla nostra (ed abbiamo visto quanto lontani siamo da questi livelli!), si valutano disponibilità per miliardi di anni.

c) Infine è il combustibile a più alto contenuto energetico per unità di peso che si conosca (varie volte maggiore dell'uranio). Perciò, ed anche questa non mi sembra cosa da poco, gli effetti di disturbo ambientale dovrebbero essere i più limitati: basti pensare, ad esempio, che facendo l'ipotesi di estrarre il deuterio dall'acqua dei mari per ottenere le disponibilità di energia sopra citate, il loro livello si abbasserebbe solo di molto poco. A titolo di curiosità dirò che grandi quantità di elio 3 sembrano non esistere sulla terra, ma da informazioni della NASA pare ce ne sia in abbondanza sulla Luna e soprattutto su Marte: la cosa non dovrebbe fare soltanto sorridere, perchè è stato valutato che i costi di trasporto dell'elio 3 dalla Luna sulla terra, con la tecnologia spaziale del prossimo secolo, non dovrebbero alterare sensibilmente il costo dell'energia di fusione così ottenuta.

Vorrei concludere questo argomento parlando, seppure in termini qualitativi di SICUREZZA. Per chiarire quale tipo di sicurezza si possa pensare di ottenere in un reattore a fusione, vorrei precisare che cosa intendo per sicurezza.

Nel campo dell'ingegneria la sicurezza di un impianto si realizza in tre stadi, successivi da un punto di vista logico, ma contemporanei dal punto di vista operativo: **SICUREZZA NEL PROGETTO**, con cui intendo la sicurezza inserita dal progettista utilizzando la 'fisica' dei processi coinvolti, esempio un aereo che riesca ad

atterrare senza motori (molti piccoli aerei da turismo, ma anche lo 'space shuttle, dove le ali sono state progettate appunto per questo); SICUREZZA DELLE PROTEZIONI, con cui intendo la sicurezza 'ingneristica' ottenuta con il numero e la qualità delle protezioni aggiunte all'impianto, esempio il meccanismo automatico che fa scattare l'interruttore di casa quando si dermina un 'guasto a terra' nella lavatrice o nel frigorifero (quando anche una piccola corrente fluisce, come non deve, verso terra si attua il meccanismo che apre l'interruttore e...fa mancare la luce); infine SICUREZZA PROCEDURALE, con cui intendo la sicurezza 'amministrativa', ottenuta dall'operatore seguendo con attenzione tutte le procedure operazionali stabilite, esempio l'istruzione di come frenare la nostra automobile quando guidiamo su strade viscide per pioggia o per neve.

La sicurezza complessiva è il risultato della combinazione, in varia percentuale, di questi tre tipi di sicurezza.

Quando sono presenti tutti e tre in modo corretto, ogni cosa realizzata dagli ingegneri, e quindi anche il reattore nucleare a fissione, è perfettamente sicura. Come ci è stato detto, i due più noti incidenti nucleari, Three Mile Island del 1979 (con impatto ambientale relativamente ridotto) e Chernobyl nel 1986 (con impatto ambientale notevole) sono stati determinati da deficienze nel terzo e nel secondo tipo di sicurezza, anche se per Chernobyl si è messo l'accento anche sul primo.

Quando si parla di sicurezza si devono anche mettere in evidenza i due livelli, sicurezza per i componenti dell'impianto (che preserva il capitale) e sicurezza delle persone in genere (addetti e non). Quando si parla di SICUREZZA INTRINSECA si parla necessariamente della seconda...perchè non vedo come si possa realizzare una automobile che non si rompa mai!

Ebbene io credo che abbiamo basi scientifiche sufficienti per pensare che, utilizzando in maniera intelligente tutte le favorevoli caratteristiche del processo di fusione termonucleare (e limitandomi al sistema a confinamento magnetico di cui credo di essere, in qualche modo, un esperto), sia possibile realizzare un reattore a fusione con il 100% di sicurezza intrinseca, dove cioè per quanto riguarda le persone (certamente per i non addetti ai lavori) tutta la sicurezza stia nel progetto, è cioè sicurezza 'fisica': i cosiddetti 'piani di evacuazione' che tanto sgomento suscitano per le centrali a fissione non sarebbero necessari per il reattore a fissione. In sostanza quando non funzionassero perfettamente il secondo ed il terzo tipo di sicurezza, in un reattore a fusione, avremmo sì dei guasti ai componenti (perdita di capitale) ma non danni alle persone: e scusate se è poco. Con tutto questo non voglio dire che non sarebbe stato possibile progettare reattori a fissione, in questo senso, intrinsecamente sicuri: questo lo devono dire gli esperti di fissione, come io non sono. Dobbiamo certamente accettare però che un impianto intrinsecamente sicuro, anche se possibile, costa certamente di più od anche molto di più se utilizziamo i metodi di valutazione di costi usati sino ad ora: se miriamo all'intrinsecamente sicuro, come sopra definito, dobbiamo tra l'altro prima imparare e poi riuscire ad imporre sul mercato un modi di fare i conti completamente diverso!

6. CONCLUSIONI E SUGGERIMENTI

Avviandomi alla conclusione vorrei riassumere alcuni dei temi che ritengo più significativi tra quanto detto ivi inclusi, mi sia consentito, alcuni suggerimenti.

a) Le RICERCHE SULLA FUSIONE TERMONUCLEARE degli isotopi dell'idrogeno impegnano migliaia di ricercatori in tutto il mondo da oltre trent'anni. Solo in questi ultimissimi anni, come si è visto al Congresso di Kyoto nel novembre scorso, si sono realizzati progressi quantitativi ed anche qualitativi, che ci danno una ragionevole certezza di arrivare al reattore a fusione in tempi definibili. Va precisato con grande chiarezza che questi progressi sono legati alla linea tokamak ed in gran parte alla entrata in funzione negli Stati Uniti, in Europa ed in Giappone dei tre 'grandi' tokamak, TFTR, JET, JT-60.

b) I TEMPI che abbiamo davanti, così come definiti dalla sequenza di macchine JET, NET, DEMO del programma europeo (che comprende tutte le attività sia nazionali che comuni) coordinato da Bruxelles dall'Euratom, ci dicono che i primi MW di energia elettrica di fusione potrebbero essere immessi nella rete europea nel 2020.

c) Poichè il PROGRAMMA EUROPEO si è andato quasi esclusivamente concentrando sulla linea tokamak alla fine degli anni sessanta e dopo pochissimo è stato messo in cantiere il JET (1973) e definita la linea JET - NET - DEMO, non credo che anche con risorse maggiori, sarebbe stato possibile ridurre i tempi per il passato in quantità di qualche interesse; con scelte diverse penso che potremmo essere addirittura più indietro. Per quanto riguarda il futuro, anche se riusciremo a portare avanti le tre imprese principali con lo stesso impegno, sostegno ed aggressività con cui sino ad ora ci è stato permesso di portare avanti JET, credo che i tempi del programma siano i più stetti che persone responsabili, competenti e ragionevoli possano concepire come data per centinaia di megawatt di fusione nella rete elettrica europea. Non credo assolutamente che esistano scorciatoie per arrivare prima del 2020 (come prevede il programma) ad immettere centinaia di MW elettrici in rete.

Dico questo perchè con JET non solo abbiamo la macchina più avanzata al mondo sul piano della fisica (vedere Kyoto), ma abbiamo anche la macchina che può fornire maggiori informazioni ingegneristiche ed operazionali di interesse reattoristico per NET. Basti pensare che per ottenere i risultati scientifici di JET (e possibilmente superarli), negli Stati Uniti è allo studio una nuova macchina (CIT) che, essendo sulla carta, è ovviamente più indietro di JET, ma che soprattutto, essendo concentrata sui problemi di fisica (per ragioni di costo a detta degli interessati), non possiede la configurazione ed i parametri estrapolabili al reattore, come invece è in misura certamente importante per JET. In sostanza i tempi del programma europeo sono i più brevi possibili perchè con la linea JET - NET - DEMO, il passaggio dalla fisica (JET) all'ingegneria (DEMO) non presenta soluzioni di continuità: fisica ed ingegneria non sono separate ma, con una progressiva enfasi verso l'ingegneria si muovono insieme attraverso la sequenza JET- NET - DEMO, con il sostegno del programma di sviluppo per le tecnologie necessarie.

d) Le forme esistenti di COLLABORAZIONE INTERNAZIONALE gestite dalla

IAEA e dalla IEA, che sono quasi esclusivamente centrate sulla linea tokamak vanno mantenute. In questo quadro sarà interessante seguire la collaborazione tra i grandi tokamak ora in funzione (JET, TFTR, JT-60), perchè, contrariamente alle altre, è una collaborazione che va al di là della carta, per lavorare sperimentalmente assieme con le tre macchine più significative al mondo oggi.

A questo proposito va rilevato che la collaborazione internazionale di maggiore successo è stata proprio quella che ha consentito di realizzare JET e su questa spinta mettere a punto il programma così come è oggi. Andare oltre a questo punto, non mi sembra necessario, anzi ritengo che, come i vari tokamak del programma europeo sono stati e sono importanti per JET, così ritengo che sia utile ed oserei dire necessario, avere nel mondo a tempo debito, più di una macchina tipo NET per acquisire in maniera seria tutte le informazioni per progettare un buon reattore a fusione (prima tipo DEMO e poi il reattore commerciale). Ritengo che questo sia ancora più vero quando ci si ponga il problema della sicurezza intrinseca che, come definita nel mio intervento (che è poi, penso, come la gente si aspetta), non credo tutti vogliano ritenere necessaria (basti pensare che l'equivalente del NET per i sovietici, l'OTR, è un progetto cosiddetto ibrido, che prevede di utilizzare i neutroni di fusione per 'fertilizzare' il combustibile di fissione...ed allora saremmo da capo): già in Europa ci sarebbe un certo lavoro di mediazione da fare per accordarci sul significato tecnico di sicurezza intrinseca. Infatti progettare centrali con sicurezza intrinseca, comunque definita, significa rivedere in maniera sostanziale gli attuali criteri su cui si basano i 'conti' dei costi dell'energia.

Non ritengo del tutto valida la motivazione dei costi per fare un solo tokamak di tipo NET al mondo, semmai ci potrebbe essere una motivazione politica, ma questo non è di mia pertinenza, ed inoltre ci credo poco, perchè, come si è visto, dovrebbe essere una motivazione della durata di oltre vent'anni ed è già difficile mantenerla all'interno dell'Europa!

e) Allo stesso tempo non penso ragionevole e nemmeno possibile che l'ITALIA (o altro Paese europeo) concepisca di andare avanti da sola con un drastico aumento unilaterale degli investimenti, per ragioni di risorse umane, tecniche e scientifiche ed andando avanti anche finanziarie (ricordo che il costo complessivo previsto per arrivare alla commercializzazione della fusione si aggira sui 20-30 miliardi di Unità di Conto Europee, come ritengo sarebbe quello per ogni altra nuova fonte di energia della stessa portata): esperienze recenti, anche in Europa ci dovrebbero suggerire che alla lunga risulta più efficiente e più redditizio farsi promotori di una iniziativa di collaborazione da avviare in comune, invece che affrontarla da soli, cercando magari dopo gli aiuti per andare avanti.

Vedrei perciò molto bene un impegno vigoroso dell'Italia a sostegno della fusione a livello di Comunità Europea, anche perchè io noto, al mio modesto livello che a volte, anche chi rappresenta il nostro Paese nelle varie sedi politiche, amministrative, tecniche e scientifiche nelle strutture comunitarie, non sembra avere per la fusione l'interesse che con questa indagine conoscitiva il Parlamento Italiano sta mostrando. E si potrebbe cominciare subito con una azione nei confronti degli altri Paesi europei per evitare che il 'budget' del programma fusione venga ridotto nel

corso della presente trattativa per il ridimensionamento dell'intero 'budget' comunitario per la ricerca.

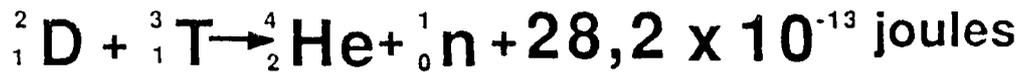
f) Le caratteristiche potenziali del combustibile e del processo di fusione termonucleare (fonte di energia inesauribile, pulita sia chimicamente che dal punto di vista del pericolo radioattivo, suscettibile di essere prodotta in centrali intrinsecamente sicure, equamente distribuita laddove vive l'uomo) sono tali da far considerare la fusione come la vera fonte su cui basare, oserei dire per sempre, la strategia energetica mondiale.

Naturalmente prima dobbiamo riuscire a dimostrare che questo 'sogno' sappiamo realizzare, questa 'pietra filosofale' sappiamo concretamente costruire: al punto in cui siamo, penso che le probabilità siano così elevate, che il rischio associato con gli investimenti necessari, sia da considerarsi del tutto accettabile.

Concludo rivolgendo Loro l'invito, qualora e quando fosse possibile, a venirci a trovare al JET: sono sicuro che, indipendentemente da quanto ho detto in questo mio intervento ed anche dalle decisioni che saranno prese in Italia ed in Europa riguardo alle strategie energetiche, questa visita, che per noi può avvenire in ogni momento, si dimostrerà di un grande interesse su molti piani...incluso quello spettacolare!

Enzo Bertolini

Tabella I

Fusione deuterio (D) - Trizio (T)


condizioni per la fusione:

$$n \tau_E T > 10^{28} \text{ m}^{-3} \text{ s k}$$

$$n \tau_E > 10^{20} \text{ m}^{-3} \text{ s}$$

$$T > 10^8 \text{ }^\circ\text{k} (\equiv 10 \text{ kev})$$

Due approcci principali:

$$n \cong 10^{30} \text{ m}^{-3} \quad \text{confinamento inerziale}$$

$$\tau_E \cong 10^{-10} \text{ s}$$

$$n \cong 10^{20} \text{ m}^{-3}$$

$$\tau_E \cong 1 \text{ s}$$

confinamento magnetico

dove n = densità del plasma

T = densità del plasma

τ_E = tempo di confinamento

Tabella II : COSTI DELL'INTERO PROGRAMMA JET

SOTTOSISTEMI	Mio Ecu*	%
TOKAMAK	97	9
ALIMENTAZIONI TOKAMAK	46	4
INIETTORI	61	5.5
RADIOFREQUENZA	59	5.5
SISTEMI AUSILIARI	92	8
EDIFICI	60	5.5
DIAGNOSTICHE	60	5.5
TOTALE INVESTIMENTI	475	43
OPERAZIONE	305	28
PERSONALE	320	29
TOTALE GENERALE (1973-1992)	1100	100

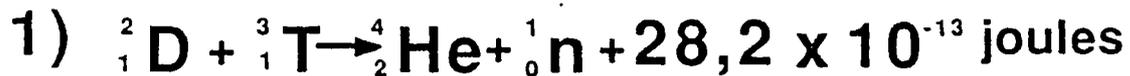
*Milioni di unità di conto europee: per aggiornare i costi al 1986 le cifre vanno moltiplicate per il fattore 1.3

Tabella III : LA STORIA DEI GRANDI TOKAMAKS

Anno	Eventi		
1972	Studi preliminari		
1973			
1973	Inizio progettazione		
	Riunioni IAEA		
	Fine progettazione	1975-76	JET
		1976-77	TFTR
		1977-78	JT-60
1977	Scelta del sito	1977	TFTR
1979		1978	JET
		1979	JT-60
1977	Costruzione	1977-82	TFTR
1985		1978-83	JET
		1979-85	JT-60
1983	Programma sperimentale e di sviluppo		
1990			
1990	Esperimenti con D+T per << Breakeven >>	1990	TFTR
1992		1990-92	JET
1993	Inizio costruzione NET per << Ignition >>		
	Ingegneria e tecnologia del reattore		

Tabella IV

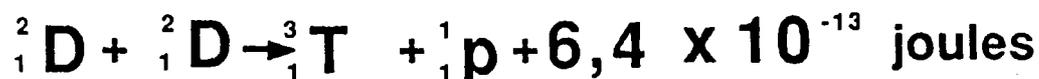
Reazioni di fusione



condizioni:

$$\begin{aligned} n \tau_E T &> 5 \cdot 10^{21} \text{ m}^3 \text{ s keV} \\ T &> 10 \text{ keV} (\cong 10^8 \text{ }^\circ\text{k}) \end{aligned}$$

Caratteristiche: radioattività da trizio e neutroni - deuterio in natura trizio dal litio nel reattore.



condizioni:

$$\begin{aligned} n \tau_E T &> 5 \cdot 10^{23} \text{ m}^3 \text{ s keV} \\ T &> 10 \text{ keV} (\cong 10^8 \text{ }^\circ\text{k}) \end{aligned}$$

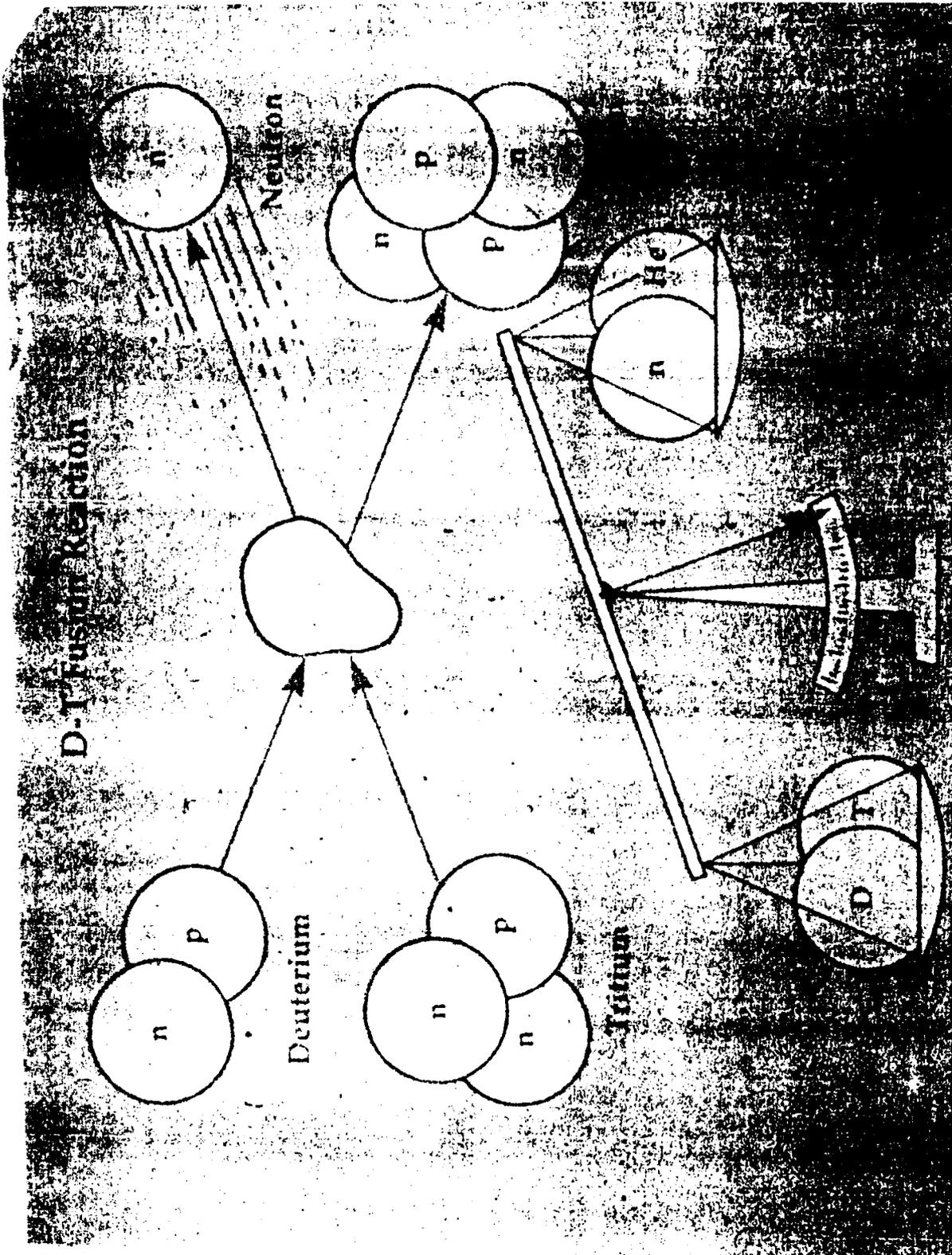


FIGURA 1 LA REAZIONE TERMONUCLEARE DI FUSIONE DEUTERIO (D) E TRIZIO (T)

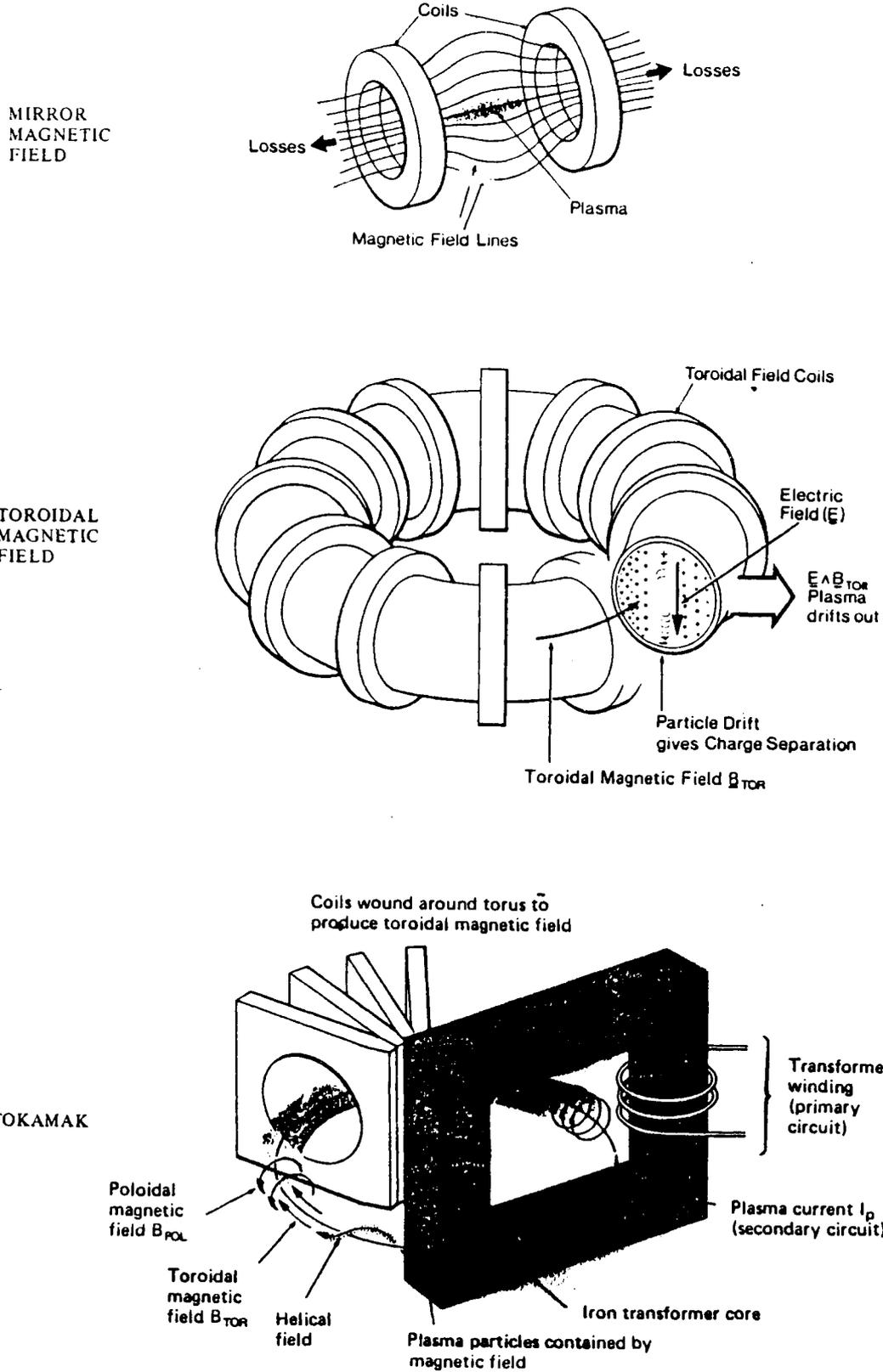


FIGURA 2 FUSIONE A CONFINAMENTO MAGNETICO: VARI SCHEMI DI BOTTIGLIA MAGNETICA

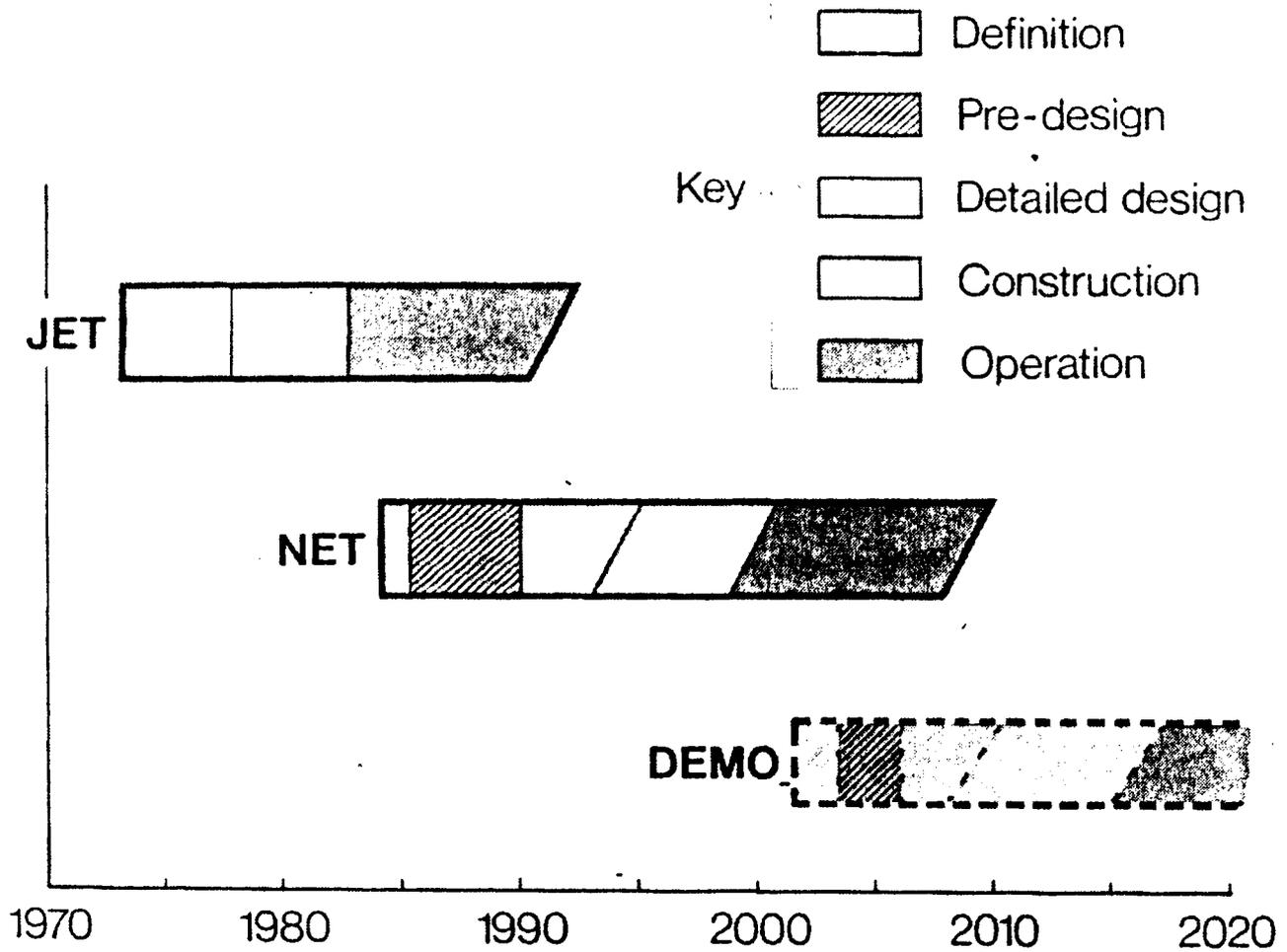


FIGURA 3 PROGRAMMA FUSIONE EUROPEO: LA STRADA VERSO IL REATTORE CON LE MACCHINE JET - NET - DEMO

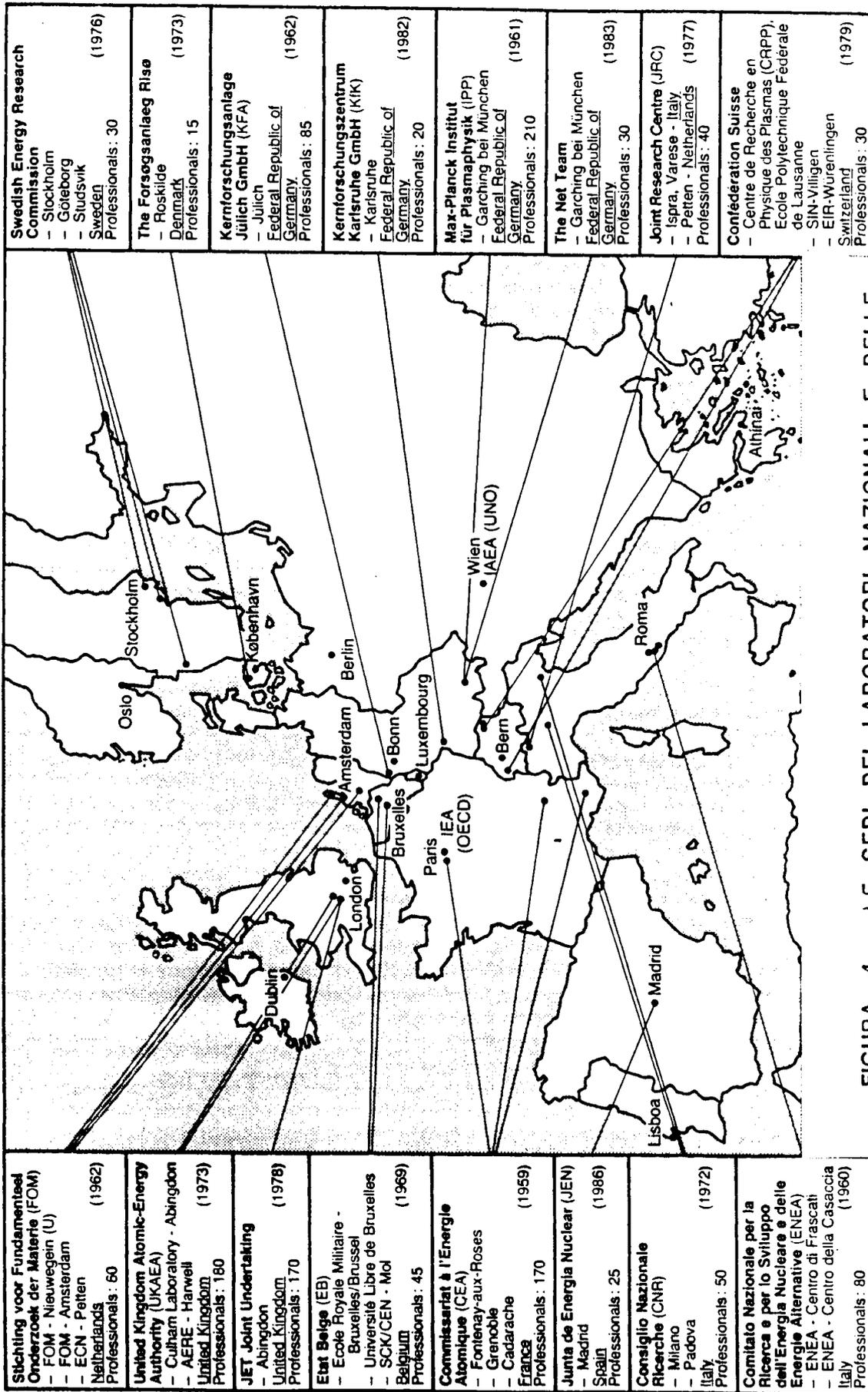


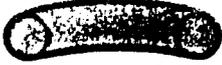
FIGURA 4 LE SEDI DEI LABORATORI NAZIONALI E DELLE IMPRESE COMUNI DEL PROGRAMMA FUSIONE EUROPEO

CEC DG XII / May 1986

Parameters of Principal Tokamaks in Europe

Existing

UK



DITE

a 0.26m
R 1.17m
 I_p 0.28MA
 B_T 2.8T

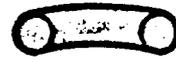
FRANCE



T.F.R.

a 0.22m
R 0.98m
 I_p 0.6MA
 B_T 6.0T

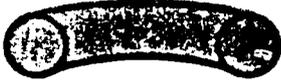
ITALY



F.T.

a 0.23m
R 0.83m
 I_p 1.0MA
 B_T 10T

GERMANY



ASDEX

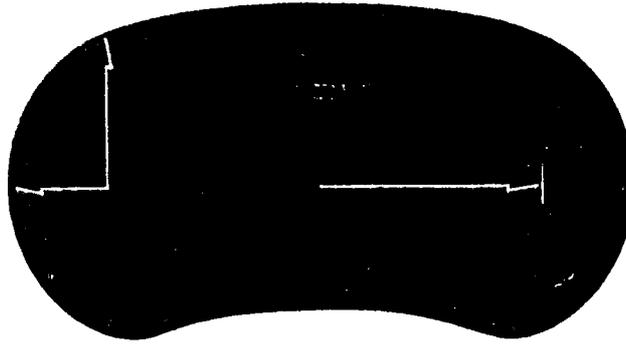
a 0.4m
R 1.65m
 I_p 0.5MA
 B_T 2.8T

GERMANY



TEXTOR

a 0.5m
R 1.75m
 I_p 0.65MA
 B_T 2.0T



FRANCE



TORE SUPRA

a 0.7m
R 2.25m
 I_p 1.7MA
 B_T 4.5T

Under construction

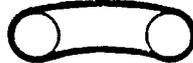
GERMANY



ASDEX UPGRADE

a 0.5m
b 0.8m
R 1.65m
 I_p 1.6MA
 B_T 4.0T

ITALY



FT UPGRADE

a 0.31m
R 0.92m
 I_p 1.6MA
 B_T 8T

UK



COMPASS

a 0.23m
b 0.39m
R 0.56m
 I_p 0.4MA
 B_T 1.9T

FIGURA 5 PARAMETRI DEI PRINCIPALI TOKAMAK DEL PROGRAMMA FUSIONE EUROPEO

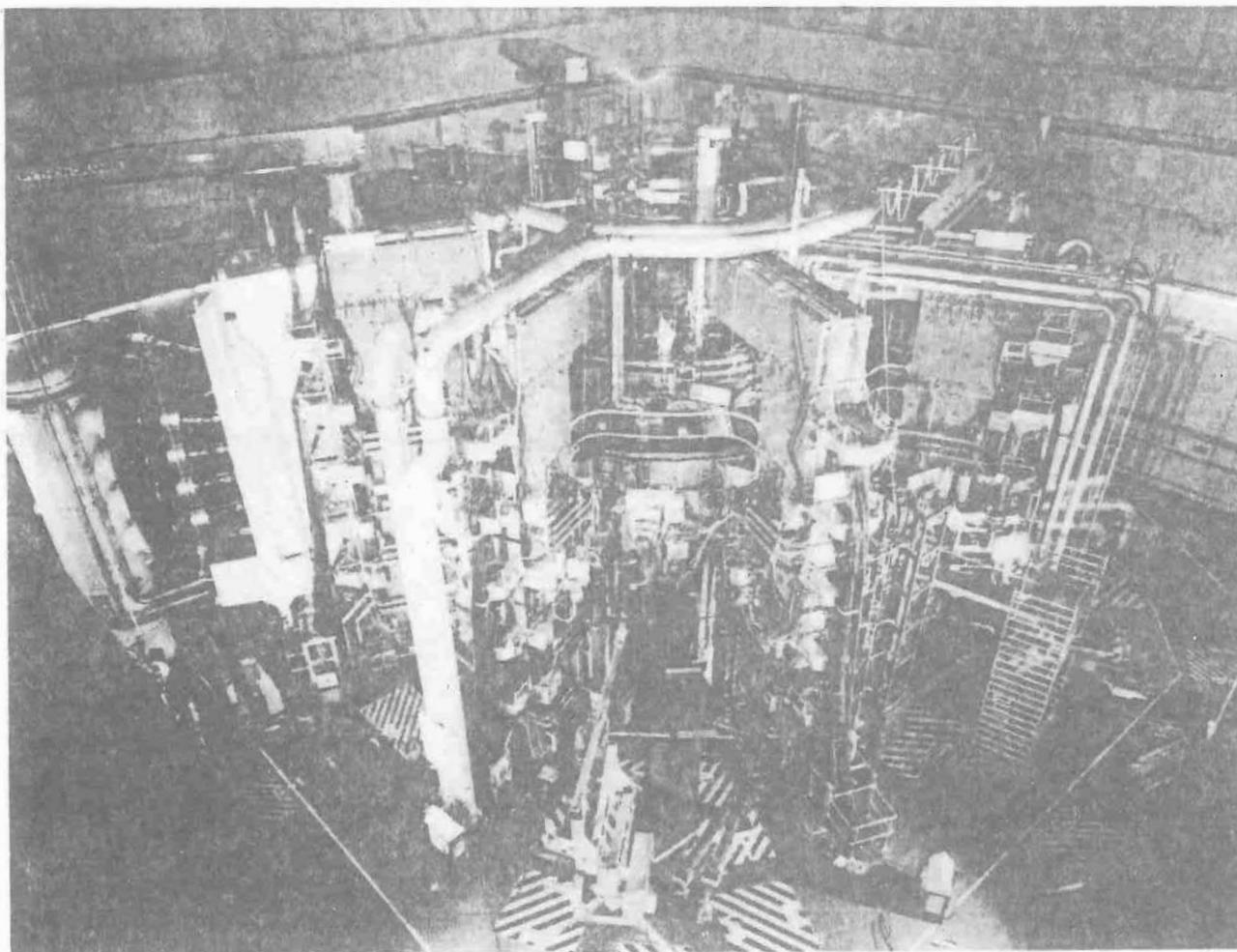


FIGURA 6 IL TOKAMAK JET COME APPARE OGGI

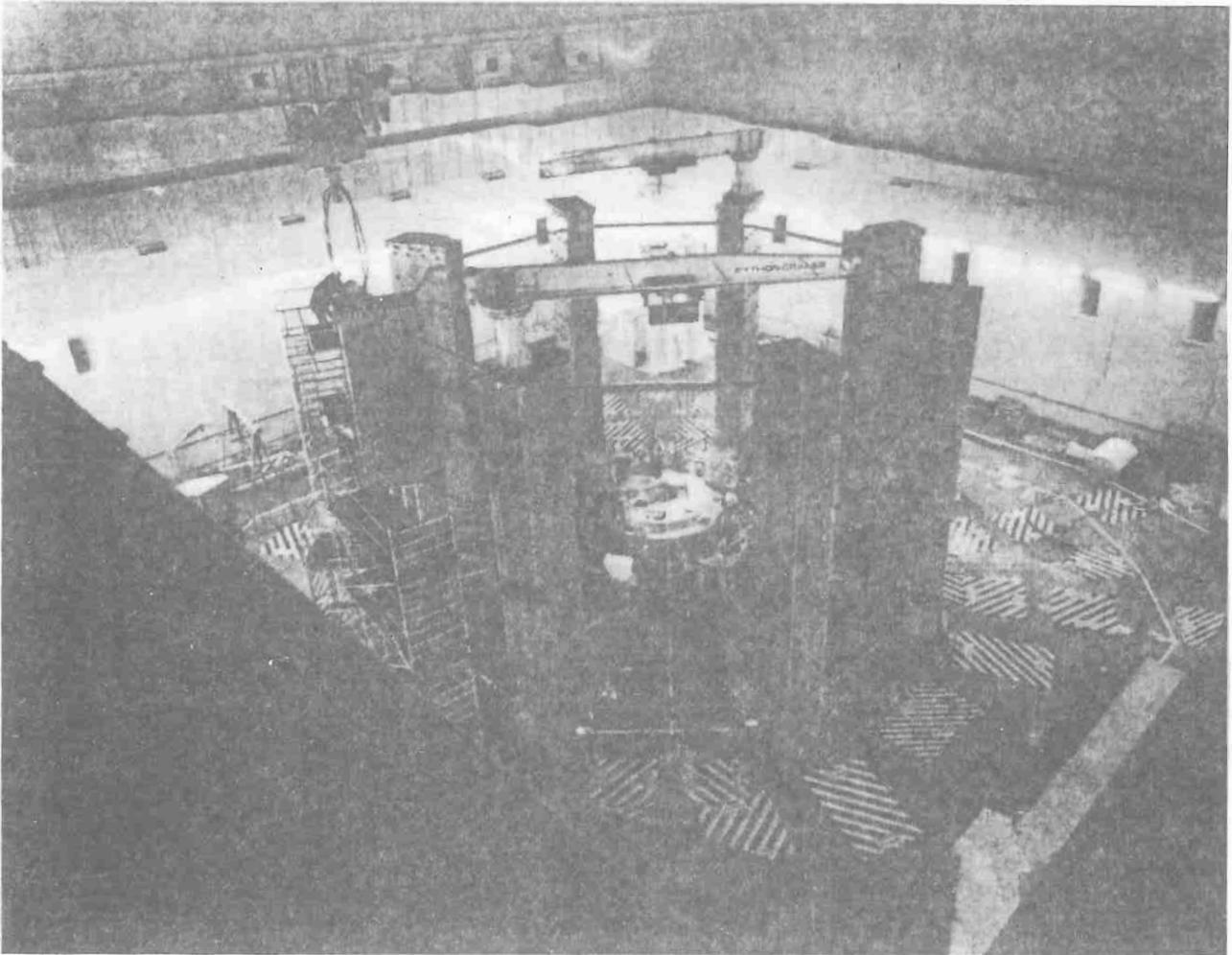


FIGURA 7 LA SALA TOKAMAK ALL'INIZIO DEL MONTAGGIO DELLA MACCHINA JET

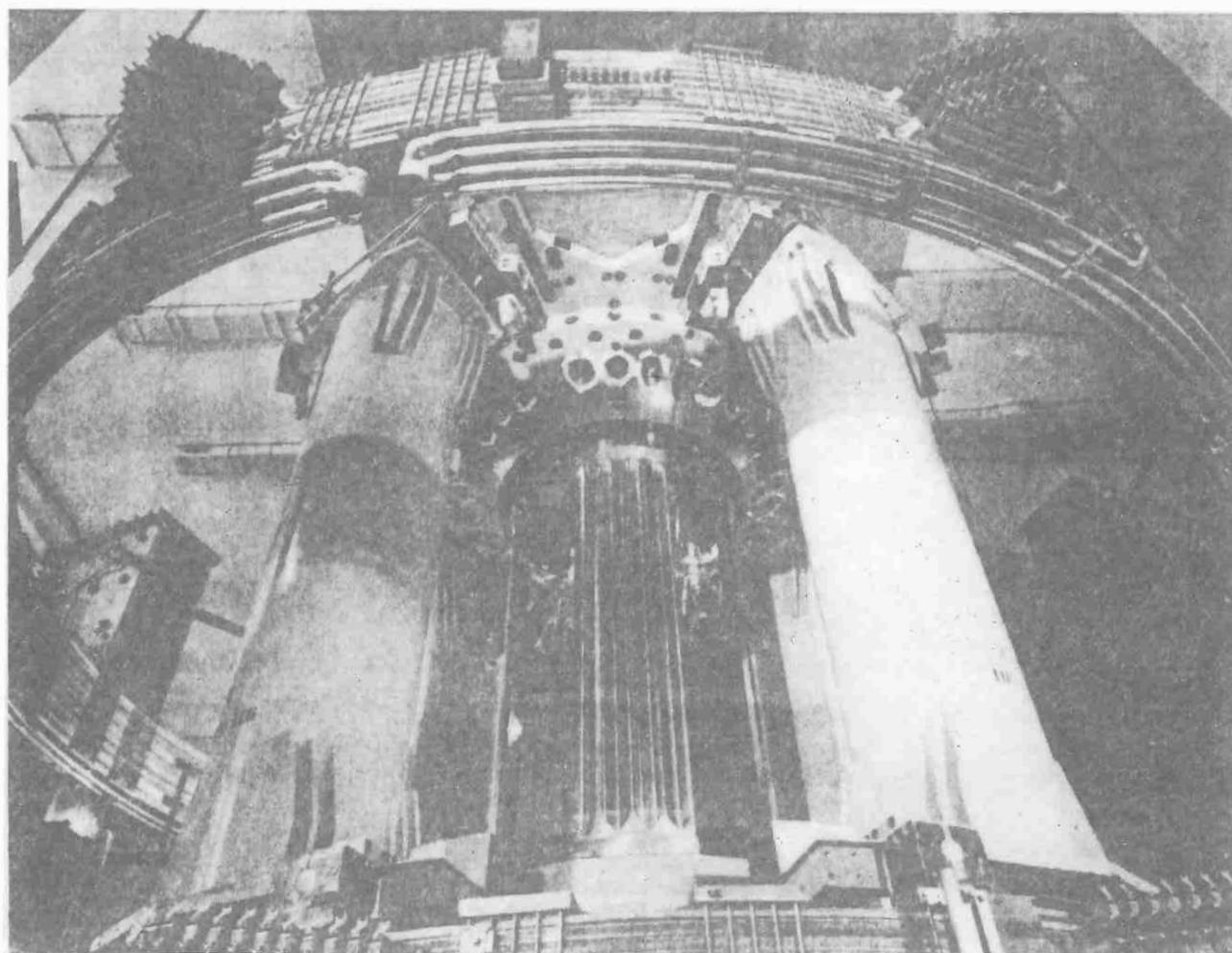


FIGURA 8 MONTAGGIO DELLE BOBINE DI EQUILIBRIO DEL JET

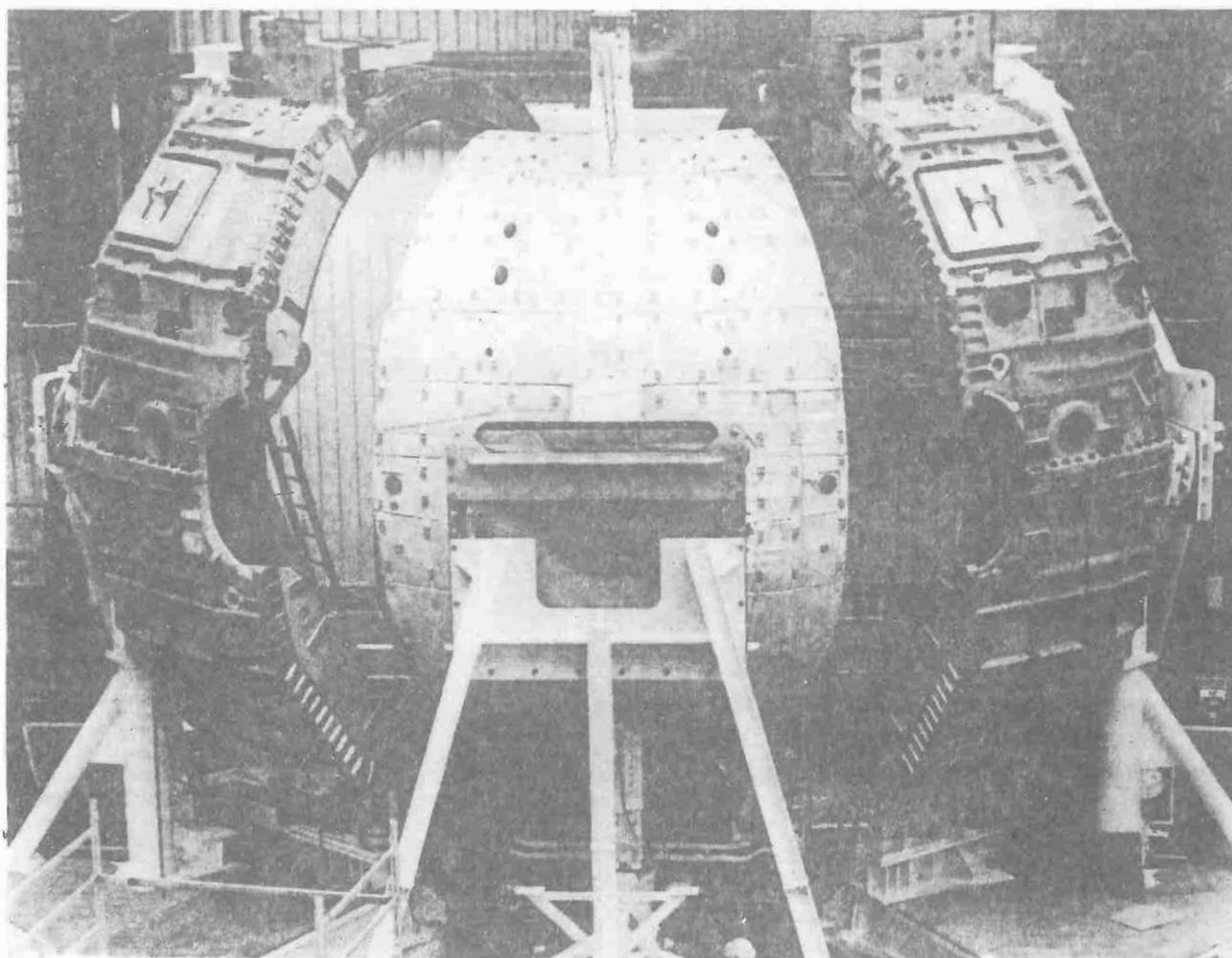


FIGURA 9 ASSEMBLAGGIO DI UN OTTAVO ('OTTANTE') DEL JET

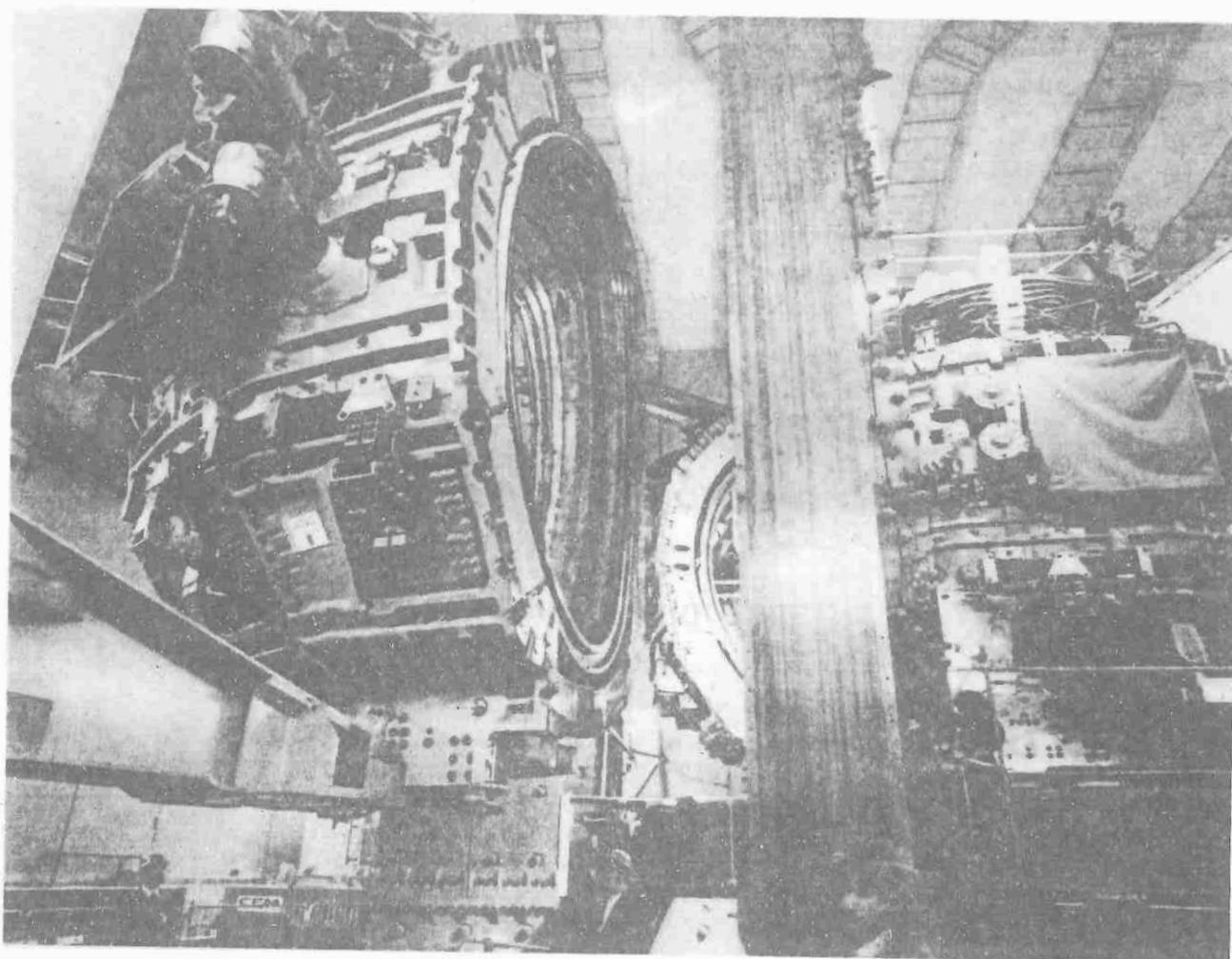


FIGURA 10 MONTAGGIO DELL'ULTIMO OTTANTE DEL JET

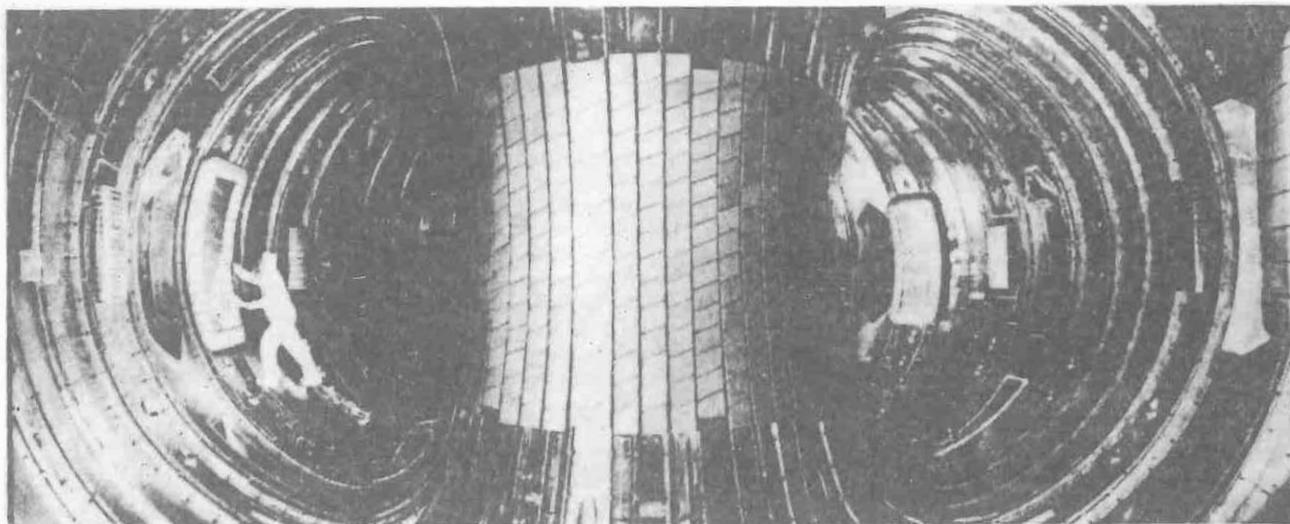
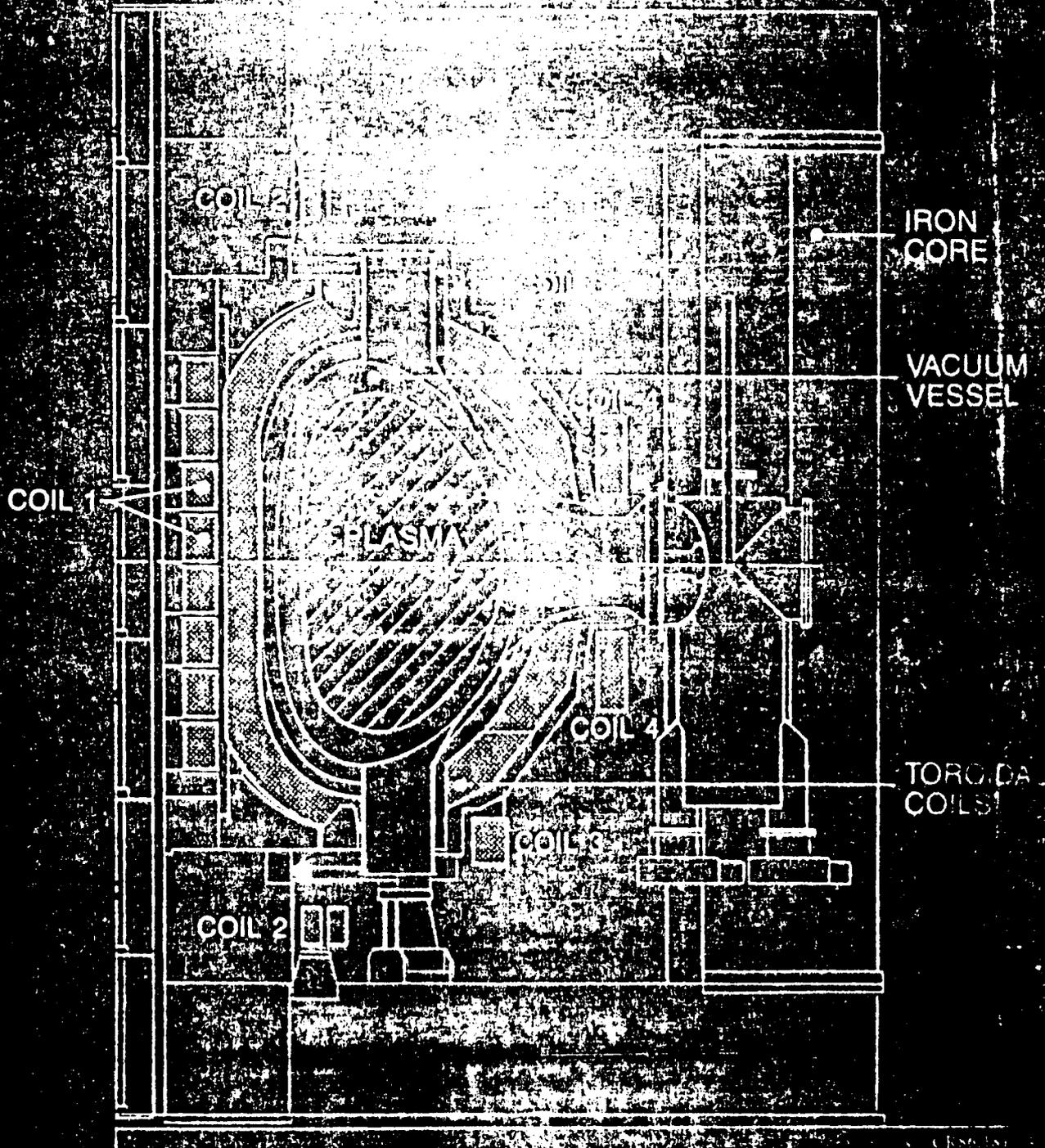


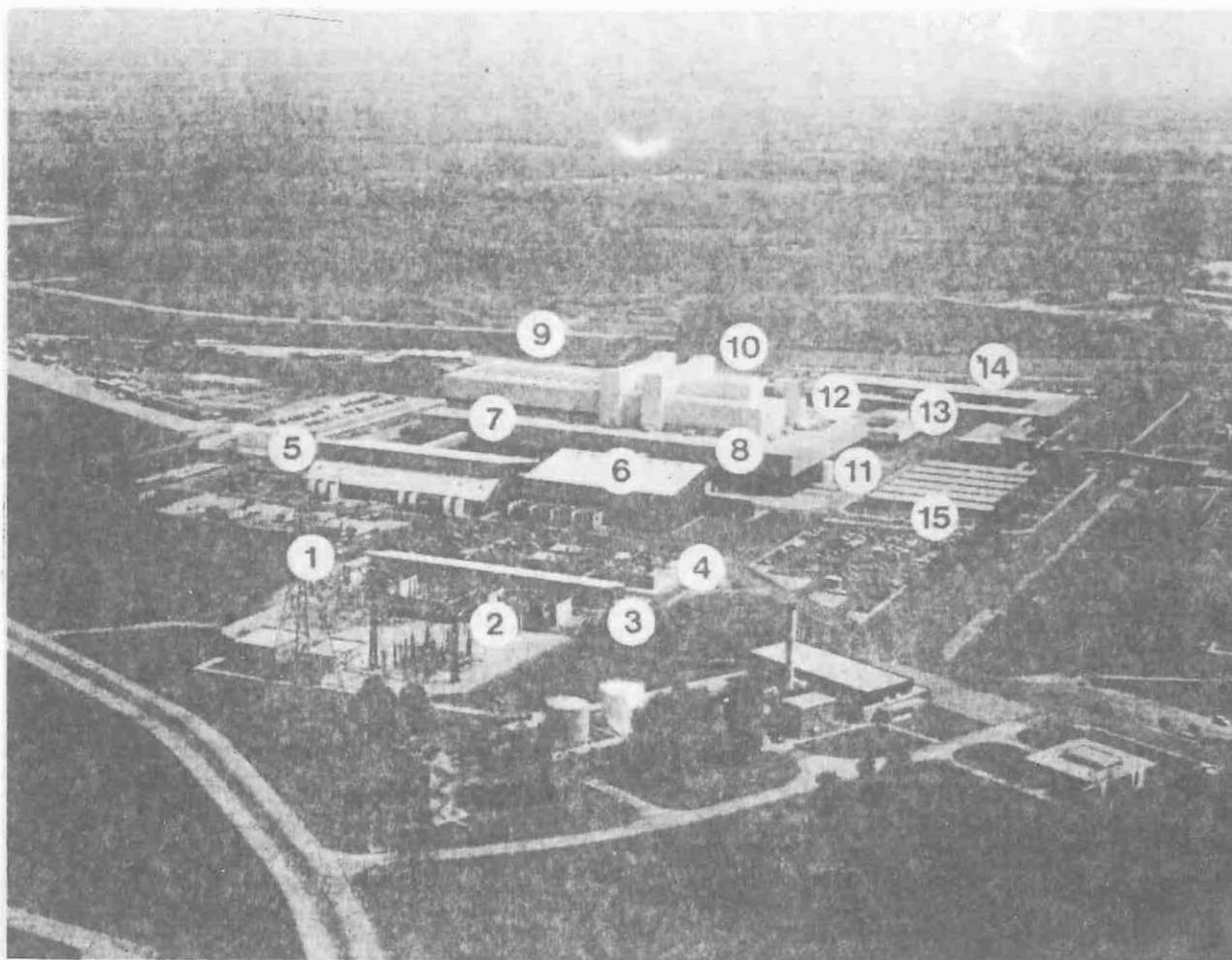
FIGURA 11 L'INTERNO DELLA CAMERA DA VUOTO DEL JET

Presentazione del progetto del tokamak a sistema di bobine toroidali



$R = 2.96\text{m}$, $a = 1.25\text{m}$, $k = \frac{b}{a} = 1.68$
 $I_p = 4.8\text{MA}$, $B_{T0} = 3.45\text{T}$, $V_0 = 150\text{m}^3$

FIGURA 12 LA SEZIONE DEL JET CON I VALORI DEI PARAMETRI PRINCIPALI



- | | |
|--|---|
| 1. 400kV Incoming Line and Substation. | 8. J1NWW Building: Neutral Injection Protection Circuits and Radio Frequency Generators for Additional Heating. |
| 2. 400kV/33kV Transformers. | 9. J1 Building: Assembly Hall. |
| 3. J5 Building: 33kV Switchgears. | 10. J1 Building: Torus Hall with the JET Tokamak. |
| 4. Outdoor Additional Heating AC/DC Convertors. | 11. J1WW Building: Machine Services. |
| 5. J3 Building: Toroidal and Poloidal Generators. | 12. J1SW Building: The Diagnostics Hall. |
| 6. J4 Building: Toroidal AC/DC Convertors. | 13. J2 Building: The JET Control Room. |
| 7. J1NWE Building: Ohmic Heating Circuit and Plasma Position and Shape Control AC/DC Convertors. | 14. K1 Building: Offices. |
| | 15. J6-11 Building: Offices. |

FIGURA 13 VEDUTA COMPLESSIVA DEL SITO DEL JET

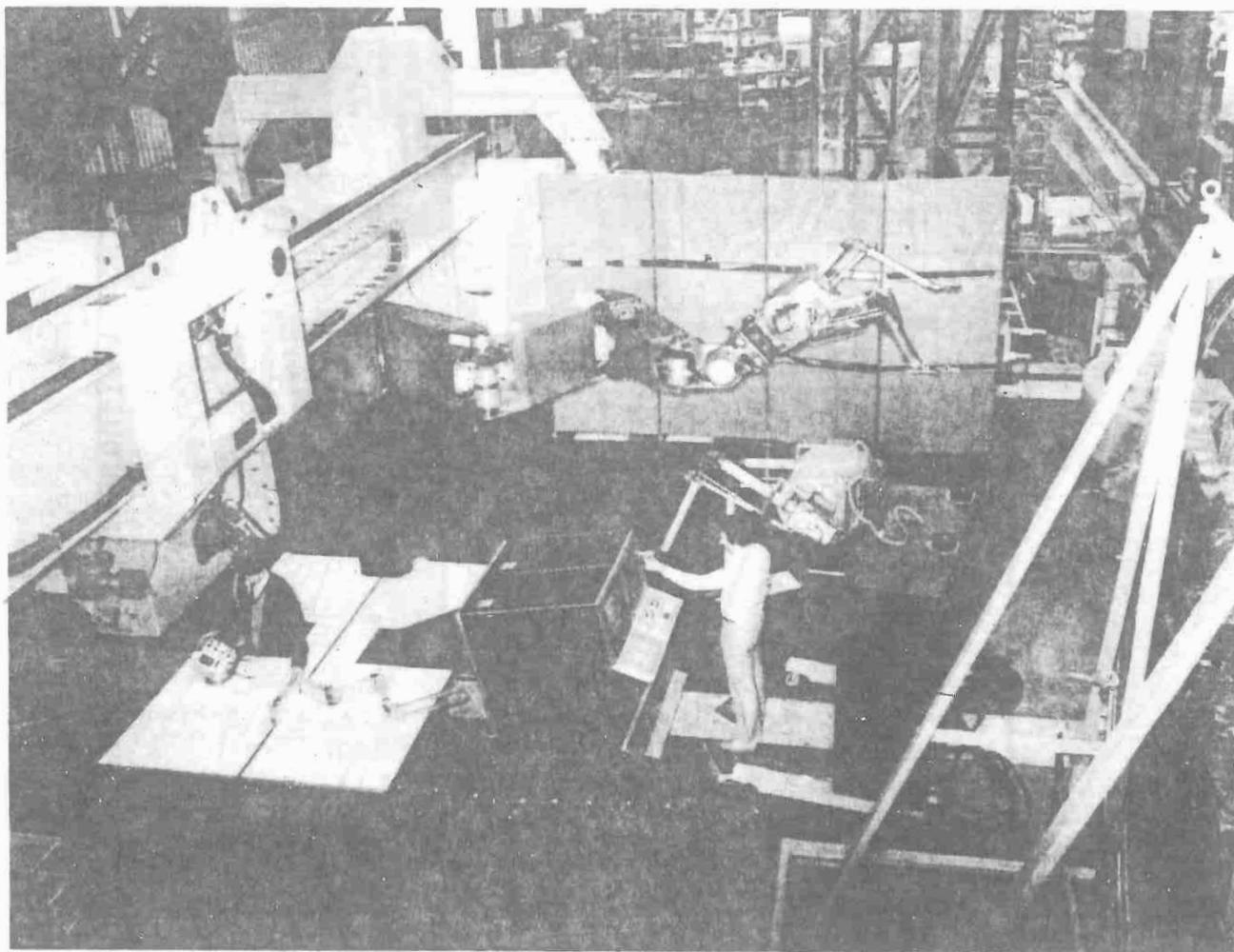


FIGURA 14 **IL BRACCIO ARTICOLATO CON IL SERVOMANIPOLATORE**

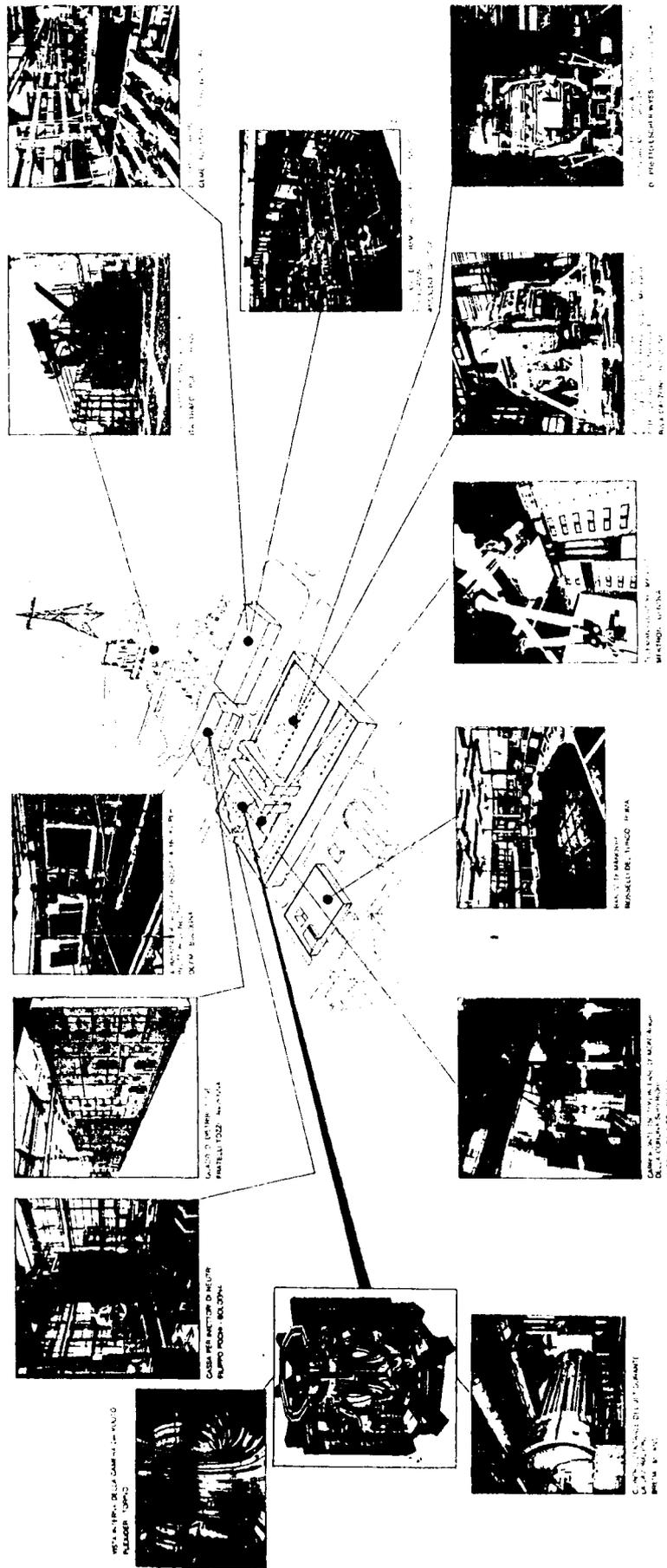


FIGURA 15 LE REALIZZAZIONI PRINCIPALI DELL'INDUSTRIA ITALIANA PER IL JET

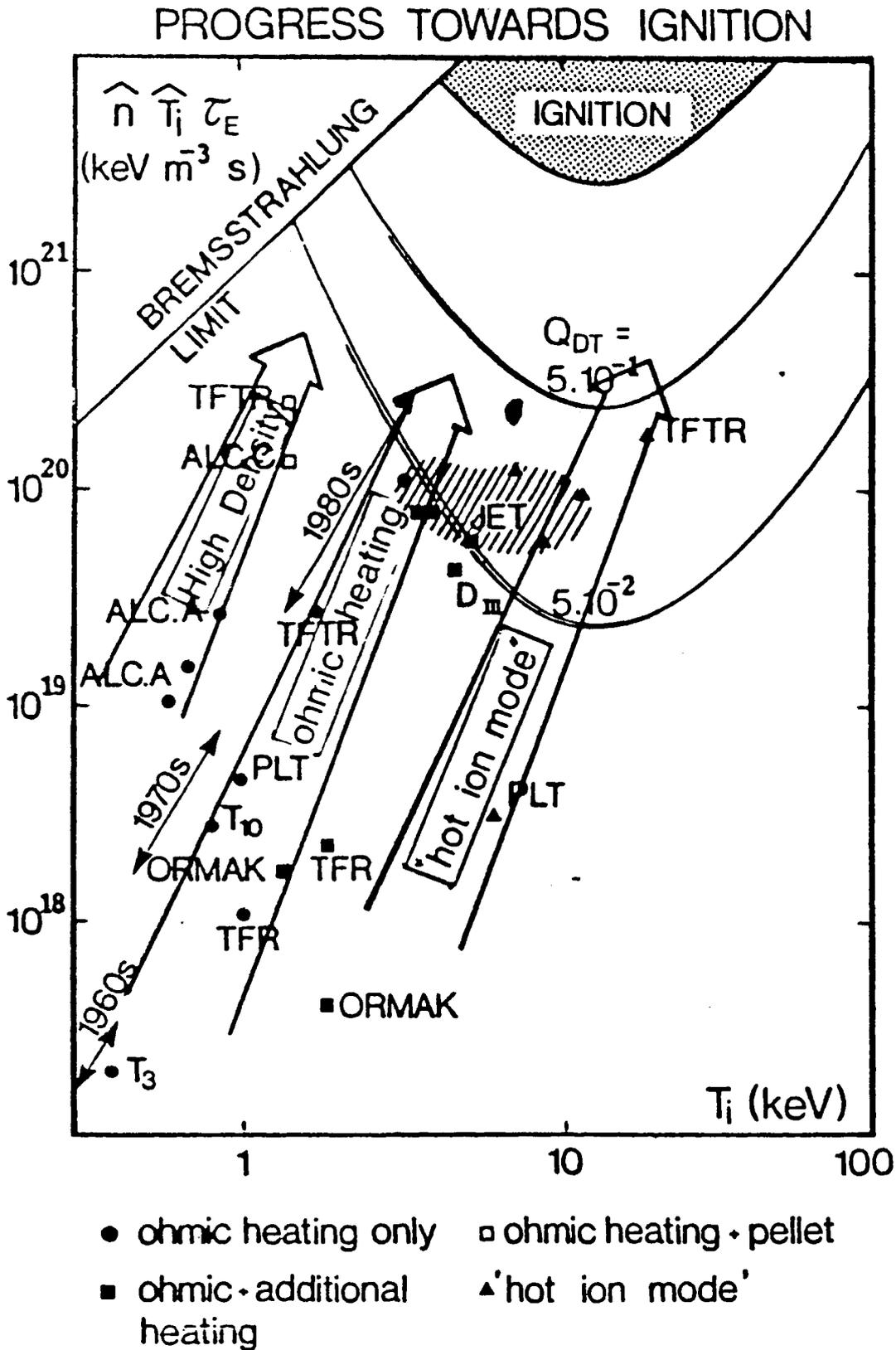


FIGURA 16 PROGRESSO NEL MIGLIORAMENTO DEL PARAMETRO DI FUSIONE DAL 1960 AD OGGI

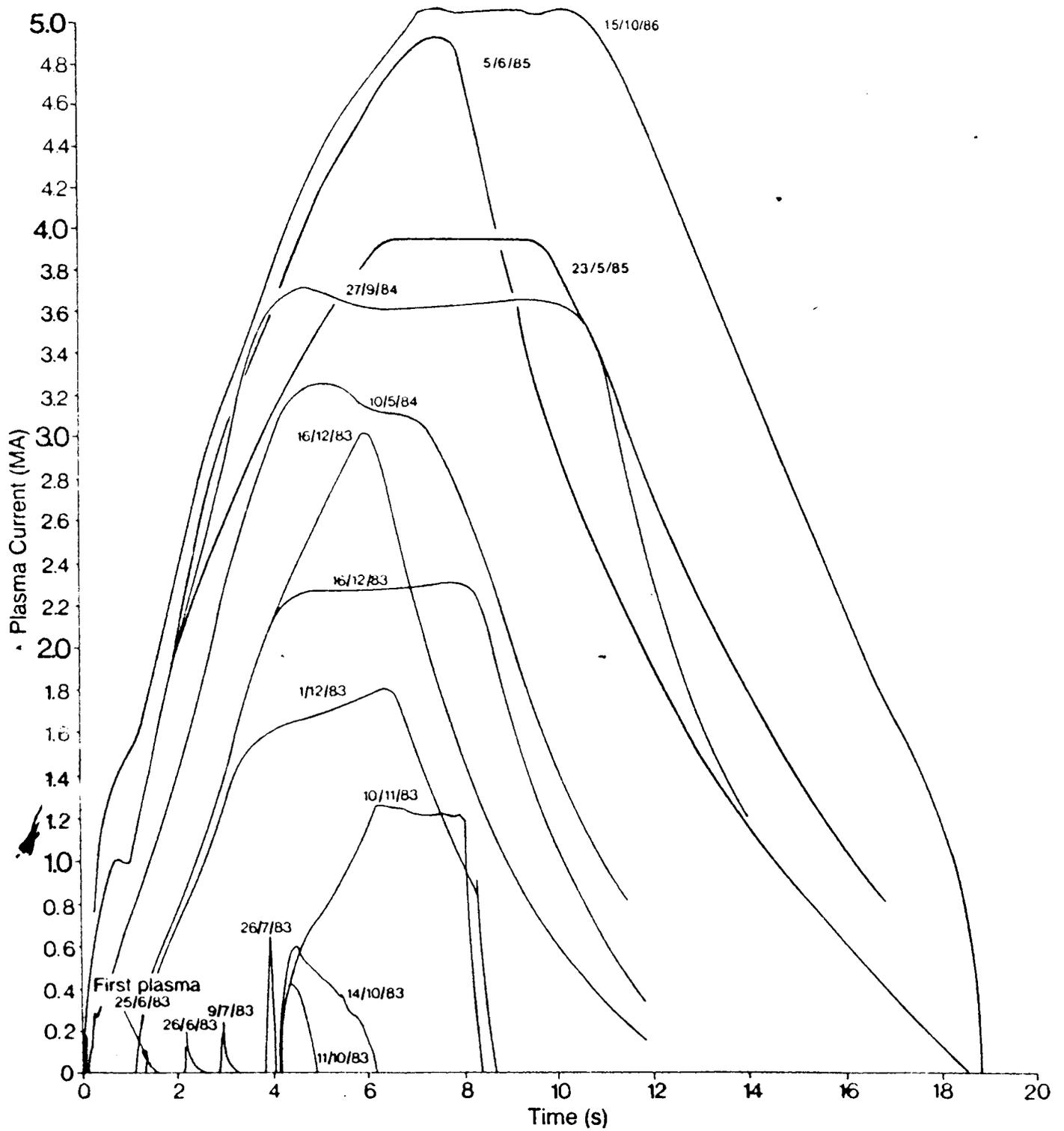


FIGURA 17

L'EVOLUZIONE DEL PROGRESSIVO AUMENTO DELLA
CORRENTE DI PLASMA NEL JET

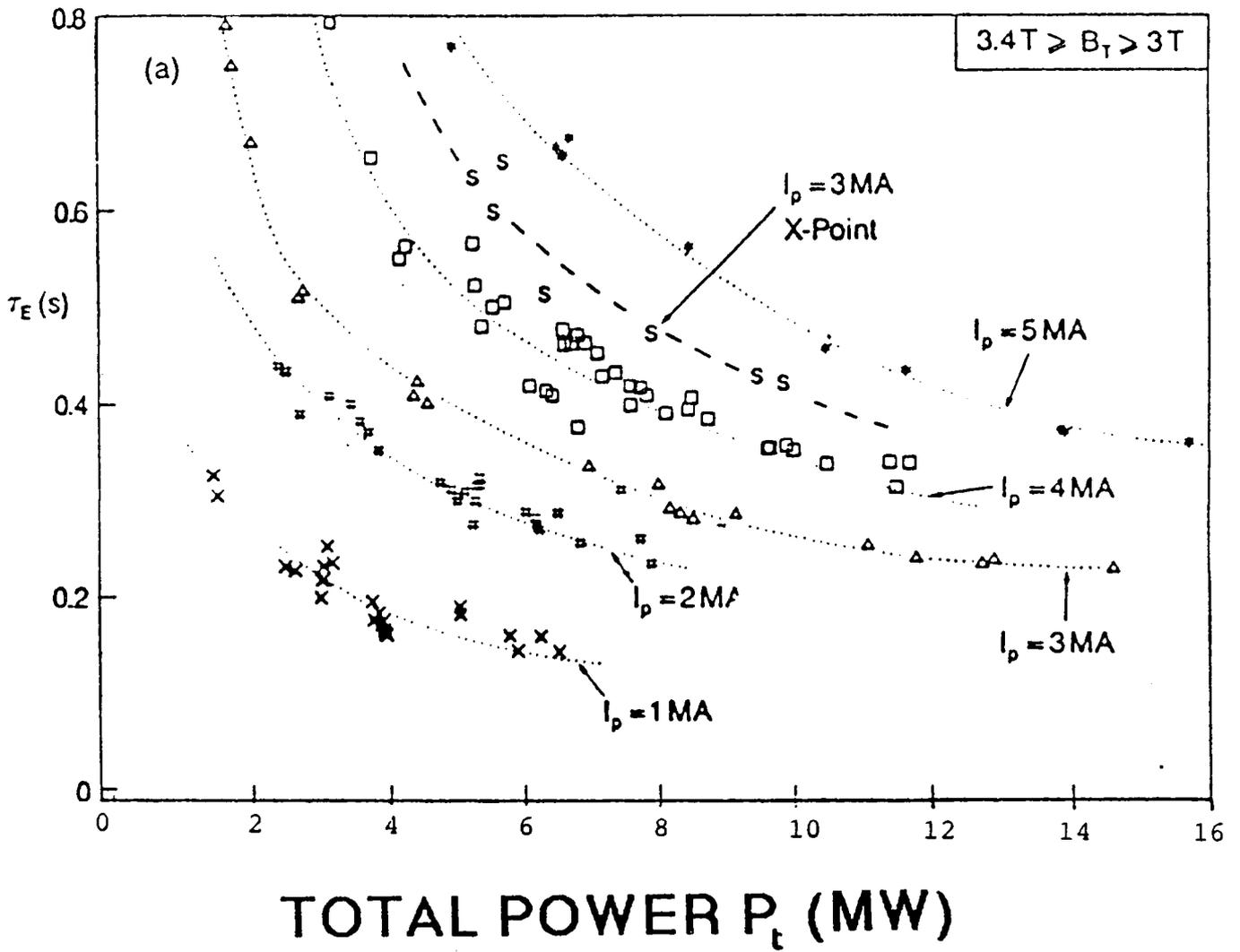


FIGURA 18 ANDAMENTO DEL TEMPO DI CONFINAMENTO τ_E CON L'AUMENTARE DELLA POTENZA DI RISCALDAMENTO DEL PLASMA E CON L'AUMENTARE DELLA CORRENTE IN CONFIGURAZIONE MAGNETICA CHIUSA ED APERTA

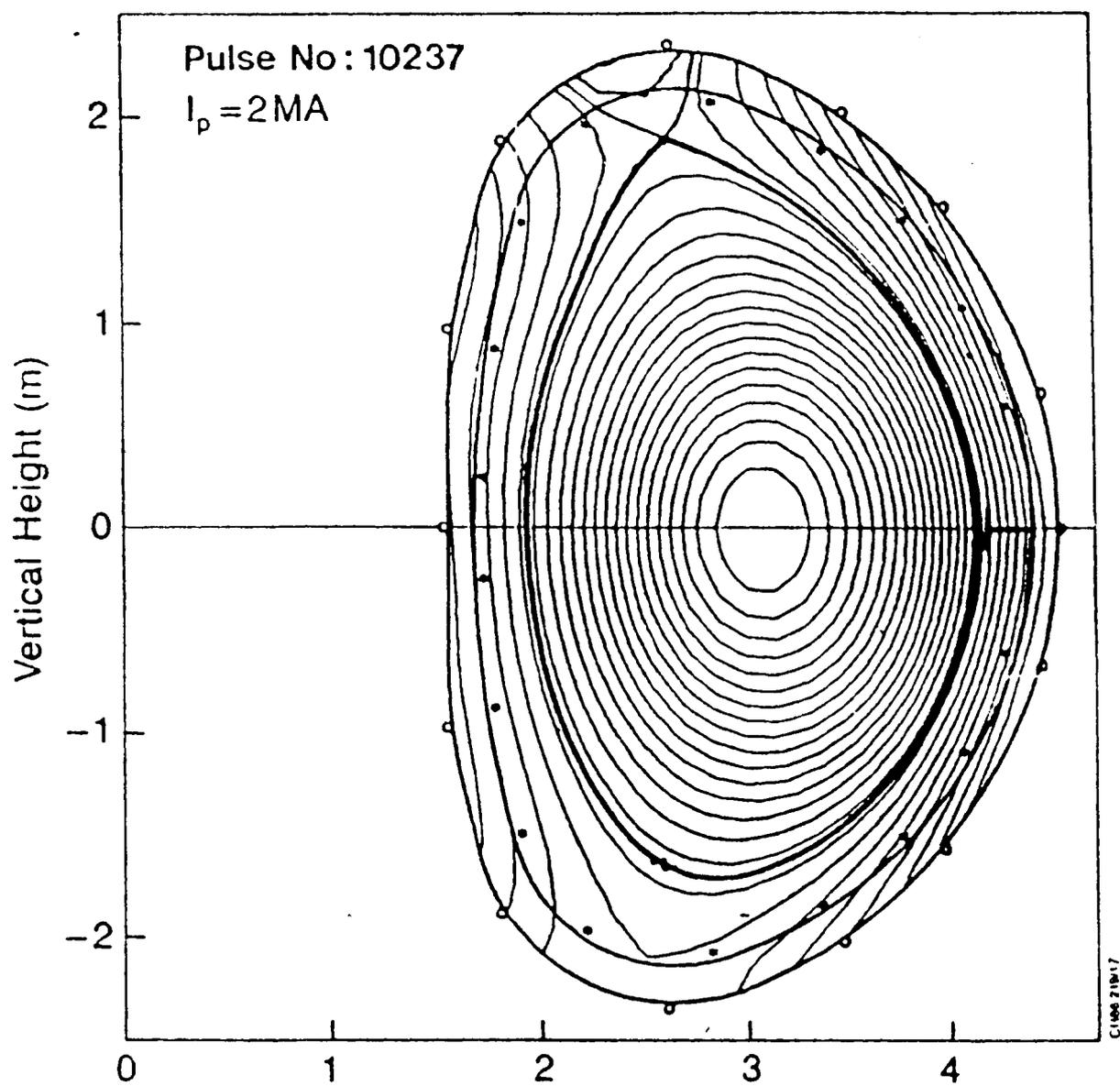


FIGURA 19

SEZIONE DEL PLASMA DEL JET CHE MOSTRA
LA CONFIGURAZIONE MAGNETICA APERTA

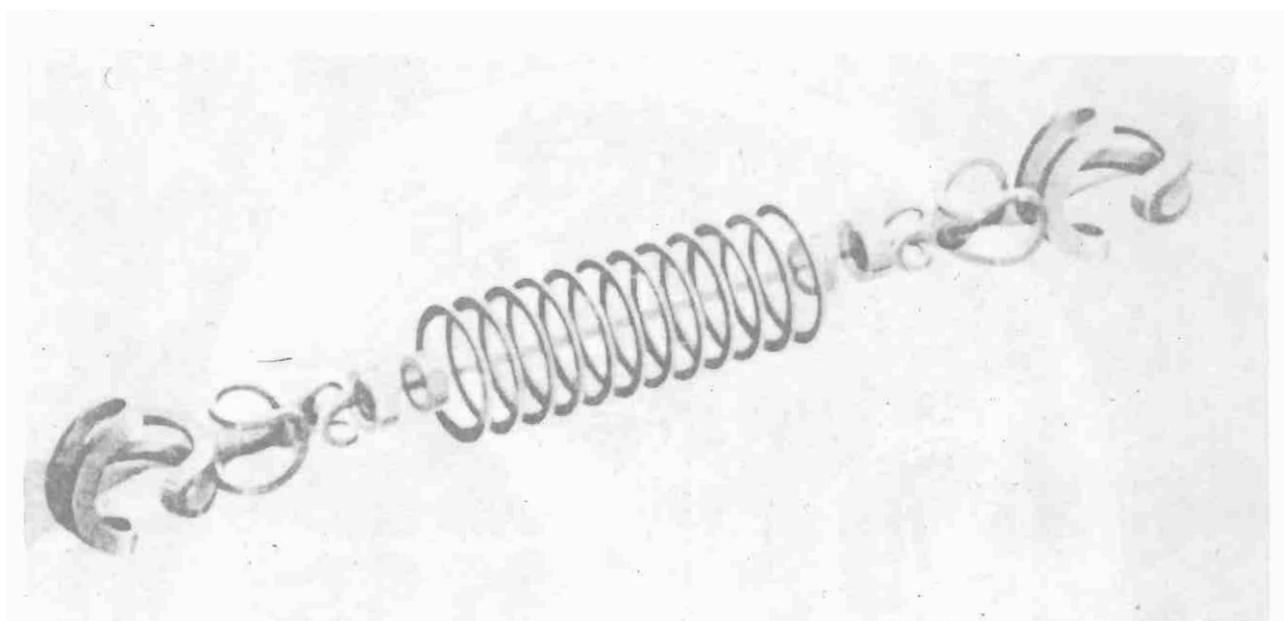


FIGURA 20 . SCHEMA DEL SISTEMA DI CONFINAMENTO MAGNETICO
A SPECCHIO 'MFTF-B'(LIVERMORE, USA)

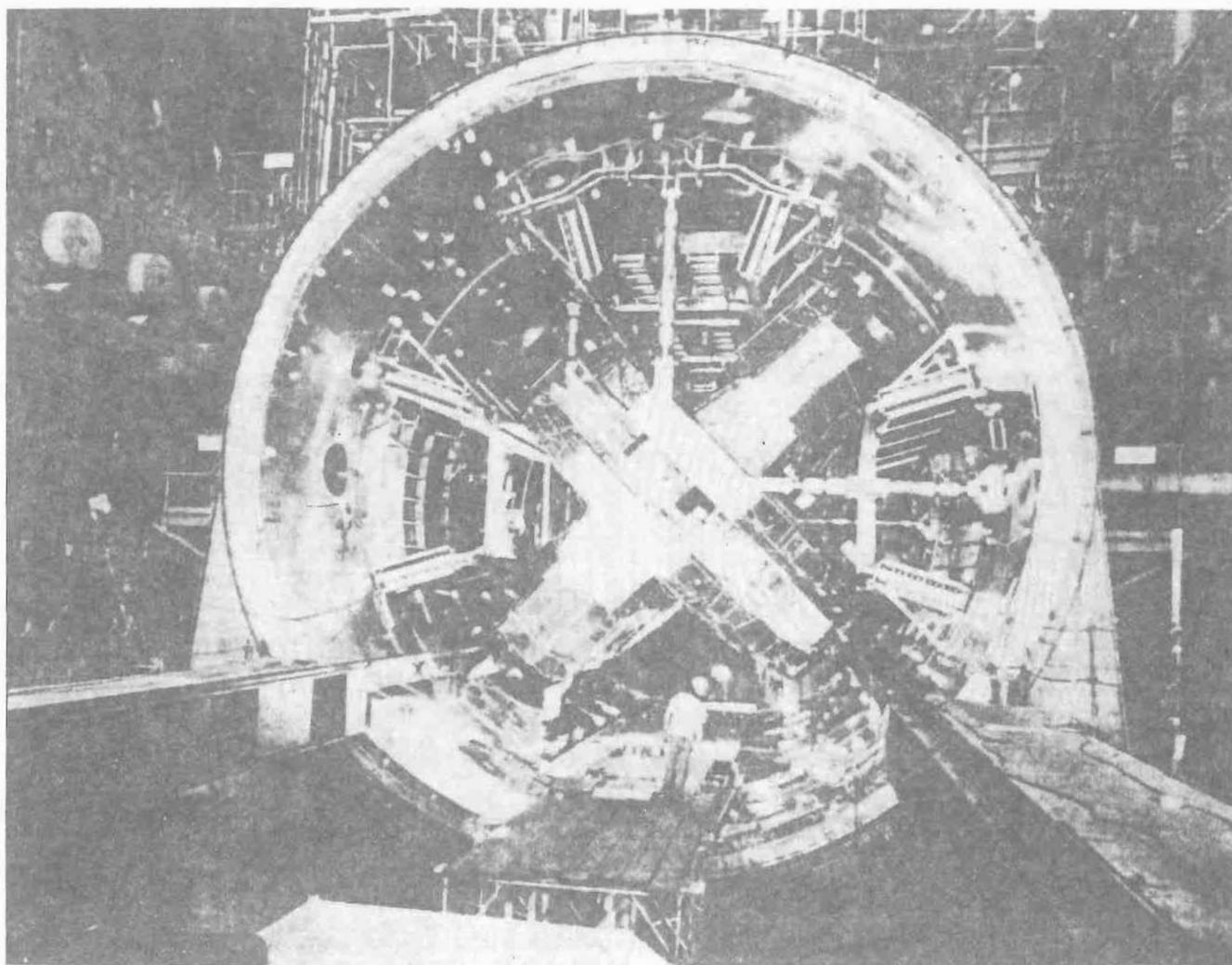


FIGURA 21

LA MACCHINA A SPECCHIO 'MFTF-B' NELLE FASE FINALE
DEL MONTAGGIO

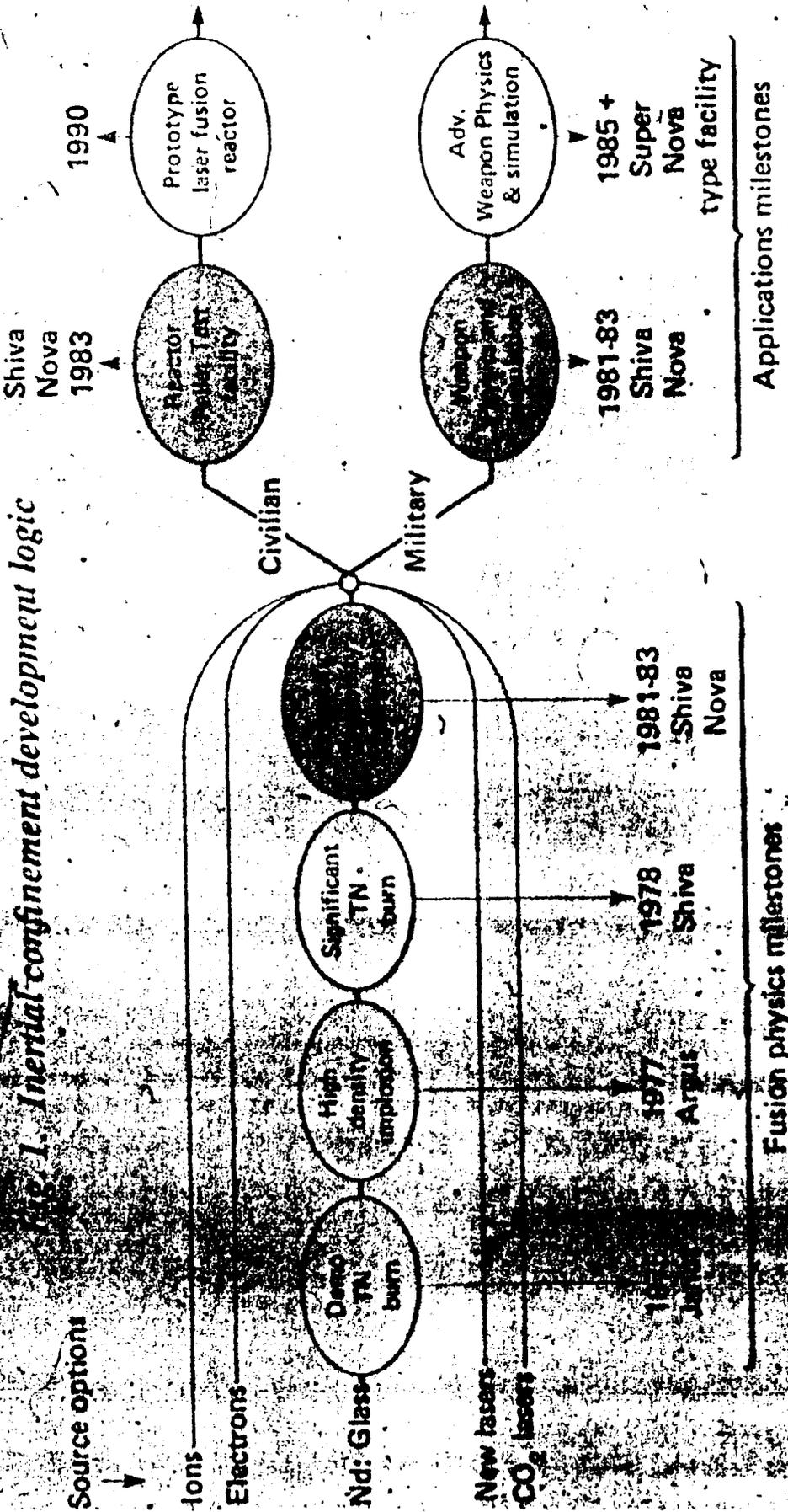
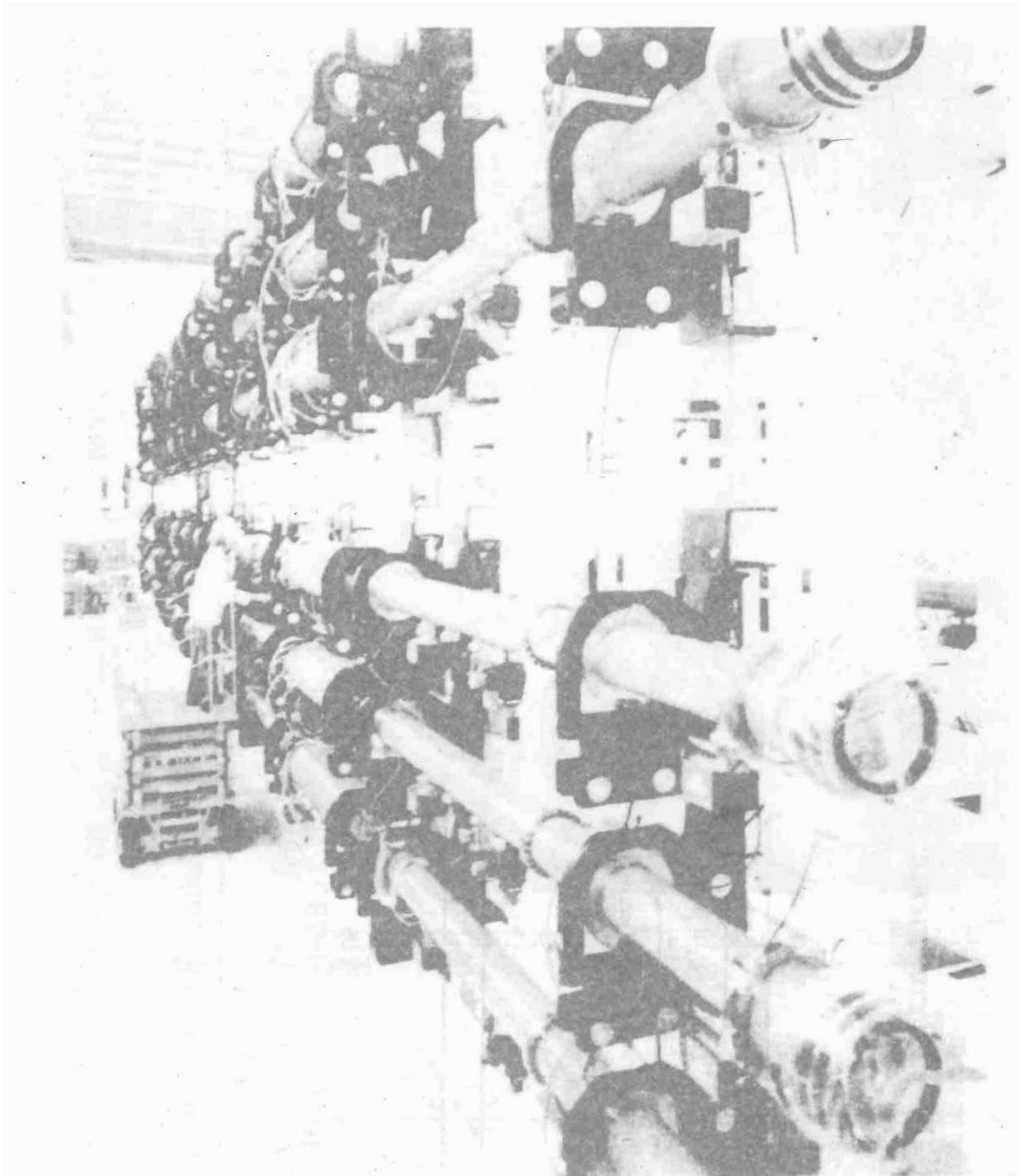


FIGURA 22 LA STRATEGIA DELLA FUSIONE A CONFINAMENTO INERZIALE NEGLI STATI UNITI

**FIGURA 23****LINEE DI LUCE LASER PER LA MACCHINA 'NOVA'
A CONFINAMENTO INERZIALE (LIVERMORE, USA)**

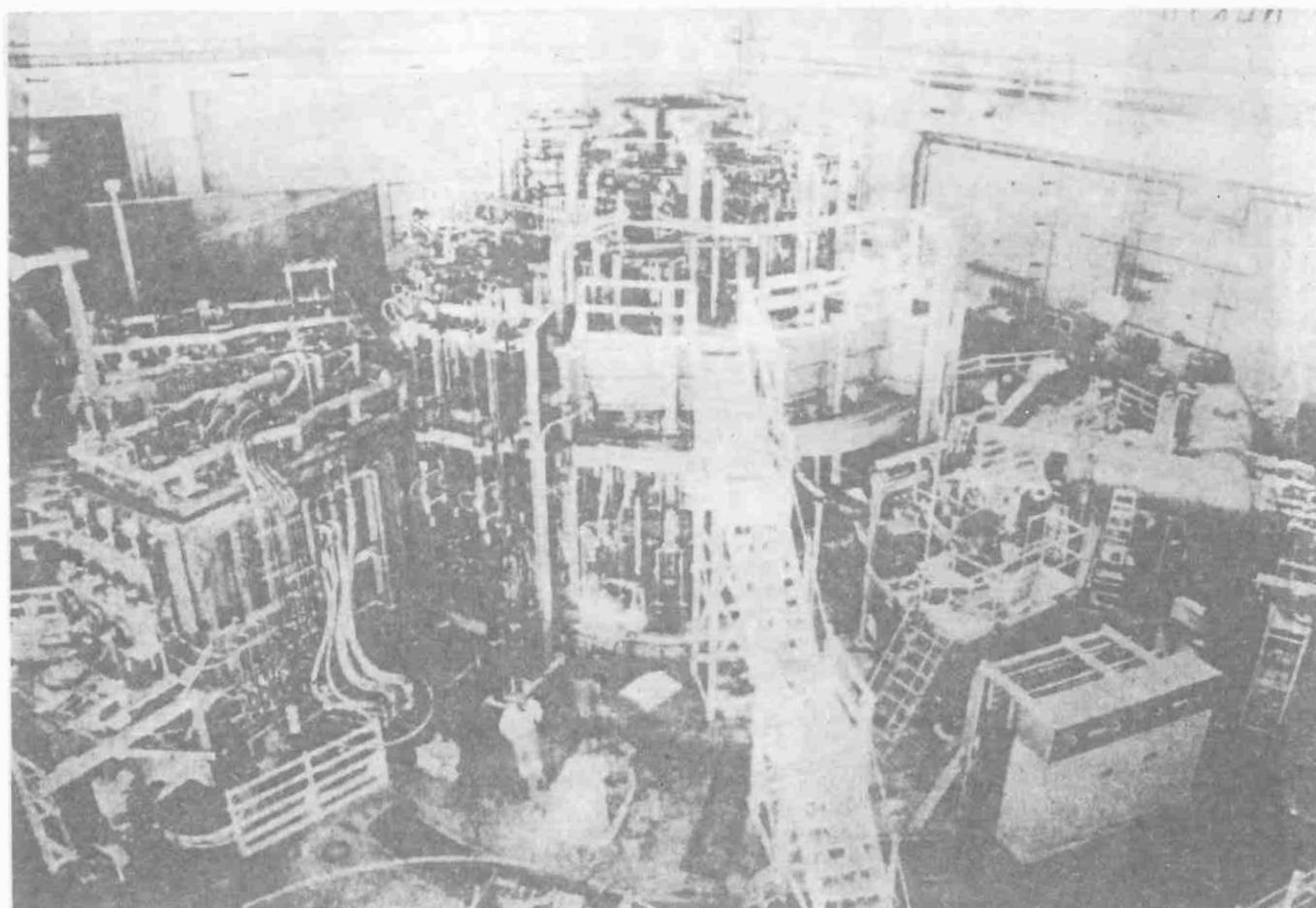


FIGURA 24

IL GRANDE TOKAMAK 'TFTR' (PRINCETON, USA)

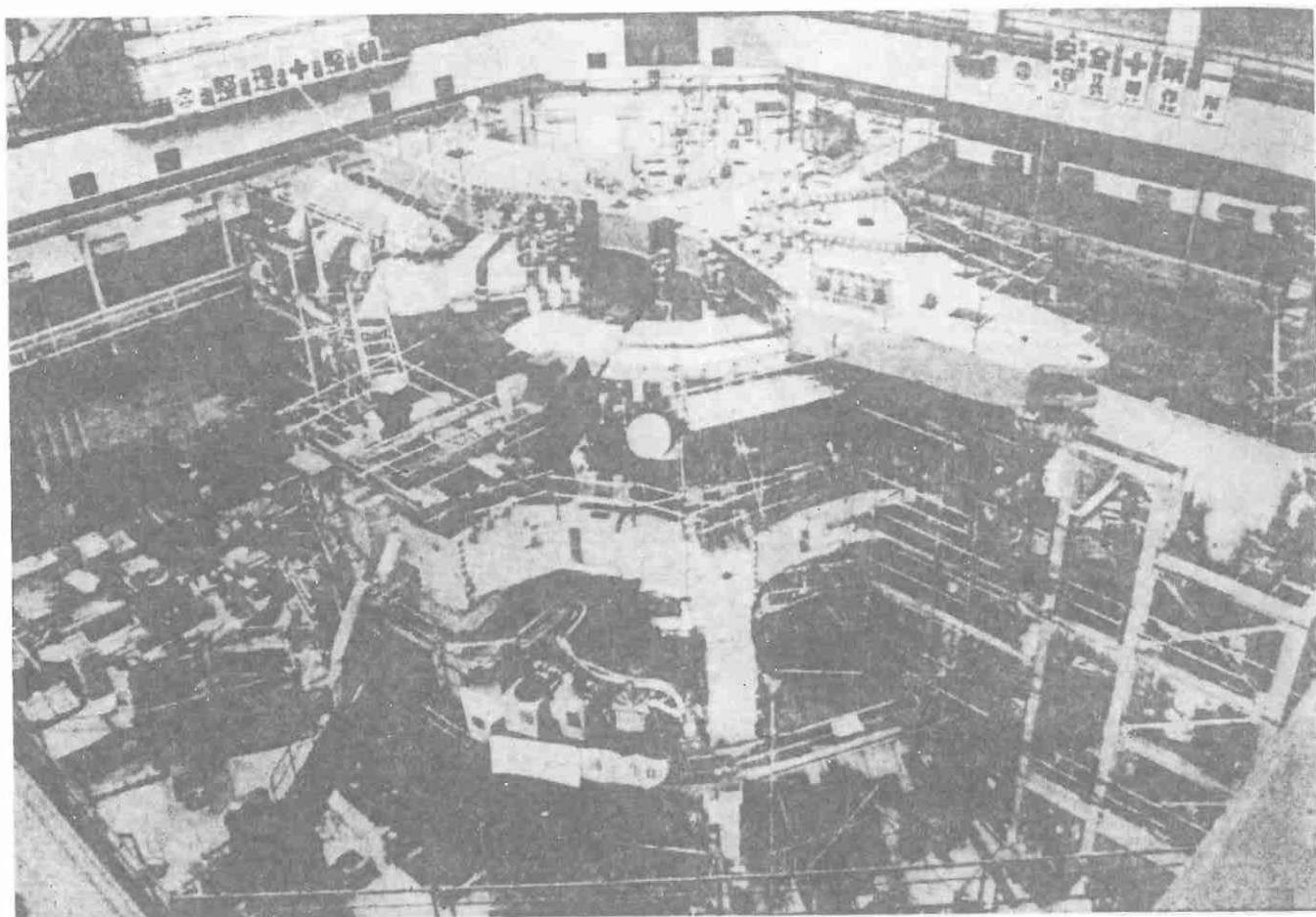


FIGURA 25

IL GRANDE TOKAMAK 'JT-60' (GIAPPONE)

06A0069

MFE/PPPL BUDGET (BO) IN CURRENT DOLLARS

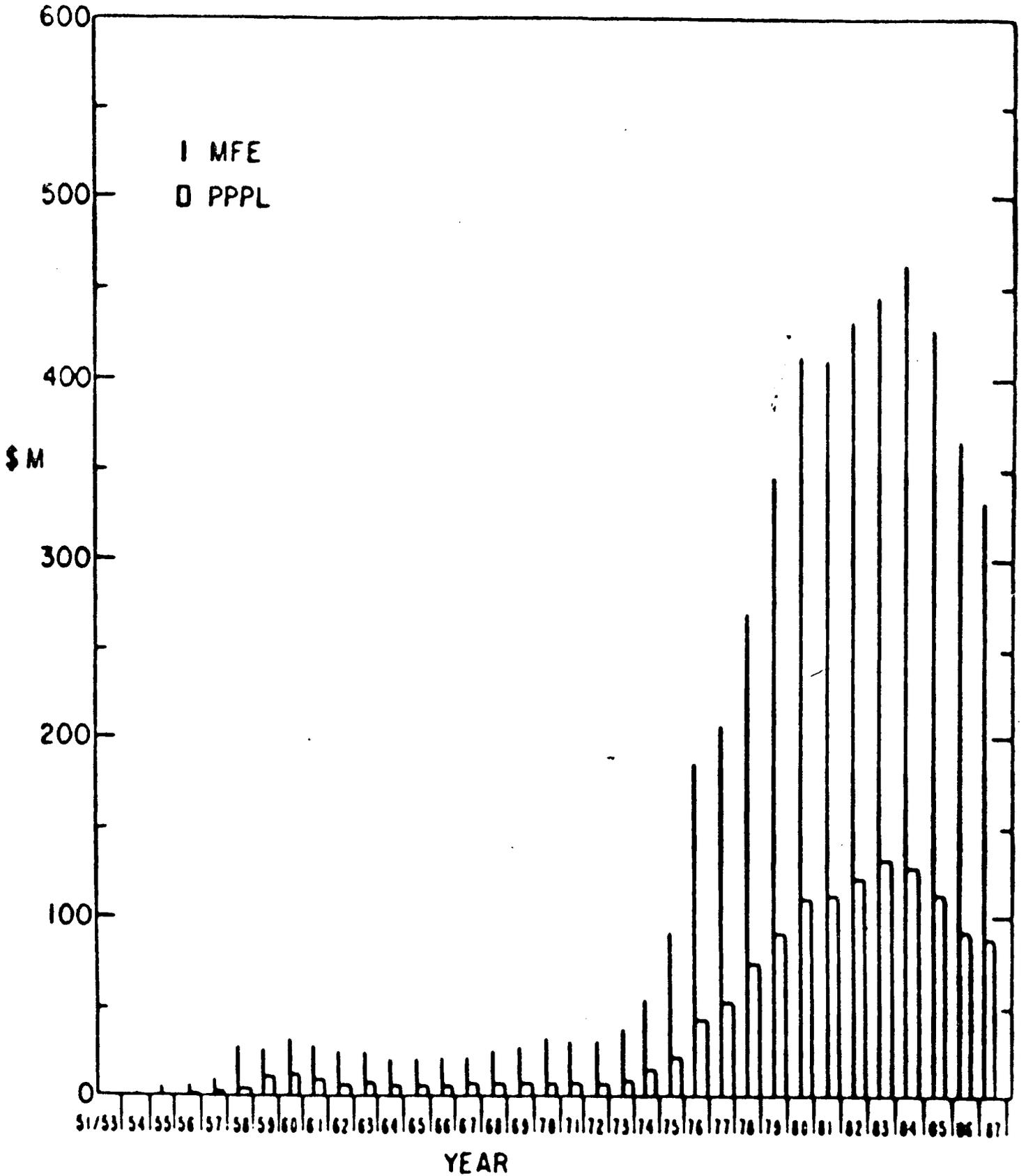


FIGURA 26

ANDAMENTO DEL BILANCIO PER IL CONFINAMENTO
MAGNETICO NEGLI STATI UNITI

06AC

TFTR/CIT INTEGRATED PLAN

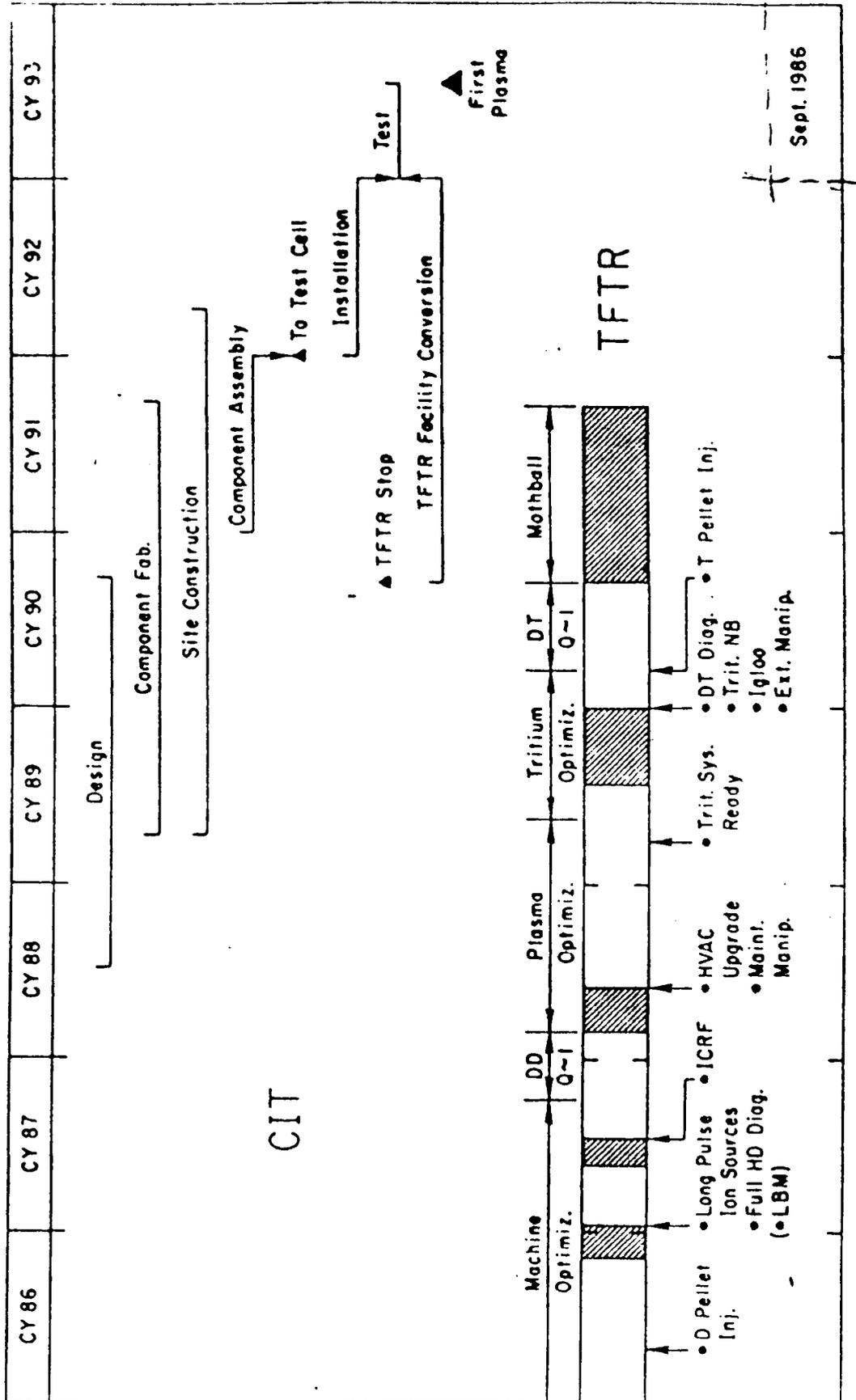


FIGURA 27 PIANO PER LA REALIZZAZIONE DI 'CIT' INTEGRATO NEL PROGRAMMA SPERIMENTALE DI 'TFTR' (PRINCETON, USA)