

INT 159/89

Mars 1989

FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA

Il punto sulla ricerca

P.J. Paris

FUSIONE TERMONUCLEARE CONTRALLATA

Il punto sulla ricerca

P.J. Paris

Centre de Recherches en Physique des Plasmas
Association Euratom - Confédération Suisse
Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne
21, Av. des bains / CH-1007 Lausanne / Switzerland

Tradotto dal francese da Ambrogio Fasoli (CRPP - EPFL)

In corso di pubblicazione su "Rivista Tecnica"

FUSIONE TERMONUCLEARE CONTROLLATA

Il punto sulla ricerca

Nel corso degli ultimi cinque anni, tre grandi installazioni sperimentali di tipo tokamak sono state messe in funzione: JET in Europa, TFTR negli USA e JT 60 in Giappone. Dopo un periodo di assestamento, curate le "malattie infantili", questi esperimenti hanno prodotto dei risultati e delle performances meritevoli di attenzione.

Gli obiettivi raggiunti sono promettenti, anche se non tutti i problemi incontrati hanno trovato soluzione.

Le caratteristiche dei plasmi confinati in queste macchine - densità, temperatura e tempo di confinamento - sono state considerevolmente migliorate.

Per un'introduzione alla fusione termonucleare ed una descrizione del JET (Joint European Torus) rimandiamo i nostri lettori ai numeri 12/82 e 2/83 di "Rivista tecnica".

Si tratta in questo ambito di una ricerca di ampio respiro, che passa da momenti di grande speranza e di successo a grandi periodi di dubbio.

I problemi incontrati non sono risolvibili velocemente, e sono necessari talvolta diversi anni, legati spesso alla costruzione di nuove installazioni sperimentali, per comprenderli definitivamente ed apportare delle soluzioni.

Risolti tali problemi, appaiono peraltro nuove insidie. Non si comprende ancora al cento per cento il mezzo nel quale si tenta di dimostrare la fattibilità scientifica della fusione termonucleare controllata in laboratorio.

Questo mezzo è ciò che si chiama plasma, stato ultimo della materia ad altissima temperatura, in cui gli atomi sono dissociati in ioni ed elettroni.

In laboratorio si tenta di riprodurre un processo fisico analogo a quello che fa brillare le stelle.

Alla fine di questo decennio, o all'inizio del prossimo, sarà possibile raggiungere, in macchine sofisticate dette "tokamaks" (dall'acronimo russo che significa "corrente in una camera magnetica toroidale") le condizioni necessarie alla nucleosintesi degli atomi leggeri (Appendice 1) con un bilancio energetico positivo.

In pratica un gran numero di reazioni di fusione dovrebbe aver luogo affinché l'energia liberata compensi in un primo tempo l'energia investita per creare il processo.

Si tratta, in parole povere, del criterio di Lawson (Appendice 2). Scopo finale: un'energia senza problemi di combustibile; gli isotopi dell'idrogeno, utilizzati come reagenti, esistono infatti in quantità abbondante sul pianeta.

In caso di riuscita del progetto, sarebbe possibile produrre senza problemi 100 miliardi di volte l'energia totale consumata nel mondo nel 1986, ciò che evidentemente è più semplice da dire che da realizzare.

Veniamo ai fatti: è nel gennaio del 1957 che il fisico britannico John D. Lawson formula le condizioni rigorose di bilancio energetico positivo per un reattore termonucleare.

Retrospectiva: un po' di storia.

Inizialmente, nei primi anni '50, tre paesi avevano intrapreso delle ricerche civili e militari per produrre il più presto possibile energia atomica a partire dalla fusione degli isotopi dell'idrogeno: deuterio e trizio.

Dal lato militare, si conosce l'esito: gli Stati Uniti hanno realizzato la bomba H nel 1951, l'Unione sovietica nel '53 e la Gran Bretagna nel '57.

Ma per quanto riguarda l'aspetto civile, ovvero la fusione termonucleare controllata, dopo l'entusiasmo della prima metà degli anni '50 quando si aveva l'impressione di potervi accedere in tempi brevi, lo slancio si è arrestato sulle mille difficoltà incontrate.

Il programma tokamak (Fig. 1) fu varato nel 1955, sotto la direzione di M.A. Leontovich e L.A. Artsimovich, all'Istituto Kurchatov di Mosca.

Il TMP, che era in un certo senso l'antenato del tokamak attuale, aveva già delle dimensioni apprezzabili ($R= 0.8$ m; $a= 0.13$ m e $B_t= 1.5T$). Rispetto ad altri esperimenti, mostrava soprattutto la possibilità di mantenere in uno stato quasi stazionario una scarica in un forte campo magnetico. Ma le scariche contenevano una frazione apprezzabile di impurezze derivanti dalla pareti del "recipiente", e di conseguenza la temperatura del plasma non era molto elevata: $\approx 100'000$ °C. Fu proprio questo difetto a far sì che tale sistema di confinamento non fu immediatamente accettato dai ricercatori.

Delle prestazioni eccezionali

Nel corso della 3^a conferenza internazionale che ebbe luogo a Novosibirsk nel 1968, i Sovietici annunciarono i risultati ottenuti sul tokamak T-3 dell'istituto Kurchatov.

Il plasma vi era stato confinato per un tempo molto più lungo del "tempo critico" cui si mirava fino ad allora.

D'altra parte, gli elettroni avevano raggiunto una temperatura di $10'000'000$ °C e gli ioni di $3'000'000$ °C, e questo durante qualche millesimo di secondo.

La comunità scientifica si mostrò un po' scettica, dal momento che il metodo di misura utilizzato per determinare la temperatura elettronica era quantomeno ambiguo.

Artsimovich, allora, invitò un'équipe di ricercatori britannici del laboratorio di Culham ad andare in URSS con il relativo equipaggiamento, che passava per essere il più avanzato nella misura della temperatura elettronica.

La tecnica impiegata - la diffusione Thompson - mostrò l'anno successivo che i risultati erano ancora migliori di quelli pubblicati dai sovietici.

Questa collaborazione anglo-sovietica fornisce una prova del carattere complementare a livello internazionale delle ricerche in ambito civile, mettendo peraltro in evidenza l'apparizione dell'alta tecnologia in questo campo, oltre ad una nuova tecnica sofisticata: la diagnostica del plasma.

I risultati annunciarono dunque il declino dei cosiddetti "esperimenti chiari".

Nella fusione per confinamento magnetico, a parte i tokamaks, non restavano che gli "stellarators" e le macchine "a specchio magnetico", non privi peraltro di buone qualità, in particolare nel dominio della stabilità.

Sempre nel 1968 furono intrapresi i primi esperimenti di utilizzo del laser come mezzo di produzione di plasmi termonucleari.

Adozione del tokamak

Immediatamente dopo la verifica delle buone prestazioni di T-3, i programmi di costruzione di tokamaks si moltiplicarono.

A Princeton si convertì lo stellarator C in un tokamak chiamato ST; al laboratorio di Oak Ridge (USA) fu costruito ORMAX; a Fontenay-aux-Roses

TFR (Fig. 2); a Culham (Gran Bretagna) CLEO; a Garching (Germania) Pulsator, a Jaeri - Tokai Mura (Giappone) JFT II.

Il Giappone si era lanciato nella corsa in seguito alla conferenza di Ginevra del 1958.

Durante gli anni successivi ci furono dei progressi notevoli; uno dopo l'altro gli esperimenti superarono le performances di T-3.

Nel 1971, nel nuovo Tokamak di Kurchatov, T-4, gli elettroni raggiungevano $20'000'000$ °C e gli ioni $600'000$ °C, e questo per un tempo superiore a 10 millesimi di secondo. I risultati ottenuti su ST a Princeton erano identici.

Sempre a Kurchatov, T-6, costruito con un ridotto rapporto d'aspetto ("aspect ratio" R/a), affrontava già il problema della stabilità ideale adottando una sorta di guscio; sempre in questa installazione è stata studiata l'instabilità detta "di disruption", in cui la scarica diventa talmente instabile che il plasma si libera dalla "gabbia" magnetica e va materialmente ad urtare il toro. Tale violenta instabilità può arrivare a danneggiare le pareti della camera da vuoto.

Un'analisi sistematica del bilancio energetico del plasma (corrente-densità) è stata intrapresa nel periodo 1976-79 a Culham da J. Hugill.

Un altro studio, che dava luogo empiricamente ad una legge di scala, era stato effettuato da Murakami a Oak Ridge nel 1976.

Ma è nel '74 che furono intrapresi tentativi veramente nuovi.

In un tokamak la corrente che fornisce l'energia di riscaldamento delle particelle non è sufficiente una volta che queste hanno raggiunto una certa temperatura (compresa fra 20 e 30 milioni di gradi Celsius).

Infatti, una delle proprietà particolari del plasma risiede nel fatto che ad alta temperatura diventa eccellente conduttore elettrico (20 volte migliore del rame a temperatura ambiente), ed il riscaldamento per effetto Joule perde la sua efficacia.

Questo faceva sì che, a partire da un certo valore di corrente, la temperatura elettronica su TFR non sorpassasse $25'000'000$ °C, il che si verificava anche su ST.

Allora si credeva che il plasma fosse "inquinato" da impurezze provenienti dalle pareti del recipiente, e che queste potessero raggiungere il centro della scarica, raffreddando gli elettroni. Diverse prove furono effettuate su ST, TFR e ORMAK senza poter dimostrare una concentrazione significativamente elevata al centro della scarica.

Il riscaldamento addizionale

Bisognava dunque trovare altri metodi di riscaldamento. Un nuovo tipo di esperimenti ebbe allora inizio: si trattava di cercare il mezzo migliore di riscaldare il plasma fino ai cento milioni di gradi necessari!

Tre diversi schemi di riscaldamento addizionale (Fig. 3) - oltre al riscaldamento associato alla corrente di plasma - sono utilizzati con esiti differenti.

-Il primo consiste nell'iniettare delle particelle neutre estremamente energetiche all'interno del plasma, che può essere riscaldato per collisioni. Perché neutre? Perché occorre penetrare nel campo magnetico che confina il plasma. Delle particelle cariche elettricamente sarebbero deviate e non raggiungerebbero il centro del plasma.

-Il secondo metodo utilizza la proprietà che hanno le onde elettromagnetiche, tramite diverse risonanze, di accoppiarsi al plasma.

L'energia contenuta nelle onde è assorbita dalle particelle del plasma; un po' come in un forno a microonde, in cui gli alimenti sono riscaldati dall'energia che l'onda vi deposita. Secondo il tipo di frequenza utilizzata, tale metodo porta

diversi nomi. Presso il Centro di Ricerche in Fisica dei Plasmi del Politecnico Federale di Losanna (CRPP-EPFL), la ricerca sul tokamak TCA ha condotto al riscaldamento del plasma tramite assorbimento di energia depositata da onde "di Alfvén". L'efficienza di questo metodo di riscaldamento si è mostrata in competizione con altri metodi basati su altri tipi di onde.

-Infine il terzo schema fa intervenire delle proprietà termodinamiche: si tratta della compressione adiabatica. Comprimendo il plasma in un volume più limitato, se ne aumentano ad un tempo densità e temperatura.

Analogamente, se si ottura l'estremità di una pompa di bicicletta e si aziona il meccanismo, si comprime l'aria contenuta nella parte ermetica e si produce del calore. E' ciò che ha dimostrato, nel 1974, il tokamak ATC a Princeton: la densità passava da 10^{19} m^{-3} a 10^{20} m^{-3} e la temperatura degli ioni da $1'000'000 \text{ }^\circ\text{C}$ a $6'000'000 \text{ }^\circ\text{C}$. Questo procedimento, che richiede troppa energia magnetica - costosa - era stato momentaneamente abbandonato in Occidente; l'Unione Sovietica, al contrario, mantenne un programma basato su questo metodo (TUMAN 2A). Un ritorno d'interesse si è manifestato oggi negli Stati Uniti, ove lo si utilizza su TFTR (Fig. 4).

Noi ci soffermeremo sullo sviluppo dei primi due metodi, dal momento che sono questi schemi di riscaldamento addizionale che hanno contraddistinto i progressi ottenuti nel corso di quest'ultimo decennio.

Iniettori di neutri

Gli esperimenti portanti all'iniezione di neutri hanno avuto inizio negli Stati Uniti sul tokamak ORMAK (Oak Ridge). Diversi lavori su CLEO (Gran Bretagna), TFR (Francia) e ATC hanno rapidamente fatto seguito.

Nel 1974, l'équipe di Oak Ridge metteva in evidenza un aumento della temperatura ionica del plasma (con 400 kW di potenza del fascio di neutri, la temperatura passava da $2'000'000 \text{ }^\circ\text{C}$ a $6'000'000 \text{ }^\circ\text{C}$).

L'influenza dell'iniezione dei neutri sul tempo di confinamento dell'energia non poteva allora essere rivelata, data la limitata potenza utilizzata.

Sfortunatamente, più tardi ci si renderà conto che, quale che sia il riscaldamento ausiliario utilizzato, il tempo di confinamento dell'energia contenuta nel plasma viene deteriorato. E' peraltro grazie a questo metodo che saranno ottenute le più alte temperature nei tokamaks. Lo sviluppo degli iniettori di particelle neutre è perciò sempre d'attualità.

Agli inizi degli anni Settanta, si disponeva di fasci la cui energia era dell'ordine di 10 keV, per un tempo molto breve: ~ 0.5 s (potenza massima: ~ 100 kW), mentre oggi vengono prodotti dei fasci di energia superiore a 150 keV per tempi dell'ordine di 30 s ed una potenza di picco degli iniettori multipli non lontana dal valore di 10 MW. Affinchè un fascio di neutri penetri bene all'interno del plasma da fusione, è necessario che l'energia sia molto elevata (da 100 a 200 keV); a questo livello, l'efficienza dell'iniettore di neutri (legata alla neutralizzazione degli ioni) diminuisce rapidamente quando si parte da un fascio iniziale di ioni positivi neutralizzati, ma è maggiore nel caso in cui si neutralizza un fascio di ioni negativi. Gli specialisti in questo campo consacrano i loro sforzi allo sviluppo di tali iniettori.

Le onde elettromagnetiche: riscaldamento e generazione di corrente

L'utilizzo di onde elettromagnetiche atte al riscaldamento specifico delle differenti particelle contenute nel plasma è stato introdotto negli anni Sessanta in Unione Sovietica e negli Stati Uniti sui tokamaks, sugli Stellarators e sulle macchine a specchio magnetico. La comprensione dei meccanismi di

riscaldamento e di penetrazione delle onde nel plasma fornisce ancora, malgrado tutto, soggetti attuali di ricerca.

Uno studio sperimentale sistematico ha mostrato recentemente che praticamente tutte le onde (di ciclotrone ioniche ed elettroniche, di Alfvén, ibride inferiori, ecc.) possiedono delle qualità relative al riscaldamento delle particelle del plasma.

Tuttavia, la loro applicazione è spesso accompagnata da un aumento netto delle impurezze.

Si nota, inoltre, un degrado nel tempo di confinamento dell'energia.

Negli anni Settanta e Ottanta, le onde ioniche ciclotroniche sono state utilizzate su larga scala (TFR, ST, PLT, Alcator C, Uragan 3, T-10, FT2M), ed i risultati ottenuti hanno contribuito alla scelta di tale metodo per gli esperimenti JET (Fig. 5) et JT60 (Fig. 6).

L'onda ibrida inferiore, scelta inizialmente per fornire energia al plasma, è ora impiegata per generare una corrente non induttiva nel plasma.

La prima esperienza di questo tipo è stata realizzata nel 1980 su Versator al Massachusetts Institute of Technology (MIT, USA).

Essa fu seguita nel 1982 da un'altra dimostrazione, sempre al MIT, su Alcator C: con 1 MW di potenza, un'onda a 4.6 GHz aveva generato una corrente di 230 kA nel plasma.

Lo stesso anno, su PLT (Fig. 7), a Princeton, una corrente di 450 kA veniva generata nel plasma con lo stesso metodo; anche a Grenoble le prove su Petula avevano successo. Il metodo ebbe dunque grande diffusione.

Attualmente, il primato è detenuto da JT60 che, nel 1986, ha generato più di 1 MA con 2 MW di potenza.

Un inconveniente di questo metodo è che l'efficienza diminuisce all'aumentare della densità, ed al di là di un valore critico di densità, cessa di funzionare.

Si pensa anche di poter usufruire della generazione di corrente non induttiva per mezzo di onde ciclotroniche elettroniche ad altissima frequenza (>100 GHz), ma finora non si è avuta una dimostrazione sperimentale chiara.

Questo onde possono essere utilizzate anche per riscaldare efficacemente gli elettroni del plasma.

L'accoppiamento delle onde con il plasma è ottimo, ed ha permesso nel 1984 di quasi triplicare la temperatura elettronica nel tokamak T-10 (da 1.4 keV a 3.8 keV con soltanto 0.9 MW).

Sembra, inoltre, che questo sia il metodo in assoluto meno perturbativo.

Tale tecnica può essere impiegata anche nel controllo del profilo della temperatura elettronica, il che dovrebbe influenzare la distribuzione di corrente e la stabilità del plasma.

Attualmente, bisogna sviluppare i tubi di potenza a queste alte frequenze - i "gyrotrons" - per poter impiegare questo metodo nel caso dei grandi tokamaks.

E' il caso a Losanna (CRPP-EPFL), dove un importante progetto di sviluppo di un gyrotron da 120 GHz e da 200 kW è in fase di sperimentazione (Appendice IV). Questo progetto, realizzato in collaborazione con l'industria svizzera (BBC), partecipa allo sforzo europeo di disporre rapidamente di tali sorgenti ad altissima frequenza.

Progressi nel prodotto $n_0\tau_E$

Fra i notevoli progressi ottenuti negli ultimi anni, citiamo in particolare i primati nel valore del parametro $n_0\tau_E$ realizzati su Alcator A e Alcator C (MIT, Stati Uniti).

Nel 1975 e nel 1978, Alcator A aveva ottenuto rispettivamente $n_0\tau_E=1 \times 10^{18} \text{m}^{-3}\text{s}$ e $n_0\tau_E=3 \times 10^{19} \text{m}^{-3}\text{s}$. Nel 1983, Alcator C aveva pure superato il criterio di

breakeven $n_0\tau_E=8\times 10^{19}\text{m}^{-3}\text{s}$. Quest'ultimo risultato era stato acquisito grazie alla ricarica di "combustibile" nel plasma per mezzo di una tecnica sviluppata a Oak Ridge: l'iniezione di "proiettili" di idrogeno condensato ("pellet injection").

Tuttavia, se il tempo di confinamento τ_E e la densità n_0 aumentavano, le temperature ioniche ed elettroniche cadevano bruscamente, per poi riacquistare il loro livello in 15 - 40 msec; la temperatura degli ioni arrivava infine addirittura a sorpassare il valore che aveva prima dell'iniezione.

Ricarica del combustibile durante la scarica

Gli iniettori di proiettili di idrogeno e deuterio condensato sono stati utilizzati per la prima volta nel '77 su Omak a Oak Ridge per rifornire di combustibile un plasma preesistente.

L'impiego di tale procedimento per aumentare la densità del plasma o per "ricaricarlo" di idrogeno era stato proposto nel 1954 da L. Spitzer.

Fino ad allora, si provvedeva iniettando degli "sbuffi" di gas per mezzo di valvole piezoelettriche molto rapide.

Questa tecnica aveva lo svantaggio di alimentare il plasma dal bordo e di raffreddare la regione esterna, modificando così i profili di temperatura e densità.

I proiettili di ghiaccio fortemente accelerati hanno una grande velocità all'entrata del toro, il che permette loro di raggiungere il centro del plasma, ove si desiderano conservare le più alte densità e temperature.

Nel 1977, sferette di ghiaccio di 70 μm di diametro venivano lanciate a 100 m/s; nel 1980-81, la tecnica permetteva d'iniettare delle sfere da 1 a 6 mm di diametro a 1000 m/s; attualmente si raggiungono delle velocità di 2600 m/s, ma in particolare per gli iniettori impiegati sulle grandi installazioni, questo non basta a raggiungere il centro del plasma.

Per JET, si vorrebbe che i proiettili raggiungessero velocità comprese fra 5000 m/s e 10000 m/s, dunque delle accelerazioni dell'ordine di 10^7 m s^{-2} (10^6 g !).

Il Centro di studi nucleari di Grenoble si è unito al laboratorio di Oak Ridge nello sviluppo di una tale tecnica: queste "pistole automatiche a tamburo" che sono i "pellet injectors" dovranno essere in grado di fornire diversi proiettili per secondo per mantenere costante la densità al centro del plasma.

Aumento della temperatura: la situazione agli inizi degli anni '80

Aggiungiamo a questi exploits tecnologici il fatto che le temperature ioniche raggiunte sui tokamaks PLT et PDX nel 1980 erano dell'ordine di 80'000'000 °C, con densità medie fra $3\times 10^{19}\text{m}^{-3}$ e $4\times 10^{19}\text{m}^{-3}$ (il riscaldamento addizionale era costituito dall'introduzione di deuterio neutro energetico (40 keV)).

I regimi di confinamento

Un altro effetto, non previsto dalla teoria, è stato scoperto nel febbraio 1982 sull'esperimento ASDEX (Garching, Germania).

Questa esperienza presenta la particolarità di una singolarità magnetica legata al suo diaframma ("divertore") magnetico, sistema che è stato oggetto di studio su altri tokamaks: Doublet III (Stati Uniti), DITE (Gran Bretagna), PDX (USA), eccetera.

Nel corso di una scarica (con iniezione di neutri), si è notato che al di là di un certo valore minimo della potenza di riscaldamento, esistevano due regimi differenti per quanto riguarda la qualità del confinamento: l (come in tutti i tokamaks a limiter-diaframma metallico, (Fig. 8)), che riflette una cattiva qualità del confinamento, ed h (alta qualità di confinamento).

Per un certo periodo non si sapeva molto su come agire sulla scelta fatta dal plasma a questa biforcazione ($l-h$). Sembra che, recentemente, si sia in grado di ottenere la qualità h sui tokamak a divertore magnetico; è quello che hanno dimostrato DIII e PDX.

Grazie a questo metodo, pare che la temperatura elettronica al bordo del plasma diminuisca molto rapidamente e che le instabilità localizzate alla superficie siano ridotte. In breve, l'isolamento termico nella regione esterna del plasma è migliore.

Ultimamente, JET (Fig. 9) ha intrapreso la modifica della configurazione magnetica all'interno della camera da vuoto, ed è così che nel 1986 sono state ottenute le prime scariche in modo h , caratterizzate da un minor degrado del tempo di confinamento dell'energia in seguito all'applicazione del riscaldamento ausiliario.

Sembra poi che alcuni metodi di riscaldamento per mezzo di onde, per i quali si sceglie la zona di risonanza all'interno o alla periferia del plasma, permettano anch'essi di accedere a regimi di confinamento "quasi h ".

Le onde di Alfvén, studiate sul tokamak TCA di Losanna come riscaldamento addizionale, potrebbero servire anche a questo scopo.

Evoluzione di questi ultimi anni.

Conferenza nei paesi del Sol Levante; l'estate "bollente" di Princeton, l'autunno caldo di JET (1986)

I risultati ottenuti su JET nel corso del 1986 meritano di essere menzionati. Nella fase ohmica la massima corrente di plasma è stata di 5.1 MA, ma è con solamente $I_p = 3\text{MA}$ ($B_t = 3.4\text{ T}$) che il tempo di confinamento dell'energia τ_E ha raggiunto il valore massimo di 0.8 s (record mondiale assoluto).

I valori delle temperature ioniche ed elettroniche erano allora di 3 keV* e di 4 keV, per una densità media di $4 \times 10^{19} \text{m}^{-3}$. Grazie al riscaldamento addizionale, si sono potute migliorare le temperature. Per il riscaldamento ad alta frequenza (HF) - onde ioniche ciclotroniche - tre antenne sono state installate a partire dagli inizi del 1986.

Le frequenze utilizzate, da 25 a 50 MHz, permettono di riscaldare il plasma di Deuterio tramite le risonanze delle specie minoritarie H^+ e H^{3++} , aggiunte in proporzioni limitate ($\approx 10\%$) al plasma formato.

In questo modo, con una potenza accoppiata di 7 MW, la temperatura di picco degli elettroni al centro della scarica era di 7.5 keV.

Il secondo metodo utilizzato per il riscaldamento ausiliario è l'iniezione di particelle neutre energetiche.

Un iniettore a sorgenti multiple, reso operativo all'inizio del 1986, ha permesso di introdurre fino a 6 MW di atomi H^0 a 80 keV, o ancora 9 MW di atomi D^0 a 80 keV*.

Nel caso di questo metodo, la temperatura massima raggiungibile nel plasma dipende dalla densità del plasma.

In condizioni di densità da media a alta, gli ioni sono stati scaldati fino a 6.5 keV e gli elettroni fino a 4.8 keV (con 5.5 MW di fasci di neutri).

In scariche a bassa densità, sono state raggiunte temperature ioniche massime di 14 keV.

Questi risultati arrivano praticamente a coincidere con quelli ottenuti su TFTR (Princeton) nell'estate 1986.

* 1 keV \approx 11'000'000 °C

Alcune scariche nel luglio '86 avevano prodotto temperature ioniche di 20 keV in plasmi a bassa densità, con un valore di $n\tau_E$ di $10^{19} \text{m}^{-3}\text{s}$.

Questi esperimenti sono stati realizzati con fasci di Deuterio atomico, in un plasma molto tenue, il che ha comportato una "produzione" di plasma da 20 keV da parte degli ioni decelerati provenienti unicamente dal fascio stesso.

A queste temperature, avendo utilizzato scariche D-T (Deuterio-Trizio), la potenza ottenuta dal plasma sarebbe stata uguale ad un quarto di quella fornita.

In condizioni differenti, TFTR aveva raggiunto agli inizi dell'86 un valore record di $n\tau_E$ relativo al breakeven; scariche in cui gli ioni possedevano 1.2 keV avevano mostrato un $n\tau_E \cong 1.5 \times 10^{20} \text{m}^{-3}\text{s}$, superando, cioè, la soglia del criterio di Lawson (Fig. 10).

Alcuni elementi ci permettono di congetturare che un' "autocorrente" creata dallo stesso plasma ("bootstrap current"), dovuta apparentemente a particelle veloci intrappolate all'interno di particolari orbite, era stata generata.

Previsto dalla teoria, questo effetto permetterebbe di risparmiare, in termini energetici, sul trasformatore ohmico.

Infine, due risultati che potrebbero avere degli effetti positivi sulle ricerche future sono stati acquisiti sull'esperimento JT-60 in Giappone.

Da una parte, una corrente di $\approx 1.7 \text{ MA}$ è stata generata con metodi non induttivi, utilizzando la frequenza ibrida inferiore (2GHz - 2 MW); dall'altra, l'impiego di un "limiter" magnetico (divertore) ha permesso di ridurre la potenza irraggiata dal plasma di un fattore 10, segno che le impurezze prodotte alla periferia del plasma vi penetrano in minor misura e che, in più, sono in gran parte eliminate direttamente dal divertore.

Il punto attuale: 1988

All'inizio del 1987, alcune pause dovute all'installazione di nuove sorgenti di riscaldamento addizionale erano state previste sui due grandi esperimenti, cosa che in una certa misura ha rallentato le campagne sperimentali.

In particolare, TFTR ha ricevuto dei nuovi iniettori di neutri (sviluppati al Lawrence Berkeley Laboratory) la cui potenza prodotta è stata dell'ordine di 25 MW durante 2 s (fasci di D^0 a 120 keV). Inoltre, sono stati predisposti 4 MW di riscaldamento ICRH. Menzioniamo che, su TFTR, sono state mantenute le esperienze utilizzando 4 iniettori di neutri.

E' così che sono stati stabiliti dei limiti di funzionamento nel caso dei "supershots" (bassa densità, grande potenza delle particelle neutre): si possono mantenere i "supershots", per una corrente di plasma costante, fino ad un valore fissato della potenza di iniezione di neutri.

In questo modo è stato possibile ottenere temperature $T_i = 30 \text{ keV}$.

Su JET, si è proceduto all'installazione di un secondo iniettore, che permette di aumentare la potenza disponibile fino a 20 MW (per D^0 a 80 keV). Nel 1988, la potenza RF è stata progressivamente elevata ad un totale di 32 MW durante 20s. La corrente di plasma è stata portata a 7 MA nel corso dell'estate '88 (in una scarica con limiter meccanico).

Si prevede inoltre di poter accedere ad una corrente di 4 MA con un limiter magnetico (punto X: divertore magnetico singolo o doppio).

E' stato infine pianificato di generare corrente tramite l'onda ibrida inferiore, come su JT-60.

Tutto questo con lo scopo di ottenere un prodotto $n_i T_i \tau_E^{**}$ significativo per realizzare potenza in modo conveniente.

Il miglior valore raggiunto da JET è fino ad oggi di $n_i T_i \tau_E \cong 3 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \text{ keV s}$, che deve essere confrontato con $7 \times 10^{20} \text{m}^{-3} \text{ keV s}$, necessario ad ottenere una frazione importante di riscaldamento dalle particelle α (Elio) (condizione di "breakeven").

Questo valore, ancora, può essere comparato a $3 \times 10^{21} \text{m}^{-3} \text{ keV s}$, che dovrebbe permettere a JET di raggiungere l'autosostentamento (grazie alle particelle α) del plasma termonucleare senza apporto di energia esterna (condizione di ignizione). Altissime temperature sono state ottenute anche su JT-60, con 20MW di iniezione di neutri; T_i ha raggiunto gli 11 keV (in scariche con limiter) ed i 6 keV (con divertore magnetico).

Grandi lavori sono previsti su JT-60, in particolare la sostituzione della camera da vuoto: il limiter magnetico laterale non era convenientemente disposto (la posizione ideale sembra essere nella parte alta o in basso nella camera da vuoto).

Nello stesso tempo, è previsto l'aumento della corrente di plasma fino a 7MA (scarica con limiter) e 6 MA (divertore magnetico); ciò rimanderà al 1990 la ripresa delle attività sperimentali.

Infine, diversi risultati lasciano pensare che si avranno presto delle spiegazioni relativamente ai modi di buon confinamento del plasma e al minimo degrado del tempo di confinamento.

Effettivamente, su JFT 2M è stata mostrata l'esistenza di modi h nell'ambito di scariche che utilizzavano dei limiters disposti nella zona di forte campo magnetico - configurazione i cui risultati sono comparabili con quelli di scariche prodotte, sullo stesso esperimento, con un divertore magnetico singolo.

Su ASDEX e Doublet IIID, esperimenti recenti hanno annunciato la conservazione del tempo di confinamento τ_E in modo di funzionamento h , benchè la potenza totale impiegata (ohmica ed iniezione di neutri) fosse di parecchi megawatts.

Prospettive

In funzione dei risultati che otterranno JET e TFTR, una tappa cruciale si giocherà negli anni 1991-1992 nell'utilizzazione di scariche costituite da una miscela di deuterio e trizio.

Diversamente andrà per JT-60, ove questa fase di dimostrazione non è prevista (Fig. 11).

A partire da oggi, nuovi progetti sono in corso di elaborazione: CIT negli Stati Uniti, NET in Europa, e FER, in Giappone.

Questi esperimenti dovranno sopportare dei plasmi termonucleari di lunga durata (da 1 a diverse decine di minuti), senza peraltro concepire il recupero di energia come scopo prioritario.

Sarà allora possibile individuare i nuovi soggetti di ricerche, fisiche e tecnologiche.

Al momento degli incontri al vertice, i grandi paesi industrializzati hanno sottolineato che lo sforzo di cooperazione internazionale sarà rinnovato e che alcuni programmi mondiali - come, in passato, quello di INTOR - dovranno essere rilanciati.

** Si rappresenta sovente il prodotto $n_i T_i \tau_E$ invece di $n \tau_E$ perché è più esplicitamente legato al contenuto energetico del criterio di Lawson.

Come diretta conseguenza di questa politica, i negoziati recenti (ottobre 1987) fra la Comunità Europea, il Giappone, l'Unione Sovietica e gli Stati Uniti hanno condotto alla creazione del progetto ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).

Il sito che dovrebbe ospitare i 40 ricercatori del programma è stato scelto per essere vicino all'équipe europea responsabile del progetto NET a Garching (presso Monaco nella Repubblica Federale Tedesca).

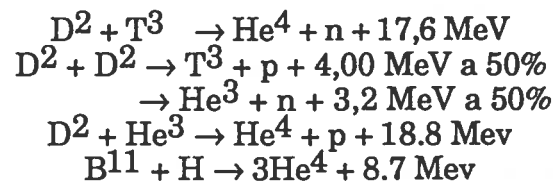
Questo programma conduce allo sviluppo, per la fine del 1990, di un progetto di reattore termonucleare sperimentale, in modo da dotare le quattro protagoniste di un esperimento realizzabile nell'ambito dei loro singoli programmi, oppure all'interno di un programma più vasto di collaborazione internazionale.

Nel frattempo nasceranno dei progetti utilizzando magneti super-conduttori, come Tore Supra a Cadarache, in Francia (Fig. 12), e T-15 (Kurchatov, URSS), i quali apporteranno nuove nozioni riguardo alla costruzione dei tokamaks, abordando un argomento tecnologico estremamente importante.

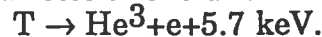
Tore Supra è stato messo in opera nell'aprile 1988; i magneti superconduttori in NbTi saranno raffreddati con Elio superfluido a 1.8 °K a pressione atmosferica, secondo una concezione assolutamente nuova.

Per quanto riguarda T-15, la sua installazione è prevista per la fine dell'88 o l'inizio dell'89; i ritardi sono dovuti fra l'altro alla difficoltà della fabbricazione delle bobine superconduttrici in Nb₃Sn.

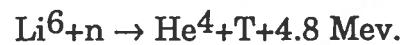
E' probabile che con lo sviluppo rapido della tecnologia dei super-conduttori a temperature più elevate, le macchine dette a basso β (rapporto fra l'energia contenuta nel plasma e l'energia magnetica) vengano comunemente accettate. Bisogna peraltro rimanere molto prudenti a questo riguardo, dal momento che fra la fabbricazione di piccoli campioni superconduttori e la realizzazione di grandi sistemi di bobine, rimane da compiere un passo gigantesco.

*Appendice I*Le principali reazioni di fusione

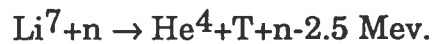
Il trizio è un elemento radioattivo il cui tempo di dimezzamento è di 12,3 anni. E' un emettitore beta, che permette anche di ottenere l'isotopo He³,



Il trizio è a sua volta ottenuto a partire da reazioni di fissione del litio. L'isotopo Li⁶ dà luogo ad una reazione esotermica la quale, nel caso di rigenerazione del trizio nel "mantello" del reattore, permetterebbe di aumentare l'energia recuperata,



L'isotopo Li⁷ genera una reazione endotermica in cui il neutrone secondario prodotto è dotato di energia sufficiente ad aumentare il rapporto di rigenerazione del trizio,



Il Li⁶ costituisce il 7,4% del litio naturale. Anche se fosse necessaria una frazione superiore, l'arricchimento sarebbe comunque poco costoso.

Se la reazione D-T sembra attualmente quella più facilmente realizzabile, le seguenti reazioni sono futuribili, benché necessitino di temperature più elevate:

- D-D, per la quale le riserve di combustibile sono maggiori;
- D-He³, in cui l'He³ inesistente allo stato naturale può essere prodotto tramite la disintegrazione del trizio, o la reazione D-D;
- H-Be¹¹, che non produce neutroni.

Appendice II

Produzione dell'energia da fusione:

Breakeven, criterio di Lawson e condizioni di ignizione

L'espressione delle sezioni efficaci delle reazioni di fusione indica una probabilità massima quando le temperature dei nuclei sono molto elevate. L'agitazione termica dei nuclei è allora tale che questi si scindono e formano una miscela di ioni ed elettroni, cioè un plasma, il quale ha la proprietà di interagire con i campi elettrici e magnetici. Tale proprietà è sfruttata nella realizzazione della fusione magnetica (lenta).

Non essendo evidentemente possibile mantenere un plasma ad una temperatura di cento milioni di gradi in contatto con una parete materiale, occorre contenerlo ed isolarlo termicamente: è il problema dell'isolamento o del confinamento dell'energia.

La qualità di tale isolamento può essere confrontata, ad esempio, con quella di un thermos: più a lungo il liquido contenuto nel thermos rimarrà alla sua temperatura iniziale, migliore sarà l'efficienza del suo isolamento.

Inoltre, poiché le particelle devono essere mantenute a queste alte temperature, bisogna compensare le perdite dovute all'irraggiamento e alla convezione.

In termini semplici, per un plasma contenente soltanto i combustibili deuterio e trizio (senza considerare dunque le impurezze), si possono riassumere le condizioni necessarie per l'energia da fusione in tre forme.

L'obiettivo iniziale più evidente è che l'energia prodotta dalle reazioni di fusione sia almeno uguale a quella investita. Questa formulazione conduce alla prima relazione di breakeven: è necessario un valore $n_0\tau_e$ di $7 \times 10^{19} \text{ m}^{-3}\text{s}$ per una miscela D-T (50%-50%) a una temperatura di 100'000'000 °C.

Una seconda relazione, nota con l'appellativo di criterio di Lawson, tiene conto delle condizioni di operazione di un reattore a fusione (Fig. 13). John D. Lawson fu il primo ad individuare l'importanza del confinamento energetico del plasma, tradotto nel valore del prodotto $n_0\tau_e$. Egli prevede, per mantenere una miscela D-T a 100'000'000 °C, di recuperare una parte dell'energia prodotta dalle reazioni di fusione, di convertirla ($\eta=0.33$), ed infine di restituirla al plasma per compensarne tutte le perdite, in particolare quelle dovute all'irraggiamento di "brehmstrahlung" (frenamento) delle particelle ad alta energia.

La relazione è allora più difficile da realizzare della prima: è necessario che $n_0\tau_e \approx 1.4 \times 10^{20} \text{ m}^{-3}\text{s}$.

Da ultimo, esiste una terza condizione ancora più severa affinché un plasma termonucleare continui a "bruciare" senza apporto di energia dall'esterno: la condizione di ignizione (autosostentamento).

Questa sottintende che l'energia delle particelle α (elio) generate dalle reazioni di fusione compensi tutte le perdite e contribuisca al mantenimento delle condizioni necessarie alle reazioni stesse.

Questo criterio è il più difficile da soddisfare: $n_0\tau_e \approx 2 \times 10^{20}$ particelle (a 100 milioni di gradi) per m^3 per s.

Tali criteri devono essere riconsiderati nel caso reale di un plasma contenente delle impurezze; l'emissione della radiazione di frenamento diviene in questo caso molto elevata e la soglia di convenienza energetica delle reazioni è riallontanata.

Anche se le impurezze rappresentassero soltanto una frazione compresa fra lo 0.1 ed il 2%, secondo la natura degli atomi costituenti il plasma, tale soglia non potrebbe essere raggiunta.

Appendice III

Un nuovo tokamak in Svizzera: TCV, il tokamak a configurazione variabile.

Il Centro di Ricerche in Fisica dei Plasmi (CRPP) è divenuto esperto, nel corso degli ultimi anni, nel funzionamento e nell'utilizzo dei tokamaks, intesi come installazioni di ricerca votate al dominio della fusione termonucleare.

Il tokamak TCA (Fig. 14), costruito per studiare il riscaldamento addizionale (tramite onde di Alfvén) rispetto a quello prodotto dalla corrente circolante nella scarica toroidale, è stato reso operativo nel 1980. I risultati ottenuti sono comparabili a quelli di altri metodi di riscaldamento ad alta frequenza.

Ricordiamo che è necessario utilizzare un metodo complementare del riscaldamento ohmico per portare le particelle del plasma ai cento milioni di gradi necessari ad ottenere un numero sufficiente di reazioni di fusione. La ragione è che il plasma ad alte temperature diviene un ottimo conduttore elettrico e l'effetto Joule perde tutta la sua efficacia.

Il gruppo teorico del CRPP si è specializzato fra l'altro nello studio dei problemi di stabilità e di equilibrio di un plasma in un tokamak. È stata scoperta, introducendo nei programmi numerici le caratteristiche ed i risultati di diverse installazioni mondiali, una legge di scala semi-empirica che permette di conoscere la pressione massima di un plasma confinato in una configurazione tokamak.

Forte di queste esperienze e degli studi intrapresi in questi ultimi anni riguardo ai progetti INTOR e NET, previsti nella tappa "post-JET", il CRPP ha deciso di affrontare un certo numero di problemi importanti, che rientrano nelle sue competenze e che dovranno essere risolti prima della costruzione di un progetto credibile di reattore (di tipo tokamak).

Con i mezzi attuali di realizzazione del campo magnetico di un tokamak, il limite di pressione del plasma è troppo basso per assicurare che questo genere di installazione possa servire da modello ad un reattore energeticamente vantaggioso.

In base alle conoscenze finora acquisite, due strade dovrebbero permettere di aumentare questo limite: raggiungere la seconda regione di stabilità, la cui esistenza è annunciata dai teorici, ma che non è stata ancora trovata sperimentalmente, oppure aumentare la corrente massima della scarica.

Le leggi di scala empiriche conosciute indicano che tale aumento di corrente è possibile allungando la sezione del plasma lungo l'asse del toro; è la via scelta nel progetto di tokamak a configurazione variabile TCV.

TCV (Fig. 15) appare come un tokamak con camera di scarica toroidale a sezione rettangolare, il cui raggio medio è 87 cm, la larghezza 56 cm e l'altezza 154 cm. La camera è circondata da un magnete smontabile composto da 16 sezioni di 6 spire ciascuna, il quale produce un campo magnetico toroidale di 1.5 Tesla sul raggio medio del toro. Le 16 bobine possono essere alimentate separatamente e ripartite sulle facce esterna ed interna della camera da vuoto, con lo scopo di creare dei campi magnetici atti a definire la geometria del plasma ed a mantenerne l'equilibrio.

Una grande varietà di forme della sezione del plasma può essere prodotta e mantenuta nella camera per mezzo di questo insieme di bobine. Le forme variano da quella di una pista di ippodromo ("race track") a quelle di una D o di un fagiolo, fino a strutture ancora più esotiche e complicate (una S, un otto,...). L'elongazione di tutte queste configurazioni può essere variata in maniera continua a partire da una sezione circolare, fino al punto in cui tutto il volume utile della camera da vuoto viene ad essere occupato.

La sperimentazione su plasmi di grande elongazione ci farà senza dubbio scoprire una fisica molto più ricca di quella annunciata da una semplice estrapolazione delle leggi di scala conosciute.

Appendice IV

Sviluppo di una sorgente di onde elettromagnetiche ad altissima frequenza, il "gyrotron".

Fra i metodi di riscaldamento del plasma, l'assorbimento da parte degli elettroni dell'energia di un'onda elettromagnetica alla frequenza ciclotronica elettronica appare al momento attuale come uno dei metodi più efficaci. Se nel passato questo metodo di riscaldamento non è stato esplorato in maniera approfondita, è stato essenzialmente per la mancanza sia di una sorgente alla frequenza adatta (da 60 a 150 GHz), sia di potenze sufficienti (da 200 kW a diversi megawatts).

Ecco perché i principali paesi ed organismi internazionali impegnati nel programma di fusione termonucleare hanno deciso di operare uno sforzo importante nello sviluppo di queste nuove sorgenti, denominate "gyrotrons".

In un oscillatore a microonde di tipo tradizionale la frequenza dell'onda è determinata dalle dimensioni del risonatore. All'aumentare della frequenza, ed alla conseguente diminuzione della lunghezza d'onda, sorgono numerosi problemi tecnici. I risonatori sono allora di dimensioni molto limitate. Perciò, a causa delle perdite ohmiche sulle pareti, è impossibile raggiungere alte densità di energia nel risonatore, e di conseguenza elevate potenze di uscita.

La situazione è diversa in un gyrotron, in cui la frequenza dell'onda non dipende dalle dimensioni del risonatore, ma dall'intensità del campo magnetico che guida gli elettroni relativistici la cui energia è convertita in onde elettromagnetiche. Il risonatore può dunque avere una taglia maggiore, e si possono ottenere notevoli potenze d'uscita.

Si possono trovare sul mercato gyrotrons a 70 GHz con una potenza continua di 200 kW, ma le macchine per la fusione richiedono frequenze di 120-150 GHz, con potenze dell'ordine del megawatt.

A questo scopo sono necessari numerosi sviluppi sia fisici sia tecnologici; il miglior risultato al momento attuale è stato ottenuto al Naval Research Laboratory (Stati Uniti) alla frequenza di 110 GHz, con una potenza di 80 kW durante 1 microsecondo.

Integrato nel programma Euratom, il CRPP, in collaborazione con il laboratorio di elettromagnetismo ed acustica (LEMA) dell'EPFL e la divisione tubi elettronici EKR della società ABB (Baden), ha intrapreso lo sviluppo di un gyrotron ad alta frequenza (120-150 GHz, $\lambda=2.5$ mm), che utilizza un concetto analogo a quello del laser (Fig. 16).

In questo approccio, l'interazione fra il fascio di elettroni relativistici e l'onda elettromagnetica, nel corso della quale l'energia del fascio di elettroni è ceduta all'onda, ha luogo in un risonatore quasi ottico formato da due specchi.

Questo sistema presenta sicuri vantaggi ad alta frequenza, allorché le lunghezze d'onda divengono molto piccole e valgono i concetti utilizzati in ottica, d'onde la denominazione di "quasi-ottico".

Schematicamente, il gyrotron si compone di tre elementi principali: un cannone a elettroni relativistici, un risonatore quasi-ottico, e le bobine superconduttrici per la generazione del campo magnetico. Il cannone a elettroni produce un fascio anulare di ridottissime dimensioni (diametro 4 mm, spessore dell'anello 0.2 mm); l'energia trasportata dal fascio è di 700 kW. L'intensità del campo magnetico, il cui profilo è necessariamente ben determinato, è di circa 50 kG.

In questo modo il fascio di elettroni è direttamente guidato fino al risonatore, formato da due specchi, ove cede una frazione (fino al 40%) della sua energia

all'onda elettromagnetica. Il fascio è poi deviato su pareti raffreddate all'estremità della camera.

Fra il 1985 ed il 1986 un importante sforzo teorico e sperimentale è stato compiuto nel campo dei risuonatori quasi-ottici. Le perdite per diffrazione e l'accoppiamento dell'energia all'esterno del risuonatore sono stati studiati per mezzo di simulazioni numeriche che hanno condotto ad una maggiore comprensione dei risultati sperimentali.

Il buon accordo teoria-esperimento ha permesso di determinare i parametri dei diversi risuonatori che saranno installati sul gyrotron.

Come per ogni sistema risonante che non funziona al modo fondamentale, il problema della competizione fra i differenti modi è cruciale in un gyrotron.

Una struttura di specchi per i risuonatori quasi-ottici permette di selezionare la frequenza desiderata.

Alcune simulazioni numeriche, in cui la dinamica e la competizione dei modi sono seguite nel tempo, hanno permesso di verificare che un solo modo è eccitato in un risuonatore munito di tali superficie riflettenti.

La realizzazione del progetto di sviluppo del gyrotron quasi-ottico necessita un'infrastruttura notevole, così come un'installazione sperimentale di grandi dimensioni.

Un banco di prova, che permetterà di collaudare diverse configurazioni del risuonatore, quindi di approfondire le conoscenze fisiche del sistema, è in corso di installazione nel sito di Ecublens dell'EPFL.

Diverse installazioni di supporto sono necessarie, in particolare un'alimentazione stabilizzata (1 MW a 10 kV) ed una grossa unità criogenica di liquefazione dotata di un sistema di distribuzione dei fluidi, per il raffreddamento delle bobine superconduttrici.

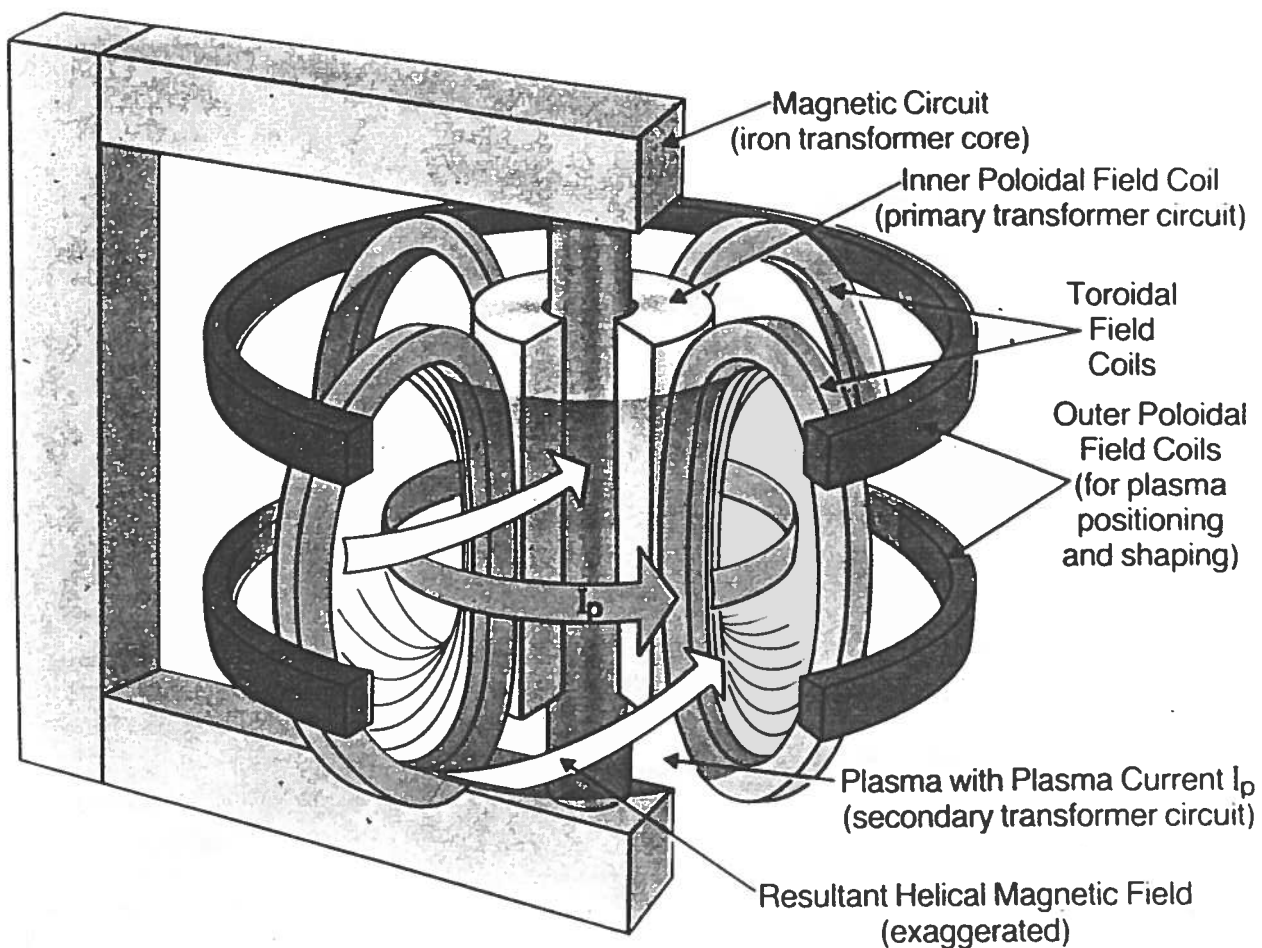


Fig. 1 Schema di funzionamento del tokamak

I_p = corrente di plasma; R = raggio maggiore del toro;
 B_t = campo magnetico toroidale; a = raggio minore del toro.

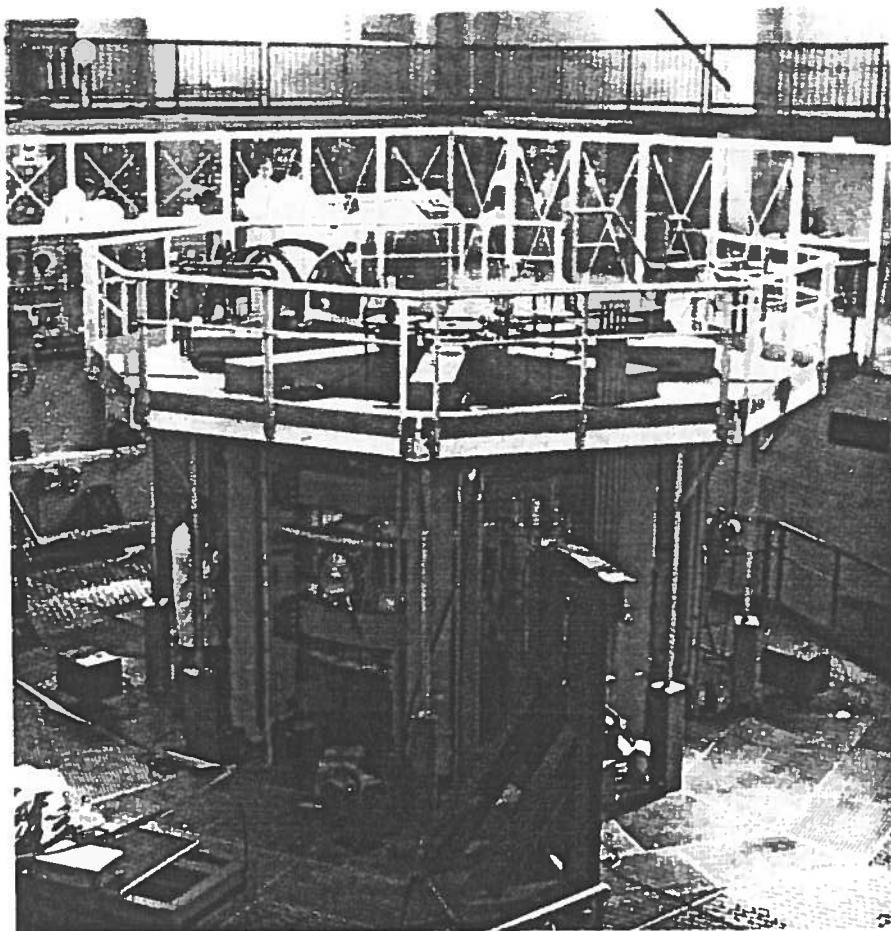


Fig. 2 FR (Tokamak de Fontenay-aux-Roses), in Francia: una tappa importante nelle performances dei tokamaks.

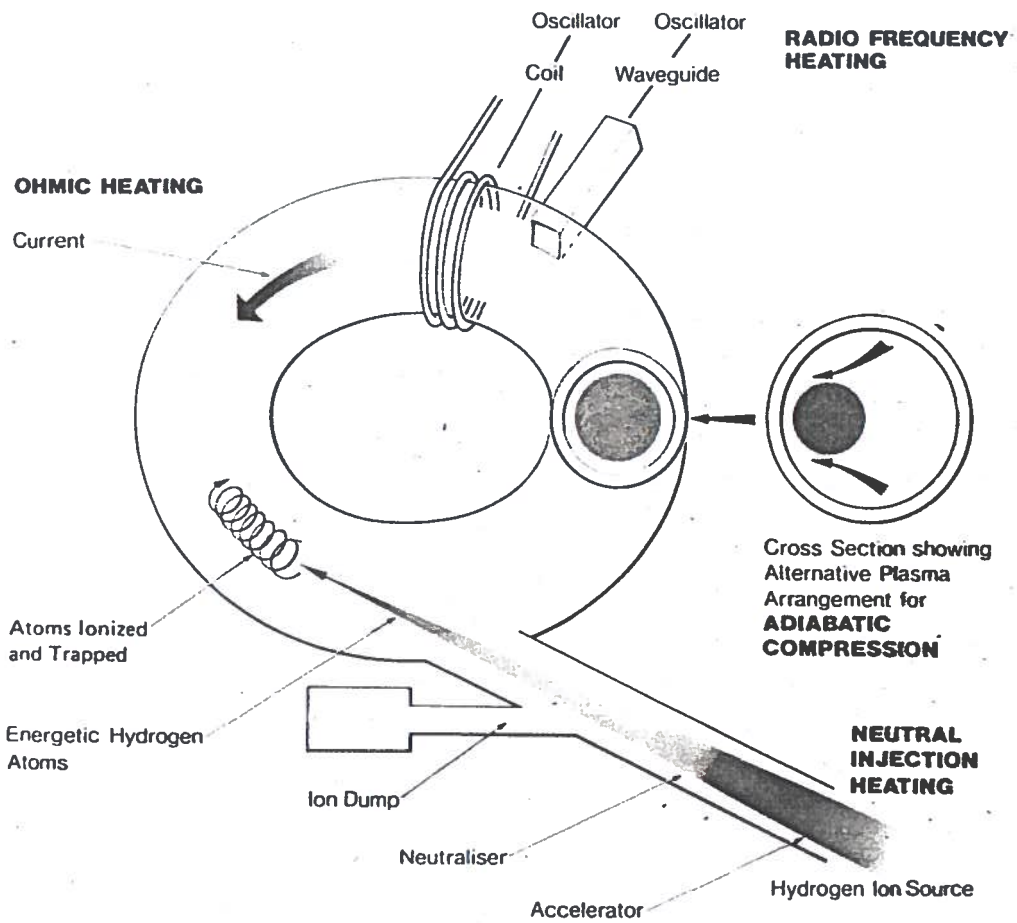


Fig. 3 Rappresentazione schematica dei metodi di riscaldamento del plasma.

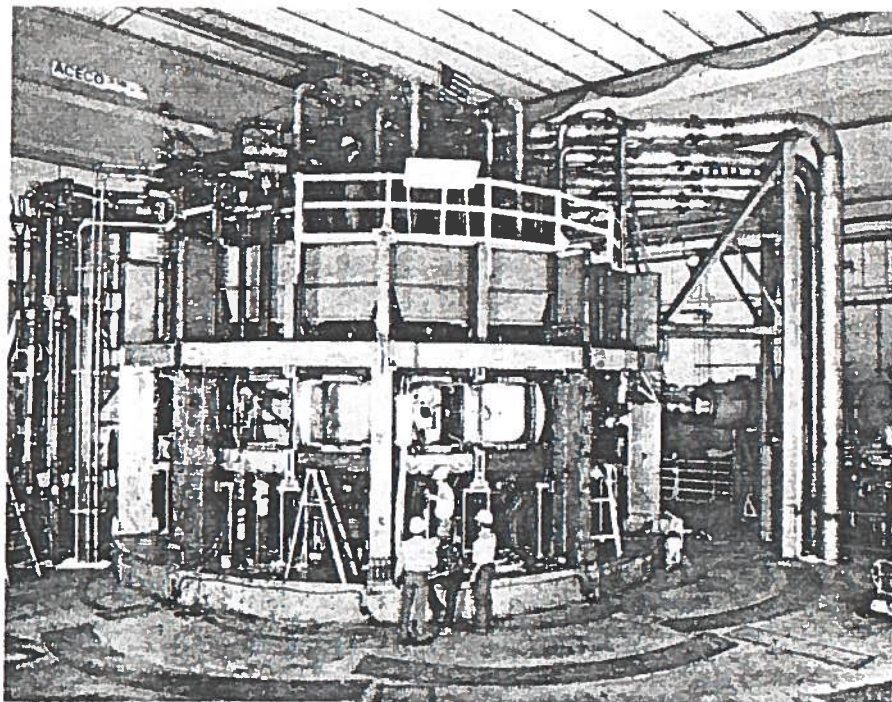


Fig. 4 TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor), al Princeton Plasma Physics Laboratory negli Stati Uniti: una delle tre maggiori installazioni sperimentali nel mondo

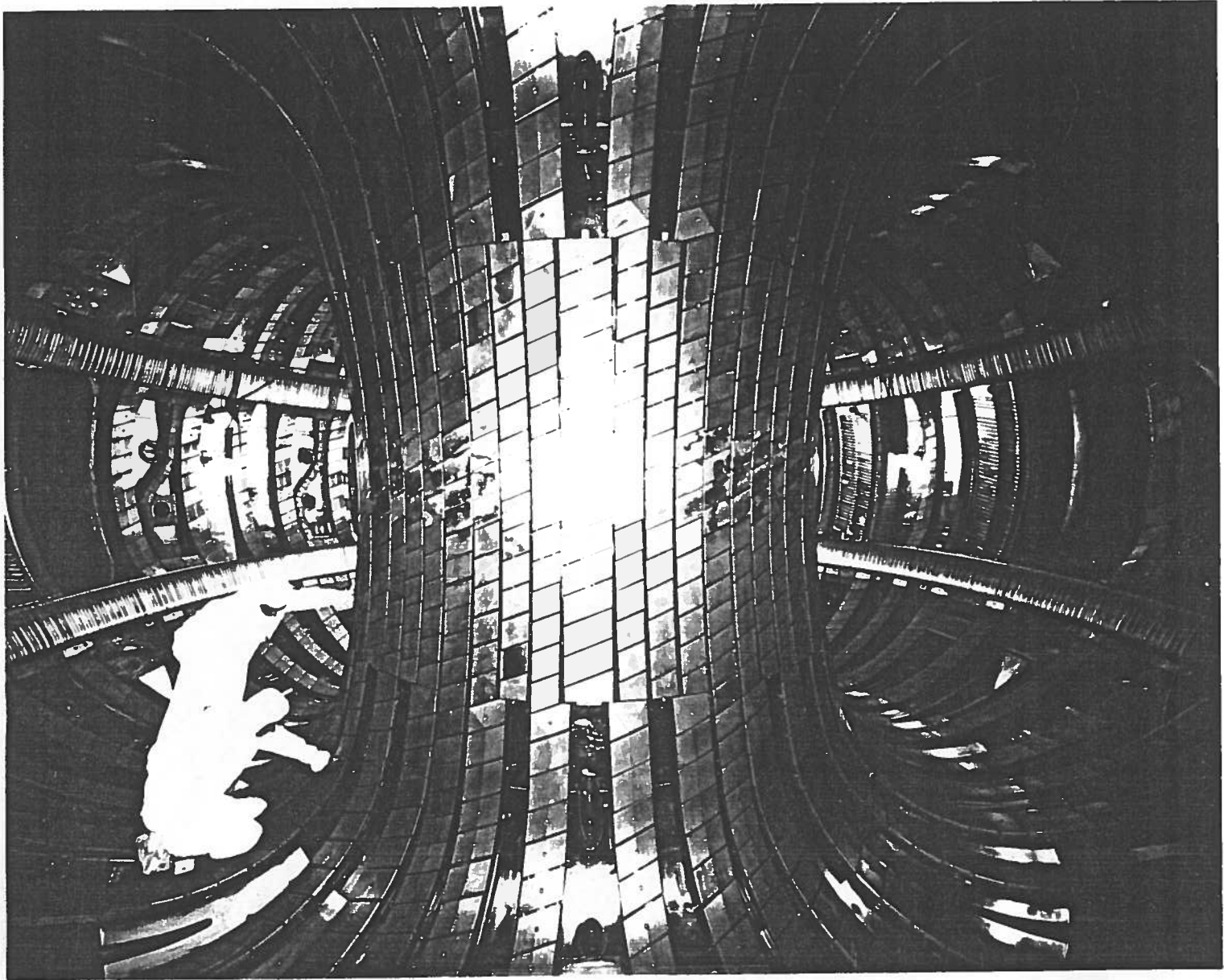


Fig. 5

JET (Joint European Torus): l'esperimento europeo, situato nei pressi di Oxford, in Gran Bretagna. L'interno del toro è protetto da tegole di carbonio; si distinguono i due limiters toroidali e tre antenne per il riscaldamento HF tramite onde ioniche di ciclotrone.

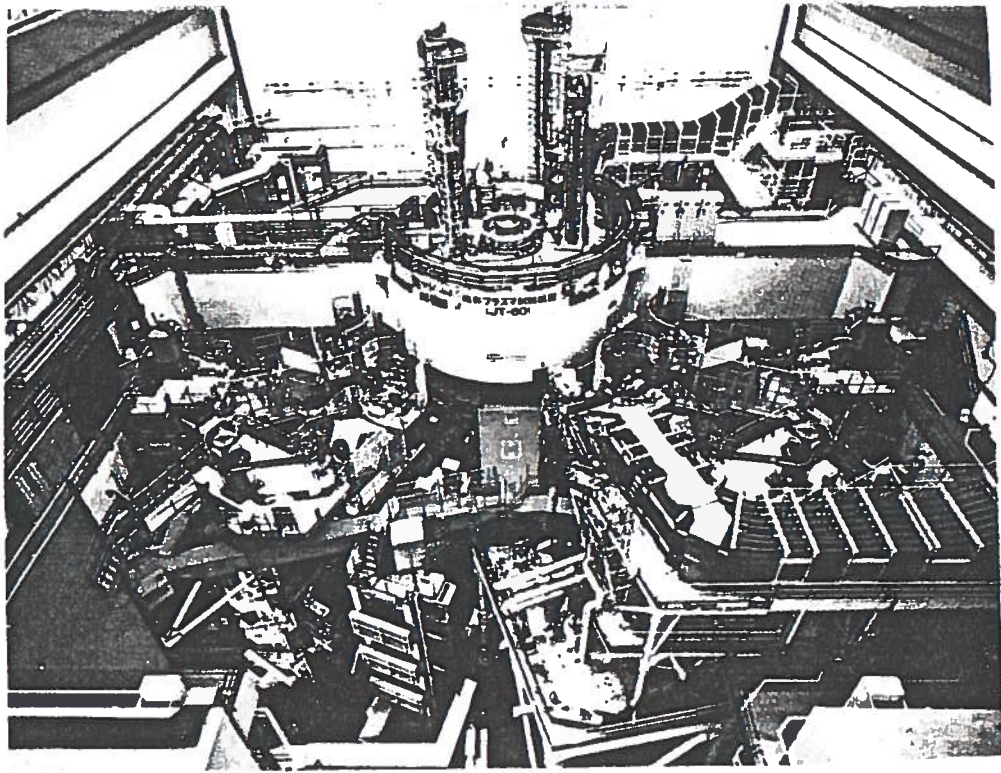


Fig. 6 JT60 (Japanese Tokamak), a Tokai Mura; insieme molto compatto, questo esperimento ha mostrato la generazione di una corrente molto elevata per mezzo di onde ad alta frequenza.

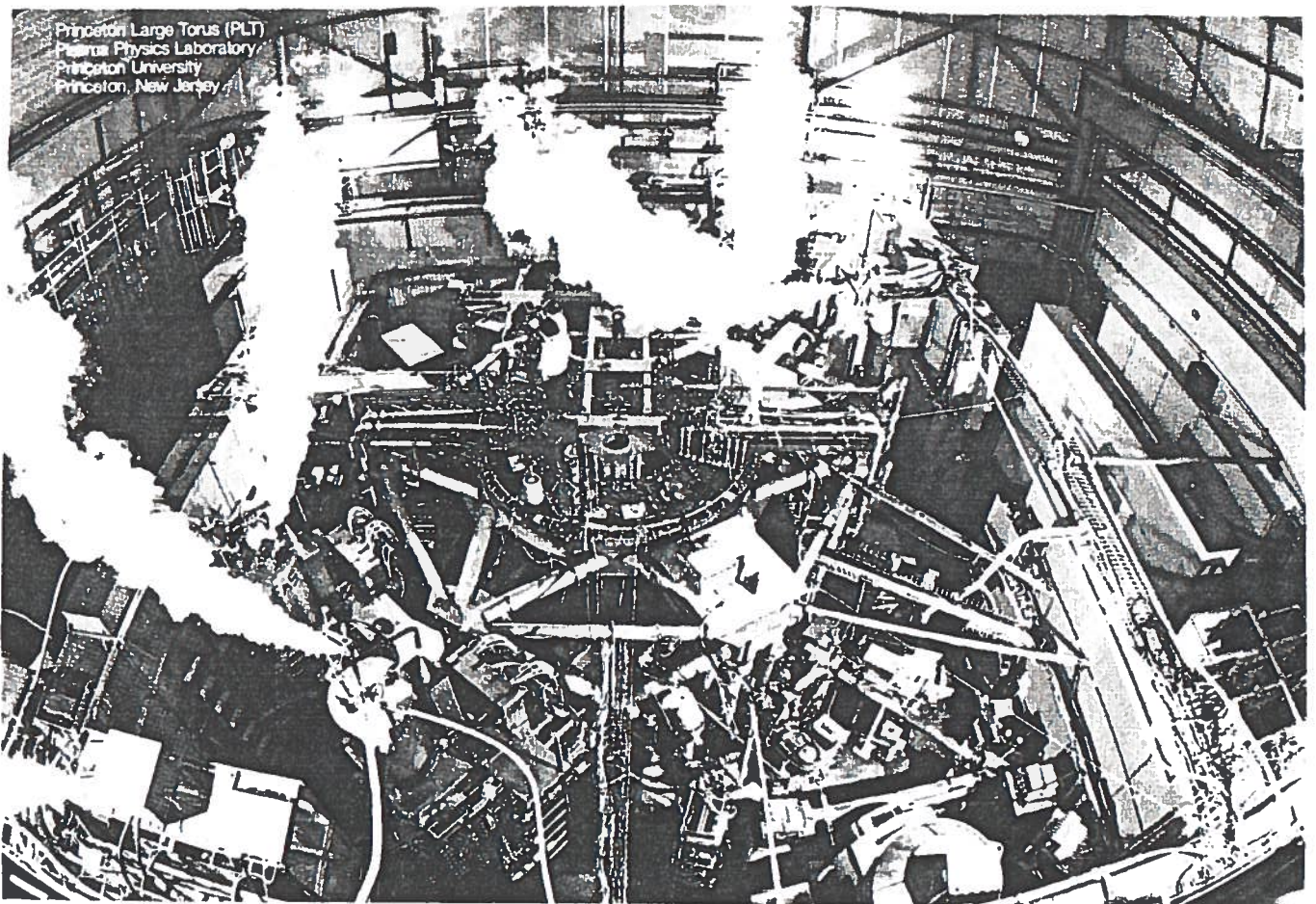


Fig. 7 PLT (Princeton Large Tokamak): un'altra grande tappa sperimentale sul cammino della fusione.

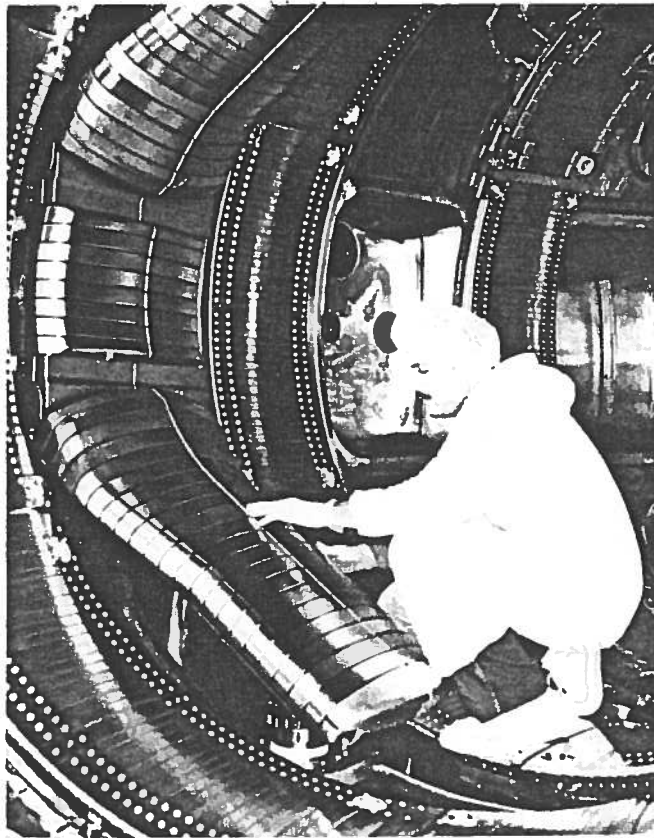


Fig. 8 Messa in opera del limiter amovibile su TFTR.

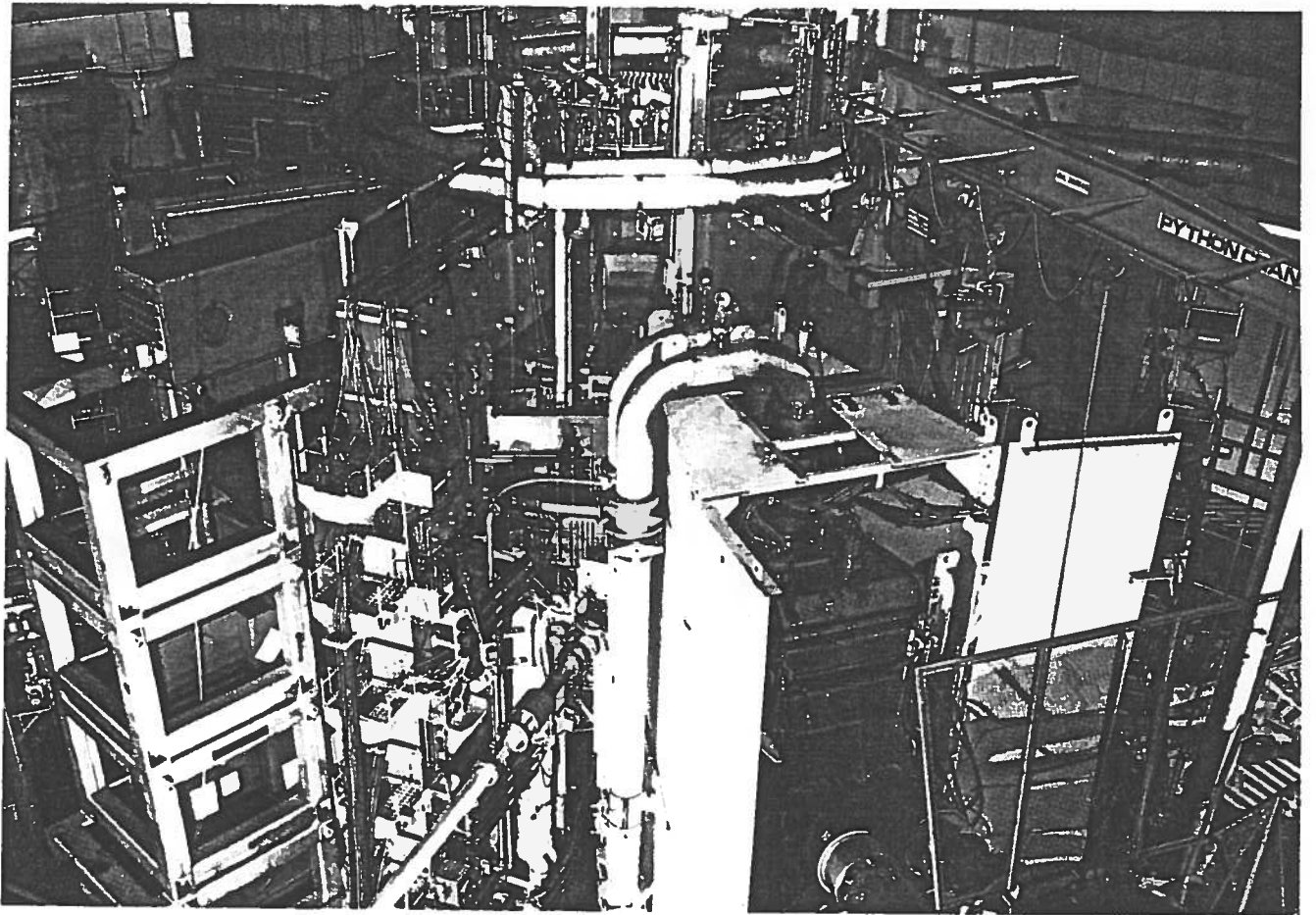


Fig. 9 JET: visione d'insieme; in primo piano un iniettore di neutri.

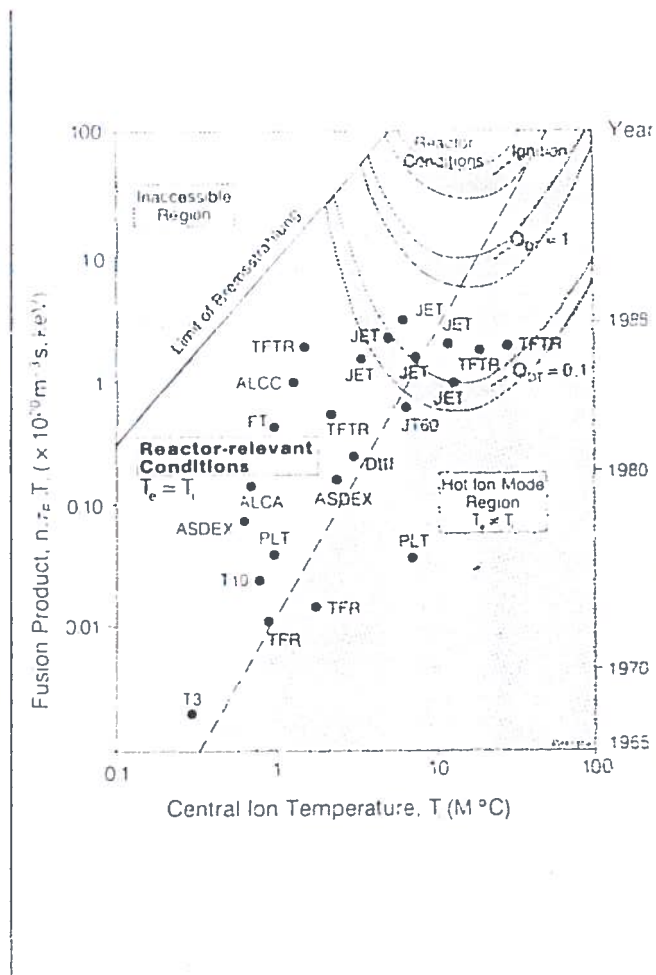


Fig. 10 Progressi compiuti nella dimostrazione del criterio di Lawson. I punti rappresentano i risultati ottenuti dalle diverse macchine fino al 1988 (a destra).

THE THREE LARGE TOKAMAKS IN THE WORLD

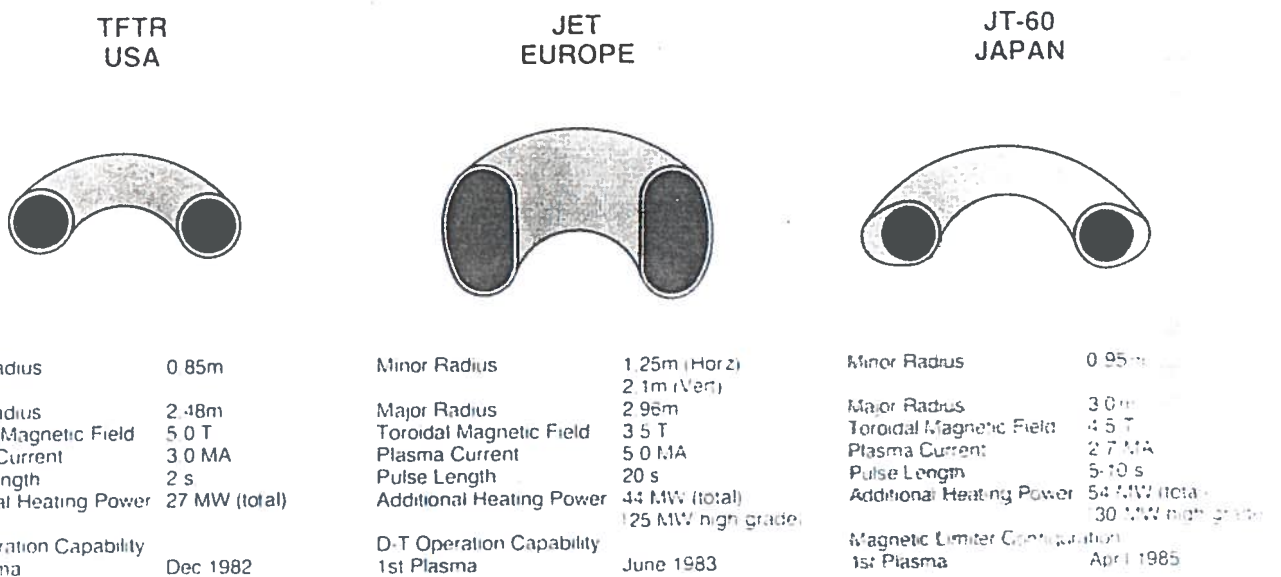


Fig. 11 Confronto fra i parametri dei tre maggiori esperimenti mondiali.

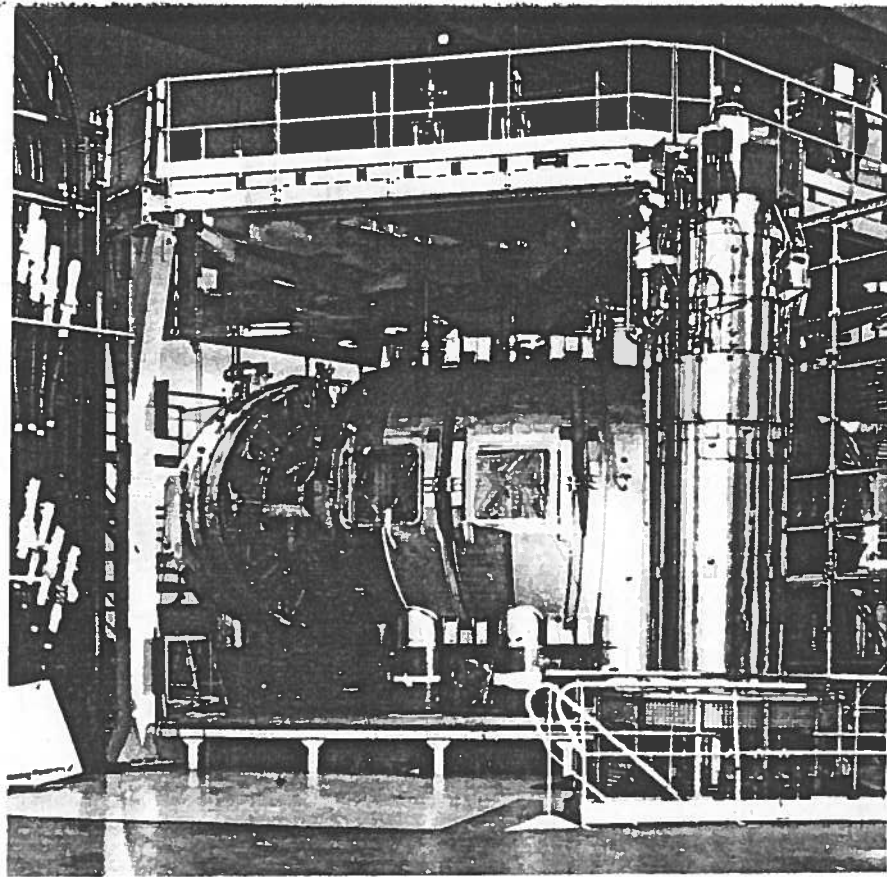


Fig. 12 Tore Supra, installato a Cadarache, in Francia. L'esperimento è stato avviato nell'aprile 1988. Si tratta del più grande tokamak a magneti superconduttore.

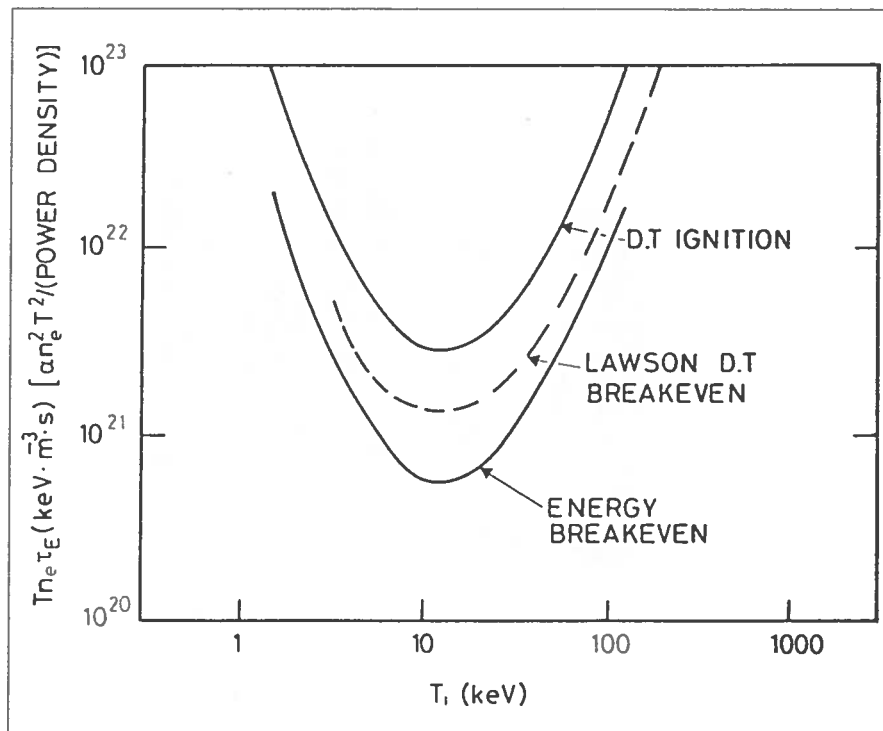


Fig. 13 Il criterio di Lawson: le tre "barriere" da superare.

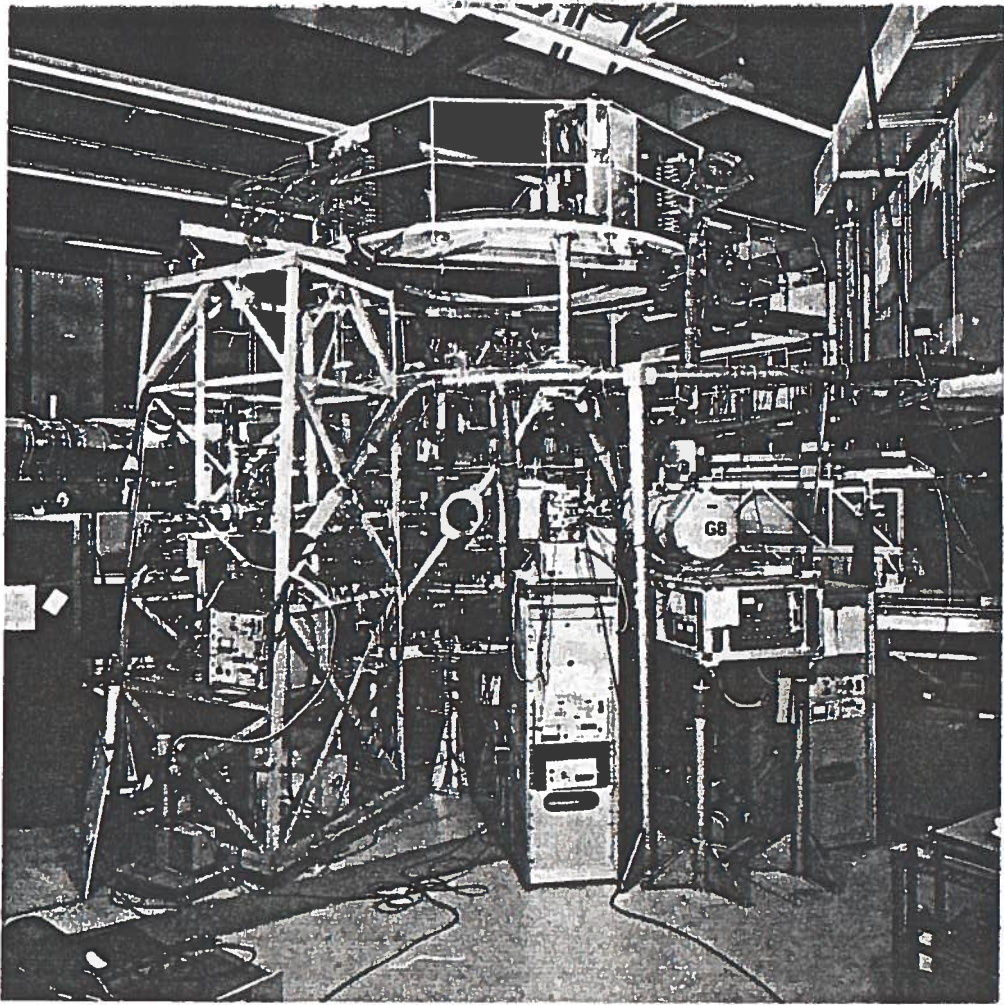


Fig. 14 Il tokamak TCA (Tokamak per lo studio del riscaldamento tramite onde di Alfvén), installato al Centro di Ricerca in Fisica dei Plasmi del Politecnico Federale di Losanna.

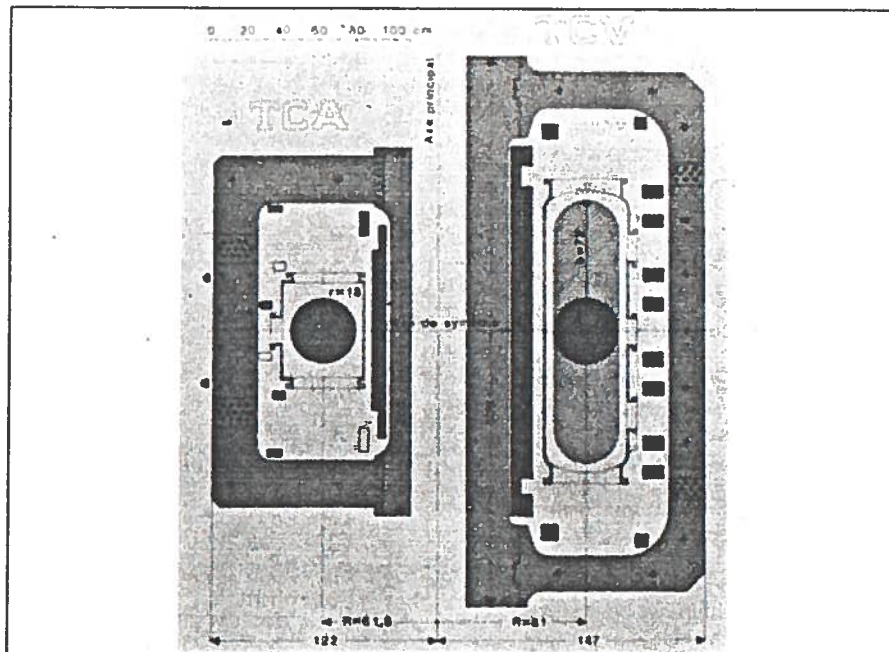


Fig. 15 Confronto fra TCV (Tokamak a Configurazione Variabile) e TCA. Caratteristica principale del nuovo progetto TCV: la capacità di variare la forma e le dimensioni della sezione del plasma.

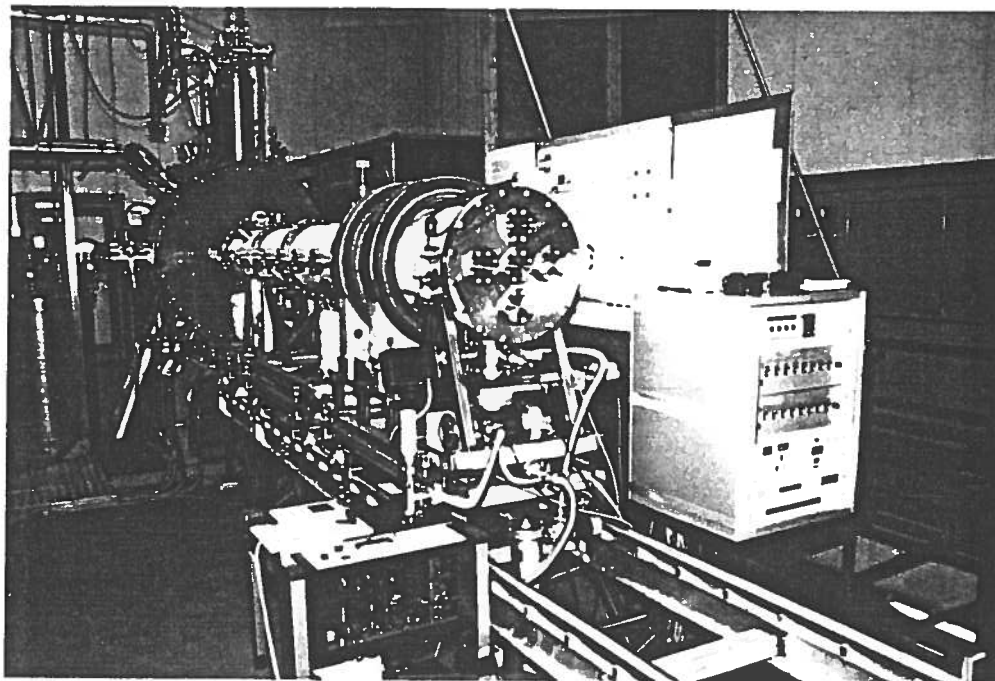


Fig. 16 Visione d'insieme dell'installazione per lo studio del gyrotron da 120 GHz, situata presso il Centro di Ricerca in Fisica dei Plasmi.

