

GAETANO MALESANI

IL PROGETTO RFX

SULLA FUSIONE TERMONUCLEARE *

Per almeno due motivi ho accettato l'invito dell'Accademia a parlare su questo argomento.

Il primo è che il problema energetico è sempre presente all'attenzione pubblica in tutto il mondo, ma particolarmente in Italia, dove in questi ultimi mesi sui mezzi di comunicazione si è dibattuto più volte circa la possibilità di soddisfare la richiesta di energia mediante la fusione di nuclei di atomi leggeri. Si tratta di una prospettiva che da più di trent'anni viene perseguita dalle società più industrializzate, e con notevole impegno.

L'altro motivo è dato dal fatto nuovo che in terra veneta è iniziata nel 1984 una grossa impresa di ricerca sulla fusione che concentra rilevanti risorse pubbliche: il progetto RFX. Mi è parso perciò doveroso cogliere questa occasione per informare i cittadini sulla destinazione di una parte dei loro contributi.

Ricordo rapidamente che i processi di fusione nucleare riguardano nuclei di atomi leggeri, composti da poche cariche positive (i protoni) e da qualche particella neutra (i neutroni); inoltre poche cariche negative (gli elettroni) orbitano attorno al nucleo, come i satelliti del sistema solare. In Fig. 1 sono schematizzati i tre tipi possibili (i tre «isoto-

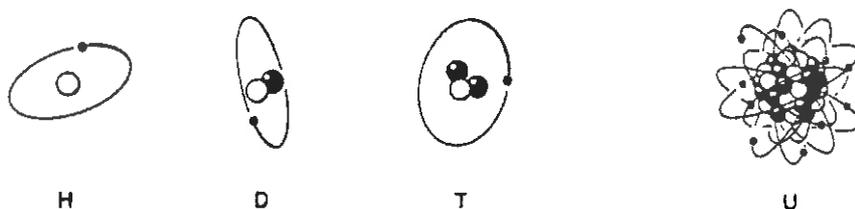


Fig. 1

* Comunicazione presentata dall'Accademico Prof. GAETANO MALESANI, Ordinario di Elettrotecnica all'Univ. di Padova e Direttore dell'Istituto Gas Ionizzati del C.N.R., in occasione della tornata del 4 giugno 1988 in Teatro Olimpico.

più) dell'atomo di idrogeno; nell'idrogeno più diffuso l'atomo è composto soltanto da un elettrone e un protone, mentre nel nucleo di deuterio (isotopo D) vi è anche un neutrone ed in quello del trizio (isotopo T) ve ne sono due. Ebbene, i loro nuclei atomici, in opportune condizioni, arrivano a fondersi liberando energia, soprattutto energia cinetica del neutrone generato dal processo di fusione, come schematizza la Fig. 2) dedicata alla fusione di nuclei di Deuterio e Trizio, che produce un nucleo di Elio (He), un neutrone veloce ed altra energia. Si tratta di un fenomeno molto diverso da quello, detto di «fissione», presente nelle attuali centrali nucleari e che riguarda nuclei atomici molto più complessi (come l'uranio, U di Fig. 1), composti da molte particelle nucleari; questi nuclei «pesanti» possono venire scissi in nuclei più piccoli a seguito di un urto con un neutrone, e in questo processo liberano altri neutroni con elevata energia cinetica.

Stiamo dunque considerando la possibilità di portare alla fusione nuclei leggeri di isotopi di idrogeno in modo da produrre energia utile, in forma controllata, economica e non pericolosa ma compatibile con le esigenze ambientali. Si tratta di arrivare a disporre di una sorgente energetica con costi competitivi rispetto ad altre fonti e che opera in condizioni di sicurezza per l'uomo e per l'ambiente.

L'idrogeno usuale (atomo isotopico H) è uno degli elementi frequentemente presenti nelle esperienze quotidiane, per esempio quale componente dell'acqua. Ogni 7.000 gocce d'acqua dell'oceano ce n'è una di «acqua pesante», il cui peso maggiore è dovuto al fatto che l'idrogeno è sostituito da deuterio, nel cui nucleo, oltre al protone, carico positivamente, vi è anche un neutrone. L'altro isotopo dell'idrogeno, chiamato trizio, non ha lunga vita perché è in situazione instabile, cioè tende a decadere radioattivamente; pertanto si cerca di produrlo quando e dove serve, per esempio mediante bombardamento nucleare del litio.

Perché la prospettiva dell'energia da fusione è tanto interessante?

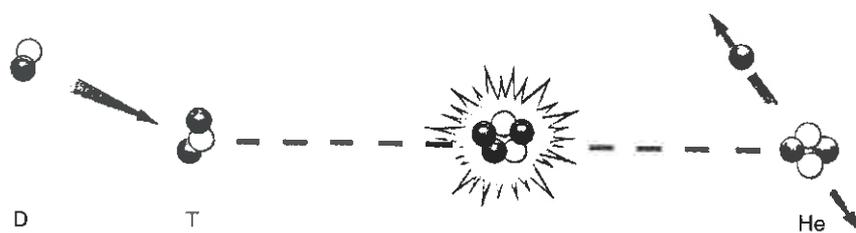


Fig. 2

Ho trovato significativa questa valutazione: se l'energia elettrica utilizzata in tutto il mondo nel 1975 fosse stata prodotta bruciando carbone, sarebbero state necessarie 1 miliardo e 700 mila tonnellate di carbone. Se la stessa energia fosse stata prodotta mediante fissione di uranio, ne sarebbero state sufficienti 85 mila tonnellate. Questo con l'uranio normale, mentre con l'uranio fertilizzato nei superconvertitori (reattori che sono oggetto di forti polemiche in questi giorni) sarebbero bastate soltanto 1.000 tonnellate. Ma se fosse stato possibile produrre la stessa energia con reattori a fusione, si sarebbero impiegate acqua pesante e 1.000 tonnellate di litio, necessario per produrre il trizio. Se poi, in un domani più lontano, si riuscirà a fondere direttamente i nuclei dell'acqua pesante, cioè nuclei di solo deuterio, ne sarebbero sufficienti 335 tonnellate, cioè quanto deuterio si trova nell'acqua contenuta in un cubo con un lato di 3-400 metri. Immaginando quanti di questi cubi gli oceani possono contenere, ci si rende conto che la possibilità di arrivare a produrre energia mediante la fusione di nuclei leggeri corrisponde a risolvere il problema energetico per molte migliaia di anni.

L'ipotetico futuro reattore a fusione dovrebbe quindi, nella condizione che oggi appare meno lontana, essere alimentato da deuterio estratto dall'acqua del mare e anche da litio, che pure si ricava dall'acqua del mare mediante processi più complessi. Il deuterio dovrebbe entrare direttamente nel cuore del reattore, cioè nella «fornace nucleare» (la parte centrale della Fig. 3), insieme con una piccola quantità

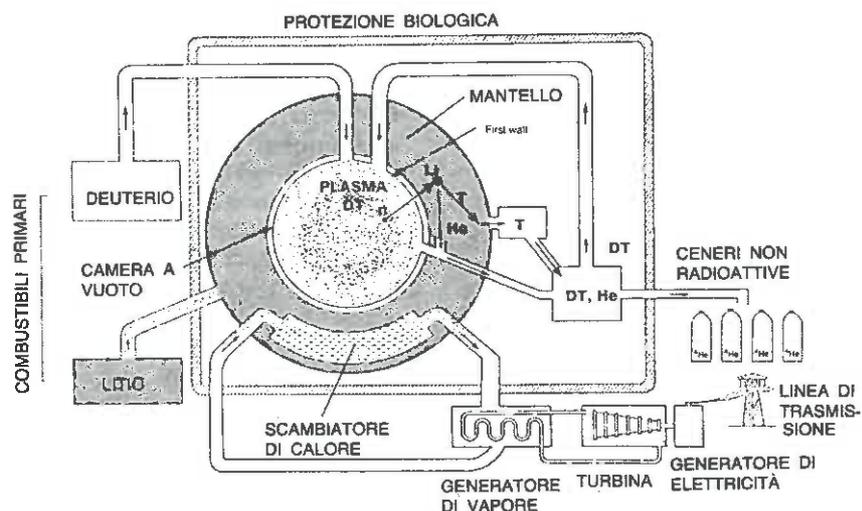


Fig. 3 Schema di un reattore a fusione nucleare secondo le concezioni attuali.

iniziale di trizio. Invece il litio si dovrebbe trovare nel mantello che delimita la fornace. Una volta che il processo di fusione sia stato innescato, verranno prodotti neutroni veloci che saranno assorbiti dal litio del mantello. Il bombardamento neutronico sul litio ne opera la trasformazione in trizio da inviare nel cuore del reattore per ivi entrare in contatto e fondersi con il deuterio. Il mantello della fornace nucleare rallenta e frena i neutroni veloci che, generati dai processi di fusione, arrivano ad investirlo. Pertanto il mantello si riscalda e il calore così prodotto può venire raccolto da fluidi refrigeranti che circolano nel mantello e poi entrano in sistemi di scambiatori di calore per generarvi vapor d'acqua capace di azionare turbine come quelle operanti nelle attuali centrali termoelettriche. Vantaggi potenziali di questa fonte di energia: prima di tutto che i combustibili primari, deuterio e litio, sono abbondanti, economici, non radioattivi. Radioattività sarebbe presente solo all'interno del reattore, perché ivi si fabbricherebbe il trizio per esservi subito consumato e ivi soltanto si troverebbero i materiali costruttivi resi radioattivi dal bombardamento neutronico.

Se un domani si potrà arrivare anche alla fusione controllata di deuterio con deuterio, non vi sarebbero neppure prodotti radioattivi.

Infine, le ceneri, cioè i prodotti di scarico, che costituiscono uno dei più gravi problemi delle odierne centrali a fissione perché sono ceneri radioattive. Le centrali a fusione produrranno ceneri costituite da gas elio, un gas non radioattivo che può venire maneggiato con facilità.

Occorre, peraltro, essere realistici: i vantaggi della fusione sono soltanto potenziali, mentre ben reali sono i problemi da affrontare e risolvere per realizzare e controllare i processi di fusione.

Il primo problema è posto dall'alta temperatura a cui occorre portare e mantenere le miscele di gas di deuterio e trizio affinché i loro nuclei possano fondersi. Si tratta di circa 100 milioni di gradi, cioè delle temperature stellari: infatti i processi di fusione nucleare sono quelli che mantengono in vita il sole e le altre stelle. Sinora l'uomo è riuscito a riprodurli sulla terra soltanto nella forma incontrollata e terribile della bomba all'idrogeno. La ricerca che dal 1945 va avanti è appunto tesa a riprodurre questi fenomeni in maniera controllata. Non c'è solo il problema dell'altissima temperatura; c'è anche il problema di confinare la miscela di gas a quella tremenda temperatura; infatti sono in gioco delle pressioni spaventose, e inoltre qualunque parete materiale impiegata per contenere un simile gas lo contaminerebbe, oppure ne verrebbe distrutta.

Bisogna ricorrere a quelle che la fisica chiama «forze a distanza»,

ovvero a campi di forza atti a frenare la tendenza alla dispersione. Nelle stelle il confinamento è attuato dalle forze di gravità associate alle enormi masse del sole e degli altri astri. Niente di simile è possibile sulla terra. Ed ecco che la ricerca punta su due linee alternative.: Poiché quello che conta è un prodotto di densità particellare per tempo di confinamento, si può fare affidamento su un *confinamento inerziale*, dovuto soltanto all'inerzia delle particelle che compongono la massa di deuterio e trizio. Infatti l'espansione della materia ad alta temperatura non avviene in tempo zero; appena prodotta e riscaldata essa rimane abbastanza compatta per tempi dell'ordine dei milionesimi di secondo, brevi ma sufficienti per lo sviluppo di processi di fusione se la densità della materia è almeno mille volte quella dei solidi in condizioni ordinarie. Come si faccia a produrre materia con una simile densità, è problema delicato ma parzialmente risolto. Sono necessarie grosse macchine acceleratrici di particelle, oppure laser di enorme potenza, tutti apparati al cui sviluppo si lavora da diversi anni e con molto impegno, anche perché simili ricerche hanno pure una forte implicazione militare.

L'altra linea è invece quella che punta al confinamento della miscela di deuterio e trizio ad altissima temperatura e bassa densità mediante l'impiego di *campi magnetici*. Ed è questa la linea di ricerca che è oggetto degli accordi internazionali e sulla quale, quindi, si hanno anche le maggiori informazioni. Un gas portato all'alta temperatura sopra indicata è fortemente ionizzato; cioè le sue strutture atomiche sono dissolte e il gas risulta composto da una miscela di elettroni, carichi negativamente, e di nuclei atomici, carichi positivamente. Confinare con campi magnetici un gas ionizzato (detto anche «plasma», come in Fig. 3) è un po' come tentare di contenere un gas normale in un recipiente costituito non da una parete continua, ma da fili elastici, tanti fili elastici molto fitti, così da realizzare qualcosa che approssima una parete; ma i fili sono deformabili e tendono a rompersi, e quindi costituiscono una superficie molto precaria. Ciò nonostante si riesce quantomeno a rallentare la perdita. Occorre che questi elastici, queste «linee magnetiche», come si usa chiamarle, siano contenute entro regioni delimitate. Ecco che allora il gas fortemente ionizzato e ad altissima temperatura viene generato all'interno di camere inizialmente vuote (camere «a vuoto», che non sono i contenitori del gas ma semplicemente le regioni dove lo si produce e si cerca di mantenerlo in vita), che hanno la forma di salvagente: ovvero la forma che i geometri dicono «toroidale».

Allora una macchina toroidale per ricerche sperimentali sulla fusione termonucleare secondo l'approccio «magnetico» (Fig. 4) comprende anzitutto una camera toroidale ove si produce un anello, un

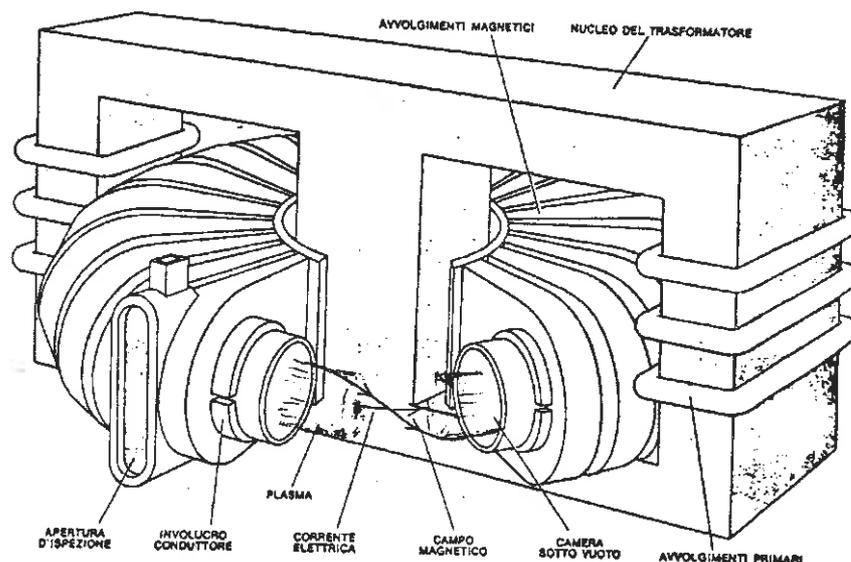


Fig. 4

«toro», di gas ad altissima temperatura e fortemente ionizzato (che prende anche il nome di plasma). Nella stessa camera devono essere presenti dei forti campi magnetici, a loro volta indotti da robusti avvolgimenti elettrici percorsi da intense correnti elettriche. Lo stesso gas, che quando è a temperature molto elevate diventa un ottimo conduttore, deve essere sede di altre, intensissime correnti elettriche che lo riscaldano e contribuiscono al suo confinamento.

Le macchine toroidali che hanno raggiunto i risultati più significativi nel cammino di avvicinamento alle condizioni di fusione sono quelle del tipo «Tokamak», nome dato dai ricercatori russi che per primi hanno evidenziato le positive prospettive di un particolare tipo di configurazione magnetica toroidale. La camera «sotto vuoto» dove l'anello di gas ionizzato (o plasma) viene prodotto, riscaldato e confinato (Fig. 4) è circondata da grosse bobine che inducono il campo magnetico caratterizzato da linee chiuse: una corrente rapidamente variante presente in altri avvolgimenti induce nella camera campi elettrici che a loro volta generano corrente dentro il plasma.

Dispositivi di questo genere, ma con dimensioni e particolarità molto differenziate, ormai si trovano in tutto il mondo. Il dispositivo

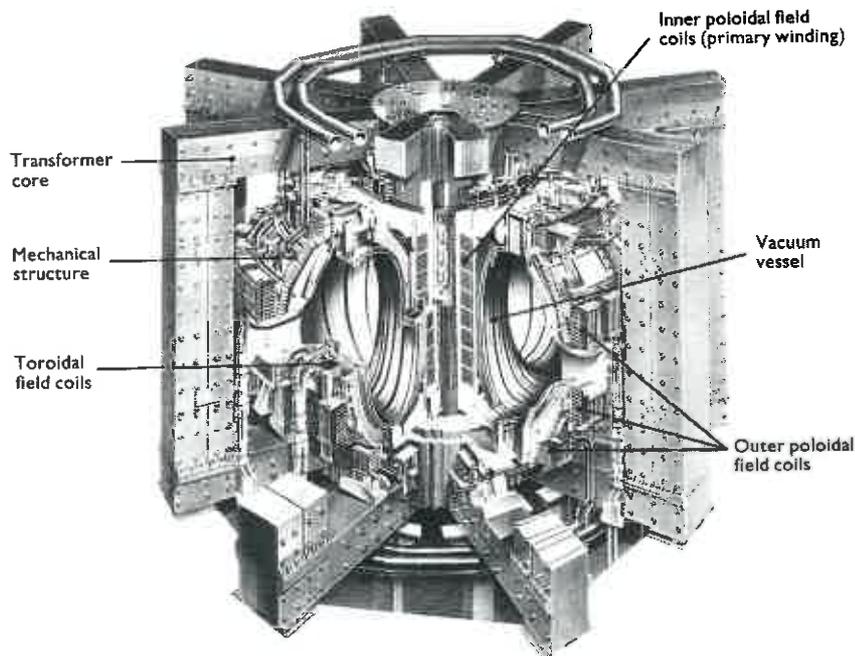


Fig. 5 Joint European Torus. Toroide Europeo Comune.

che ha già ottenuto i risultati migliori è la macchina JET (Fig. 5), che si trova in una località a 10 chilometri da Oxford. Si tratta di una macchina Europea, non inglese; ci tengo a precisarlo perché molti miei colleghi hanno lavorato e lavorano tuttora al suo sviluppo ed impiego. Le dimensioni di questo dispositivo sono tali che nella camera toroidale potrebbe correrci una piccola automobile. Altri dispositivi paragonabili a JET, si trovano uno in America ed un'altro in Giappone. La costruzione e l'esercizio di ciascuna di queste macchine comportano costi dell'ordine di un migliaio di miliardi di lire. JET è la macchina arrivata alle condizioni più prossime a quelle necessarie perché il processo di fusione si sviluppi. Ed è la macchina che, se realizzerà tutte le aspettative, potrebbe riuscire a dimostrare, entro pochi anni, che la fusione controllata è fisicamente fattibile.

Nelle macchine di tipo Tokamak finora realizzate la corrente circolante nell'anello di gas ionizzato non è sufficiente per raggiungere la temperatura di fusione; è necessario produrre altri meccanismi di riscaldamento additivo, mediante iniettori di particelle veloci o generatori di potenza ad alta frequenza, a microonde, o impiegando tecniche di compressione. Ciascuno di questi meccanismi comporta

l'impiego di apparati il cui costo e la cui complessità sono paragonabili a quelli delle macchine principali. E anche il rendimento energetico di questi «riscaldamenti additivi» è veramente problematico.

Questi ed altri motivi hanno suggerito agli organi decisionali dei maggiori programmi di ricerca sulla fusione (quelli europeo, americano e giapponese) l'opportunità di continuare a dedicare risorse per indagare su sistemi di confinamento magnetico basati su criteri diversi e potenzialmente vantaggiosi rispetto alla più investigata configurazione Tokamak.

Per cercare di spiegare una diversa configurazione magnetica, ritorno al paragone degli elastici impiegati per trattenere un fluido: se, anziché predisporre elastici tutti fra loro paralleli, si realizza qualche cosa che assomiglia ad un graticcio (o anche ai fili intrecciati di un panierino di vimini) la fuga del gas risulta rallentata anche se questi elastici sono relativamente più radi di quelli tutti paralleli. Elastici più radi, ovvero «linee magnetiche» meno fitte e densità energetica minore, di quelle necessarie per i Tokamak, ma disposte in maniera più complicata.

Una configurazione più sofisticata del campo magnetico può portare ad un confinamento accettabile, nonostante che l'energia magnetica complessiva in gioco sia minore. Nel volume della camera toroidale occorre operare affinché i vari strati di gas ionizzato, infilati l'uno dentro l'altro, come salvagenti via via più grossi, abbiano a che fare con linee di campo magnetico che cambiano la loro direzione. Ne risulta una strizione, cioè una compressione che spinge il gas lontano dalle pareti della camera, dovuta ad un campo magnetico le cui linee cambiano direzione man mano che ci si allontana dal centro, verso la parete della camera, arrivando fino a rovesciarsi. Si parla quindi di una configurazione di strizione con campo magnetico che rovescia: Reversed Field Pinch (RFP). I vantaggi potenziali del RFP sono l'impiego di campi magnetici molto meno intensi di quelli necessari ai Tokamak e la possibilità di riscaldare il gas con la sola corrente circolante nell'anello di gas ionizzati fino alle temperature di ignizione del processo di fusione. Si tratta di aspetti che possono rivelarsi determinanti per l'economia e la semplificazione tecnologica dei futuri reattori a fusione nucleare.

Ecco allora il progetto in corso a Padova, chiamato esperimento a campo che rovescia (Reversed Field Experiment: RFX). Alla fine del 1984 la Comunità Europea decise di finanziare la realizzazione di questo progetto assicurando il 45% dei finanziamenti necessari per la costruzione della macchina RFX che è schematizzata in Figura 6. La

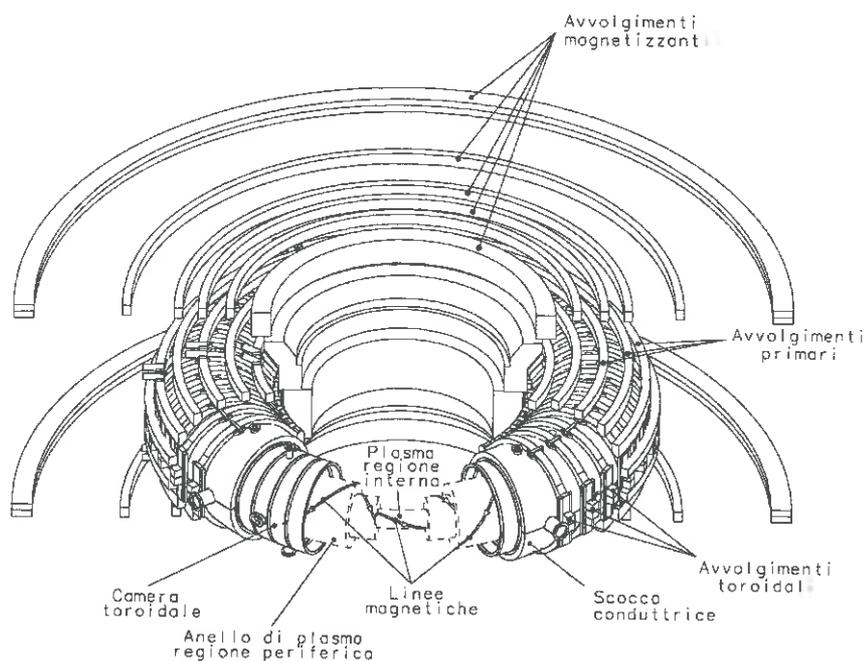


Fig. 6 La configurazione toroidale RFP.

camera toroidale nella quale verrà prodotto l'anello di plasma ha diametro minore di 1 metro ed è circondata da vari avvolgimenti elettrici, alcuni dei quali sono relativamente «leggeri» rispetto a quelli di una equivalente macchina Tokamak. Gli avvolgimenti magnetizzanti hanno diametro fino a circa otto metri. Sono quasi terminati gli edifici per la macchina RFX, gli impianti ausiliari, la sala controllo, le officine, i laboratori di ricerca, la biblioteca, gli uffici e quanto ancora servirà per svolgere esperimenti su RFX e sviluppare le connesse attività di ricerca. L'impresa è affidata al Gruppo di Padova per ricerche sulla fusione controllata che ha sede presso l'Istituto Gas Ionizzati del CNR. L'impresa, finanziata dall'EURATOM, dall'ENEA e dal CNR, vede anche la partecipazione di ricercatori e docenti dell'Università di Padova, e di ricercatori e tecnici britannici. In questo momento a Padova operano un'ottantina di persone impegnate nella fase finale della costruzione di questo dispositivo, che dovrebbe entrare in funzione tra due o tre anni. Lo scopo è quello di vedere se i vantaggi potenziali della configurazione a campo che rovescia, finora intravisti in esperimenti svolti in tutto il mondo e anche a Padova, ma in scala troppo piccola, costituiscono una realistica prospettiva termonucleare per questa configu-

razione. La risposta a questa domanda comporterà molti anni di impiego della macchina RFX e quindi potrà ottenersi solo verso la fine degli anni '90. Al momento, chi venisse a Padova, nell'Area della Ricerca del CNR, potrebbe vedere gli edifici (circa 50.000 metricubi) e la grande linea elettrica a 400 kV, l'unica che l'ENEL ha permesso di costruire per un utente esterno.

Concludo questa rapida presentazione cercando di inquadrare il progetto RFX nel contesto del programma europeo di ricerche sulla fusione termonucleare controllata. Disseminati per l'Europa esistono una quindicina di laboratori associati al programma europeo, uno dei quali è a Padova. Ad ovest di Londra si trova il JET; altri laboratori li troviamo in Germania, in Francia, in Italia e negli altri Stati europei. L'interesse del programma fusione è tale che vi partecipano pure Svizzera e Svezia, quantunque non siano membri della Comunità.

La maggior parte dei laboratori europei lavora sulla linea Tokamak; soltanto Padova e un piccolo gruppo inglese lavorano sulla linea del RFP. Un'altra linea diversa dai Tokamak è sviluppata vicino a Monaco. Complessivamente si tratta di circa 2 mila persone: e il bilancio annuale, dell'ordine di 1.300 miliardi di lire (metà dei quali a carico del bilancio comunitario), corrisponde press'a poco a quello che l'Europa spende ogni giorno per comprare il petrolio di cui attualmente abbisogna. Il solo progetto JET costa, nel suo complessivo sviluppo pluriennale, un migliaio di miliardi.

La strategia europea verso la fusione è quella più chiara: esistono strategie analoghe perseguite dagli Stati Uniti, dalla Russia e dal Giappone. Credo non sia offensivo dire che quella americana spesso ha risentito di cambiamenti collegati a finalità politiche e strategiche; così, ad esempio, il programma «Guerre stellari» ha provocato un rallentamento della ricerca sulla fusione. Della strategia russa si sa che impiega molti uomini, ma gli esatti programmi non sono mai ben noti; quella giapponese è paragonabile all'europea. Attualmente si persegue l'obiettivo di dimostrare che la fusione è scientificamente fattibile e la linea più avanzata è quella del progetto JET, che è impresa europea.

Molto impegno è dedicato alle tecnologie giacchè, se grossi sono i problemi fisici, in gran parte ancora inesplorati sono quelli tecnologici. E comunque è stato dato l'avvio anche al prossimo passo: il Next Step, chiamato «NET», un progetto che dovrebbe raccogliere il migliori risultati fisici e tecnologici e, all'inizio del prossimo millennio, potrebbe dimostrare che la fusione è anche tecnologicamente accettabile, cioè che esistono i materiali e le tecnologie affidabili per l'intero processo. A questo punto saremmo ad un risultato equivalente a quello che, per la fissione, Fermi raggiunse con la sua «pila atomica». Se il risultato

fosse positivo, si passerebbe al proto reattore, al primo reattore dimostrativo, che ha già il nome di DEMO.

Quali sono i costi in gioco? Nella fase attuale della ricerca, larga parte dei 1300 miliardi all'anno approvati dal Parlamento Europeo è dedicata a JET; il resto ai progetti affidati ai vari laboratori associati. Per il successivo progetto NET si parla di una spesa complessiva di 5-6 mila miliardi. Si inserisce qui il Progetto ITER, avviato dall'accordo tra Reagan e Gorbaciov, durante il loro recente incontro in Islanda; un gruppo internazionale, europeo, americano, russo, giapponese, lavora alla progettazione di un dispositivo che potrebbe divenire il «prossimo passo» nell'approccio alla fusione nucleare controllata, compiuto nell'ambito di una collaborazione mondiale. È chiaro che, di fronte alle enormi poste in gioco, la possibilità di suddividere i costi fra le varie aree industrializzate rende il tutto più realistico.

Per concludere, si può dire che la ricerca sulla fusione, che va avanti in forma programmata dalla fine degli anni '50 e che vede ormai implicati anche grossi interessi industriali (anche RFX ha significato un notevole lavoro per l'industria nazionale e veneta in particolare), è un imponente tentativo di raggiungere un risultato importante, che però oggi nessuno può garantire. Tuttavia la rilevanza dell'obiettivo è tale da giustificare l'impegno e la costanza con cui lo si persegue: si tratta ancora di una ricerca che guarda al futuro, più che all'utilità immediata.

GAETANO MALESANI