

**6**

**SEDUTA DI GIOVEDÌ 18 DICEMBRE 1986**

**PRESIDENZA DEL PRESIDENTE MICHELE VISCARDI**

PAGINA BIANCA

**La seduta comincia alle 15,30.**

DANTE ORESTE ORSENIGO, *Segretario*, dà lettura del processo verbale della seduta precedente.

(È approvato).

AUDIZIONE DEL PROFESSOR ENZO BERTOLINI, DIRETTORE DELLA DIVISIONE SISTEMI ELETTROMAGNETICI DEL DIPARTIMENTO MACCHINA E SVILUPPO DEL PROGETTO JET (JOINT EUROPEAN TORUS).

PRESIDENTE. L'ordine del giorno reca, nell'ambito dell'indagine conoscitiva sullo stato attuale della fusione nucleare ai fini degli usi pacifici, sulle sue prospettive e sui problemi di sicurezza l'audizione del professor Bertolini, direttore della Divisione sistemi elettromagnetici del Dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET che ringrazio per la sensibilità dimostrata nell'accettare il nostro invito, nonostante egli sia costretto a muoversi tra l'Europa e gli Stati Uniti per ragioni inerenti alla sua attività. Avverto che il nostro ospite ha predisposto una relazione - alla quale sono allegate tabelle e figure - che sarà pubblicata con le altre presentate nel corso delle audizioni. Cedo ora la parola al professor Bertolini.

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del Dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Signor presidente, onorevoli deputati, voglio innanzitutto ringraziarvi per questo invito, perché considero una gratificazione il fatto

di poter parlare del mio lavoro in presenza di parlamentari. Per consentire ai membri di questa Commissione una più accurata valutazione della mia esposizione preciso innanzitutto in quale misura mi occupo di fusione termonucleare e quale è il mio *background*. Ho studiato ingegneria elettrotecnica e fisica nucleare a Padova, quindi ho lavorato quattro anni al CERN di Ginevra su esperimenti di fisica delle alte energie, poi per dieci anni ho lavorato a Frascati su esperimenti di fisica del plasma orientati sia verso la fusione, sia verso sistemi che, utilizzando un certo tipo di plasma, consentono di convertire direttamente l'energia termica in elettrica. Nel 1973, grazie alla determinazione di Donato Palumbo, che dirigeva il programma CEE sulla fusione termonucleare, questa collaborazione già avviata fin dal 1958, è divenuta più stretta e si è deciso di iniziare, mediante un accordo comune, la progettazione del JET (Joint european torus) definito come l'esperimento che deve dimostrare la fattibilità scientifica della fusione termonucleare controllata. Io sono stato delegato quale rappresentante italiano nella direzione del progetto, sotto la responsabilità del francese P.H. Rebut. Da allora ho vissuto in Gran Bretagna.

La mia attività comprende compiti relativi all'ingegneria del progetto, con la particolarità però che riesco a soddisfare le mie esigenze scientifiche spendendo una settimana al mese nella sala di controllo, dove collaboro alla direzione degli esperimenti, secondo un turno prestabilito. Di tanto in tanto, poi, mi reco all'università della California a svolgere attività di insegnamento. Ho detto questo per consentire loro una più accurata va-

lutazione dell'attendibilità e dei limiti del mio intervento. Quando parlerò dei risultati del JET, mi riferirò alle mie funzioni nell'ambito del progetto ed a cose condivise da tutti i miei colleghi; quando cercherò di rispondere alle domande dei commissari, dato che molte materie non rientrano nell'ambito del mio lavoro, esporrò le mie opinioni personali nella maniera più chiara ed onesta possibile, da scienziato che lavora nel campo della fusione termonucleare.

Per quanto riguarda la collaborazione internazionale, la mia conoscenza dell'argomento non deriverà dalla letteratura scientifica: tra una lezione e l'altra ho dedicato un po' di tempo al colloquio con i miei colleghi americani per essere in grado di rispondere alle domande sui programmi al di fuori dell'Italia e dell'Europa. Per quanto riguarda gli Stati Uniti, sono in possesso perciò di informazioni generali ma abbastanza precise; so qualcosa sulla situazione in URSS, perché dopo Chernobyl sono stato inviato a Yalta, non lontano da Kiev, per una riunione di lavoro a livello internazionale, promossa dall'AIEA di Vienna, per discutere dei passi da compiere in avvenire sulla fusione; so molto meno del Giappone.

La fusione termonucleare significa mettere insieme due nuclei di atomo di idrogeno e produrre un elemento diverso, cioè l'elio. Questo vuol dire che l'energia di fusione è energia nucleare. Mi piace fare questa affermazione dopo Chernobyl, perché dalla lettura della stampa italiana, sino a due mesi dopo l'incidente di Chernobyl, ero pronto a scommettere che la maggior parte dei miei concittadini avrebbe detto che la fusione non è energia nucleare. Quando si parla di fusione termonucleare si parla oggi di deuterio e trizio, cioè di due tipi di idrogeno che si usano per la bomba, unico esempio sulla terra di fusione nucleare. Affinché, in una miscela di deuterio e trizio, avvengano nell'unità di tempo reazioni in numero sufficiente affinché 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  $\tau_E$  per il quale queste condizioni sono mantenute (tempo di confinamento) sia  $n \tau_E T > 10^{24} \text{m}^{-3} \text{s} \text{ } ^\circ\text{K}$ . Poiché è necessaria una temperatura di almeno 100 milioni di gradi (equivalenti a circa 10 keV nelle nostre unità) affinché 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 perché non fa parte di conoscenze dirette acquisite con il mio lavoro, ne farò solo un accenno in relazione alle questioni poste dalla Commissione. Non sono un esperto del confinamento inerziale, ma so abbastanza del confinamento magnetico, sistema usato nella maggior parte degli esperimenti di fusione nel mondo (80 o 90 per cento); è certamente l'unico sistema studiato nell'ambito del programma europeo. Vi sono due tipi di confinamento magnetico: uno è rappresentato da una bottiglia magnetica dritta e con il campo magnetico rinforzato agli estremi, l'altro invece è rappresentato da una struttura a « ciambella ». Di quest'ultimo sistema a « ciambella », chiuso, ne esistono vari tipi, ma quello più diffuso nel mondo è il Tokamak, in cui la configurazione magnetica è fatta da correnti che passano nelle

bobine e da correnti che passano nel plasma. Si tratta di un'invenzione russa degli anni sessanta: quando furono presentati i primi risultati, nessuno ci credeva. Un gruppo di studiosi inglesi si è recato a Mosca, con i suoi strumenti ha effettuato alcune misurazioni ed è tornato gridando al miracolo, perché si tratta di un sistema nettamente migliore di tutti gli altri. Da allora, tutti sono orientati sul Tokamak.

Come si può dimostrare che si può fare la fusione? Occorre portare un pezzo di sole in terra? Abbiamo un gas, che chiamiamo plasma perché alle altissime temperature in questione è composto da una miscela di ioni positivi ed elettroni negativi. Il gas va riscaldato, mandando energia dall'esterno, con vari sistemi. La stessa corrente che passa dentro il gas, dissipa energia e, quindi, alza la temperatura. Questo sistema già ci ha portato in macchine grandi, tipo JET, al 30-40 per cento del valore finale necessario. Vi sono poi altri sistemi aggiuntivi: fasce di atomi neutri o sistemi di radiofrequenza. Si può vedere che più tentiamo di riscaldare per giungere alle condizioni di fusione, cioè ai famosi 100 milioni di gradi, più aumenta la perdita verso le pareti. È come se qualcuno che volesse portare in casa la temperatura da 15 a 20 gradi, vedesse aumentare la necessità di energia perché la parete, che è isolante, si riduce di spessore. Lo scambio termico aumenta e l'energia si dissipa molto più in fretta. Questa è la battaglia che abbiamo condotto negli ultimi anni. In parte abbiamo capito ed in parte abbiamo intuito come contrastare il fenomeno. Quindi, vincendo delle battaglie, ma non ancora la guerra, siamo arrivati ai risultati attuali, che poi illustrerò. Il nostro problema, comunque, è sempre quello di evitare che, raggiungendo le condizioni di densità e di temperatura necessarie per il reattore, il tempo in cui si riescono a mantenere tali condizioni sia sempre più piccolo, fino a diventare assolutamente insufficiente. Questo è il problema della fusione nel mondo, oggi. I progressi si misurano con

i passi avanti nella comprensione o nelle *performances* in relazione a tale problema.

Il programma europeo è definito da una decisione del consiglio dei ministri della Comunità con cui si è stabilito che il programma comunitario di fusione è un progetto a lungo termine ed è concepito per portare, nei tempi dovuti, alla costruzione in comune di reattori prototipo, in vista della successiva produzione industriale e commercializzazione. La decisione del consiglio dei ministri del 1971 ci dice due cose. La prima, che è nostro compito costruire un reattore nel minor tempo possibile: per questo cerchiamo di non separare troppo le cose e di dimostrare la fattibilità scientifica con un tipo di macchina che ci dia informazioni sia fisiche che ingegneristiche per la costruzione della macchina successiva, che a sua volta ci dimostri la fattibilità tecnologica e così via. La seconda cosa che quella decisione ci dice è che attraverso il programma della Comunità europea si deve arrivare assieme alla produzione industriale e alla commercializzazione di reattori a fusione. Questo punto è molto importante perché è completamente diverso da quanto è avvenuto per i reattori a fissione, per i quali — eravamo nel dopoguerra, negli anni cinquanta — si è finito per utilizzare filiere prodotte al di fuori dell'Europa. Ora, invece, si vuole non solo produrre un filiera europea, ma cercare di mettere insieme le industrie che poi venderanno al di fuori della Comunità questi prodotti. Si tratta di due indicazioni molto importanti. Ricordiamo che quando si progettano queste macchine bisogna sempre pensare al reattore. Questa è la scelta che è stata fatta dalla Comunità europea.

Per questo, come hanno già sentito, il programma prevede tre macchine, da costruire e gestire in comune, i cui obiettivi sono definiti in maniera semplice e chiara.

Il JET deve mostrare la fattibilità scientifica così definita: provare 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 fattibilità 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 fattibilità 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.

Accanto a questi tre pilastri vi è una grande attività in tutti i laboratori europei. I tre pilastri saranno costruiti in comune, come JET, già in operazione, e NET, che è in fase di progetto. Vi è un certo numero di macchine tipo Tokamak in funzione; ve ne sono altre in costruzione, ma quelle precedenti e quelle successive sono più piccole del JET ed hanno funzioni di supporto, un supporto importante perché già noi potremmo dire quante indicazioni, anche cruciali, abbiamo avuto da queste macchine, per portare avanti la costruzione del JET e la scelta di programmi sperimentali nel JET

stesso. Il programma europeo, quindi, è concentrato, tra i sistemi di confinamento magnetico, sul Tokamak. Vi sono solo due iniziative importanti, una in Germania ed una in Italia, a Padova, al di fuori di queste linee. Credo che il professor Fasella vi abbia già detto che il bilancio della fusione, nell'ambito del programma di ricerca della Comunità, ha un peso di circa il 10 per cento, ed in questo ambito il costo del JET è di circa il 25 per cento.

Passiamo ora a parlare del progetto JET che è di mia competenza. A mio avviso, è molto importante comprendere perché si è fatta una macchina del genere. Gli obiettivi del JET sono lo studio: 1) dei processi nel plasma e leggi di scala in regimi operativi prossimi a quelli del reattore; 2) dell'interazione del plasma con le pareti della camera toroidale e controllo della purezza del plasma; 3) dei metodi per riscaldare il plasma a temperature prossime a quelle richieste dal reattore (riscaldamento ohmico, ad iniettori di neutri ed a radiofrequenza); 4) della produzione e del 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. Per la macchina americana, chiamata TFTR, non vale questo tipo di definizione, perché è stata concepita per produrre solo pochi impulsi dimostrativi in deuterio e trizio. Noi, invece, dobbiamo capire cosa fanno le particelle alfa, e come riscaldano il plasma, e perciò abbiamo previsto un periodo di due anni, il che vuol dire circa diecimila impulsi con deuterio e trizio. Questo è un *input* cruciale nel progetto. Per prima cosa, bisogna essere in grado di realizzare una macchina che non si rompa tanto facilmente: l'energia nucleare produce neutroni, le strutture della macchina vengono attivate, e dopo un centinaio di impulsi non si può più en-

trare nella sala macchina. Bisogna quindi progettare la macchina in modo tale che, in caso di guasti, sia possibile ripararli con i *robot*; per questo motivo, bisogna ideare persino ogni bullone in modo che il *robot* sia in grado di avvitarlo. Abbiamo pensato ad una macchina con sforzi bassi, anche per fare degli accessi grandi, perché per entrare con i *robot* ci vuole spazio; pertanto, abbiamo dato la preferenza al volume grande ed al campo magnetico relativamente ridotto, anche perché un campo magnetico grande è piuttosto difficile da realizzare con un grande volume di plasma. Con questi criteri abbiamo costruito la macchina raffigurata nella figura n. 6 della mia relazione, una macchina alta più di dieci metri e larga altrettanto, e progettata in modo tale che il *robot* possa entrarvi e compiere tutte quelle operazioni che dovessero rendersi necessarie. Altra cosa importante è che l'edificio macchina è progettato come quello di un reattore, cioè con uno spessore delle pareti di oltre due metri, con tipi speciali di cemento, in modo tale che quando si produrranno neutroni nulla esca fuori.

Come si può vedere dalla figura n. 9, allegata alla mia relazione, abbiamo costruito il primo Tokamak in modo modulare, cioè abbiamo fatto otto moduli, più esattamente, abbiamo costruito nove moduli prevedendone uno di riserva perché in caso di incidenti sarà possibile sostituirlo con i *robot*. Questa *facility* è solo del JET, ed è fondamentale per un reattore a fusione. Quindi, stiamo facendo cose che servono a noi per studiare la fisica della fusione in una macchina che abbia altresì caratteristiche tecniche simili a quelle di un reattore, in modo che quello che impariamo lo possiamo trasferire al passo successivo con ovvio guadagno di tempo. Nella figura n. 10, allegata alla mia relazione, si può vedere una successiva fase del montaggio. Questo Tokamak ha un volume di plasma di 150 metri cubi ed è cinque volte maggiore dell'analogo macchina americana (TFTR), tre volte maggiore di quella giapponese (JT-60) e più di dieci volte di quelle che vi sono nei laboratori europei.

Nella figura n. 12 allegata alla mia relazione è rappresentata una sezione della macchina, si vede che il plasma è allungato, così come lo sono la camera da vuoto e le bobine. Quando l'abbiamo concepito, nel 1973-1974, ci è stato detto che eravamo pazzi a fare questa cosa. Ma noi che credevamo alla fisica dei plasmi realizzati in questo modo, ci siamo giustificati dicendo che realizzando le bobine in questo modo gli sforzi meccanici sarebbero stati minori. Però, se oggi guardiamo ogni progetto concettuale di reattore (NET e DEMO inclusi) vediamo che non ve n'è alcuno che non abbia queste tre caratteristiche. Allora, avendo dimostrato e sperimentato che questa configurazione funziona sia dal punto di vista ingegneristico, sia dal punto di vista fisico, crediamo di aver fatto cosa utile per le macchine successive e per il reattore.

SALVATORE CHERCHI. Come viene mantenuto il vuoto nella camera?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Il combustibile sta ad una pressione equivalente ad un centomillesimo di quella della stanza dove ci troviamo. Partiamo da un vuoto ancora migliore perché vogliamo che il gas non si mischi con elementi non fusinabili.

EMANUELE CARDINALE. Il livello del vuoto?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Partiamo da  $10^{-7}$  millibar.

EMANUELE CARDINALE. Come lo ottenete?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Con pompe

rotanti, turbomolecolari ed altri sistemi. Nella tecnologia del vuoto abbiamo molto mutuato dalla fisica delle alte energie dove hanno iniziato queste cose prima di noi. Anche in quei settori hanno bisogno di vuoti molto spinti, pur se le dimensioni sono diverse. Ho cercato di farvi vedere come il JET, dal punto di vista macchina, sia una cosa abbastanza seria e complessa. Devo anche dire che dopo un anno abbiamo portato il JET alle *performances* massime di progetto, e questo è importante perché non vi è nessun Tokamak che lavora tutti i giorni alle massime prestazioni. Questo perché abbiamo cercato di fornire informazioni di fisica importanti mediante una macchina con sforzi e sollecitazioni limitati.

La prima persona italiana che feci venire dall'ENEA fu l'ingegner Raimondi che, con altri, sviluppò un *robot* (Moscot). Così nel 1974 iniziammo a progettare quello che ci sarebbe servito nel 1988-1990. Un esempio è il braccio articolato che opera nella camera da vuoto. Esso è già stato usato per smontare antenne a radiofrequenze e piastre protettive e abbiamo potuto notare che funziona benissimo, impiegando da un decimo ad un quinto dei tempi umani. Questo non è un miracolo, ma è il risultato del lavoro svolto. Questa è un'informazione utile per i reattori, anche se naturalmente i processi potranno risultare più complicati.

EMANUELE CARDINALE. Quali sono le condizioni interne nel momento in cui entra ed opera il *robot* ?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Quando entra il *robot* fermiamo l'esperimento, la temperatura è quella ambiente, la radioattività è superiore ai livelli tollerabili da una persona anche per pochi minuti. Perciò quando lavoriamo con il deuterio ed il trizio non solo non ci introduciamo nella camera, ma evitiamo perfino di entrare

nella sala della macchina. Desidero a questo punto ricordare che, quando abbiamo avuto l'approvazione del progetto JET, il 15 giugno 1978 (eravamo in 40-50), ci è stato detto che sarebbero stati necessari 5 anni per raggiungere l'obiettivo dell'esperimento. Noi abbiamo realizzato il primo esperimento il 26 giugno 1983, con soli pochi giorni di ritardo e con l'incombenza di dover reclutare 600-700 persone, alcune delle quali erano nuove alla fusione. Il risultato è stato importante, soprattutto se si considera che, rispetto al preventivo del giugno 1975, il costo è risultato superiore soltanto dell'8 per cento. Anche questo può essere considerato un *record* raggiunto grazie al direttore, alla direzione del progetto e a tutti coloro che vi hanno collaborato.

Ho potuto verificare con piacere che il sistema organizzato dal JET funziona. Per la realizzazione del JET ci è stato permesso l'utilizzo del *Joint Undertaking*. Esistono infatti alcune norme comunitarie che consentono la costituzione di società di tipo privato per la realizzazione di questi progetti: in questi casi, ogni governo invia uno o due membri in rappresentanza nel Consiglio di amministrazione. Con tale struttura è stato possibile assumere personale specializzato, riuscendo anche a stipulare contratti competitivi. Non era mai accaduto che l'industria elettromeccanica entrasse in competizione in Europa a livelli tanto massicci. 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 per cento superiore, qualsiasi fosse stato il Paese scelto *a priori*.



**SALVATORE CHERCHI.** Esisteva uno stato che si avvicinava molto al *mix* produttivo ?

**ENZO BERTOLINI,** *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus).* Nessuno, perché il contratto è assegnato all'offerta dal costo più basso la quale soddisfi le specifiche tecniche. Difatti noi, in collaborazione con giapponesi ed americani, due anni fa abbiamo effettuato il calcolo del costo delle tre macchine, deducendo che se il JET costa 100, la macchina americana costava 125 e quella giapponese 150. Questo naturalmente per molte ragioni. Tutto ciò sta a significare che, se in Europa si agisce comunemente con criteri seri di competitività tecnica ed economica, riusciamo a realizzare opere valide a costi inferiori. Voglio ricordare che siamo riusciti a piazzare fuori dell'Europa solo il 2 per cento dei contratti - dell'1 per cento sono responsabile io - ed anche questo è un *record*.

Quando ci trovavamo di fronte ad una industria europea che poteva costruire determinate cose e non sapeva però progettare, intervenivamo noi. Abbiamo così stabilito un clima di reciproca stima e fiducia con l'industria europea. Siamo giunti al punto che oggi, se ho bisogno di un ingegnere che non riesco momentaneamente a reperire, telefono all'Ansaldo o alla Siemens o alla BBC o alla GEC e spesso riescono a soddisfare la mia esigenza, alle volte anche gratuitamente, proprio in virtù di una esperienza valida di collaborazione. L'industria italiana risulta, in questo ambito, a livello della Francia nella distribuzione dei contratti. Molti di essi sono tecnologicamente avanzati, come ad esempio tutta la robotica e la lavorazione della struttura meccanica della macchina. Molte industrie italiane, anche di piccole dimensioni, riescono a effettuare realizzazioni perfette. Ho capito, così, perché l'economia italiana stia sempre a galla, dal punto di vista delle tecnologie avanzate. La scuola di ingegneria italiana è, infatti, molto buona.

Infine, tornando al JET, devo dire che abbiamo perso due anni (dal 1975 al 1977) perché non siamo riusciti a tenerlo ad Ispra sito proposto dalla Commissione europea. Quando però abbiamo cominciato, nel 1978, la costruzione, abbiamo mantenuto i tempi anche dal punto di vista scientifico. Siamo oggi a metà del programma sperimentale e si pensa di raggiungere la dimostrazione della fattibilità scientifica della fusione nel 1992. Come si vede occorre dedicare venti anni della propria vita per concepire un esperimento di questo genere, costruirlo, portarlo a termine e presentarne non i risultati generici, ma il risultato per cui il progetto è stato concepito. Abbiamo lavorato sodo e continuiamo a farlo. Ciò dà la dimensione del lavoro necessario per un progetto del genere, e quindi anche dei tempi per realizzare la fusione nucleare.

**SALVATORE CHERCHI.** Vuol dire che vi è un bilancio tra energia immessa ed energia prodotta ?

**ENZO BERTOLINI,** *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus).* Fattibilità scientifica vuol dire che l'energia che si immette deve essere uguale all'energia di fusione che esce, associata ai neutroni ed alle particelle alfa. Però, siamo ancora lontani dal reattore: occorre andare cinque volte sopra. L'energia di fusione è per quattro quinti associata ai neutroni, il restante quinto sta nell'elio e serve a tenere alta la temperatura (3 breakeven). Per il NET e per il reattore l'energia delle particelle alfa deve essere sufficiente al completo autosostenimento delle reazioni di fusione (Ignition). Relativamente allo stato della ricerca, dal 1960 ad oggi sono stati compiuti passi da gigante; dal 1980, il progresso più recente si è avuto grazie alle grandi macchine. Con il JET, abbiamo raggiunto la densità, la temperatura ed il tempo di confinamento necessari per la prima volta, nella stessa macchina, seppure separatamente. Ora, crediamo di aver capito in che dire-

zione occorra muoversi per realizzare queste condizioni contemporaneamente. Per quanto riguarda la corrente che gira nell'anello, abbiamo 5 milioni di ampère per 4-5 secondi. Si tratta di un tempo piuttosto lungo, ma noi pensiamo sia basso. La battaglia più difficile che abbiamo dovuto combattere è stata quella di progettare il JET per venti secondi; nel 1973 non riuscivamo a giustificarlo scientificamente. Nostra intenzione era di costruire una macchina per 8 milioni di ampère, ma il consiglio di amministrazione (di cui Toschi era presidente), non ci diede il nullaosta. Comunque, pensavamo che con pochi soldi in più l'obiettivo sarebbe stato raggiungibile.

Lavoriamo sistematicamente a questi valori, secondo gli esperimenti che vogliamo fare ed al massimo campo magnetico. Quindi, abbiamo la macchina che funziona alle *performances* normali. La densità è a  $5 \cdot 10^{19}$  particelle per metro cubo - un terzo di quella che serve - la temperatura è a 50 milioni di gradi - metà di quella che serve - ed il tempo è di 0,7 secondi - trenta per cento in meno di quello che serve -. A questo punto abbiamo detto: « Alziamo la temperatura »; abbiamo quindi immesso potenza addizionale ed effettivamente la temperatura è salita di circa una volta e mezza; anche la densità è aumentata, ma il tempo è crollato (0,39 secondi). Il problema è quindi questo: quando riscaldiamo, l'isolamento si deteriora.

Abbiamo visto che aumentando il riscaldamento il tempo cala, però da 1, 2, 3, 4, 5 milioni di ampère cresce. Più alta è la corrente, più alto è il tempo. Abbiamo quindi compreso che la corrente è molto importante. Riusciremo nel JET ad andare a più di 5 mega-ampère, che rappresentano il valore massimo del progetto? È proprio questo che stiamo cercando di fare; tale possibilità esiste perché la macchina è stata progettata per altri motivi con sforzi bassi; più si aumenta la corrente, più gli sforzi sono alti. Dobbiamo aumentare la corrente se vogliamo avere tempi sufficientemente alti.

SALVATORE CHERCHI. La corrente circola nel plasma?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Sì. Per mantenere la corrente si usa un trasformatore di cui il plasma è il secondario. Il risultato più eclatante che abbiamo ottenuto è questo: attorno alla corrente vi sono sempre linee di campo magnetiche chiuse. Abbiamo pensato - anche su suggerimento di altri laboratori europei - di aprire la linea. Dalle prime sperimentazioni fatte in Germania si è visto che riscaldando, il tempo non crolla se vi sono queste linee magnetiche aperte e si stacca il plasma dalla parete. Il JET non era progettato per fare queste configurazioni e tutti sono rimasti sorpresi quando siamo riusciti a farla. È stato possibile perché la macchina è grande ed ha una configurazione magnetica flessibile. Possiamo vedere quindi che con questo sistema (*X point*) a 3 milioni di ampère si ha un tempo doppio. Abbiamo quindi imparato come combattere il crollo dell'isolamento del plasma: aumentando la corrente e cambiando la configurazione magnetica. Il secondo grande *input* nel nostro programma futuro è quello di andare con la configurazione chiusa a correnti più alte di circa 7-8 milioni di ampère e con la configurazione aperta a correnti più alte possibile (4 o 5 milioni di ampère). Bisogna confrontare le due configurazioni e vedere quale è la migliore. Con i risultati raggiunti fino ad ora pensiamo che andremo vicini al faticoso numero del parametro di fusione  $n_{\text{E}} T = 10^{21}$ , che serve a Toschi per fare il passo successivo. Aumentando la corrente il tempo aumenta; con l'apertura delle linee magnetiche questo tempo aumenta ulteriormente; combinando opportunamente queste due cose si dovrebbe riuscire a raggiungere l'obiettivo del JET, dimostrare cioè la fattibilità scientifica della fusione (punto 4 degli obiettivi del JET).

Questa è la ragione del commento contenuta nel *New Scientist* del 20 no-

vembre: i lavori del JET hanno oscurato tutti gli altri lavori presentati alla conferenza mondiale di Kyoto. Vogliamo modificare la configurazione magnetica per andare a 7 mega-ampère con la linea chiusa o a 4-4 e mezzo con quella aperta. Bisogna poi fare altre cose, perché se aumentiamo la potenza si ha più energia in gioco, sia quando produrremo fusione, sia ora in termini di riscaldamento. È quindi necessario coprire le pareti con grafite o berillio per renderle meno danneggiabili ed anche per avere di fronte al plasma dei materiali che non lo inquinino molto. Bisogna poi iniettare combustibile - questo vale anche per un reattore - al centro, altrimenti il plasma diventa instabile. Ciò si può fare attraverso dei cannoni. Per questo stiamo progettando un iniettore di deuterio solido (5-10 chilometri al secondo) che attualmente non esiste; forse vi sono studi in campo militare, ma per ora in molti Tokamak sono cannoni da un chilometro al secondo. Questo servirà anche al NET ed il NET lo farà per il DEMO.

EMANUELE CARDINALE. Verrebbero sparate sull'asse...

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Sì. Poi dobbiamo cercare di controllare la configurazione elettromagnetica. Ciò si può fare con sistemi di radiofrequenza. Mettendo in campo tutti questi strumenti, pensiamo di migliorare sostanzialmente le condizioni di plasma già raggiunte. Un anno fa ero meno ottimista perché dopo i primi esperimenti erano sorti questi problemi: aumentava la temperatura, ma l'isolamento crollava. Non potevamo chiedere 60 milioni di unità di conto in più per queste cose; dovevamo prima dimostrare che funzionavano. Siamo riusciti a modificare la macchina senza spese grazie alla sua flessibilità per dimostrare, seppure in misura limitata, ma già eclatante come si è visto dai risultati, che le cose in effetti funzionavano. Allora, il no-

stro consiglio di amministrazione ha approvato il nuovo programma di sviluppo. Però noi siamo una piccola parte nel bilancio comunitario e siamo quindi in attesa che la situazione si sbocchi a livello del piano globale di ricerca. Ho già illustrato lo stato delle ricerche e debbo dire che a Kyoto vi è stato veramente un salto di qualità come comprensione e di quantità come *performances* rispetto alle altre conferenze, e ciò senz'altro in conseguenza dell'entrata in funzione di queste tre grandi macchine in Giappone, in Europa e negli Stati Uniti.

In merito alle linee di ricerca, abbiamo detto che siamo concentrati sulla configurazione magnetica toroidale, soprattutto Tokamak. Quella che invece è rappresentata nella figura n. 21 allegata alla mia relazione è la macchina a specchi MFTF-B di Livermore. Questa macchina costa 360 milioni di dollari, ma nonostante questo il programma è stato bloccato perché i risultati sperimentali ottenuti con i modelli più piccoli non sono stati dei migliori. Dunque, se dipendesse da me, darei un premio sostanzioso a chi negli anni settanta ha deciso di non far nulla dei *mirrors* in Europa. La scelta, che appariva limitativa negli anni settanta, è stata o saggia o fortunata.

SALVATORE CHERCHI. Ma questa configurazione a specchi era intrinsecamente senza sviluppo?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Era quella che noi ingegneri vorremmo perché il nostro reattore diventerebbe meravigliosamente semplice per quanto riguarda il sistema di conversione dell'energia nucleare in energia termica. Invece, con i Tokamaks la configurazione è abbastanza complessa, anche se non più di tante altre cose di ingegneria. Comunque, questa macchina è là, e dicono che non funzionerà più, e questo è positivo perché è meglio abbandonare una macchina che non funziona piuttosto che continuare a spenderci soldi.

PRESIDENTE. Per lo sviluppo quanto hanno speso ?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Per quella macchina hanno già speso 360 milioni di dollari; il costo della missione sarebbe stato complessivamente di almeno il doppio. Infatti, per il Tokamak JET gli investimenti sono del 43 per cento, il costo del personale è del 29 per cento, il costo dell'operazione il 28 per cento. Comunque, quando si affronta una missione, i soldi devono essere quelli previsti per la missione stessa, perché non si può giocare al ribasso e ritrovarsi poi a questuare. Se dovesse essere così, allora sarebbe meglio non preoccuparsi della fusione, ma magari di esperimenti più interessanti e più gratificanti per noi ricercatori. Il Tokamak JET costa 97 milioni di unità di conto per un costo complessivo della missione di 1.000 milioni di unità di conto.

L'altra linea di ricerca, molto importante, alla quale voi siete molto interessati, è quella della fusione inerziale. Personalmente, non sono un esperto, ma da amici che lavorano a Shiva Nova so che questo è l'esperimento di fusione inerziale più grande del mondo. Nella figura n. 23 allegata alla mia relazione, si può vedere una linea di fasci laser che debbono colpire la sferetta di combustibile deuterio-trizio solido causandone l'implosione e, conseguentemente, la produzione di energia.

La figura n. 22, allegata alla mia relazione, è ancora più importante perché dice a che cosa serve questo tipo di sviluppo, quale ad esempio quello di Shiva Nova. Siccome vi sono stati gli accordi per non fare più esplosioni sotterranee, ma la ricerca deve andare avanti, si sostituisce la bomba atomica con qualcos'altro, ed in particolare con fasci di luce laser. La ricerca sulla fusione a scopi pacifici è, in pratica, un sottoprodotto ed i colleghi che lavorano a Shiva Nova si lamentano per il fatto che non possono

pubblicare o possono pubblicare poco. In particolare, lamentano il fatto che i giapponesi pubblicano, magari dopo molto tempo, ciò che loro hanno già scoperto. È evidente, invece, che un ricercatore non vuol lavorare per ciò che altri hanno già fatto, ma per quello che nessuno ha ancora inventato. È inutile infatti riscoprire ciò che magari è già stato scoperto dieci anni fa.

Il fatto poi che non vi sia un programma nella Comunità europea dipende dalle scelte fatte. Quando ciò è stato deciso non ero in una posizione così importante da poter influire su queste decisioni e valutarne il significato. So però che questo tipo di ricerche vengono fatte in Francia ed in Inghilterra. So che vengono fatte con lo stesso scopo (militare) e con macchine di dimensioni minori.

SALVATORE CHERCHI. Quindi, c'è un punto dal quale si dipartono poi due linee di sviluppo.

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Sì, tanto è vero che il budget della fusione americana per scopi pacifici è solo quella per la fusione magnetica. Vi è poi quello per le spese militari, che riguarda la fusione a confinamento inerziale. Questo programma dimostra indirettamente che la fusione è pulita. Chi sporca sono i prodotti di fissione dell'uranio, non i prodotti della fusione. I fisici sono molto contenti perché finalmente possono studiare questo tipo di bombe senza tutti i problemi che possono derivare dall'esplosione atomica associata. La difficoltà di realizzare una ricerca sulla fusione in comune in Europa su queste linee penso abbia trovato ostacoli da parte della Gran Bretagna e della Francia che svolgono queste ricerche per scopi militari, quindi classificate.

Mi è stato chiesto di esprimermi a proposito della collaborazione internazionale. Posso dire che essa esiste e a tale proposito voglio ricordare una decisione

del Consiglio dei ministri della ricerca della Comunità dell'8 aprile 1986, secondo cui la partecipazione della Comunità europea ad eventuali *joint ventures* internazionali deve soddisfare i seguenti criteri: la Comunità partecipa come uno dei quattro maggiori *partners* ed è riconosciuta come tale; la Comunità mantiene il suo programma indipendentemente al livello previsto, fino a che non siano raggiunti impegni precisi su di un programma alternativo comune che coinvolga Giappone, Stati Uniti ed Unione Sovietica.

Quali complicazioni esistono in proposito? La tabella n. 3 allegata alla mia relazione fornisce alcuni dati riguardanti la « storia » dei grandi Tokamak. La progettazione e la costruzione sono avvenute attraverso diverse fasi. Ho già accennato alla collaborazione che riusciamo a realizzare tra scienziati. In particolare dal 1974 al 1978 partecipammo a riunioni comuni che si svolgevano in media ogni sei, sette mesi, nel corso delle quali ci scambiavamo informazioni utili al nostro lavoro. È risultato proficuo lo scambio di idee e di collaborazione, ad esempio con i giapponesi, che non conoscono Cartesio, con i sovietici, che hanno un sistema politico diverso dal nostro, con gli americani, che hanno una organizzazione economica in qualche modo diversa proprio perché il Governo interviene mediamente molto meno che non in Europa, Inghilterra compresa. Tre Tokamak sono stati costruiti ed un altro è in fase di ultimazione (T-15, URSS). La IEA ha promosso una collaborazione ancora più stretta tra i tre Tokamak in funzione (TFTR, JF-60, JET), con la conseguenza che ci si incontra più spesso, ogni tre, quattro mesi, realizzando anche uno scambio di personale. Probabilmente faremo anche esperimenti comuni. Si tratta, come si comprende, di una collaborazione scientifica vera con tre macchine invece che con una. Di tutto ciò siamo molto contenti, perché penso che riusciremo in tal modo ad ottenere risultati migliori.

Dalle figure n. 24 (relativa al TFTR) e n. 25 (relativa al JT-60) allegate alla mia relazione, si possono notare le differenze tra il Tokamak americano e quello giapponese ed il JET, figura n. 6 della mia relazione. Solo JET, e molto limitatamente TFTR, prevedono l'uso di deuterio e trizio.

PRESIDENTE. Cosa vuol dire « senza trizio »?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. I giapponesi pensano di lavorare con deuterio soltanto, non producendo così né alfa né neutroni in maniera apprezzabile, quindi non possono verificare il nuovo tipo di plasma, né vedere come i prodotti della fusione riescono a scaldare il plasma. Gli americani, come sappiamo, possono realizzare soltanto cento impulsi, perché non hanno progettato – per ragioni di costo – gli edifici e la macchina fin dal primo giorno a questo scopo.

SALVATORE CHERCHI. Per definizione sono macchine inferiori?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Sì, se ci riferiamo al quarto obiettivo del JET.

Per quanto riguarda le collaborazioni internazionali voglio rendere noto che esiste un progetto *Intor international torus*. In virtù di questo da sette, otto anni a Vienna si incontrano esperti di vari paesi, nel tentativo di sviluppare un progetto comune. Devo dire, però, che in questi anni non è ancora venuto fuori, a mio avviso, un prodotto degno di giungere alla fase di disegno. Tuttavia questi incontri sono utili perché ci danno la possibilità di acquisire nuovi elementi e di contattare fisici molto bravi, come ad esempio i nostri colleghi sovietici, che nel loro paese hanno una scuola di fisica del plasma molto prestigiosa. Tra l'altro ri-

cordo che due fisici del plasma sono oggi tra i più vicini consiglieri di Gorbaciov. L'IAEA poi organizza altri *meetings*, come ad esempio quello di Yalta, cui ho partecipato anch'io, che permettono un confronto sui futuri passi da compiere. Tutto ciò è molto utile, soprattutto perché vi è in progetto l'idea di ripetere per le macchine di tipo NET la serie di incontri che facemmo dodici, tredici anni fa per i grandi Tokamak.

Per quanto riguarda il tempo di realizzazione e le risorse, se noi riusciremo a completare la missione JET, nessuno ci contesterà di aver impiegato vent'anni. Non vedo, quindi, come si possa uscire dallo schema del programma europeo: il NET ha tempi di costruzione molto lunghi, per cui sarà difficile completare il programma NET in vent'anni. Inoltre, mentre i guasti del JET possono essere riparati abbastanza agevolmente, quelli del NET devono essere riparati con sistemi molto complicati, che richiedono tempi lunghi. Gli americani pensano di costruire una nuova macchina per completare le informazioni necessarie alla progettazione del loro NET; ciò anche perché non possono lavorare per molto tempo in deuterio e trizio con la macchina TFTR. Tale macchina intermedia (CIT), dal punto di vista della fisica, dovrebbe essere uguale nel NET; pensano di cominciare a metà del 1988 per avere la macchina funzionante nel 1993, quando il JET dovrebbe aver compiuto la sua missione.

Noi ancora pensiamo che il JET sia costruito in modo tale da non aver necessità di questa macchina, se continueremo lungo la nostra strada. Anche se i risultati non saranno ottimali, possiamo passare al NET con le poche modifiche previste per il JET. Si tratta, ovviamente, di una mia opinione, ma oggi i risultati di Tokyo ci dimostrano che la sequenza JET-NET funziona, senza passare per un'altra macchina. Questo non vuol dire che non si possano costruire altre macchine: in Europa esistono già dieci Tokamak che offrono importanti informazioni. Negli USA la spinta verso questa nuova

macchina è stata data dal fatto di non avere una macchina che possa funzionare sistematicamente in deuterio e trizio. Invece noi abbiamo una macchina che può funzionare – se non sono stati compiuti errori di ingegneria – in deuterio e trizio per molti impulsi.

Il discorso che si sta portando avanti in Italia non trova riscontro nel resto del mondo: nessuno ha cambiato opinione sul nucleare tradizionale o sulla fusione, dopo Chernobyl. L'Inghilterra continua a mantenere fuori dalle strategie energetiche degli anni duemila la fusione; il bilancio comunitario sarà costante (380 milioni di unità di conto), ma non sarà aumentato, secondo il professor Fasella, mentre quello americano sta calando di un dieci o venti per cento annuo. In questo quadro a me sembra difficile perseguire questi obiettivi isolatamente: occorre entrare nella comunità scientifica per cercare di lavorare insieme.

Vorrei parlare, 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 « ingegneristica » 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 determina 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 « amministra-

tiva », ottenuta dall'operatore seguendo con attenzione tutte le procedure operazionali stabilite, esempio l'istruzione di come frenare la nostra automobile quando guidiamo su strade viscido 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... perché 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 per cento 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 modo di fare i conti completamente diverso!

PRESIDENTE. Oltre a problemi di costi, vi sono limiti realizzativi?

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Per quanto riguarda la fusione, penso vi siano molti elementi che consentono di muoversi in questa direzione. Per esempio, non ci sono ceneri radioattive, la radioattività è solo quella indotta dai neutroni sui materiali. Nella fusione vi è l'elio, l'elemento più innocuo che esista: in presenza di grandi quantità di elio cambia il tono della nostra voce, e nient'altro. La quantità di combustibile nel reattore è limitata all'ammontare necessario per operare per tempi dell'ordine di minuti, non di anni. Inoltre, più dell'80 per cento dell'energia di reazione è portata dai neutroni, mentre in un reattore a fissione il 97,5 per cento sta nelle ceneri altamente radioattive. Se costruiamo un reattore a bassa densità di potenza, rendiamo possibile una progettazione assente da pericoli, una progettazione che impedisca alla temperatura di salire tanto da fondere le strutture, come è avvenuto a Chernobyl. Si tratta di una caratteristica potenziale del reattore a fusione: è infatti impossibile che si verifichino gravi incidenti, perché ogni disfunzione fa sì che il plasma sparisca. In questo modo, si può arrivare ad una sicurezza del cento per cento. Quando dico « sicurezza » mi riferisco

alla sicurezza per la gente, perché è chiaro che anche nel reattore a fusione ho bisogno di protezioni ingegneristiche per preservare il capitale, perché se si rompe una bobina, devo ripararla, ma non arriva radioattività alla gente. Comunque, è sufficiente fare i conti per vedere che in un reattore a fusione la radioattività è molto minore rispetto a quella di un reattore a fissione. Però, parliamo di una cosa che non esiste, quindi, non è facile fare un confronto, come non è possibile prevedere i costi e paragonarli a quelli dell'energia nucleare o di quella prodotta dal petrolio. Non si può confrontare una tecnologia esistente con una da sperimentare.

Un'altra cosa interessante in merito alla fusione, è che in seguito, con l'esperienza, si possono usare combustibili più difficili, con i quali bisogna andare a temperature e densità più alte, ed allora non vi sarebbe più il trizio. Parlando di fusione deuterio-deuterio entriamo nel campo della fantascienza perché si tratta di avere energia per tutti per miliardi di anni; poi, posso pensare ad un giorno in cui potrò andare, con i miei colleghi della NASA, a prendere l'elio sulla luna, dove è stato trovato per caso, cercando l'ossigeno. Nello sviluppo del combustibile di fusione non si va nella direzione dei reattori veloci (più radioattività) ma in quella di una minore radioattività. Se sviluppiamo la fusione, forse tra due o tre generazioni, alla fine del prossimo secolo, non si parlerà più di radioattività. In America, in Europa, in Italia si parla spesso di fabbisogno energetico. Quando avviene una catastrofe naturale, ci si fa carico del terzo mondo, ma io credo che, invece di mandare viveri, coperte e medicinali, dovremmo fornire energia e conoscenza. Posso dire, ad esempio, che voglio che il consumo energetico in Italia non aumenti più, lasciando però il gap di 50 volte in questi paesi? Io credo che questa sia una fonte di instabilità politica, perché abbiamo visto che con l'energia e la conoscenza si controllano perfino anche le nascite in maniera naturale. Allora, poiché alla fine del secolo saremo sei mi-

liardi, vogliamo fare in modo che tutti abbiano almeno un quinto della energia che consumiamo noi? Facciamo tutti i conti energetici (petrolio, gas, carbone), andiamo avanti per migliaia di anni e vedremo che sono necessarie sorgenti di energia ad alto contenuto energetico per chilogrammo e cioè energia nucleare: la fissione c'è, e la fusione stiamo cercando di procurarcela.

Pensiamo che la fusione possa non avere tanti svantaggi, dal punto di vista ambientale, come sembra avere la fissione, ma si tratta sempre di energia nucleare. Vi è poi anche un fatto filosofico: l'energia di fusione è quella che produce i cancro per radiazione sulla terra, perché il sole è un reattore a fusione che manda calore e radiazioni. Si afferma che i cancro prodotti da radiazioni dovute a bombe ed a incidenti come quello di Chernobyl, sono una piccola percentuale di quelli prodotti dalle radiazioni contenute nell'atmosfera ed in totale 3 su 100. Da dove vengono gli altri 97?

PRESIDENTE. Grazie, professor Bertolini.

ELIO GIOVANNINI. Desidero rivolgere al professor Bertolini due rapide domande, premettendo che egli può anche non avere una opinione in merito o non avere interesse ad averla. Nel processo logico che ci è stato descritto - JET, NET, DEMO - lei, professore, ritiene che la « macchina Coppi » possa avere un ruolo di acceleratore? Le ho premesso prima che lei può darmi la risposta che vuole, può anche dirmi che non se ne interessa affatto e che aspetta che qualcuno decida. Ma se può, gradirei una sua valutazione sul ruolo di questa macchina, se lo ha, come elemento acceleratore rispetto al processo logico di cui ho parlato.

Per la seconda domanda, vale la stessa premessa. Il professor Rubbia ci ha fatto una descrizione di un rapporto ricerca militare-ricerca civile sul confinamento inerziale. Poiché esiste una fortissima spesa ed anche un fortissimo investi-



mento di risorse intellettuali nella ricerca militare e poiché i suoi tempi sono già definiti (si parla del 1995 per quanto riguarda la SDI), tale ricerca produrrà, come effetto di quello che già esiste, un'enorme accelerazione degli strumenti di cui disponiamo, per quanto riguarda i laser. Quindi, può succedere che questa cosa che è negativa, perché avendo scopi militari produce gli effetti nefasti che tutti conosciamo, possa essere utilizzata virtuosamente per consentirci di arrivare al confinamento inerziale in tempi molto più accelerati rispetto a quelli pensati ieri. Il quadro che ci ha descritto lei, professore, rispetto a Shiva Nova è un po' rovesciato. Infatti, lei dice: attenzione, perché, in realtà, tutto quello che si investe in termini di ricerca, sia dal punto di vista di danaro sia dal punto di vista di cervelli, in realtà ci viene poi sottratto perché - come già avviene a Shiva Nova - i risultati più interessanti di questa ricerca vengono coperti dal segreto militare, e quindi rischiamo di trovarci in un vicolo cieco. Cioè, al limite, abbiamo investito denaro e persone su una linea che non ha sbocco. Ecco, anche su questo vorrei una sua opinione.

GIOVANNI BIANCHINI. Professore, se lei dovesse impiegare delle risorse, soldi ed uomini, li metterebbe tutti in un solo « panierino », se questo fosse quello del confinamento magnetico? A proposito del confinamento inerziale, è vero che vi è il limite delle conoscenze classificate, ma esse potrebbero liberarsi da qui a un po', potrebbero essere rese note e messe in circolazione. E poiché è stata sottolineata la maggiore praticabilità industriale e commerciale della macchina a confinamento inerziale rispetto a quella a confinamento magnetico, desidererei, anche su questo, conoscere il suo punto di vista.

Passando al problema della sicurezza, l'ingegner Naschi ha espresso perplessità in particolare sui rifiuti solidi. A suo avviso, infatti, è vero che la ricaduta esterna sarebbe inferiore, ma i rifiuti solidi sarebbero non minori di quelli della reazione da fissione. Desidererei pertanto,

qualche considerazione in più, pur avendo capito che la direzione di marcia della ricerca va progressivamente verso l'utilizzo di materiali che nel tempo dovrebbero far superare questi rischi. Inoltre, sempre dal punto di vista della sicurezza vorrei chiederle se lei ritiene che le tecnologie di sicurezza riferite all'esperienza del nucleare da fissione siano importanti ai fini del nucleare da fusione.

SALVATORE CHERCHI. Desidero chiederle, professor Bertolini, se la linea di sviluppo della fusione attraverso il confinamento magnetico può avere, a suo avviso, tempi comprimibili. Sono, cioè, ipotizzabili percorsi diversi dal progetto che lei ci ha mostrato, sono possibili accelerazioni all'interno di questo percorso, esiste un problema di risorse umane e finanziarie per arrivare all'utilizzo finale? Per quanto riguarda il confinamento magnetico, il JET sembra essere l'esperienza più avanzata, anche tenuto conto della libera circolazione delle informazioni e dello scambio di esperienze a livello internazionale. Invece, per quanto riguarda l'altra linea, quella del confinamento inerziale, abbiamo appreso che si va ad impattare sul segreto militare. Ebbene, se fosse possibile fare un confronto sul dove si è arrivati, ritiene che il confinamento magnetico rispetto all'obiettivo finale sia più avanti, allo stato attuale, del confinamento inerziale? Oppure c'è un JET di conoscenze e di informazioni da parte di chi fa questa ricerca per cui nulla si può dire?

ALESSANDRO TESSARI. Nel ringraziare il professor Bertolini per la puntualità della sua esposizione, devo confessare una qualche difficoltà nel mettere a fuoco la materia. Proprio ieri sera, nella riunione del comitato dei dodici parlamentari che assiste il ministro Zanone nell'organizzare la Conferenza nazionale sull'energia assieme agli altri colleghi, ho sollevato una questione, e cioè quella del pochissimo spazio che sarà dato alla fusione. Di questo mi sono dispiaciuto con il ministro Zanone perché poteva essere un'occasione

interessante per acquisire informazioni non solo a livello europeo ma direi planetario. Del resto, quando poi il Parlamento dovrà discutere i risultati di quella conferenza dovrà mettere nel gioco di queste nostre valutazioni anche la grande opzione sulla fusione. Personalmente, allo stato delle mie conoscenze, sono per mettere l'un contro l'altro tutti i tecnici che lavorano nel campo della fusione. Non vorrei privilegiare nessuno, ma garantire la sopravvivenza di tutti.

Non intendo fare della fusione l'alibi o il toccasana di tutto quello che non funziona nel campo della fissione; nell'ambito di quella Conferenza il professor Rubbia rappresenterà la voce della fusione. Dal nostro punto di vista avremmo preferito più voci, anche internazionali, a confronto, invece si è voluto privilegiare un aspetto più nazionale di rappresentanza delle componenti. Noi abbiamo bisogno non di acquisire elementi di formazione e di valutazione, quanto chiarire un grosso equivoco di tipo emozionale: scappiamo dalla fissione per cadere dove? In un'altra mitica fusione! L'approccio della fusione può essere pericoloso come quello della fissione. Forse non abbiamo messo in conto i risvolti che dopo Chernobyl sono stati posti in evidenza. Io non so se il professor Bertolini abbia ricevuto il questionario in quanto tale.

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. No, neanche come Comunità europea, a quanto mi risulta.

ALESSANDRO TESSARI. Chiederò all'onorevole Zanone che le faccia avere una documentazione sui lavori di Venezia.

ENZO BERTOLINI, *Direttore della divisione sistemi elettromagnetici del dipartimento macchina e sviluppo del progetto JET (Joint european torus)*. Passando a rispondere alle singole domande, faccio rilevare che il JET costa un miliardo di dollari, il NET più di due ed il DEMO

tre, quattro miliardi. I Tokamaks che fanno da contorno al JET costano tra i cento milioni e il mezzo miliardo di dollari l'uno. Aggiungere ora un'altra macchina da cento milioni di dollari, può anche essere utile, però c'è da tener presente che il reattore ha bisogno di operare molti secondi. Noi sappiamo che nemmeno 10-20 secondi sono sufficienti al JET per raggiungere una situazione stazionaria della configurazione magnetica e del plasma. I tempi sono più lunghi e, per il reattore, stiamo cercando dati di informazione globale operando nelle condizioni reali. Dell'Ignitor io conosco il concetto, non i dettagli.

A proposito poi del « militare » e del « civile », posso assicurare che non ho approfondito tale questione. Se però fra dieci anni gli americani forniranno tutte le informazioni sulla fusione *laser*, mi sembra difficile che non si attengano a una determinata linea, come si è verificato per i reattori a fissione. Questo, comunque, non mi parrebbe un modo per renderci indipendenti (cioè usare soprattutto *know-how* prodotto da altri). Potrebbe anche darsi che quella linea si dimostri più promettente dal punto di vista economico. Alcuni miei studenti hanno preparato tesi sui reattori a confinamento inerziale basati su Shiva Nova e non mi è sembrato che si arrivasse ad uno schema semplice.

Mi è stato chiesto, poi, che cosa avverrebbe se aumentassimo le risorse nel campo del confinamento magnetico. Io non riesco a fare ipotesi. Nella situazione reale ci troviamo, però, tutti i giorni in difficoltà perché non riusciamo a reperire personale esperto. Ci troviamo a lottare perché ci vengano assegnati i sessanta miliardi di unità di conto per poter realizzare alcune modifiche sul JET. Di conseguenza non riesco ad immaginare un drastico aumento di risorse in questo campo.

Mi è stato posto un quesito su una questione specifica: sicurezza-soldi. Questo è certamente un problema di ingegneria. Nel programma europeo è prevista una spesa di 60-70 miliardi di unità di

conto all'anno per lo sviluppo di tecnologie che riteniamo necessarie per il NET. Investire sulla sicurezza? Certo, questo fa parte del programma, però mi ritengo un competente della sicurezza nella logica che ho prima spiegato e nella fisica della fusione, che è diversa da quella della fissione, quindi so quali elementi posso sfruttare per progettare in futuro un reattore il più sicuro possibile. Non riuscirei, tuttavia, a tradurre questo concetto in termini di iniziative specifiche da prendere. Oggi se riusciamo a superare alcuni problemi scientifici sul tappeto certamente avremo idee su cui basare un certo discorso. Non mi sento, però, in questo momento di dare ulteriori *input* in tal senso.

Altra questione è quella della tecnologia nucleare (fissione) e della fusione. L'energia di fusione è nucleare e la tecnologia nucleare in parte serve. Al JET un'apposita divisione si occupa di specifici problemi nucleari e il 10 per cento degli ingegneri del JET proviene dal settore dei reattori. Al NET la percentuale è più alta e lo sarà ancora di più quando verrà costruita la macchina. Si verifica un trasferimento di persone e competenze, e in parte di tecnologie, perché il sistema di conversione dell'energia nucleare e di quella termica è simile.

L'onorevole Cherchi mi ha chiesto se i tempi di realizzazione del reattore a confinamento magnetico siano comprimibili. Sulla base della mia esperienza posso dire che non vedo come si possa realizzare questo obiettivo in maniera più rapida di quanto previsto dalla linea JET-NET-DEMO. Ritengo però che il problema del tempo non sia vitale, dal mo-

mento che devono essere privilegiate la sicurezza e l'ottenimento di una sorgente di energia inesauribile. Le persone che lavorano a Livermore sul confinamento inerziale con la mente alle bombe non si comportano come noi del JET, che lavoriamo con la mente al reattore, quindi usiamo tecnologie, metodi e configurazioni estrapolabili dal reattore.

L'onorevole Tessari parlava della Conferenza nazionale sull'energia e della fusione: qualsiasi cosa si decida, ritengo sia irragionevole pensare di avviare un programma di fusione più vasto in Italia al di fuori della Comunità europea. Non si tratta di un problema di disponibilità finanziarie perché il costo del NET è pari a 2-3 miliardi di unità di conto, cioè come il tratto autostradale in progetto per collegare Aosta a Courmayeur: è un problema di scelte.

**PRESIDENTE.** Ringrazio il professor Bertolini per la sua esposizione e per i suoi consigli; faremo senz'altro buon uso delle sue valutazioni e ci auguriamo che questa nostra indagine conoscitiva contribuisca a dare un supporto più ampio sulla materia di quanto sia avvenuto finora, nella prima fase, di grandi visioni e prospetti a livello europeo. Pensiamo, attraverso questa indagine, di fornire al paese elementi di chiarezza, quanto meno sulle prospettive della fusione nucleare. Il professor Bertolini ha concluso questo ciclo di audizioni con una lucidità ed una lealtà nel rapporto con la Commissione di cui tutti gli siamo grati.

**La seduta termina alle 17,35.**