

1

SEDUTA DI MARTEDÌ 25 NOVEMBRE 1986

PRESIDENZA DEL PRESIDENTE MICHELE VISCARDI

PAGINA BIANCA

La seduta comincia alle 16.

AUDIZIONE DEL PROFESSOR CARLO RUBBIA, SENIOR SCIENTIST DEL CERN ED HIGGINS PROFESSOR PRESSO L'UNIVERSITÀ DI HARVARD.

PRESIDENTE. Ringrazio il professor Rubbia per aver accolto l'invito della Commissione e ricordo che questa è la prima delle audizioni previste nell'ambito dell'indagine conoscitiva sullo stato attuale della fusione nucleare ai fini degli usi pacifici, sulle sue prospettive e sui problemi di sicurezza. Desidero far presente al professor Rubbia i motivi che hanno indotto la Commissione a deliberare l'indagine conoscitiva: si intende approfondire di più questo futuro incerto, al fine di ricavarne indicazioni utili sia dal punto di vista dei problemi della sicurezza, che hanno assunto una dimensione notevole dopo il recente episodio di Chernobyl sia per valutare, in ordine alle esigenze del nostro paese, la possibilità di poter disporre di energia in quantità abbondante e a basso prezzo, verificando in quale misura esistano linee lungo le quali avventurarsi affinché l'Italia possa trovare, anche nell'ambito di collaborazioni internazionali, riserve alternative attraverso le quali rimuovere gli attuali condizionamenti.

Faccio presente che, da parte del presidente del gruppo radicale, è pervenuta richiesta di pubblicità dei lavori della Commissione mediante l'impianto audiovisivo a circuito chiuso. Se non vi sono obiezioni, rimane stabilito che si adotterà tale forma di pubblicità per l'odierna seduta.

(Così rimane stabilito).

Do ora la parola al professor Rubbia per la sua relazione.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard.* Onorevoli rappresentanti del Parlamento, ringrazio, innanzitutto, la Commissione per avermi invitato a discutere di questi problemi. Ho un'esperienza abbastanza vasta delle commissioni parlamentari del Congresso americano, ma è la prima volta che mi viene offerta la possibilità di ripetere quest'esperienza nel mio Paese. Ho predisposto un documento che vorrei brevemente illustrare, dopodiché sarò a disposizione dei commissari per eventuali domande. Ovviamente, si tratta di un campo molto complesso e quindi non posso offrire garanzie certe delle mie risposte, perché non sono un esperto di qualunque cosa, ma cerco di fare del mio meglio e di capire ciò che succede in questo settore. Vorrei brevemente riassumere il mio punto di vista personale sul soggetto della fusione nucleare e sulle sue implicazioni sul problema energetico in generale e del nostro paese in particolare. Vorrei innanzitutto sottolineare – nonostante che tanto l'energia, una ben nota grandezza fisica, che la fisica nucleare facciano parte delle mie competenze – non sono e neppure pretendo di essere un esperto nel campo della tecnologia della fusione. Vorrei cogliere questa occasione per sottolineare che oggi il problema dell'energia è troppo importante per essere lasciato interamente nelle mani degli esperti. In un'intervista rilasciata qualche tempo fa ad un settimanale, il professor Toschi, noto esperto della fusione, e responsabile del progetto europeo NET (Next european torus) si è domandato da dove nasceva quella che egli definì come « l'isteria ita-

liana sulla fusione». Modestia a parte, credo di esserne – almeno in buona parte – il responsabile. D'altronde questa « isteria » sembra essere divenuta piuttosto contagiosa, nel senso che una delle poche cose su cui il presidente americano Reagan e il primo segretario dell'URSS, Gorbaciov si sono trovati d'accordo a Ginevra e Reijkiavich è sull'opportunità di lanciare un vasto piano di cooperazione internazionale allo scopo di sviluppare una sorgente di energia pulita e inesauribile, che essi identificarono appunto con la fusione nucleare. Vorrei in questa occasione citare alcuni punti di una mia lettera, datata 22 maggio 1986, al Presidente del Consiglio dei ministri Craxi: « Il programma nucleare già realizzato o in via di realizzazione non potrà più nel suo insieme essere rimesso in questione dall'incidente di Chernobyl. Non è infatti possibile cancellare istantaneamente, come con un colpo di bacchetta magica – anche assumendone l'opportunità – una sorgente energetica che rappresenta ormai una parte così importante dell'approvvigionamento energetico di molti paesi, soprattutto europei. Quello che può essere rimesso realisticamente in questione da un incidente come quello di Chernobyl, è la possibilità di sviluppare ulteriormente il nucleare nella prima metà del secolo prossimo, allo scopo di rimpiazzare una gran parte del petrolio e delle altre sorgenti di energia che si stanno lentamente esaurendo. Se vogliamo fare dell'atomo la sorgente principale di energia non sarà sufficiente costruire alcune centinaia di reattori. Bisognerà prevedere migliaia e migliaia di nuove centrali, di cui una buona parte funzionante al plutonio, seguendo la tecnica dei surrigreneratori tipo Phenix. La domanda energetica crescente ci spingerà senza scampo ai surrigreneratori, a causa della relativa scarsità di uranio su Terra. Molte di queste installazioni dovranno essere previste nel Terzo Mondo, dove i criteri di rigida osservanza delle regole di sicurezza potranno facilmente fare difetto (un Bohpal nucleare?). Inoltre il plutonio non è solo uno degli elementi più

velenosi scoperti dall'uomo e fortemente radioattivo, con una vita media di oltre 24.000 anni. È anche e soprattutto l'ingrediente numero uno per la realizzazione di bombe termonucleari che diverrà inevitabilmente disponibile su grande scala in un gran numero di paesi che sono certamente oggi – e probabilmente anche domani – troppo poco affidabili per possedere tali mezzi di distruzione enormi.

« È quindi necessario pianificare il futuro, non tanto quello di domani, per cui le scelte sono molteplici e accettabili, ma soprattutto quello dell'anno 2000 e oltre, e per il quale non si conoscono per ora alternative all'uso su larghissima scala del nucleare. Per evitare questa disastrosa alternativa ci rimane una sola via d'uscita: ritornare alla ricerca fondamentale allo scopo di aprire in tempo quelle vie nuove, che fortunatamente non mancano. Di gran lunga la più promettente è la via della fusione nucleare, con la quale ci si propone di ripetere in forma controllata e su terra le reazioni che fanno bruciare il sole. Il combustibile è il deuterio contenuto nell'acqua, necessario in piccolissime dosi: un'energia inesauribile e disponibile in eguale misura per tutti i popoli della terra. Tali reazioni sono note da tempo e sono ad esempio alla base delle bombe termonucleari all'idrogeno. Tuttavia – e nonostante la presenza nel nostro Paese e altrove di ricercatori di alto valore – le ricerche nel campo avanzano troppo a rilento. Mancano la spinta e la volontà politica per farne una ricerca altamente prioritaria con le corrispondenti risorse finanziarie. Ad esempio, una particolare soluzione, la cosiddetta fusione inerziale, non riceve l'attenzione che si merita nonostante a mio parere sia forse la strada più promettente per una realizzazione pratica di tali progetti. Anche l'utilizzazione di altri tipi di energie alternative, come ad esempio l'energia solare, richiederà per diventare praticamente utilizzabile, lo sviluppo di tecnologie di supporto che sono oggi solo parzialmente studiate nei laboratori e per scopi alternativi. L'Europa non investe sufficientemente in ricerche sui problemi legati alle fonti

nuove di energia, nonostante rappresentino il problema politico e sociale numero uno per l'umanità in un futuro non certo lontano. Credo che sarà difficile invertirne la tendenza, almeno fintanto che mancherà la chiara volontà politica di investire mezzi finanziari e risorse umane di dimensioni ben maggiori, che abbiano le proporzioni di progetti ormai famosi come il progetto Manhattan o "L'uomo sulla luna" voluto da Kennedy negli anni sessanta.

« Mi permetta quindi di proporre che il nostro Paese si faccia – con mezzi adeguati ed al massimo livello – promotore di un ambizioso, rinnovato programma internazionale di ricerche, avente come scopo preciso quello di liberare l'umanità dalla dipendenza dell'energia di fissione dell'uranio e soprattutto del plutonio, realizzando una sorgente pulita, inesauribile e che possa essere pronta il giorno cui le risorse convenzionali di energia avranno raggiunto la loro fine naturale. Eureka e SDI sono certamente progetti di respiro analogo: Eureka tuttavia manca di specificità e l'SDI è un'impresa per la guerra. Un progetto di simile calibro dedicato alla ricerca di energie pulite ed inesauribili unirebbe la specificità dell'SDI alle motivazioni universalmente accettabili di Eureka. Anche senza insistere troppo sul fatto che l'energia nucleare fu scoperta dall'italiano Enrico Fermi, sono certo che nel mondo scientifico e industriale italiano ed europeo esistono le premesse per far crescere un tale progetto originale.

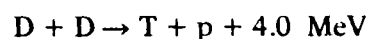
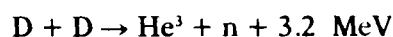
È mia viva speranza, signor Presidente, che lei voglia farsi promotore di una tale iniziativa che certamente nella presente congiuntura troverebbe nel nostro Paese e altrove un'eco favorevole e soprattutto potrebbe avere conseguenze inestimabili per il futuro di una comunità ben più vasta di quella del nostro Paese. Rimango interamente a sua disposizione qualora una discussione più approfondita fosse necessaria sui soggetti contenuti nella mia nota e più in generale qualora passi concreti richiedano ulteriori contributi... ».

Tenendo conto del fatto che la mia presentazione è la prima di una serie di testimonianze nel campo della fusione e soprattutto dell'alto livello di tecnicità del soggetto, vorrei brevemente delineare le linee generali della fusione nucleare, per poi valutarne le potenzialità nelle sue varie linee di ricerca, esprimendo il mio punto di vista in proposito. Vorrei infine menzionare che sto portando a termine degli studi su un nuovo metodo per realizzare un tipo di reattore a fusione a mio parere molto promettente e che in un futuro relativamente prossimo potrebbe divenire oggetto di un'eventuale proposta di ricerca. La fusione e la fissione nucleari traggono radici comuni dal fatto che in natura i nuclei di peso medio sono favoriti sul piano energetico – e cioè che le particelle costituenti questi nuclei sono fortemente legate. Di conseguenza, è possibile ricavare energia sia quando nuclei pesanti spezzati (fissione) o quando nuclei leggeri vengono uniti (fusione). La fissione è di più facile realizzazione che la fusione. Diverse specie atomiche, come ad esempio l'Uranio-235 o il Plutonio-239, sono quasi sul punto di spezzarsi spontaneamente. L'aggiunta di un solo neutrone è sufficiente a causare l'istantanea fissione. Il nucleo si spezza quindi in frammenti più piccoli, producendo abbondante energia e alcuni neutroni. Questi neutroni a loro volta, essendo neutri, possono penetrare facilmente le barriere elettriche che circondano i nuclei di uranio o di plutonio, dando origine a ulteriori fissioni. È questa la ben nota « reazione a catena ». Le difficoltà associate alla fissione sono quasi interamente dovute al fatto che il nucleo si frammenta in questi oggetti più piccoli. Non possiamo controllare in quale modo si producono le centinaia di prodotti differenti della fusione. Purtroppo – molti di essi sono nocivi, radio-attivi, volatili, tossici e corrosivi. Sono questi prodotti inevitabili della fissione a creare i ben noti problemi di sicurezza dei reattori, inclusi quelli dell'eliminazione delle scorie e la possibilità del *meltdown*.

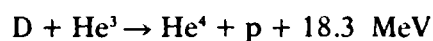
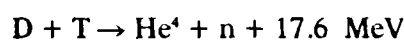
Quantunque la fusione sia concettualmente più semplice della fissione, tecnicamente essa richiede molti più sviluppi. Alla base del problema sta il fatto che non vi è l'equivalente alla reazione di fissione ottenuta mediante neutroni non carichi. Tutti i nuclei che devono essere portati assieme per la fusione sono carichi positivamente e quindi, si respingono. Questa forza di repulsione tra i nuclei aumenta rapidamente con l'aumentare della carica e diventa proibitiva anche per dei nuclei relativamente piccoli. Quindi, sembra che i combustibili di fusione debbano essere scelti tra gli elementi più leggeri - idrogeno, elio, litio, berillio e boro. Nonostante il numero di questi elementi leggeri sia relativamente basso, il numero conosciuto di reazioni possibili di fusione supera il centinaio. Tutte queste reazioni hanno in comune il fatto che le particelle interagenti devono essere anzitutto portate ad alte energie - e cioè a delle temperature molto elevate - per vincere la loro repulsione elettrica ed a portarle abbastanza vicine al punto di farle fondere. Quasi tutti gli elementi leggeri sono dunque in grado di partecipare a reazioni di fusione in cui i nuclei si combinano con la produzione di grandi quantità di energia. I candidati migliori per reazioni produttrici di energia sono gli isotopi dell'idrogeno: il protone, e cioè il normale nucleo dell'idrogeno; l'idrogeno pesante, o deuterio (D) che ha un neutrone attaccato al protone e il trizio (T), il più pesante degli isotopi dell'idrogeno che ha due neutroni attaccati al protone e che è radioattivo con una vita media relativamente corta di 12.4 anni e che quindi non esiste in natura in quantità apprezzabili. I nuclei di questi tre isotopi dell'idrogeno sono portatori della più piccola carica positiva - la carica elementare. Quindi per essere portati in contatto al punto di fondere essi richiedono energie che sono inferiori a quelle degli altri nuclei che hanno cariche positive maggiori. La scelta del deuterio e del trizio come combustibili nelle prime fasi di un programma di fusione è quindi pie-

namente giustificata. In natura, all'incirca 1 su 6500 atomi di idrogeno è deuterio. Quindi è abbondante - dopo tutto, vi è moltissimo idrogeno nell'acqua dei mari - e la sua separazione dall'idrogeno ordinario è relativamente facile grazie alla diversità delle due masse.

La prima reazione che è stata considerata in modo serio per degli impianti di fusione era la fusione automatica del deuterio - la reazione D-D. Il deuterio reagisce con se stesso per produrre sia elio-3 (He^3), un isotopo di elio stabile ma estremamente raro, oppure il trizio. Ambedue le reazioni producono energia, misurata in milioni di elettron volt (MeV):



Questi prodotti di reazione possono a loro volta reagire con il deuterio ed essere bruciati o riciclati e produrre ancora più energia di quella ricavabile dalla reazione D-D.

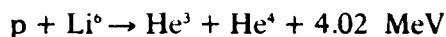


In quanto il combustibile per le due ultime reazioni è generato nelle prime due, il deuterio è in linea di principio la sola sostanza che deve essere introdotta dall'esterno. I prodotti finali di reazioni - i comunissimi elio e idrogeno - sono benigni. Tuttavia come vedremo i neutroni energetici possono produrre danni e indurre radioattività nella struttura della macchina. Perciò un reattore a fusione alimentato con deuterio - limitandoci per il momento solamente al primo gruppo di reazioni - è capace di estrarre mediante la fusione del deuterio contenuto in un metro cubo d'acqua di mare un'energia equivalente a quella ottenuta bruciando 2000 barili di petrolio grezzo. Un chilometro cubo di mare contiene quindi tutta l'energia di tutte le riserve petrolifere mondiali, abbastanza per farci tirare avanti per i prossimi quarant'anni o giù di lì. La quantità totale di acqua conte-

nuta negli oceani è pari a più di un miliardo di chilometri cubi. In altre parole, al ritmo attuale del consumo planetario di energia (fossile, minerale, nucleare eccetera) c'è abbastanza deuterio per parecchi miliardi di anni a venire – per un periodo talmente lungo da sorpassare nel tempo la durata prevedibile del combustibile idrogeno del Sole. È da notare che a questo scopo basta estrarre dell'acqua del mare l'infinitesima frazione di deuterio in essa contenuta – l'acqua viene poi restituita senza danni apparenti per l'ecologia marina. Questa sorprendente proprietà della reazione D-D ci fa capire la straordinaria importanza che la fusione ha per il futuro dell'umanità e il perché centinaia di scienziati stiano dedicando tutta la loro carriera alla ricerca di trarre profitto da questa incredibile e soprattutto inesauribile sorgente di energia. In confronto, l'energia disponibile dalla fissione nucleare, basata sulle tecnologie classiche e sulle riserve mondiali di uranio – escludendo quelle del mare – è all'incirca pari al 3 per cento delle riserve di energia fossile conosciute.

Particolarmente attraente è la reazione D-T. Quasi unanimemente il primo obiettivo da raggiungere in un programma di fusione è lo sviluppo di un reattore D-T. Uno dei problemi posti dalla reazione di fusione D-T, era come ottenere abbastanza trizio. Il trizio è radioattivo, con una mezza-vita relativamente corta di 12.4 anni, e perciò esiste in natura in quantità piuttosto minute. Fortunatamente, il neutrone che viene emesso durante la fusione D-T può reagire con un isotopo di litio per produrre il trizio ed inoltre liberare altra energia durante questo processo. Anche se non è paragonabile con l'immensa quantità di deuterio nell'acqua dei mari, le risorse mondiali di litio sono sufficienti per la produzione energetica di parecchie migliaia di anni. La fusione basata su qualunque reazione che contenga deuterio produrrà dei neutroni – il più spesso indesiderabili. È chiaro che anche se utilizzassimo la benigna reazione D-He³, con elio e protoni

nello stato finale, non potremmo evitare che un certo numero di deutoni della miscela di combustione entrino in collisione tra di loro producendo neutroni e trizio. Neutroni addizionali saranno prodotti dalle collisioni D-T. Combustibili nucleari basati su protoni hanno in generale la proprietà di produrre molto meno neutroni. La reazione sul litio-6:



è interessante in quanto ambedue i costituenti hanno cariche basse. Tuttavia essa non è interamente libera del problema neutronico. Uno dei prodotti della reazione, He³, può reagire con il Li⁶ producendo un numero più limitato, ma pur tuttavia apprezzabile di neutroni. Una reazione quasi ideale, anche se di terza generazione è il processo basato sul boro-11:



in cui né il combustibile, né le ceneri producono neutroni.

Esaminiamo in dettaglio i problemi di sicurezza di un tale tipo di reattore a fusione, legato in gran parte dalla presenza dei neutroni. Ritorniamo al caso peggiore e cioè al D-T. Infatti ben quattro quinti dell'energia della reazione D-T vengono liberati sotto forma di neutroni a movimento rapido. Questi neutroni sono da 15 a 30 volte più energetici che quelli liberati durante la reazione a fissione. La prima parete che circonda il plasma e le regioni del vuoto intorno al punto di fusione assorbiranno la maggior parte dell'urto, prodotto sia dal bombardamento neutronico sia dalla radiazione elettromagnetica emanata dal plasma surriscaldato. Nelle collisioni contro questa parete, i neutroni abbandoneranno una parte della loro energia sotto forma di calore. Questo calore deve essere rimosso rapidamente mediante un raffreddamento circolante per evitare che la parete si fonda. Dopo l'estrazione dal reattore, questo raffreddante surriscaldato viene usato per la produzione di vapore per generare l'elet-

tricità. Un metodo interessante è quello di usare un cuscinetto di litio, che sotto l'azione dei neutroni produrrà abbondanti quantità di trizio che eventualmente, in una seconda fase potrà essere bruciato nella reazione. E allora la sicurezza? Anzitutto la fusione genera molto meno radioattività che la fissione e non vi sono problemi di lunga scadenza concernenti le scorie radioattive. Un reattore a fusione genererebbe una grande quantità di trizio, che è radioattivo e difficile da contenere. Tuttavia, gli effetti biologici del trizio sono relativamente benigni - non ha la tendenza a concentrarsi o a rimanere negli organismi viventi - ed emette una radiazione relativamente debole, elettroni di un'energia massima di 16 KeV, meno energetici e quindi meno pericolosi del fascio di elettroni di un comune televisore, pari a 24 KeV. Anche dopo un periodo breve di funzionamento, la radioattività dovuta ai neutroni che bombardano la struttura di un reattore a fusione diviene molto più grande che la debole radioattività del trizio. Una scelta intelligente delle pareti del reattore può minimizzare questi effetti. La radioattività indotta nelle strutture è costituita principalmente da isotopi non-volatili. Invece, in un reattore a fissione, una quantità ragguardevole della radioattività prodotta è sotto forma di gas volatili che potrebbero fuoriuscire se la struttura del contenitore subisse un danno, come avvenne ad esempio a Chernobyl dove tutta la radioattività sfuggita - più di venti milioni di curie - fu sotto forma di sostanze gassose. Un reattore a fusione fatto in acciaio inossidabile anche senza cuscinetto protettore di litio, accumula - a parità di potenza - ben 300 volte meno radioattività di un reattore a fissione. Rimpiazzando l'acciaio con l'ancora più resistente contenitore di vanadio, la radioattività indotta sarebbe dieci volte migliore. In altre parole, è concepibile un reattore a fusione che produca 3.000 volte meno radioattività di un reattore a fissione con la stessa potenza.

La differenza tra la fissione e la fusione è ancora più rilevante per quanto

riguarda la produzione di scorie radioattive a vita media lunga. In un reattore a fusione non c'è niente di paragonabile al plutonio o ai frammenti di fissione di un reattore a fissione. Come ben noto, il plutonio contenuto in un reattore a fissione è notevolmente pericoloso. La sua radioattività ha una vita lunghissima, con una mezza-vita di 24.100 anni. Esso è completamente assente nel caso della fusione, almeno che non si circondi il plasma con l'uranio! Dopo un periodo di stoccaggio di 100 anni, le scorie radioattive prodotte da un reattore a fusione in acciaio inossidabile, sarebbero un milione di volte meno pericolose che quelle prodotte da un reattore a fusione in vanadio per un tempo così lungo. In altre parole, un reattore a fusione ben concepito eliminerebbe completamente il problema dello stoccaggio a lungo termine delle scorie radioattive. Ma come realizzare in pratica la fusione nucleare a scopi pacifici? Il problema è quello di mantenere temperature astronomiche durante il tempo necessario alla realizzazione controllata per aver luogo. Per innescare una combustione nucleare occorre raggiungere e mantenere idrogeno, trizio, deuterio, elio a temperature tra i 100 e i 200 milioni di gradi. È chiaro che tutti i materiali conosciuti fondono già ad alcune migliaia di gradi. Dunque bisogna trovare altri meccanismi. La ricerca sulla fusione nucleare ha individuato due metodi fondamentalmente diversi. Il primo sistema consiste nelle cosiddette « bottiglie magnetiche » nelle due forme di « tokamak » e di « doppio specchio »; certamente il più studiato e con almeno un quarto di secolo di ricerca sperimentale. L'idea è di utilizzare un campo magnetico sufficientemente intenso da trattenere i gas riscaldati a decine di milioni di gradi. Poiché la Commissione ha previsto l'audizione dei professori Toschi e Coppi, i quali senza dubbio parleranno a lungo della fusione a confinamento magnetico, per ovvie ragioni di tempo, preferisco farne solamente un breve cenno, e concentrare invece la mia presentazione sull'altro metodo di confinamento, quello

inerziale, sul quale sto portando avanti studi di fattibilità basati sulle tecniche degli acceleratori di particelle di cui sono, per così dire, specialista. La conclusione del mio lavoro sarà eventualmente una proposta pratica di fusione del tipo inerziale. Fino dagli anni cinquanta è in corso una vasta linea di ricerca in varie parti del mondo allo scopo di creare una bottiglia magnetica capace di contenere plasmi abbastanza caldi per innescare spontaneamente il processo di combustione. Dopo una fase iniziale di grande ottimismo, è risultato evidente che l'impresa non era facile. Nel corso degli anni si sono dovute rivedere le troppo ottimistiche previsioni sulla possibilità quasi matematica di arrivare in breve tempo alla fusione nucleare per confinamento magnetico. Oggi si pensa che la fusione sia effettivamente possibile ma solo alla condizione di aumentare l'intensità dei campi rispetto ai valori raggiunti fino a questo momento. Per innescare il processo di fusione occorre creare simultaneamente queste condizioni: portare la miscela dei gas ad almeno cento-duecento milioni di gradi, mantenere la temperatura elevata per qualche secondo, rendere il plasma sufficientemente denso.

Interessanti risultati sono stati ottenuti negli ultimi anni: in Europa, Unione Sovietica e Giappone, recentemente negli Stati Uniti. Un goal straordinario è stato fatto a metà luglio con la macchina toroidale dell'Università di Princeton: per un quarto di secondo il plasma è stato portato alla temperatura di 200 milioni di gradi, un risultato straordinario che rinnova le nostre speranze nella fattibilità del progetto di fusione. Mancano ancora diverse condizioni per raggiungere la certezza che questo metodo sarà capace di sostenere l'autocombustione. Nelle sue grandi linee tuttavia lo schema è più o meno definito. Si tratta ora di realizzarlo arrivando a costruire una bottiglia magnetica abbastanza robusta e che abbia capacità di tenuta in modo che il gas non sfugga. Il fine più prossimo di queste ricerche è oggi quello di ottenere dal sistema più energia di quanta se ne spenda

per innescare il processo di combustione e per mantenere la bottiglia magnetica in funzione. Ad esempio il U.S. Department of Energy (DOE) ha in programma di dimostrare su larga scala la produzione di una quantità notevole di energia partendo dalla reazione D-T prima della fine del secolo. Il produrre dalla fusione più energia di quanto sia necessario per innescare la reazione, è certamente una meta scientifica valida. Tuttavia il realizzare un dispositivo capace di produrre elettricità in maniera economica, e possibilmente migliore dei metodi odierni, è tutto un altro paio di maniche. La gravità dei problemi tecnici associati alla realizzazione pratica di un dispositivo capace di produrre grandi quantità di energia elettrica non era stata del tutto capita nei primi anni del programma di fusione. Queste difficoltà sono state gradualmente rivelate da una serie dettagliata di straordinari disegni concettuali di reattori, frutto di sforzi del DOE negli ultimi dieci anni. L'obiettivo di questi studi è stato quello di arrivare ad una descrizione plausibile del reattore a fusione, partendo da concetti fondamentali di fisica e con una ragionevole estrapolazione della tecnologia dei dispositivi attuali. È chiaro che nessuno può descrivere oggi con esattezza a cosa assomiglierà un reattore D-T. Ma alcune delle difficili questioni possono già trovare risposta, anche se approssimativa. Sappiamo ad esempio che: 1) deve essere molto grande. Teorie attuali ci dicono che il raggio del plasma deve essere di parecchi metri per sostenere la reazione. Anche se ciò cambiasse, le dimensioni devono essere considerevoli per uniformizzare la potenza assorbita dalle pareti; 2) il cuscinetto di litio fuso per rallentare i neutroni deve essere almeno di un metro di spessore. Schermi addizionali sono necessari per proteggere le bobine superconduttrici dall'intenso calore e dalle radiazioni del plasma; 3) magneti superconduttori di grandissime dimensioni e campo elevatissimo sono soggetti a grandissime forze dell'ordine di centinaia di atmosfere. La temperatura di funzionamento del magnete si discosta di pochi

gradi da quella dello zero assoluto. Quindi a qualche metro di distanza abbiamo le più alte temperature di centinaia di milioni di gradi e le temperature più basse.

Nonostante le conoscenze scientifiche siano aumentate enormemente, non è quindi del tutto fuori posto il pessimismo espresso da parecchia gente e tra questi il collega Toschi sulla possibilità di trasformare uno strumento di ricerca quale il « tokomak » in un dispositivo pratico, semplice ed economico per produrre energia di fusione. Nell'opinione di molti il « tokomak » trasformato in centrale corre il rischio di finire assieme ad altri « trionfi » della tecnologia, troppo costosi per trovare una vasta applicazione, come il dirigibile « Zeppelin », il supersonico « Concorde » e il reattore autofertilizzante tipo « Superfenix », eccetera.

Di gran lunga più promettente è, a mio parere, l'altro filone di ricerca sulla fusione, basato sul cosiddetto confinamento inerziale, una variante dei principi della bomba termonucleare, soprattutto grazie a dei nuovi sviluppi della tecnica degli acceleratori di particelle di alta energia. La fusione nucleare a confinamento inerziale è in essenza una successione di micro-esplosioni nucleari controllate che, in analogia con un motore a scoppio, possono fornire il calore necessario dal quale estrarre potenza energetica. Immaginiamo una minuscola pallina metallica cava, riempita di deuterio e trizio, che cada all'interno di una camera di esplosione al centro della quale viene rapidamente surriscaldata da fasci di luce o di particelle ad alta energia – così intensi da riprodurre su scala microscopica gli effetti della tradizionale bomba a fissione che innesca la bomba termonucleare. L'anno scorso quattro dei più grandi sistemi *laser* del mondo, il NOVA del Lawrence Livermore national laboratory di Livermore, in California, il GEKKO-XII dell'Università di Osaka in Giappone, il PHEBUS di Limeil, in Francia, e l'OMEGA nel laboratorio dell'Università di Rochester, hanno iniziato a funzionare a lunghezze d'onda nel visibile e nell'ultravioletto. Presso il Los Alamos national

laboratory è in fase di messa a punto un altro tipo di *laser*, funzionante a una lunghezza d'onda ultravioletta leggermente inferiore. Anche se molti grandi sistemi *laser* hanno un ruolo indiscusso nel campo degli armamenti, le linee di ricerca scientifica aperte da tutti questi strumenti consentono un moderato ottimismo anche per un'applicazione di tipo pacifico: la fattibilità scientifica di ottenere energia di fusione con il *laser*.

Vediamo alcuni dei parametri essenziali di questo ipotetico schema di produzione energetica. Le dimensioni tipiche della pallina potrebbero essere dell'ordine del millimetro e la camera di scoppio del diametro di almeno dieci metri per diluire gli effetti dell'esplosione sulle pareti. Un'esplosione termonucleare in miniatura al secondo – qualora si raggiungesse il rendimento energetico sperato – produrrebbe una potenza pari a quella di una grande centrale da tre-quattro gigawatt termici o uno-duemila megawatt elettrici. L'intera domanda di energia elettrica dell'Italia, per esempio, potrebbe essere soddisfatta facendo esplodere una manciata di tali palline al secondo! Sappiamo già parecchie cose sul come realizzare un tale programma di ricerche. Dovendo provocare un'implosione, la pallina va riscaldata solo all'esterno: se si facesse il contrario, si dissiperebbe, si distruggerebbe e non resterebbe niente. Perciò essa è come una bomboletta di gas con un guscio dello spessore opportuno che colpito dalla luce *laser*, produce sull'interno un forte effetto di compressione e riscaldamento. Un fascio o un impulso di luce *laser* viene scisso in numerosi fasci più piccoli di uguale intensità. I singoli fasci vengono focalizzati mediante un sistema di lenti e specchi su una piccola regione lungo direzioni differenti. Una carica di combustibile di deuterio e trizio viene incapsulata in un involucro sferico di pochi millimetri di diametro, fatto di plastica, vetro o altro materiale; la risultante « pastiglia » di combustibile viene poi posta all'intersezione dei fasci e illuminata uniformemente. L'impulso *laser* ionizza quasi istantaneamente gli atomi dello strato più

esterno della pastiglia, mentre il materiale all'interno di un certo raggio critico è opaco all'energia *laser*. L'energia incidente viene di conseguenza assorbita in un denso strato di plasma che circonda il combustibile di deuterio e trizio. Lo strato di plasma riscaldato si espande e viene asportato per ablazione, ovvero strappato in modo esplosivo, dal resto della pastiglia: la velocità del plasma ablatato è tipicamente di 1000 chilometri al secondo. Una forza uguale e opposta accelera verso l'interno il materiale al di sotto dello strato di ablazione, come se si trattasse di un razzo la cui spinta venisse fornita dal plasma che sfugge tutto all'intorno. La forza implosiva concentrica è sufficiente per accelerare il resto dell'involucro a una velocità di molte centinaia di chilometri al secondo in un miliardesimo di secondo. Il raggio del combustibile viene compresso anche di 50 volte, così che l'alta temperatura e l'alta densità risultante ne provocano la fusione. È in scala molto inferiore un fenomeno simile a quello del sole il cui nucleo è schiacciato dal peso delle masse superiori. Anche se l'esplosione nucleare di una pallina di combustibile non è stata mai osservata, possiamo studiare teoricamente il processo con precisione grazie alle simulazioni su grandi calcolatori in cui le fasi dell'implosione possono essere seguite con il più grande dettaglio. Si noti che una buona parte dei codici di calcolo utilizzati per descrivere lo stato di combustibili ad altissima temperatura sono segreti, in quanto ottenuti e utilizzati per progettare le bombe termonucleari. Nelle tipiche condizioni di una pastiglia di combustibile che potrebbe essere presa in esame per un reattore commerciale, essa è irraggiata da un *laser* nell'ultravioletto la cui energia è di 1,6 milioni di joule (un joule è l'energia necessaria per sollevare un chilogrammo di circa 10 centimetri). Nel caso in studio l'energia del *laser* viene liberata con una potenza media di 3×10^{14} watt in un impulso la cui intensità aumenta costantemente per 5-10 miliardesimi di secondo. L'intensità dell'impulso viene tenuta suffi-

cientemente bassa per evitare di produrre un numero eccessivo di elettroni sovratermici nella corona di plasma. Si scopre così che per mantenere la stabilità della pastiglia, il rapporto tra il raggio iniziale del materiale di ignizione e il suo raggio finale non dovrebbe essere troppo alto, dell'ordine di 50:1.

Mentre la superficie di separazione tra l'involucro e il combustibile decelera in prossimità dell'istante di compressione massima, le variazioni di pressione e l'aumento delle instabilità idrodinamiche obbligano i profili di densità a seguire un andamento complesso attorno al nocciolo. Le particelle alfa emesse dalla combustione termonucleare nella regione di ignizione cominciano a cedere la loro energia allo strato principale del combustibile. Quando il prodotto tra la densità e il raggio della regione di ignizione raggiunge valori sufficientemente grandi da arrestare la maggior parte delle particelle alfa, si è raggiunta l'ignizione termonucleare. La temperatura nella regione di ignizione raggiunge all'incirca 100 milioni di gradi Celsius, mentre la temperatura dello strato principale del combustibile è di circa 30 milioni di gradi. La combustione termonucleare si propaga radialmente verso l'esterno nello strato principale del combustibile e, mentre viene consumato il combustibile, il profilo di temperatura diventa più regolare e la combustione diventa quasi sferica. La pastiglia a questo punto si sfalda e il « fuoco » termonucleare si spegne. Secondo le simulazioni, che hanno considerato una varietà di disuniformità dell'irraggiamento, la produzione di energia termonucleare è tipicamente 100 volte l'energia *laser* in ingresso. Questi risultati danno nuova fiducia nella realizzabilità della fusione con il *laser*. Si potrebbe quindi creare un impianto di potenza capace di produrre quasi un miliardo di watt, e cioè la potenza confrontabile a un grande reattore nucleare, se si innescassero 10 compresse di combustibile ogni secondo e se il rendimento complessivo del *laser* fosse circa del 15 per cento. Sulla base di tali calcoli, ci aspettiamo

che per un reattore potrebbe essere adeguato un *laser* che emetta più di 1,6 milioni joule di energia, ma meno di 10 milioni joule. La tecnica sviluppata nei laboratori americani negli anni sessanta e settanta con l'impiego di *laser* ordinari si è rivelata insufficiente, anzitutto perché la potenza emessa dai più potenti *laser* oggi è dell'ordine di appena 15.000 joules, e cioè meno dell'1 per cento di quanto è necessario, e inoltre la lunghezza d'onda della luce emessa è troppo lunga. A lunghezze d'onda lunghe, dopo un primo riscaldamento, la pallina diviene riflettente, speculare e non è in grado di assorbire la luce ulteriormente emessa a causa del fenomeno di riflessione. Questi *laser* si sono dimostrati inefficienti anche dal punto di vista del bilancio energetico: infatti solo un millesimo dell'energia impiegata si trasforma in luce. Con questo rapporto, il saldo sarebbe negativo, perché tutto il prodotto della fusione se ne andrebbe per compensare l'inefficienza del *laser*. Ricordiamoci che nell'esplosione termonucleare la bomba-accendino innesca una reazione che dà un fattore da cento a mille di potenza. Più precisamente, le simulazioni al computer delle mini-esplosioni per la fusione inerziale indicano un fattore corrispondente di guadagno dell'ordine di cento. Ma se il *laser* consuma cento volte più di quanto produce in termini di luce si va alla pari: tutta l'energia ricavata dalla fusione se ne va per ricaricare il *laser*.

Vanno quindi trovati meccanismi migliori in grado di provocare l'implosione della pallina di idrogeno. Invece della luce al *laser* si possono usare fasci di nuclei di materiali pesanti, come piombo, oro, argento o mercurio, spinti con campi elettrici a velocità grandissime, prossime a quella della luce, e puntati contro la pallina. Sparando contro la pallina che sta cadendo nella camera di fusione dei fasci ben focalizzati di particelle si produce un impatto meccanico che genera la reazione trizio-deuterio. Per questo ci può dare una mano la grande esperienza nell'accelerazione di particelle e nell'accu-

mulazione di grosse correnti di ioni pesanti, fatta negli Stati Uniti e soprattutto in Europa, al CERN di Ginevra. Abbiamo quindi a disposizione la tecnologia che ci permette di dire che la produzione di fasci di grande intensità non è irragionevole, di considerare tali progetti nei limiti del possibile.

Ai Sandia national laboratories ad Albuquerque è stata ultimata di recente la costruzione di un acceleratore chiamato PBFA II (Particle Beam Fusion Accelerator), che fornirà energia alle pastiglie di combustibile mediante fasci di ioni di litio altamente energetici. La tecnologia degli acceleratori ci offre anche una nuova e più potente sorgente di luce. Si tratta del cosiddetto Free Electron Laser, il *laser* a elettroni liberi, più sinteticamente noto come FEL. Sto elaborando una serie di parametri per un FEL che – perlomeno teoricamente – risponde ai bisogni della simulazione sul computer. È questa oggi una tecnologia completamente nuova che a mio parere è capace di progressi straordinari e rapidi, promettente per almeno tre motivi: 1) consente di emettere fasci luminosi incredibilmente intensi. Un acceleratore lineare costruito con tecniche provate seguito da un opportuno « ondulatore » può – secondo calcoli da me fatti – ottenere potenze picco di alcuni milioni di joules; 2) è molto più efficiente sotto il profilo del bilancio energetico. Misure compiute in diversi laboratori hanno rilevato che è possibile ottenere un'efficienza del 30 per cento in termini di produzione di intensi impulsi di luce rispetto alla quantità di energia impiegata per produrli, con un saldo quindi estremamente positivo; 3) funziona su tutte le lunghezze d'onda. Si può quindi prescegliere una lunghezza d'onda sufficientemente corta allo scopo di eliminare il fenomeno di autoriflessione della pallina per ottenere la massima resa nel processo di riscaldamento del plasma.

Si stanno quindi compiendo progressi tecnologici fondamentali che fanno sperare in una soluzione di molti problemi della fusione a confinamento inerziale in tempi ragionevolmente brevi. Vorrei no-

tare che il FEL è anche oggi un investimento di miliardi di dollari all'anno da parte dell'amministrazione americana per lo sviluppo della ricerca sul FEL. Questa fortissima spinta, determinata da ragioni belliche, si rifletterà in maniera decisiva sui programmi di ricerca nel campo della fusione, con un'accelerazione altrimenti impensabile.

Nel campo della ricerca sulla fusione si fronteggiano dunque due linee alternative: il confinamento magnetico e quello inerziale. La ricerca sulla fusione a confinamento magnetico è più avanzata; il sistema è più studiato, più capito, conta maggiori esperienze. Il confinamento inerziale è tuttavia molto più attraente dal punto di vista tecnico della realizzazione pratica di un reattore a fini commerciali. Una concentrazione sufficientemente alta di energia per provocare l'implosione a mio parere è possibile in un futuro non lontano con lo sviluppo di un adeguato schema di FEL.

Sono persuaso che l'uomo del futuro vivrà di fusione come noi viviamo di combustibili fossili e di fissione nucleare. Quando avverrà la prima transizione è impossibile dirlo: tutto dipende dall'impegno nel raggiungimento di questo obiettivo. Non mi sembra che la ricerca sia abbastanza sostenuta, incentivata, per poter prevedere tempi brevi. Quella sul confinamento inerziale, che si fa quasi esclusivamente negli Stati Uniti e in Giappone, procede a rilento per mancanza di fondi, a parte il recente scossone ricevuto indirettamente dal programma di guerre stellari. Per quanto riguarda le bottiglie magnetiche, si va avanti a un ritmo *standard*, con un supporto finanziario più o meno costante che tuttavia ha permesso alcuni significativi progressi negli ultimi anni. Non è il progetto Manhattan, è la *routine*.

PRESIDENTE. Ringrazio il professor Rubbia per il suo intervento introduttivo. Passiamo ora alle domande.

GIANNI TAMINO. La relazione del professor Rubbia è stata molto interessante,

pertanto, è innanzitutto doveroso ringraziarlo per il contributo fornitoci e per l'onestà morale con la quale ha posto in evidenza i pericoli militari connessi con alcune tecnologie; ciò è molto importante in un momento in cui si discute l'operato dello scienziato rispetto ai possibili rischi.

Vorrei avere un chiarimento su un aspetto che non è stato evidenziato. Desidero innanzitutto precisare che non sono un fisico; sono un biologo che, però, si è occupato di problemi di questo genere. Mi risulta che la fusione (per lo meno per quanto riguarda il confinamento magnetico) per motivi geometrici sia tale da non rendere possibile un processo continuo. Esiste, quindi, il grosso problema di mantenere lontano dalle pareti lo strato del plasma. Vi è, inoltre, anche un problema di bilancio energetico ed economico di un ipotetico reattore a fusione. Pertanto, la prima domanda che vorrei porre è la seguente: tenuto conto di questi problemi (a parte il discorso del cristallino da colpire con il *laser* o con altri sistemi), è possibile valutare se la resa energetica sia tale da compensare non solo l'energia del materiale, ma anche l'insieme del bilancio energetico, quindi l'estrazione del deuterio, eventualmente l'ottenimento del trizio e la costruzione della centrale?

Inoltre, nell'ambito del bilancio economico vorrei avere una valutazione sul « mantello » di assorbimento dei neutroni, tenuto conto che se il « mantello » è di scarsa qualità abbiamo problemi in termini di prodotti di reazione, quindi di radioattività, oltre a problemi di resa energetica se non manteniamo intorno ai 600 gradi il flusso. È possibile fare un'ipotesi di bilancio energetico ed economico che tenga conto di tutti questi aspetti?

Un'altra questione riguarda i rischi. Non metto in dubbio, ovviamente, che vi sia un abisso tra i prodotti che si ottengono dalla fusione e quelli che si ottengono dalla fissione, per cui non esiste un problema di gestione di scorie. Però la questione del trizio non è così irrilevante; infatti, il trizio è rilevante nel momento

in cui entra nelle cellule. È chiaro che io posso avere a che fare con il trizio, esservi immerso, purché esso non venga a contatto con me ed io non lo assorba, ma una volta assorbito ed entrato nelle cellule, essendo un sostituto dell'idrogeno, fa parte di tutte le macromolecole, compreso il DNA, e quindi presenta un impatto genetico con rischio mutageno e cancerogeno notevole.

Vorrei, infine, porre un'ultima domanda. A seconda del tipo di « mantello » che usiamo, qual è la vita media di una centrale a fusione? Sappiamo che una centrale nucleare a fissione può durare dai venti ai trentacinque anni circa. Se i tempi sono lunghissimi, è chiaro che non si pone il problema dello smantellamento, ma nel caso contrario il « mantello » che ha assorbito quella energia da neutroni evidentemente creerebbe dei problemi che non so come possano essere valutati. Vorrei ricordare che a Bikini ancora oggi si vivono le conseguenze del bombardamento neutronico; certamente in quel caso erano presenti tutti i tipi di materiale. Il problema era stato però sottovalutato allora, mentre adesso è stato ridimensionato alla luce dell'esperienza di Bikini.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Per quanto concerne la prima domanda, sono profondamente convinto che i Tokomak siano bellissime macchine per fare ricerca, ma pessime macchine per produrre energia. Il motivo principale è che per estrarre un gigawatt di energia elettrica c'è bisogno di tre gigawatt di energia termica; occorre un sistema per estrarre una così immensa quantità di calore. Sono convinto che una macchina costruita per studiare il plasma sia molto importante per la scienza, però - ripeto - sarà molto difficile utilizzarla come sorgente pratica di energia e di calore. Per questo sono convinto che un reattore basato sul principio dell'implosione inerziale è tecnicamente e praticamente molto più adatto. Innanzitutto bisogna considerare il fatto che la densità

della pallina è molto grande, quindi l'energia è emessa a partire da un volume piccolissimo. In secondo luogo il toro diventa una sfera; è possibile costruire una sfera con un raggio di soli 5 metri (un volume analogo a quello della stanza in cui ci troviamo ora) per bruciare al suo interno ben tre Gigawatt termici. La terza cosa importante è che questa sfera è passiva: i fasci per accendere il *pellet* arrivano dentro una vera e propria camera di combustione, praticamente un fornello, senza strumentazione sofisticata all'intorno.

Un oggetto che si possa vendere deve essere intrinsecamente molto più semplice degli strumenti che stanno progettando per studiare i plasmi. Nel caso della fusione inerziale ci sono centinaia di fasci che puntano verso il centro: se ne funzionassero ad esempio soltanto 99, il sistema è ugualmente efficiente. Nel caso del Tokomak per esempio, una singola spira della bobina fuori uso, e la macchina non funziona. L'altro problema, ancora più importante, è dato dalle radiazioni, se si rompe qualcosa. Nel Tokomak bisogna entrarci per ripararlo, si deve accedere in zone dove la radioattività è grande anche dopo che è stato spento. La strumentazione attorno alla camera del plasma è complicata e richiede frequente manutenzione. Inoltre deve essere esposta all'enorme flusso di radiazioni e di calore. Nel caso della fusione inerziale invece, la macchina che li produce è lontana, costantemente accessibile agli operatori, persino durante in funzionamento della stazione.

Quindi ritengo che il sistema inerziale sia molto più ragionevole soprattutto dal punto di vista ingegneristico; questo non vuol dire che l'altro sistema non sia importante per capirne la fisica. Per una realizzazione pratica di una centrale di potenza punterei piuttosto sulla fusione inerziale.

Un'altra domanda era: « Come realizzare in pratica una tale cavità? ». Esistono degli studi estremamente dettagliati fatti negli Stati Uniti, in Giappone e in Germania che mostrano che una cavità

protetta da litio in fusione può garantire nello stesso tempo un assorbimento efficace e sicuro dei neutroni e la produzione di trizio che è indispensabile come combustione. Stime hanno mostrato che una tale cavità può operare in maniera soddisfacente per periodi molto lunghi (decine di anni). Rimane evidentemente da provare se tutto ciò è effettivamente vero. Si noti che il sistema Tokomak ha problemi del tutto analoghi.

Un altro problema importante che viene sollevato è quello del trizio. Vorrei ricordare che in un reattore la quantità di trizio presente in un istante è estremamente piccola: le palline hanno, infatti, un diametro di alcuni millimetri; per male che vada si può perdere una pallina. Il trizio è un materiale che emette radiazioni di raggi beta ma di energia massima di 16 KeV. Da notare che un comune televisore ha un intensissimo fascio di elettroni ad energia più elevata, dell'ordine di 24 KeV! In conclusione il trizio è presente nella macchina in piccole quantità. Esso è un gas estremamente leggero, come l'idrogeno. Quindi se ci fosse una fuga di trizio, esso andrebbe in alto salendo fino alla stratosfera con grandissima rapidità. Il pericolo esiste, non è trascurabile. Esistono anche reazioni di seconda o terza generazione che non usano trizio. Sono convinto che la reazione del deuterio sia quella più ragionevole. La differenza di sforzo - come sentirete anche da Toschi - tra deuterio e trizio non è poi così grande. La macchina di Toschi è prevista per il trizio, ma dovrebbe anche marciare a deuterio. È un po' come le automobili che possono andare con la benzina sia ordinaria che *super*. Riconosco l'esistenza di problemi del trizio, ma ci sono delle attenuanti.

ALFREDO PAZZAGLIA. Nel documento che ci è stato distribuito è contenuta una previsione per il futuro che a me sembra molto interessante. Si sostiene che l'uomo del futuro vivrà di fusione come noi oggi viviamo di combustibile fossile e di fusione nucleare. Si aggiunge che lo stato attuale della ricerca non consente di ipo-

tizzare tempi brevi per l'utilizzazione della fusione. Si tratta di una valutazione di tempi certamente relativa; vorrei chiedere al professor Rubbia allo stato della ricerca - certamente non prevedendo una ricerca accelerata, perché non siamo in grado di determinarla, quanto meno in Italia - quali tempi possono essere considerati per ipotizzare una produzione industriale di energia utilizzando la fusione.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed higgins professor presso l'Università di Harvard*. I metodi tradizionali consistono essenzialmente nella macchina Tokomak e nei *laser* ordinari per la fusione inerziale: a mio parere, questi due metodi sono piuttosto « coriacei » e ci vorrà molto tempo prima di realizzare una macchina che produca energia in maniera competitiva dal punto di vista economico. Abbiamo dunque bisogno di idee nuove e ne esistono almeno due che a me sembrano estremamente promettenti e che indicano un progresso molto più sicuro e veloce: una è quella relativa agli elettroni *laser* liberi. Le guerre stellari e la fusione inerziale richiedono dei *laser* con proprietà confrontabili. Almeno sulla carta, il *laser* a elettroni liberi, tanto nel campo delle guerre stellari quanto nel campo della fusione, sembra poter rispondere alle proprietà richieste. La teoria degli acceleratori ci permette di prevedere sistemi in cui si può guadagnare sui dispositivi ottici classici il fattore cento ed oltre in energia, necessario per far funzionare ambedue i sistemi. Sono convinto che queste macchine, soprattutto sotto l'impulso della ricerca sull'SDI saranno presto in grado di produrre la quantità di luce necessaria senza troppa difficoltà.

Il secondo discorso riguarda i fasci di particelle pesanti; queste sono utilizzate nell'SDI per « sentire » se il missile che arriva contro è pieno o finto. Esistono nuove tecniche, basate su tecnologie sviluppate al CERN ed altrove per studiare fenomeni fisici ad altissima energia in cui si sono accumulati e si manipolano fasci di particelle che hanno l'energia e la potenza richieste per iniziare una fusione

inerziale e in cui il *laser* è sostituito con un fascio di ioni ionizzanti e pesanti di alta energia (≈ 10 GeV). Infine, se riuscissimo ad ottenere sia con il *laser* ad elettroni liberi o con degli ioni pesanti l'energia dell'ordine di un milione o dieci milioni di *joule*, quale è la probabilità che la pallina colpita da fasci, imploda? Secondo i calcoli portati a termine con un codice analogo a quello usato per le esplosioni termonucleari la pallina imploderà restituendo all'incirca cento volte l'energia impiegata per accenderla.

Per quanto riguarda i tempi non è escluso a mio parere che succedano « miracoli », del tipo di quelli che ci vorrebbero per fare marciare l'SDI alla data prevista del 1992! Comunque non sono in grado di guardare nella sfera di cristallo - lo scienziato non può promettere il risultato prima di averlo conseguito - si tratta soltanto di una stima. Tutto dipende da come queste nuove tecnologie si svilupperanno: due o tre mi sembrano estremamente promettenti.

ELIO GIOVANNINI. Ho ascoltato con grande attenzione la valutazione sul rapporto fra l'attuale sperimentazione sul sistema Tokamak e la possibile utilizzazione di queste stesse macchine per ottenere risultati unitari di ordine planetario; però, continuo ad essere fortemente preoccupato per il fatto che, in sostanza, il progetto FEL è lo stesso sia per l'SDI sia per la fusione inerziale.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Come diceva Carlo Bernardini « essa è figlia di madre ignobile ».

ELIO GIOVANNINI. Speravo che la situazione fosse diversa. Non dico questo per spiegare che la scelta per la fusione inerziale sia più militare dell'altra, ma per sottolineare che, dato che esiste un rapporto strettissimo fra questa ipotesi e la ricerca sui *laser*, il problema di un accordo internazionale (condizione per fare la ricerca, per fare la fusione, ma

anche condizione per fare la fusione anziché un'altra cosa) è un dato politicamente cogente e, in qualche misura, decisivo. Non vorrei forzare la discussione, ma soltanto dire che mai come durante la sua esposizione mi è parso evidente il rapporto esistente fra l'adozione di una soluzione tecnica o tecnologica e le scelte politiche da effettuarsi a livello nazionale ed internazionale.

Per quanto riguarda la questione del costo del programma, lei ha parlato del costo dell'Apollo; se non sbaglio, mi pare si trattasse di 30 miliardi di dollari. Secondo una valutazione che trovo nel materiale che è stato fornito alla Commissione, mi pare sia di Mario Silvestri l'ipotesi del costo del programma sarebbe di circa 30 miliardi di dollari annui, per un certo numero di anni. Si tratta di un'ipotesi non recentissima, di qualche tempo fa. A questo punto, vorrei sapere - anche se lei probabilmente è più ottimista per quanto concerne i costi - se non ritenga che una dimensione di spesa che sicuramente deve essere dell'ordine di molti miliardi di dollari, in termini di spostamento di risorse per l'insieme dei paesi industrializzati, un programma realistico per la fusione nucleare possa essere separato da un accordo internazionale e possa essere portato avanti senza toccare l'unico programma rilevante di spesa dell'ordine di 600-700 miliardi di dollari che esista in questo momento a livello planetario per il programma militare. In sostanza, domando quale sia la sua opinione sul rapporto, che a me pare obiettivamente molto stretto, fra la scelta internazionale per la fusione nucleare e i costi di tale scelta e come si possa procedere senza interferire sull'unico programma internazionale disponibile, cioè quello così rilevante in campo militare.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CER ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Ho insistito perché si chiarisse questo rapporto tra applicazioni militari e energetiche. Mi è sembrato che queste cose si dovessero dire. Quanto alle risorse necessarie per arrivare in fondo

non possiamo saperlo, ma, come ho detto precedentemente, penso che il costo dipenda da ciò che uno vuol fare. Ciò che manca soprattutto oggi, a mio parere, non sono tanto i soldi, ma le idee; non ritengo che al momento attuale uno scienziato che abbia una buona idea non riesca a farla fruttare. Occorrono uomini e idee: la linea della fusione inerziale, basata su tecniche nuove, a mio parere, non costerebbe molto, costerebbe poco. Il suo costo sarebbe delle dimensioni di quanto si spende nel nostro Paese in altri importanti campi di ricerca come ad esempio nella fisica delle particelle elementari. Purtroppo, e questo è a mio parere il vero problema, ci sono troppo pochi scienziati veramente « di classe » che si occupano di energia. C'è più bisogno di uomini che di finanziamenti.

La seconda domanda era relativa alle interferenze tra un programma pacifico sull'energia e le applicazioni militari. Io credo che se non lanciamo qui in Europa un programma indipendente di ricerca in questo campo a scopi eventualmente ed esclusivamente pacifici, le conoscenze provenienti dall'estero potrebbero venirci a mancare. Già una volta tutto il programma di fusione inerziale è finito sotto la cappa dei lavori segreti del US Department of defense. Oggi è fortunatamente di nuovo parte del Department of energy. Non escluderei però un ritorno di alcuni dei dettagli essenziali ad un livello di militarizzazione che renderebbe la vita molto difficile agli Europei.

D'altra parte, è chiaro che ciò che può essere applicato per la guerra, non deve essere necessariamente utilizzato a tale scopo. Per esempio, il *radar* è stato creato negli anni quaranta come una grande impresa di guerra. Oggi viene utilizzato per gli aerei o per le navi, è un mezzo di progresso civile indispensabile. Alcune cose sono fatte per la guerra ed assorbite da essa: credo che noi dobbiamo mantenere in questo campo la nostra indipendenza tecnologica, portare avanti una linea equilibrata in un programma basato sul *laser* a elettroni liberi. Non bisogna

dimenticare che il *laser* è una macchina meravigliosa, che serve per tagliare i metalli, per saldare, per trasmettere informazioni sulle fibre ottiche, ed è utilizzato anche in chirurgia. Il *laser* ad elettroni liberi rappresenta un progresso enorme rispetto a quello ordinario, permette di fare cose prima impossibili, in quanto estende notevolmente la possibilità del *laser* ottico classico dalle microonde ai raggi X.

Esiste tutto un campo di ricerca e di applicazioni avente a che fare non con la guerra, ma con nuove attività tecnologiche avanzate. È importante mantenere una indipendenza tecnologica. Non possiamo vivere interamente di scienza prestata da persone che confondono scienza e applicazioni militari. Credo che in questo campo sia importante portare avanti le cose anche « a casa nostra ».

ANTONINO CUFFARO. Dobbiamo tenere nel massimo conto il punto di vista del professor Rubbia, la cui ipotesi è quella di un'accentuazione dei programmi europei come scienza libera, impegnati, sul versante della fusione, sia sul confinamento magnetico sia su quello inerziale. Anch'io ritengo che questa sia una strada molto interessante, anche perché, in base alla mia esperienza diretta, mi sembra che la fisica del plasma non sia stata ancora definita; quindi il Tokamak presenta alcune incertezze e lo stesso programma NET è un programma di ricerca. Poiché si tratta di un'ipotesi europea e non, quindi, di laboratori mondiali, che non mi sembrano realistici, chiedo al professor Rubbia quando potremo considerare questo nuovo progetto di cui egli ci ha parlato — che mi sembra l'annuncio più interessante dato dal professore nel corso del suo intervento — tenendo presente che si vanno definendo taluni piani, in Europa e nel nostro paese, per i quali esiste una notevole allocazione di risorse. Mi riferisco, per esempio, al progetto EURATOM-CEE ed al fatto che in Europa per il confinamento inerziale è previsto solo il tre per cento delle spese impiegate in questo momento sul confinamento ma-

gnetico, mentre negli Stati Uniti le percentuali sono entrambe del cinquanta per cento.

Pertanto, è molto importante per la nostra Commissione conoscere non tanto il tempo in cui funzionerà il reattore – perché le previsioni sono state effettuate sulla base del parametro dei costi e non del parametro dei tempi – quanto piuttosto la possibilità di avviare altri progetti allo scopo di rendere l'Europa competitiva su questo piano. Sappiamo infatti che esistono energie e uomini e che sarebbe sufficiente una diversa canalizzazione delle risorse per poter affrontare un problema di grandi dimensioni. Vorrei inoltre conoscere l'opinione del professor Rubbia sull'esperienza che gli Stati Uniti stanno compiendo con il programma SIT. In questo senso, parlando di programmi europei è utile precisare la distinzione già fatta tra programmi per lo studio della fusione e programmi che non hanno niente a che fare con la fusione, che sono quelli dell'SDI, anche se può esservi un segmento di sovrapposizione.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Vorrei parlare innanzitutto del problema dell'organizzazione in Europa in questo campo. È chiaro che dovrebbe essere riequilibrato il rapporto fra il tre per cento di spese sulla fusione inerziale ed il novantasette per cento sulla fusione magnetica, non abbassando la fusione nucleare, bensì aumentando quella inerziale.

Dobbiamo ricordare che la fusione inerziale è una tecnologia a largo spettro, nel senso che, una volta riusciti ad esempio a fare funzionare un *laser* ad elettroni liberi, esistono per esso moltissime applicazioni industriali. Potrebbe darsi che non funzioni per la fusione: tuttavia sarà certamente prezioso per tagliare metalli, per applicazioni nella chimica, separazione di isotopi, produzione di microonde, eccetera. Oggi il *laser* è un oggetto onnipotente, e un tipo nuovo e più potente potrà rendere dei servizi preziosi. In contrasto, la fusione magnetica è una ricerca pura con finalizzazione precisa e che per

lo meno in una prima approssimazione non ha applicazioni dirette confrontabili. È forse un po' un difetto europeo, se confrontato con il Giappone e gli USA quello di tendere a fare una ricerca pura, dimenticando spesso la necessità di applicarla ad un qualcosa di preciso. Credo sia estremamente importante ristabilire l'equilibrio con laboratori di dimensioni confrontabili nei due campi.

Ho vissuto 25 anni al CERN, e credo di sapere esattamente cosa significhi fare ricerca a livello europeo. In breve, si può dire che in Europa ci sono quattro « grandi » paesi: l'Inghilterra, la Francia, la Germania e l'Italia e un « conglomerato » di paesi più piccoli. L'Italia passa alternativamente dallo stato del più piccolo dei grandi paesi a quello del più grande dei paesi piccoli.

Credo sia ragionevole che l'Italia diventi la nazione guida in un qualche campo, piuttosto che un Paese al seguito di tutte le iniziative che vengono dal di fuori. Nel campo degli acceleratori l'Italia è stata su scala mondiale un paese guida, purtroppo poi decaduto. Frascati è stata la culla di questi studi; poi c'è stata una vera e propria diaspora.

Il nostro capitale umano – oggi disperso ai quattro venti – andrebbe recuperato per aprire una linea indipendente che dovrebbe essere una linea europea in cui l'italiano dovrebbe essere l'elemento trainante. Non dobbiamo avere paura di divenire l'elemento pilota di una proposta pratica sul piano europeo per portare avanti una nuova politica energetica di ricerca e sviluppo di nuove fonti di energia.

LUCIANO RIGHI. Mi associo ai ringraziamenti per l'interessante esposizione. Il professor Rubbia ha posto talune questioni, una delle quali riguarda il fatto che, in questi ultimi tempi, nel corso di convegni sul tema, si è avuta l'impressione che l'antinuclearismo diffuso sia ancora nel subconscio: vi è ancora il ricordo delle bombe di Hiroshima e Nagasaki, e dell'ultimo avvenimento di Chernobyl. Ella, professore, nel corso della

sua relazione ha sostenuto che anche con i nuovi sistemi vi può essere creazione di radioattività. Vorrei un chiarimento sulla quantità e la pericolosità di tale radioattività perché, in un altro punto della relazione, parlando del sistema di fusione di tipo magnetico, ha sostenuto, usando una frase molto diplomatica, che si creano temperature altissime che « non vanno molto d'accordo » con quelle bassissime.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Pericoli non ve ne sono quasi perché in caso di guasto, la macchina si blocca. Il plasma è come una grande fiamma, simile a quella delle caldaie ma a temperatura molto più elevata. Non so se lei ha avuto occasione di vedere una grandissima caldaia in funzione: vi è calore dappertutto: vi sono problemi di trasmissione del calore che hanno aspetti veramente spettacolari.

A poca distanza dalla camera dove avviene la fusione vi è un oggetto estremamente delicato, il grande magnete che opera alla bassissima temperatura di - 271 gradi centigradi. Riunire temperature altissime e flussi di calore enormi con le esigenze di una criogenia di avanguardia in uno spazio limitato non è certamente un gioco da ragazzi. E in più bisogna realizzare tutto questo in un modo che sia economicamente competitivo con le altre sorgenti di energia, incluso il nucleare classico.

La seconda domanda si riferiva al problema della radioattività. La radioattività esiste, ma essa è meno pericolosa di quella di un reattore a fissione perché non ci sono effetti di *meltdown*, non vi sono sostanze gassose che fuoriescono - tranne il trizio che è presente in piccole quantità. Problemi di radioattività esistono, ma sono « più benigni » di quelli di un reattore a fissione. Sono, se mi permettete l'esempio, un po' quello che avviene con una gigantesca macchina a raggi X. Dal medico - fatta la radiografia - si spegne l'apparecchio e non vi è più alcun problema di contaminazione. Nel

caso del reattore a confinamento magnetico, la radioattività, dopo lo spegnimento, non è zero, ma discende rapidamente dopo l'arresto della macchina. Nei reattori a fissione esiste il grave problema delle scorie a lunga vita. In questo senso la fusione è un passo avanti essenzialmente perché i problemi di radioattività sono ancora presenti, ma molto minori.

LUCIANO RIGHI. Un'altra domanda riguardava le motivazioni della sua scelta per la fusione a confinamento inerziale. Noi non siamo in grado di comprenderne i pregi rispetto all'altro sistema, ma mi sembra di aver capito che ingegneristicamente si pongono minori problemi...

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Mi scusi se la interrompo onorevole, ma presto parlerete con dei difensori del sistema magnetico che forse arriveranno alla conclusione opposta, e cioè che il reattore a fusione inerziale non funzionerà mai!

LUCIANO RIGHI. A proposito della battuta precedente sul « figlio di madre ignobile », può anche accadere che da padri cattivi nascano figli buoni. Intendo dire che se vi sono risultati positivi in un certo campo del nucleare, vi può essere uno sforzo per scopi pacifici...

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. È certamente vero che l'effetto « militare » può aiutare, come del resto ho menzionato precedentemente nel caso del radar. Tuttavia oggi il problema più serio è quello del segreto militare: alcune cose, pochissimi elementi possono diventare « tabù » e bloccare tutto il sistema. Lo vediamo ad esempio oggi al CERN nel campo dei *supercomputers* dove l'utilizzazione a certi scienziati di paesi dell'Est può essere limitata in nome di una preoccupazione di segreto militare, che di fatto non esiste, in quanto tutti i calcoli che si fanno al CERN sono di

natura pacifica. Solamente, come si fa a sapere che cosa si sta facendo con ogni programma in un calcolatore?

In pratica diventa molto difficile portare avanti una scienza aperta se toccati – anche in maniera del tutto marginale – da preoccupazioni di carattere militare; ad esempio, nel caso dei calcolatori, siamo già vicini al limite del sopportabile.

LUCIANO RIGHI. Di fronte a questa situazione, lei presuppone – e lo ha detto con estrema chiarezza anche nella lettera a Craxi – un’iniziativa politica, un rapporto di collaborazione internazionale. I rapporti di collaborazione internazionale che lei giustamente invoca, sui quali concordo pienamente, potrebbero accelerare i tempi che ha indicato quando, con una battuta, ci ha augurato di vedere i risultati, cioè, fra almeno quaranta o cinquanta anni?

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed higgins professor presso l'Università di Harvard*. La risposta è ovvia, onorevole Righi, si è risposto da solo!

GIAN LUCA CERRINA FERONI. Ringrazio il professor Rubbia per la sua esposizione e per la sua capacità di divulgazione di materie complesse a profani come me. Vorrei porre tre questioni. In primo luogo – mi perdoni l'immagine un po' banale – se potessimo tracciare due strade parallele della fissione e della fusione, a che altezza collocherebbe il percorso della fusione rispetto alla fissione? Un terzo, due terzi, di questa strada? In particolare, nella fusione sono stati superati i fatti significativi che vi sono stati nell'*iter* della fissione (mi riferisco alla pila di Fermi)?

La seconda questione è stata in parte già affrontata, ma avrei bisogno di ulteriori chiarimenti. Tra i diversi fattori di accelerazione del programma della fusione, qual è quello che lei ritiene essenziale? Qual è la condizione che ritiene essenziale? È la massa e la continuità degli investimenti, la disponibilità di ri-

sorse umane, la cooperazione internazionale a livello europeo (su cui lei ha insistito molto), la concentrazione – anche se capisco la sua prudenza e difficoltà a discutere su quest'ultima domanda – su una di queste tecnologie, in particolare quella che lei ha sostenuto, cioè il confinamento inerziale?

Infine, vi è un rapporto tra l'esperienza accumulata nella fissione e la ricerca sulla fusione? Se per ipotesi – si tratta di un'ipotesi di scuola – si dovesse oggi azzerare la fissione, se passasse la linea dell'abbandono della fissione, il programma della fusione ne risulterebbe compromesso, alterato in qualche misura? Non mi riferisco all'accumulo di sapere scientifico, ma di capacità industriali.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed higgins professor presso l'Università di Harvard*. Per fare funzionare la fissione non ci sono voluti tanti soldi, c'è voluto Fermi. La pila di Fermi era una cosa modesta, non ha avuto bisogno delle guerre stellari o di diecimila miliardi, ma di condizioni particolari, in cui si è riusciti a sfruttare la produttività di scienziati del calibro di Fermi. Sono convinto che anche oggi per le ricerche nel campo della fusione vi sia soprattutto bisogno di uomini e di idee nuove, di creare le strutture adeguate che permettano di mettere questi uomini nella massima capacità di produrre.

A mio giudizio, ci troviamo nella fase esattamente uguale a quella precedente al periodo in cui Fermi ha fatto funzionare la pila: anche la pila non serviva a niente, era soltanto un oggetto di studio, però ha posto le basi per la pila ordinaria; non vi è molta differenza tra il reattore di oggi e la pila di Fermi. Ritengo che un'idea, o prolifera subito oppure possiamo dimenticarcela, perché a mio giudizio se ha bisogno di cinquant'anni per fruttificare, non è una buona idea.

Quanto alla collaborazione europea, abbiamo soprattutto bisogno di creare una specie di simbiosi che ci permetta di utilizzare una base intellettuale più vasta:

abbiamo bisogno essenzialmente di « accordare » i cervelli. Al CERN ci siamo riusciti e abbiamo un centro di ricerca che è il migliore o è tra i migliori del mondo, grazie al clima profondamente europeo ed internazionale che si è instaurato. Se riuscissimo a creare lo stesso clima nel campo della fusione, andremmo molto avanti. Ma bisogna fare molta attenzione che la parola internazionale non divenga sinonimo di gioco politico: un'istituzione internazionale deve essere creata con molte precauzioni, che rendano le attività scientifiche all'interno possibili e proficue.

In riferimento ai tempi tecnici, ritengo che in cinque anni o giù di lì si possa costruire qualunque cosa, purché si abbiano le idee chiare. Ovviamente, si tratta di un passo. Se - ad esempio - per costruire una macchina occorrono cinquant'anni, vuol dire che ci vogliono parecchi passi successivi.

Circa l'utilità delle esperienze accumulate sulla fissione, essa è certamente benefica. Vorrei menzionare un'utilità tecnologica estremamente importante, la tecnica dei materiali. Il reattore a fusione riceve una dose massima di radiazioni pari a quella di un reattore normale; lo studio del comportamento dei materiali sotto irraggiamento può essere effettuato utilmente con un reattore nucleare. È anche importante lo studio della protezione dalle radiazioni. Anche se il reattore di fusione non è così cattivo come quello a fusione, non è certamente del tutto innocuo.

Esiste una forte connessione tra l'industria nucleare e l'ingegneria del reattore a fusione. Avendo accesso a gente che sa costruire buoni reattori, sarà più facile costruire buone macchine a fusione. È chiaro che, senza le tecnologie della fissione, sarà molto più difficile arrivare ad un reattore a fusione commerciale.

GIOVANNI BIANCHINI. Vorrei alcuni chiarimenti su questioni già affrontate. Innanzitutto, il tempo necessario per passare dalla fase di transizione al momento in cui speriamo tutti di produrre energia

pulita ci impone di continuare a produrre anche energia nucleare da fissione. Si sta ragionando in termini di costruzione di centrali sicure e vi sono programmi di ricerca che vanno avanti - finanziati da parte nostra - sui reattori veloci. A questo punto, tra un futuro verso il quale dobbiamo inevitabilmente andare, a parte la scelta delle possibili tecnologie, e l'investimento di risorse tendenti a realizzare una fase di transizione, e che comunque rappresentano una produzione concreta di energia, lei dove impiegherebbe le risorse?

CARLO RUBBIA, Senior scientist del CERN ed higgins professor presso l'Università di Harvard. Le dico francamente che un reattore nucleare classico non mi dà noia. Sono convinto che quanto è accaduto a Chernobyl è dovuto al fatto che il personale responsabile è letteralmente impazzito; esaminando il rapporto, ci si rende conto che non si trattava di un difetto tecnologico, ma di un problema di psicologia di massa. Non prenderei Chernobyl eccessivamente come esempio; in generale le centrali nucleari sono costruite bene sia all'Est che all'Ovest; ritengo che siano tutte allo stesso livello.

Se tuttavia io non trovo nulla da eccepire sulle centrali normali ciò che mi fa paura è il *Superphoenix*, cinquemila tonnellate di sodio alla temperatura della lava e tonnellate di plutonio. Ritengo che i costruttori di questi reattori siano dei veri e propri « apprendisti stregoni ». Si tratta, a mio parere, di una via morta, che non deve essere più percorsa. Sappiamo che le risorse disponibili di uranio non sono illimitate a meno di estrarre l'uranio dal mare. È una cosa difficile, ma è pur sempre una possibilità. L'alternativa sarebbe il carbone, ma il carbone è sporco e inquinante. Conseguentemente, la scelta è difficile perché le possibili soluzioni non sono molte e nessuna interamente soddisfacente.

GIOVANNI BIANCHINI. Circa il programma a livello europeo sulla fusione, vorrei sapere in quale misura sia impor-

tante la partecipazione dell'Europa, sia pure nella fase di ricerca dell'SDI, o se, al contrario, possiamo indipendentemente unire uomini e sforzi per attuare ugualmente un programma nostro.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Io lascerei perdere l'SDI. Secondo me si effettuerà come già previsto, e sarà un'arma non difensiva, ma offensiva, attuata tanto dai russi che dagli americani. L'unico modo per attuare l'SDI in maniera credibile è quello di un laser su terra e di specchi in orbita per inviare la luce sul nemico. Tali specchi sono estremamente vulnerabili. Per questo motivo si parla ora dell'opportunità di creare delle zone interdette – proibite – in cui gli Stati Uniti o l'Unione Sovietica possano minacciare di attaccare chiunque ne varchi il limite. Questo significa una completa militarizzazione dello spazio, che trovo estremamente preoccupante. A mio avviso, l'SDI si farà con gli specchi. Tuttavia ciò che non riusciranno mai a fare sono i computers per controllare tutta l'operazione. Inoltre non si proteggeranno le città, ma solo i silos e le bombe. Si tratterà quindi – a mio parere – di uno scudo limitato alla protezione del sistema di difesa e di attacco.

ALESSANDRO TESSARI. Nella scorsa legislatura in questa Commissione ero il solo a sostenere le tesi del nucleare; mi trovo in minoranza anche ora, dopo Chernobyl, perché non riesco ancora a capire come si possa continuare a finanziare i programmi nucleari e contemporaneamente dichiararsi contrari nelle piazze o nelle sedi delle centrali. Giudico la sua relazione molto positivamente, anche perché è accompagnata da quella ironia che è inevitabile di fronte a problemi di non facile soluzione. Concordo perfettamente con lei sull'importanza della ricerca fondamentale; quando parliamo di ricerca fondamentale pensiamo a tutta quella gamma di possibili investimenti per produrre non tanto macchine, quanto piuttosto quei cervelli che poi servono per

creare idee e per dare risposta a questi enigmi – secondo me falsi – sulla fusione. Purtroppo non possiamo concedere dei fondi sperando che vengano ben utilizzati, occorre rivedere non solo la nostra grande industria energetica, ma anche la nostra industria di cervelli. Anni fa ho avuto modo di visitare vari laboratori e da allora, quale deputato, ho proposto emendamenti per aumentare gli stanziamenti destinati alla ricerca sulla fusione, emendamenti che sono sempre stati respinti. Soltanto dopo Chernobyl, alcuni di essi sono stati approvati, ma i miei amici che lavorano nel campo della fusione mi dicono che è sbagliato anche l'eccedere nei finanziamenti.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Ho sostenuto proprio questo!

ALESSANDRO TESSARI. Sì, professore, ma lei sostiene di finanziare l'intero settore della ricerca fondamentale, non solo quello della ricerca sulla fusione.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Sostengo la necessità di valorizzare la ricerca fondamentale. La cosa è diversa.

ALESSANDRO TESSARI. Le rivolgerò una domanda quasi « metafisica ». Sono d'accordo con tutto quanto lei ha detto sul *Superphoenix*. Tutti noi, e comunque la maggior parte di noi, siamo orientati nel senso di bloccare gli stanziamenti destinati all'industria nucleare che adotta sistemi basati sul plutonio. Anch'io ritengo che nei prossimi anni conviveremo con il « nucleare » di tipo tradizionale, ma dato che lei ha posto l'accento sul pericolo che proviene dall'utilizzazione del plutonio da parte di molti paesi, con delle implicazioni di natura militare, le chiedo se lei ritiene che con il nostro attuale livello di produzione nucleare, penso più alla produzione « di cultura » e di tecnologia nucleare che non alla produzione industriale di energia in senso stretto, il pericolo

proveniente dalla possibile utilizzazione del plutonio da parte di paesi in via di sviluppo non sia oggi un fatto concreto anche se decidiamo di non procedere nella ricerca in quel settore.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Per fare una bomba termonucleare non c'è bisogno di avere a disposizione un reattore *Superphoenix*, basta un reattore normale. Non a caso gli israeliani hanno bombardato il reattore iracheno non appena è apparso all'orizzonte. Non è certamente perché si preoccupassero del fatto che l'Iraq poteva disporre di energia nucleare – a loro questo non importava nulla. Sapevano benissimo che c'è una differenza molto piccola tra bomba e reattore.

Vorrei far notare che la fusione – se un giorno funzionasse – non risolverebbe il nostro problema. Come ho detto prima basta prendere dell'uranio, e metterlo nelle vicinanze del Tokomak, il « ciambellone » con il plasma. I neutroni che vengono fuori sono efficacissimi per trasformare l'uranio in plutonio. In questo modo sarebbe facile accumulare delle grandi quantità di plutonio a scopi militari. Ciò vuol dire che il problema dell'energia e quello della proliferazione nucleare saranno molto più difficili da separare il giorno in cui la fusione diventerà disponibile a tutti.

Si sta sviluppando un terzo tipo di tecnologia: si tratta della separazione isotopica dell'uranio utilizzando dei laser. Fino ad ora per estrarre l'uranio 235 era necessario utilizzare una tecnologia complicatissima con filtri e pompe che richiedevano molta energia. Nei prossimi anni si prevede che il laser permetterà di giungere alla separazione con una tecnologia « da scantinato ». Quindi, è probabile che nel futuro assisteremo ad una proliferazione delle tecniche di produzione di bombe rudimentali, ma con una potenza pari a quattro-cinque volte quella di Hiroshima.

Coloro che sostengono che è possibile il controllo della proliferazione nucleare,

non si rendono conto che in un prossimo futuro molti paesi del terzo mondo avranno la capacità tecnologica e la possibilità di reperimento delle materie prime per disporre di ordigni nucleari.

LELIO GRASSUCCI. Esiste il problema di elevare l'attenzione verso la fusione inerziale anche a livello finanziario portando lo stanziamento almeno al livello della spesa destinata agli altri settori della ricerca nucleare. Inoltre, il professor Rubbia chiede che venga data la dignità di progetto autonomo alla ricerca nel campo della fusione per confinamento inerziale, visto che oggi è assorbita all'interno del progetto di fusione a confinamento magnetico.

Vi è, inoltre, il problema di lanciare una forte iniziativa. Credo che questo potrà essere fatto nel momento in cui la Commissione procederà alla redazione del documento conclusivo dell'indagine. Vi è, insomma, la necessità di giungere ad una sinergia tra i vari campi della ricerca nucleare. Mi rendo conto che la cosa appare complicata in quanto tale ricerca è sotto l'egida dell'EURATOM. La ricerca sulla fusione a confinamento magnetico, infatti, ha avuto dei finanziamenti europei. Poiché la ricerca sul sistema inerziale non è compresa nel programma dell'EURATOM, di fatto ogni paese è andato per conto proprio.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Non è un caso che non vi sia la diffusione del sistema inerziale. Una causa ben precisa è quella da lei menzionata e che, per così dire, la sta « toccando con mano ».

LELIO GRASSUCCI. La domanda è questa: quali possibilità vi possono essere per giungere ad una ricerca congiunta con il Giappone che in questo campo ha già effettuato una scelta di rilevanza politica? Mi sembra che in quel paese il quaranta per cento dei finanziamenti al settore sia destinato alla ricerca sulla fusione a confinamento inerziale.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Lei mi domanda quale sia lo stato dei nostri rapporti con alcuni paesi non europei quali il Giappone, l'Unione Sovietica e gli Stati Uniti. Ritengo che l'Italia avrà delle grandissime difficoltà a cooperare con il Giappone. Per quanto riguarda l'Europa, di fatto ha poca o pochissima connessione con il Giappone perché quest'ultimo guarda esclusivamente nella direzione degli Stati Uniti. Per i giapponesi l'Europa esiste pochissimo, l'Italia non esiste per niente. La possibilità che quest'ultima instauri rapporti con i giapponesi è praticamente nulla.

Per quanto riguarda una cooperazione con l'America e con la Russia, vi sono ostacoli determinati dai problemi militari e dall'ISD. Esiste un accordo formale tra gli Stati Uniti e il Giappone nel campo della ricerca mentre non esiste — che io sappia — un accordo simile tra il Giappone e l'Italia.

LELIO GRASSUCCI. Infine, per svolgere un impegno maggiore verso il confinamento inerziale, abbiamo di fronte un problema di macchine, di investimenti in strutture rispetto agli altri paesi, oppure le strutture in nostro possesso in questo momento sono sufficienti?

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Esiste un problema di strutture nel nostro Paese, occorre « rifarsi la pelle » a livello della ricerca in tutti i campi. Il ministro Granelli a Washington ha detto che l'Italia deve aumentare i fondi per cercare di arrivare almeno al due per cento del prodotto nazionale lordo.

Dobbiamo rimettere in funzione tutto l'apparato, di cui la fusione non è che un piccolo elemento. Ad esempio — per quanto riguarda me personalmente — io sono utilizzato pochissimo, « giro a vuoto ». A mio giudizio, il primo passo nel campo della ricerca, è la riorganizzazione del settore, che è ciò che il mini-

stro Granelli e il professor Rossi Bernardi stanno facendo. Ad esempio il CNR — di cui Rossi Bernardi è Presidente — ha compiuto notevoli progressi in questi ultimi tempi, però vi è ancora molta strada da percorrere.

Andrebbe meditato il fatto che degli ultimi sei premi Nobel di nascita italiani, cinque hanno il passaporto americano ed uno solo — io — il passaporto italiano. Inoltre tutti risiedono all'estero. Si tratta di un problema molto più vasto di quello della fusione, che comunque si inserisce in questo quadro.

SALVATORE CHERCHI. Professor Rubbia, dal suo punto di vista di osservatore privilegiato a Ginevra, vi è una convinta consapevolezza nella comunità scientifica e nel mondo politico che occorra marciare sulla strada che lei ha indicato?

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. La scienza non trova la verità sul principio del voto di maggioranza; lei può avere cinquanta persone che dicono una cosa e una sola che ne dice il contrario: quella ha ragione e gli altri cinquanta hanno torto.

MARIO FIORET. Vorrei formulare una domanda brevissima che prende spunto dalla sua ultima osservazione. Sono stati posti alcuni fondamentali problemi nella sua interessantissima relazione: ci ha detto, con molta schiettezza e coraggio, che dobbiamo aiutare in Italia la ricerca sulla fusione a confinamento inerziale e non quella magnetica.

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed Higgins professor presso l'Università di Harvard*. Ho detto che il tre per cento dei fondi per la fusione inerziale vengono stanziati in Europa, il restante novantasette per cento altrove (Giappone e America). Per la fusione magnetica l'Europa spende il cinquanta per cento della ricerca mondiale, l'America e il Giappone la restante quota.

MARIO FIORET. Mi pare che nella sua relazione lei abbia avanzato notevolissime perplessità circa la possibilità di giungere a risultati concreti con la fusione magnetica. Per quali motivi?

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed higgins professor presso l'Università di Harvard*. Perché la vedo come uno strumento di ricerca, non come una fornace capace di produrre energia a buon mercato.

MARIO FIORET. Da questa premessa traggio un'indicazione politica molto chiara: Lei ha detto che l'Italia è il più piccolo dei grandi paesi o il più grande dei piccoli paesi, per la difficoltà che incontra nel farsi ascoltare. Ho avuto l'avventura di vivere il momento in cui la Francia ha pensato il progetto EUREKA: in realtà, non l'ha pensato molto, perché Mitterrand ha fatto una dichiarazione e l'Europa si è adeguata. Questa è la verità politica. Ora mi chiedo se l'Italia abbia la possibilità di lanciare un progetto non dico come l'EUREKA, ma che sia almeno in parte credibile. Rivolgo questa domanda in quanto lei, professor Rubbia, in definitiva, ci ha dato un'indicazione quando nella lettera al Presidente Craxi ha affermato che « EUREKA tuttavia manca di specificità e l'SDI è un'impresa per la guerra. Un progetto di simile calibro dedicato alla ricerca di energie pulite ed inesauribili unirebbe la specificità dell'SDI alle motivazioni universalmente accettabili di EUREKA ». Che strumenti possiamo utilizzare? Ho pensato all'EURATOM, ma esso è già indirizzato nel senso della magnetica; probabilmente diventeremo « capicordata » di uno strumento che è già da ora inquinato. Quale iniziativa concreta potrebbe intraprendere l'Italia per avere un minimo di accettabilità e di credibilità nella sua posizione?

CARLO RUBBIA, *Senior scientist del CERN ed higgins professor presso l'Università di Harvard*. Nonostante i grandissimi

risultati che l'Italia ha sempre ottenuto nel campo della fisica, non siamo mai riusciti ad ottenere il posto del timoniere. Tre anni fa mi trovavo a Stoccolma per ricevere il premio; il resto dell'intelligenza europea votava per il rinnovo del direttore generale del laboratorio del CERN a cui io ero candidato. Non siamo riusciti a sfondare, nonostante avessimo l'Accademia di Svezia dalla nostra parte. Ciò non si riscontra solo nella ricerca, ma anche nell'industria; sono certo che molti industriali ritengano che sia più facile condurre affari con un americano piuttosto che con un francese, un tedesco o un inglese, perché esiste verso di noi un persistente, atavico sospetto, se mi è consentito questo termine.

Concordo pienamente con l'affermazione secondo cui in Europa esiste una specie di asse scientifico Bonn-Parigi, per cui le decisioni vengono assunte da tedeschi e francesi. A tale proposito, cito l'esempio della luce di sincrotrone a Grenoble. In Italia non abbiamo istituzioni di ricerca europee, tranne l'ISPRA che però è stata affossata. È chiaro che dobbiamo contare maggiormente sulle nostre forze: l'idea di un europeismo totale non è valida.

La funzione europea oggi non è quella di sacrificare i programmi nazionali; dobbiamo investire il 50 per cento in Europa e il 50 per cento in casa nostra per essere aggressivi sul piano europeo. Quella attuale non è l'Europa di De Gasperi o di Adenauer, ma è l'Europa del *do ut des*.

È chiaro dunque, che una posizione italiana nella scienza, passa attraverso la messa in funzione di un sistema italiano che abbia abbastanza sinergia da essere quasi in grado di funzionare da solo. Solo allora potremo raggiungere degli accordi. Se non arriveremo a questa massa critica nessuno ci starà a sentire. Credo che un po' di realismo non guasti in questo campo. È facile fare discorsi, ma è molto più difficile metterli in atto. La situazione europea per noi è estremamente complessa.

PRESIDENTE. Ringrazio nuovamente il professor Rubbia per il contributo offerto ai lavori della Commissione. Essendo questa indagine conoscitiva volta a far conoscere i problemi relativi allo sviluppo della produzione di energia attraverso la fusione nucleare, ritengo che potremo recepire tutti quegli elementi indispensabili affinché il nostro lavoro non

sia solo utile ai componenti la Commissione industria, ma costituisca anche un punto di riferimento per gli orientamenti e le azioni future. A nome di tutti i colleghi, auguro al professor Rubbia i migliori successi e lo invito ad occuparsi delle vicende italiane.

La seduta termina alle 18,50.