

**RELAZIONE
DEL PROFESSOR CARLO RUBBIA**

PAGINA BIANCA

XII COMMISSIONE PERMANENTE DELL'INDUSTRIA, COMMERCIO, ARTIGIANATO
E COMMERCIO ESTERO

DICHIARAZIONE DI CARLO RUBBIA SULLA FUSIONE NUCLEARE

Onorevoli rappresentanti del Parlamento:

vorrei brevemente riassumere il mio punto di vista personale sul soggetto della Fusione Nucleare e sulle sue implicazioni al problema energetico in generale e del Nostro Paese in particolare. Vorrei anzitutto sottolineare—nonostante che tanto l'energia, una ben nota grandezza fisica, e 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 anche 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 noto settimanale, il prof. Toschi, noto esperto della fusione, e responsabile del progetto europeo NET (Next European Torus) si è domandato da dove nasceva quello che egli definì come "*l'isteria italiana 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'USSR, Gorbachkhov si sono trovati subito 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 dei punti di una mia lettera datata il 22 Maggio 1986 al presidente Craxi:

"*Il programma nucleare già realizzato o in via di realizzazione non potrà più nel suo insieme essere rimesso in questione dall'incidente di Chernobil. Non è infatti possibile cancellare istantaneamente, come con un colpo di bacchetta magica — anche assumendone l'opportunità — una sorgente energetica che rappresenta*

oramai 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 Chernobil, 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 è non 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 in 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 inventata 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 infine 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 fare l'oggetto di un eventuale proposta di ricerca.

La scienza della fusione e della fissione

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 più fortemente legate. Di conseguenza, è possibile ricavare energia sia quando nuclei pesanti sono 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. E' 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 molto 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 atomica 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.

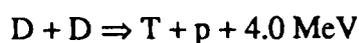
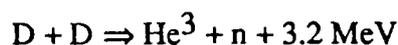
Nonostante il numero di questi elementi leggeri sia relativamente basso, il numero conosciuto di reazioni possibili di fusione supera il centinaio. Tutte queste reazioni hanno in comune il fatto che le particelle interagenti devono essere anzitutto portate ad alte energie —e cioè a delle temperature 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 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 la 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.

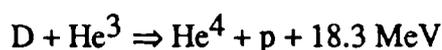
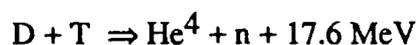
Come funziona il combustibile di fusione

La scelta del Deuterio e del Trizio come combustibili nelle prime fasi di un programma di fusione è quindi pienamente giustificato. 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 e bruciati a loro volta o riciclati e produrre ancora più energia di quello ricavabile dalla reazione D—D.



In quanto il combustibile per le due ultime reazioni è generato nelle prime due, Deuterio è in linea di principio la sola sostanza che deve essere introdotta dall'esterno. I prodotti finali delle 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 contenuta 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 ecc.) c'è abbastanza Deuterio per parecchi miliardi di anni a venire— per un periodo talmente lungo da sorpassare nel tempo la durata previsibile del combustibile idrogeno del Sole. E' da notare che a questo scopo basta estrarre dall'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 perchè 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% delle riserve di energia fossile conosciute.

Particolarmente attraente è la reazione D-T. Quasi unanimamente il primo obiettivo da raggiungere in un programma di fusione è lo sviluppo di un reattore

D-1. 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 delle reazioni che contenga Deuterio produrrà dei neutroni—il più spesso indesiderabili. E' chiaro che anche se utilizzassimo la benigna reazione D-He³, con Elio e protoni nello stato finale, non potremo 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 particolarmente 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 nè il combustibile, nè le ceneri producono neutroni.

Sicurezza legata ai reattori a fusione

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 alla punto di fusione assorbiranno la maggior parte dell'urto, sia prodotto dal bombardamento neutronico che dalla radiazione elettromagnetica emanati 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'elettricità. 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 di concentrarsi o di 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 ancora 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.

Scorie radioattive

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 confrontabile al plutonio o ai frammenti di fissione di un reattore a fissione. Come ben noto, il plutonio contenuto in un reattore a fissione è estremamente 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 circonda il plasma con dell'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 fissione equivalente. E non vi sarebbe nemmeno il bisogno di immagazzinare le scorie di 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 principale è quello di mantenere temperature astronomiche durante il tempo necessario alla reazione 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. E' 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 "tokomak" 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.

Poichè il Comitato ha previsto l'audizione dei professori Toschi e Coppi, i quali senza dubbio parleranno a lungo della fusione a confinamento magnetico, e 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 di 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.

Stato attuale della ricerca sulla fusione

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 magnetici 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.

Benefici della fusione

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 cuscino 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 le 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 perazione del magnete è di pochi gradi quella dello zero assoluto. Quindi a pochi metri 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 "Super fenix" ecc.

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.

Produzione di energia

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 una 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 ablato 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 milionesimo di secondo. Il raggio del combustibile viene compresso anche di 50 volte, così che l'alta temperatura e l'alta densità risultanti ne provocano la fusione. E' 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 istudio 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 sufficientemente 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 nello 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 di 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'un per cento di quanto necessario, e inoltre la lunghezza d'onda della luce emessa è troppo lunga. A lunghezza 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 calcolatore 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.

Prospettive per il futuro

Vanno quindi trovati meccanismi migliori in grado di provocare l'implosione della pallina di idrogeno. Invece della luce a 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 metodo ci può dare una mano la grande esperienza nell'accelerazione di particelle e nell'accumulazione 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. Io sto elaborando una serie di parametri per un FEL che —perlomeno teoricamente— risponde ai bisogni della simulazione sul calcolatore. E' 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 trenta 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 notare che il FEL è anche oggi il cavallo di battaglia del programma di guerre stellari. Ciò rappresenta 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.