

Fusione termonucleare controllata: stato attuale ed aspettative

Pubbllichiamo uno stralcio del testo della conferenza tenuta recentemente al Politecnico dal Prof. Luciano De Menna

Il dibattito sulla Fusione Termonucleare Controllata ha avuto in questi ultimi tempi larga risonanza sulla stampa nazionale.

Gli addetti ai lavori guardano, in generale, a questa improvvisa pubblicità con un certo sospetto. Infatti se da una parte è meritorio risvegliare l'attenzione su queste ricerche

d'altra parte non è giusto lasciar credere al grosso pubblico che la Fusione possa, nel breve periodo, sostituire il nucleare tradizionale.

La fusione termonucleare controllata non è nuova a alti e bassi; essa sembra destinata a scatenare spesso grandi amori e grandi odii. E la cosa si spiega se si pensa quali e quanti interessi siano coinvolti. Ma prima di addentrarci in questi discorsi occorre chiarire, anche se in maniera molto sommaria, alcuni aspetti tecnici e scientifici del problema.

Come è noto, in tema di nucleare, bisogna distinguere i due processi, quello della fissione e quello della fusione. Nella fissione un neutrone veloce che colpisce un nucleo di Uranio, produce altri elementi di peso atomico inferiore, più altri neutroni, più energia. Per capire l'origine di tale energia basta ricordare che la massa di un nucleone (protoni o neutroni, componenti del nucleo di ogni atomo) non è la stessa in ogni elemento. Un neutrone contenuto in un atomo di Uranio pesa di più, per esempio, di un neutrone di un atomo di Piombo. In realtà c'è una certa energia di legame che si è, per così dire, congelata in massa nell'atomo di Uranio, che è maggiore di quella relativa all'atomo di Piombo. Questo vuol dire che se si riesce a spaccare — fissione — un atomo di Uranio, e frantumarlo in atomi più piccoli, parte di questa energia di legame deve ritornare libera. È la grande intuizione di Einstein, $E=mc^2$, che si concretizza nella centrale nucleare che produce energia. E anche però la bomba atomica che distrugge con i suoi neutroni la vita per chilometri e chilometri.

Ma dall'esame della massa dei nuclei nei diversi elementi si scopre che non solo spaccando nuclei pesanti si può ottenere energia. Si ha, per esempio, che la massa di un protone è più grande nell'atomo di Idrogeno che in quello di Elio. Se dunque si riesce a fondere insieme atomi più leggeri a formare atomi più pesanti, dell'energia

deve liberarsi. Le reazioni più promettenti, da questo punto di vista riguardano i primi elementi della scala, cioè il Deuterio ed il Trizio, che sono isotopi dell'idrogeno rispettivamente con un protone ed un neutrone, ed un protone e due neutroni nel nucleo.

Naturalmente non basta affermare che queste reazioni sono possibili; bisogna anche esaminare in quali condizioni esse si realizzano concretamente. Purtroppo occorrono temperature dell'ordine delle centinaia di milioni di gradi perché la probabilità che un incontro tra un atomo di Deuterio ed uno di Trizio si traduca in una reazione di fusione, diventi ragionevole. Lo stato della materia a queste temperature è naturalmente ben diverso da quello ordinario, e si giustifica quindi l'uso di un termine nuovo per designarlo: il Plasma — così detto quarto stato della materia. Infatti se prendiamo un solido (primo stato) ed immaginiamo di riscaldarlo, sappiamo che ad una certa temperatura esso si trasforma in liquido (secondo stato).

Se continuiamo a riscaldare, ad una certa temperatura, il liquido si trasforma vivacemente in gas (terzo stato). I singoli atomi, affrancati da un diretto legame, si muovono liberamente ed occupano tutto il volume a loro disposizione. Cosa succede se continuiamo a riscaldare? Per capirlo bisogna ricordare che la temperatura di un corpo è in realtà una misura del grado di agitazione degli atomi che lo costituiscono; maggiore è la temperatura, più grande è la velocità quadratica media delle particelle che lo compongono. Or bene, nel loro continuo modo di agitazione termica, le particelle possono subire degli urti; se la velocità delle particelle non è troppo elevata tali urti hanno la sola conseguenza di deviarle nel loro moto, ma non riescono ad avere conseguenze sulla struttura interna delle particelle in collisione.

Ma se l'energia cinetica dei corpi è sufficiente, l'urto può avere conseguenze su tale struttura. Per intenderci, facciamo riferimento ad un modello classico che vede l'atomo costituito da un nucleo centrale, portatore di una carica positiva, e da elettroni orbitanti carichi negativamente. Questa è, evidentemente, la prima struttura che in conseguenza di una collisione può venire modificata. L'atomo perde alcuni degli elettroni orbitanti e risulta

dunque non più neutro ma portatore di una carica positiva, mentre nello stesso tempo vi saranno degli elettroni liberi, carichi negativamente. Ecco il plasma: un gas dunque, ma non più costituito da particelle neutre bensì da particelle cariche che interagiscono, quindi, fra di loro con una forza che dipende dall'inverso del quadrato della loro distanza, e cioè, vedremo, fa una grande differenza. Una affermazione che può forse sorprendere è la seguente: il quarto stato della materia è di gran lunga, diciamo, tanto per dare un numero, al 99,99%, lo stato di aggregazione più diffuso nell'Universo. La sorpresa deriva dal fatto che il plasma come tale non cade frequentemente sotto la nostra esperienza quotidiana, o almeno non in maniera determinante. È un plasma per esempio quello contenuto nei tubi fluorescenti.

E ancora a plasma dobbiamo alcuni dei più bei spettacoli della natura, quali i fulmini e le aurore boreali. Ma nello spazio, tutto è plasma.

Ma c'è di più; anche lo spazio interstellare è pieno — si fa per dire — di plasma. Ciò sembrerebbe in contrasto con l'accostamento intuitivo che abbiamo favorito con le immagini precedenti: plasma = caldo. In realtà non c'è nessuna contraddizione. Come abbiamo sottolineato infatti in precedenza, l'aspetto caratterizzante il plasma è di essere un insieme di particelle ionizzate e non neutre, come nell'ordinaria materia. Ciò non richiede necessariamente una elevata temperatura. Infatti se è vero che gli urti tra le particelle sono i principali responsabili della ionizzazione, è vero anche che esiste un tipo di collisione con effetti radicalmente opposti: quella

tra un elettrone ed un ione, per esempio, che può dar luogo alla formazione di una particella neutra.

Nel così detto vuoto interspaziale le densità di particelle sono bassissime; si deve pensare a frazioni di particelle per centimetro cubico, in contrasto con i numeri con più di venti zeri che caratterizzano la materia ordinaria. Si comprende allora che anche nel freddissimo vuoto fra le stelle la materia deve essere allo stato di plasma, semplicemente perché ogni particella, una volta ionizzata, non avrà praticamente più occasione di incontrarne un'altra per, eventualmente, ricombinarsi.

Per la sua distanza dalle cose terrene il plasma è sempre stato, tradizionalmente, oggetto di studi di gruppi non numerosi di ricercatori, in quel settore della fisica che prende il nome di Astrofisica. Le cose cambiarono radicalmente intorno agli anni cinquanta quando fu riproposta una idea che fino ad allora non aveva avuto molto credito: quella di produrre sulla terra energia dalla fusione.

Si tratta dunque di riprodurre le temperature che esistono nelle stelle e che consentono loro di irradiare nello spazio l'energia che ha permesso, tra l'altro, la nascita della vita sulla Terra. Le stesse temperature che siamo già in grado di realizzare, con effetti del tutto opposti, in una bomba all'idrogeno, dove una bomba atomica, pensate, fa da innescio per la fusione dell'idrogeno.

L'idea di farsi un sole in casa è, naturalmente molto affascinante, anche per un altro motivo: l'estrema abbondanza del combustibile. Per fare centrali nucleari tradizionali a fissione occorre il combustibile Uranio. Esso non è molto abbondante in

natura, almeno per quanto riguarda l'isotopo più adatto allo scopo. I paesi che lo producono sono pochi e ne gestiscono la distribuzione con accuratezza; per l'Uranio non c'è un prezzo di mercato, bensì politico, nel senso che il paese produttore può venderlo a prezzo diverso (o non venderlo affatto) a seconda della maggiore o minore simpatia dell'acquirente. Il cartello dei produttori di Uranio che vede ai primi posti Stati Uniti, Unione Sovietica, Canada, Sud Africa, in qualche modo tiene in pugno la situazione: è forse questa la principale ragione per cui è tanto difficile per l'Europa imporre sanzioni economiche al Sud Africa.

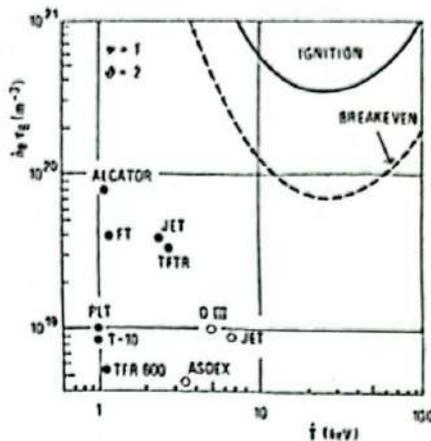
Per la fusione invece tutto è più tranquillo. Il principale combustibile, il Deuterio, si trova nell'acqua del mare in relativa abbondanza. Inoltre a causa della sua massa doppia rispetto a quella dell'idrogeno esso è facilmente separabile. Pensate che se si riuscisse a bruciare tutto il Deuterio contenuto in un metro cubo di acqua si avrebbe tanta energia quanta se ne potrebbe ricavare da duemila barili di petrolio. In pratica un chilometro cubico di acqua contiene più energia di tutte le riserve di petrolio conosciute.

Viene da domandarsi come mai sia tanto difficile raggiungere un obiettivo che, per altro scopo (vedi bomba H) è stato già ampiamente raggiunto, in effetti per consentire che, in modo più esplosivo, in ogni istante di tempo avvenga un numero adeguato di reazioni di fusione in un plasma, occorre evidentemente che lo stesso sia concentrato in una regione limitata dello spazio, sia insomma in qualche modo confinato.

Per un oggetto alla temperatura di diversi milioni di gradi non può certo pensarsi ad un contenitore con pareti materiali. Occorre che il plasma sia confinato attraverso campi di forza, cioè pareti non materiali prodotte dall'azione di forze agenti dall'esterno. Forze a distanza quindi. Di forze di tale tipo che possano servire allo scopo ne conosciamo due: la forza gravitazionale e quella elettromagnetica.

Il campo elettromagnetico, invece, può essere messo subito anche in dimensioni a laboratorio terrestre, ma solo in una delle sue componenti: il campo magnetico.

È appunto l'attrazione gravitazionale che viene utilizzata per tenere



— Diagramma di Lawson

re insieme quei favolosi reattori a fusione che sono appunto le stelle. Come sappiamo essa serve egregiamente allo scopo.

Se si realizza una struttura di campo ad anello, dunque, dovrebbe essere possibile contenere in essa il plasma per un tempo sufficientemente lungo.

Per comprendere le difficoltà incontrate bisogna cercare di dare uno sguardo più approfondito alla natura fisica di un plasma. In un contesto intuitivo viene spontaneo vedere il plasma come un fluido, un gas oppure un liquido. La natura di un plasma è invece profondamente diversa.

È come se in una sala un certo numero di individui non dotati di sensi, tranne il tatto, vagassero disordinatamente. Ogni tanto due di essi si urtano e cambiano direzione; questo è tutto. Il legame sembra molto debole eppure è in grado di dare al sistema una sua unitarietà. Notate ancora che in un modello del genere saranno certamente trascurabili gli effetti degli urti a tre individui, essendo questo un evento estremamente raro. Cosa avviene invece in un plasma?

Le particelle del plasma portano cariche elettriche e due cariche elettriche interagiscono fra di loro con una forza che va con l'inverso del quadrato della distanza. Tale interazione si fa sentire qualunque sia la distanza tra le cariche; anche se allontaniamo le cariche la forza di interazione diminuisce ma non andrà mai a zero.

Un urto tra due particelle cariche è qualcosa di molto diverso da quello a cui siamo abituati ad assimilare l'urto delle particelle neutre di un gas.

Volendo ritornare al nostro esempio precedente, dobbiamo ora immaginare che i nostri individui vaganti nella sala hanno riacquisito la vista o meglio un senso molto più potente che consente loro di vedere fino all'infinito. Come voi potete immaginare se ora sottraiamo uno degli individui, se cioè modifichiamo qualcosa in un punto del sistema, di tale modifica si è subito a conoscenza in ogni altro punto. In realtà quando dico subito, trascuro il fatto che la velocità di propagazione dell'informazione non può superare quella della luce; ma questo per i sistemi delle dimensioni che consideriamo in questo contesto non ha pratica rilevanza.

La situazione è certamente profondamente diversa da quella di un gas neutro. E ancora: nel caso di un plasma piuttosto che di urti binari — cioè tra due singole particelle — bisognerà considerare che ogni particella collide con tutte le altre contemporaneamente!

Non c'è da stupirsi che un tale sistema abbia dei comportamenti complessi. In esso si hanno dei fenomeni che, a causa della loro natura, prendono il nome di fenomeni collettivi.

Come dicevamo è la stabilità del plasma che dà tanti problemi ai fusionisti. Occorre però a questo punto quantizzare meglio questo concetto, dato che esso è necessariamente un concetto relativo: per quanto tempo deve essere stabile il confinamento, e quali le densità di plasma necessarie? Ecco dunque i tre parametri che definiscono la bontà del confinamento: temperatura — che abbiamo già introdotto in precedenza — densità e tempo di confinamento. Abbiamo già visto che la temperatura deve essere elevata; dell'ordine dei cento milioni di gradi. Quali sono i valori necessari di n e t , rispettivamente densità e tempo di confinamento?

Fu il fisico inglese Lawson il primo a mostrare che il problema ammetteva una semplice risposta in funzione del prodotto nt e della temperatura T , oltre che una intuitiva rappresentazione nel diagramma riportato in figura. In alto a destra c'è il paradiso, in altri termini il campo dei parametri in cui la reazione si autosostiene. In breve il criterio di Lawson stabilisce che per raggiungere l'ignizione occorrono, per la reazione D-T, temperature dell'ordine di cento milioni di gradi e prodotti nt dell'ordine di 10^{20} sec/cm³, mentre per la reazione D-D occorrono densità e temperature molto maggiori.

Queste temperature e queste densità debbono essere confinate dal solo campo magnetico. Sembra un obiettivo impossibile. Qualcuno infatti ha paragonato il tentativo di confinare il plasma con il campo magnetico a quello di contenere dell'acqua con un canestro di paglia.

Per restare nell'immagine, si potrebbe però, a questo punto, ricordare che intorno all'anno mille è vissuta nell'America del Nord una civiltà detta dei « basket maker » per i suoi magnifici manufatti in fibre vegetali così fittamente intrecciate da consentire di poter trasportare anche, appunto, dell'acqua. Sorprendentemente, la soluzione, o almeno, quella che appare la più probabile candidata ad essere la soluzione del problema, ha un punto in comune con quella dei « basket maker »: il fitto intreccio delle linee del campo magnetico. Un tale particolare intreccio si ottiene con macchine toroidali, i TOKAMAK, in primo luogo, che, in onore del loro inventore, lo scienziato Artimovic, prendono il loro nome da parole russe che significano campo magnetico toroidale.

Gli elementi fondamentali

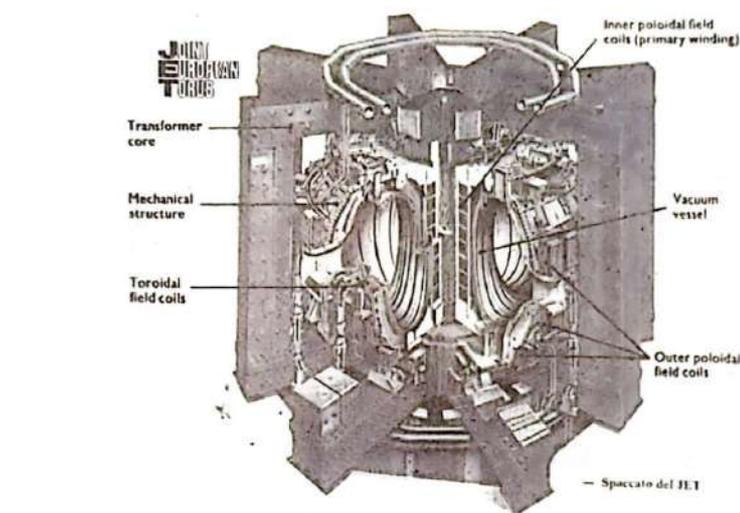


Fig. 4 Diagram of the JET Tokamak

di un Tokamak sono appunto i due campi toroidale e poloidale che producono linee di campo ad elica di passo variabile. Il tutto assume l'aspetto di un grande anello o toro.

Ma il confinamento magnetico non è l'unica via possibile. Invece di tentare di aumentare il tempo di confinamento si può cercare di produrre densità enormemente maggiori. Se si raggiungono densità dell'ordine di 10^{20} cm⁻³, contro quelle di 10^{14} di un plasma confinato magneticamente e di 10^{22} caratteristiche di un liquido, allora i tempi necessari sono tanto bassi che in pratica basta l'effetto inerziale ad impedire alle particelle di abbandonare il volume dove si vuole ottenere le reazioni di fusione. È il cosiddetto confinamento inerziale. In esso una piccolissima pallina cava contenente una miscela di Deuterio-Trizio viene bombardata quanto più uniformemente possibile da fasci laser che producono l'immediato riscaldamento con conseguente espansione dello strato esterno. Per reazione il nucleo interno viene compresso di un fattore 1000-10000 raggiungendo le densità e le temperature alla fusione. I problemi centrali di questo approccio sono due: La potenza dei laser necessari, ed il modello matematico dell'implosione. Purtroppo ognuno di questi punti coinvolge interessi di carattere militare, perché un laser di queste potenze è un'arma e perché gli studi sulla implosione servono anche per le bombe H. Per questa ragione le ricerche sulla fusione inerziale sono state per lungo tempo classificate ed ancora oggi molti risultati non godono di libera circolazione.

Dovrei dirvi ora come finisce questa avventura, ma non è facile. Riusciremo ad imbrigliare, come si scrive sui giornali, l'energia del sole? Certamente sì, ma non è facile prevedere quando. Possia-

mo però cercare di fare il punto della situazione. Con

riferimento sempre al criterio di Lawson, ed all'omonimo diagramma, a tutt'oggi i risultati record si sono ottenuti con Tokamak al alto campo magnetico. Negli anni settanta i risultati migliori erano dell'ALCATOR, una macchina costruita al Massachusetts Institute of Technology di Boston, ma ideata da uno scienziato italiano Bruno Coppi che insegna appunto al MIT. La macchina porta infatti il segno di questa origine italiana nel suo nome che viene appunto dalle parole italiane ALTO CAMPO TORO-DALE. Successivamente il record dell'Alcator è stato superato da una macchina tutta italiana: il FRASCATI TOKAMAK. Tale record fu a sua volta superato ancora dall'Alcator C con una tecnica che prende il nome di « pellet injection » e che ha dato sorprendenti risultati. Per esse-

re sintetici, e per dare una figura di merito del livello raggiunto dagli esperimenti, possiamo dire che i « records » attuali sono di un fattore 20 al di sotto dei valori per l'ignizione. Naturalmente il discorso è più complesso; bisognerebbe distinguere tra esperimenti in cui l'efficienza del riscaldamento è buona mentre il confinamento lascia a desiderare, e quelli in cui un buon confinamento si ottiene a scapito della temperatura. In ogni caso il fattore citato lascia capire quanto si sia vicini al raggiungimento dell'obiettivo finale e giustifica dunque gli ottimismo. Ad altra categoria appartengono invece le macchine che attualmente sono in operazione, anche se non a piena potenza, come il TFTR ed il JET. Si tratta di esperimenti di grandi dimensioni nella linea del futuro reattore, con campi magnetici molto più bassi e che utilizzano per riscaldare il plasma, oltre al normale effetto chimico, al-

tre tecniche che sarebbe qui troppo lungo spiegare. In particolare il JET (Joint European Torus), di cui in figura mostriamo uno spaccato, è un esperimento della Comunità Europea realizzato a Culham, in Inghilterra, che si è avvalso del contributo di numerosi ricercatori italiani. Le grandi macchine non hanno ancora dato risultati record, probabilmente perché non ne hanno ancora avuto il tempo. C'è però una certa incertezza in giro sul loro futuro, tanto che il fratello americano del JET, il TFTR appunto, complice la politica di ristrettezza imposta dall'amministrazione Regan per favorire i programmi sulle « Guerre Spaziali », ha avuto il suo budget drasticamente ridotto, al limite della chiusura.

Ora si pensa al futuro, ai nuovi esperimenti dunque, e su questo tema si è accesa una polemica tra i sostenitori delle grandi macchine — dell'ordine dei 1000 miliardi e più, per intenderci — e quelli che vorrebbero invece più esperimenti di dimensioni ridotte, mirati ad una migliore conoscenza della fisica del plasma in condizioni prossime a quelle di ignizioni, lasciando ad un momento successivo i problemi specifici del reattore. La scelta migliore sarebbe certamente, badget permettendo, quella di perseguire entrambi gli obiettivi, in stretta connessione, in modo da consentire alle grandi macchine, che richiedono tipicamente una decina di anni dalla progettazione all'operazione, di avvalersi dei risultati degli esperimenti più piccoli, mirati alla fisica, e quindi di più rapida realizzazione. Il dibattito su questo punto è ancora aperto.

Recentemente il dibattito si è ulteriormente vivacizzato per l'intervento del premio Nobel per la fisica Carlo Rubbia. La proposta di Rubbia riguarda la fusione inerziale e riprende una ipotesi fatta alcuni anni orsono dallo stesso Lawson.