

LE SFIDE DELLA FUSIONE NUCLEARE

*Intervista a Giovanni Tardini **

*A cura di Mario Gargantini***

La fusione nucleare suscita grandi aspettative, per una serie di vantaggi sul piano ecologico, della sicurezza e della disponibilità dei materiali. Si intensificano i programmi di ricerca, secondo le diverse soluzioni proposte: il confinamento magnetico, nelle due modalità tokamak e stellarator anche ad alto campo, e quello inerziale. Il programma più imponente, ITER, potrebbe dare i suoi risultati finali verso la fine degli anni '30.

** Fisico e Senior Researcher presso il Max-Planck-Institut für Plasmaphysik, Garching (Monaco di Baviera). Già Professore di Chimica Fisica presso l'Università degli Studi di Milano*

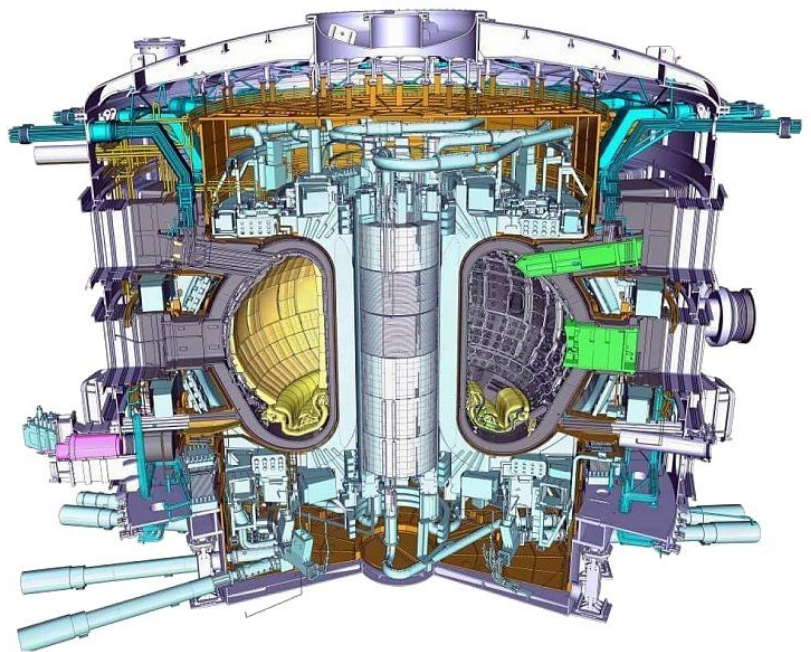
*** Direttore della rivista EMMECIquadro*

Nel vivace dibattito sulla transizione energetica è sempre più presente il tema della fusione nucleare. In realtà, della possibilità di generare energia sfruttando la fusione termonucleare si parla da molto tempo ma ogni volta il traguardo della realizzazione di una centrale a fusione era sempre spostato in avanti di decine di anni, tanto da sembrare una chimera o al più un puro esercizio di ideazione scientifica e tecnologica. Ora però qualche traguardo inizia ad avvicinarsi, pur sempre avvolto da una coltre di cautele e prudenze attraverso la quale a volte passano annunci come quello del dicembre 2022 quando gli scienziati della National Ignition Facility hanno comunicato di aver prodotto, nei Lawrence Livermore National Laboratory (California), una quantità di reazioni di fusione sufficiente a generare più energia di quanta ne sia stata fornita al target, che è circa l'1% dell'energia complessiva utilizzata per realizzare l'esperimento.

Per comprendere lo stato di queste ricerche e le prospettive reali di arrivare a produrre energia da fusione, abbiamo incontrato Giovanni Tardini, fisico e Senior Researcher presso il Max-Planck-Institut für Plasmaphysik a Garching (Monaco di Baviera).

Su quale processo fisico si basa la fusione nucleare?

La fusione nucleare è nient'altro che l'"unione" di due nuclei leggeri per formarne uno più pesante (e in avanzo tipicamente un'altra particella più leggera). È il processo fondamentale che fornisce energia alle stelle e le tiene in vita, ma anche il



processo che dà origine a tutti gli elementi chimici che non siano idrogeno, sempre nella "fucina" che è una stella, soprattutto nelle fasi finali del suo ciclo di vita.

Nel sole la reazione dominante è quella che unisce idrogeno e idrogeno per formare deuterio, ma poi con reazioni secondarie si forma anche elio (che infatti prende questo nome dalla denominazione greca del sole, "helios"). In un reattore, non avendo a disposizione la gravità solare per tenere confinato il "materiale" che fa fusione (che si chiama "plasma"), si punta su una reazione molto più efficiente, ovvero quella fra due isotopi dell'idrogeno: deuterio e trizio, che formano un nucleo di elio e un neutrone. Inoltre, sempre per aumentare la probabilità di reazione, le temperature dei reagenti sono molto elevate, servono 100 milioni di gradi. In mancanza della pressione gravitazionale del sole, occorre qualcosa che impedisca al plasma caldissimo sia di squagliare le pareti della camera di fusione, sia di disperdere troppo rapidamente tutto il calore (o energia) immagazzinato. Questo è il concetto chiave di "confinamento", che si può pensare come isolamento termico, e anche come "sospensione" del plasma caldo affinché le pareti possano resistere alle temperature elevate. A tutt'oggi, il confinamento migliore è stato raggiunto con un campo magnetico a configurazione altamente simmetrica (e questo non è un caso, ma ha delle ragioni fisiche), ovvero con una forma a ciambella ("toro" in termini geometrici): il "tokamak", parola che è un acronimo dalla lingua russa e significa "camera toroidale per il confinamento magnetico".

Di energia da fusione nucleare si parla da tanto tempo: come è iniziata questa storia? Quando e come si è passati dalle idee ai primi programmi sperimentali?

Della fusione nucleare si è parlato meno nei mass media, dal momento che non siamo mai stati vicini a poterla applicare concretamente per la produzione di elettricità, e non lo siamo ancora adesso. La fissione, invece, ha avuto prima un impatto devastante (con le bombe su Hiroshima e Nagasaki) e ben presto anche con un impatto rapido e significativo per la produzione di energia elettrica. La fusione nucleare ha avuto un'immediata applicazione bellica, con bombe ("a idrogeno") ben presto molto più compatte e dal potenziale molto più distruttivo delle bombe a pura fissione. Guardando alla storia della fissione, si è pensato nel dopoguerra che anche per la fusione il passaggio a un utilizzo controllato per la produzione di energia fosse solo una questione di tempo, qualche anno. Sono nati subito vari apparati di confinamento magnetico, e secondo i calcoli delle perdite d'energia pareva realistico realizzare un reattore delle dimensioni di un tavolo da laboratorio. La realtà parlò chiaramente un'altra lingua: le perdite erano 10mila volte più grandi di quelle stimate, e non per un errore nei calcoli, ma perché il trasporto di energia era (ed è tuttora) dominato da fenomeni di turbolenza, e non semplici urti coulombiani delle singole particelle. Solo verso la fine degli anni 50 con i tokamak si è cominciato ad avere una speranza realistica di ottenere la fusione con il cosiddetto confinamento magnetico. Parallelamente si è concepito un concetto alternativo, la cosiddetta fusione inerziale, con anche ricadute militari. Grazie al tokamak sono stati fatti progressi molto rapidi nel migliorare il confinamento e la performance, sull'onda dell'entusiasmo sono stati costruiti molti tokamak con caratteristiche diverse e dimensioni sempre più significative, permettendo anche di capire la fisica che ci sta dietro, confrontando impianti diversi con caratteristiche diverse per verificare in modo più "costringente" i vari modelli.

Perché suscita così grandi aspettative?

Le grandi aspettative sono dovute a una serie di vantaggi di rilevanza immediata per la popolazione. Di fatto è paragonabile alla fissione nucleare per quanto riguarda la programmabilità - mentre le energie rinnovabili hanno una forte variabilità, in parte intrinseca (si pensi all'alternanza giorno-notte, ma anche estate-inverno per l'energia solare) con in più una componente totalmente aleatoria legata alle condizioni meteorologiche. Rispetto alla fissione però ci sono parecchi problemi in meno.

1 - La totale assenza di rischio di una catastrofe nucleare: in caso di malfunzionamento o persino incidente, la reazione di fusione si spegne. Possono quindi verificarsi danni (anche ingenti) all'impianto, ma non una reazione a catena né uno

squagliamento del reattore come quello che si è avuto a Chernobyl e sfiorato a Fukushima.

- 2 - I prodotti di una reazione di fusione non sono radioattivi, quindi non si producono scorie con il gravissimo problema dello stoccaggio. A fine ciclo di un dato impianto vi sono materiali radioattivi, ovvero le stesse pareti della camera di fusione, ma appunto non ci sono scorie derivanti dalla reazione stessa e soprattutto il materiale radioattivo da smaltire ha tempi di dimezzamento dell'ordine delle centinaia di anni, invece che centinaia di migliaia.
- 3 - Il deuterio è facilmente reperibile, è semplicemente una frazione significativa dell'idrogeno presente in natura e si può ricavare per esempio dall'acqua. Non si creerebbe quindi una guerra di monopoli con conseguenze geopolitiche come avviene ora per le fonti fossili o per l'uranio. Il trizio è invece molto più raro in natura, un reattore dovrà produrlo in situ, sfruttando i neutroni provenienti dalla camera di fusione per una reazione che coinvolge il litio - questo è, nell'intero ciclo, il materiale meno banale da reperire, stante anche la concorrenza della produzione di batterie al litio. D'altro canto, la quantità di litio necessaria per un reattore è molto modesta rispetto al consumo mondiale legato alle batterie, quindi anche questo non sembra costituire un problema per la fusione nel medio periodo.



Sintetizzando: la fusione nucleare sarebbe una soluzione ottimale dal punto di vista ecologico, limitando al massimo la produzione di gas che fanno effetto serra, e mantenendo l'efficienza e programmabilità di un reattore nucleare attuale, mentre sarebbe esente dai rischi e dai problemi di stoccaggio a lungo termine.

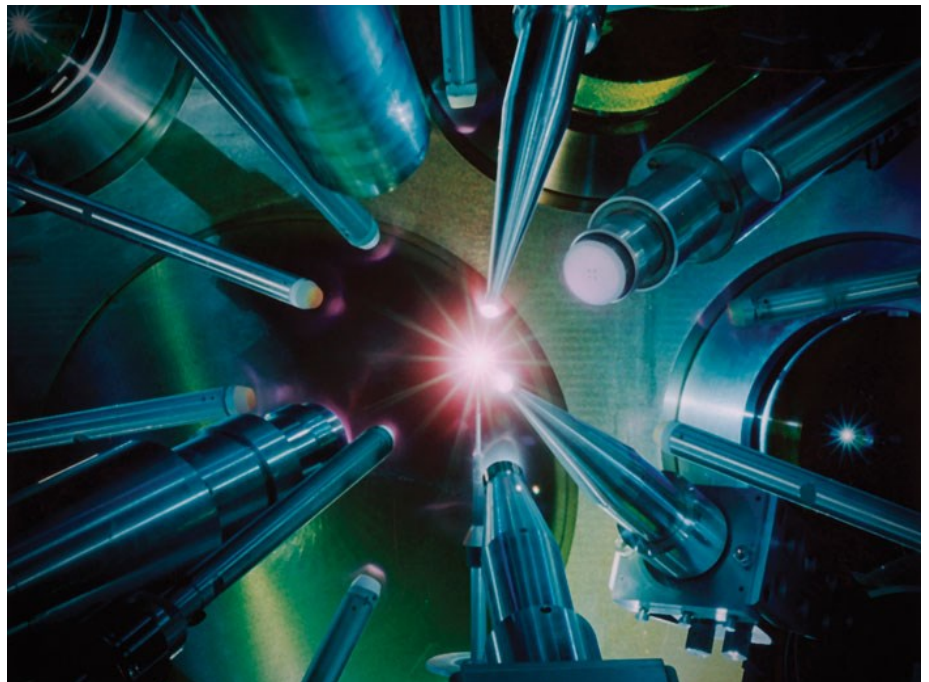
Tante aspettative ma anche tanti problemi da risolvere. Consideriamo i principali problemi legati al processo fisico: il riscaldamento del gas a enormi temperature e il contenimento del plasma supercaldo. Quali soluzioni sono state prospettate e qual è la loro realizzabilità?

In effetti il problema più grosso della fusione è proprio la sua fattibilità, che tuttora non è dimostrata - questo è proprio l'obiettivo del tokamak ITER in costruzione a

Cadarache, in Provenza. Confinare il plasma molto caldo è in effetti una sfida. Da una ventina d'anni abbiamo una buona comprensione della perdita di calore, ed è certamente vero (e verificato) che il confinamento migliora costruendo tokamak più grandi, in modo circa proporzionale al quadrato delle dimensioni lineari (ad esempio il raggio della ciambella che è appunto un tokamak). Purtroppo però un tokamak troppo grande ha problemi grossi, certamente di costo ma anche di controllo del plasma e persino di tecnologia e meccanica. In questo senso, allo stato attuale anche con molti soldi non saremmo sicuri di avere un reattore funzionante in tutte le sue fasi. Dobbiamo prima imparare da ITER come gestire certe instabilità e il logorio dei materiali, esposti all'erosione da parte dei neutroni della fusione.

Ecco una breve carrellata delle possibilità che potrebbero portare a un reattore per vie diverse.

- 1 - Fra i tokamak esiste un approccio diverso, che consiste nell'aumentare il campo magnetico invece delle dimensioni del plasma - dal punto di vista della fisica, è praticamente la stessa cosa. Qui il gap con un reattore è soprattutto tecnologico, ma non è detto che non venga superato. Questi "tokamak ad alto campo" sono quello su cui scommettono diverse start-up, certo bisogna ancora dimostrare la fattibilità (anche meccanica) di bobine così grosse di questi materiali ceramici che siano superconduttori a temperature (relativamente) alte. In aggiunta, date le dimensioni ridotte, il problema di tutti i tokamak di smaltire il calore in eccesso senza danneggiare il materiale delle pareti con picchi intollerabili sarebbe ancora più acuto per i tokamak ad alto campo.
- 2 - Oltre ai tokamak, la fusione a confinamento magnetico si può realizzare con una macchina leggermente diversa chiamata stellarator. Una camera di plasma ha bisogno di una componente di campo magnetico "poloidale", ovvero "circolare" in una sezione verticale della "ciambella" che è il tokamak. Nei tokamak, questo è realizzato inducendo una corrente nel plasma stesso con un trasformatore. Questo pone dei limiti di durata della scarica ed è all'origine di instabilità violente chiamate distruzioni. Uno stellarator, invece, fornisce questa componente minoritaria del campo magnetico deformando le bobine che generano la componente principale ("toroidale", ovvero circolare intorno all'asse di simmetria della ciambella, in una sezione orizzontale). Un altro vantaggio dello stellarator è che non ha limiti in densità del plasma, mentre per i tokamak questo limite è ben documentato e tenuto in considerazione nel design di futuri reattori. Lo svantaggio dello stellarator è una complessità di costruzione molto più ingente, compresa anche la fattibilità stessa delle bobine del campo magnetico, e un confinamento molto più inefficiente di quello dei tokamak, ragion per cui finora si è investito meno in questo ramo che e', di fatto indietro di almeno una generazione rispetto al tokamak, e non dispone di una possibilità di confronto fra gli impianti esistenti. Se però uno dei limiti del tokamak si dovesse rivelare decisivo, lo stellarator rimarrebbe come opzione.
- 3 - Fusione inerziale: è quella di cui si è parlato nei mesi scorsi. Qui di fatto si rinuncia al confinamento puntando su altissime densità di plasma che si ottengono in piccole sfere complesse di deuterio e trizio in cui si inducono microimplosioni con brevissimi impulsi laser.



*Il Laser per la fusione a confinamento inerziale
al Lawrence Livermore National Laboratory*

Nonostante i risultati promettenti dello scorso dicembre, siamo molto lontani dalla condizione di cosiddetta ignizione (ovvero quando la potenza generata dalle reazioni è sufficiente a innescare le reazioni successive) ma persino da un vero "break even", ovvero il momento in cui la potenza prodotta dalla fusione pareggia quella necessaria a generare e sostenere la reazione stessa. Inoltre c'è un limite tecnologico allo stato attuale: per avvicinarsi alle condizioni di reattore, ci vuole un tasso di ripetizione di circa un "target" al secondo, mentre attualmente ne viene consumato circa uno al giorno.

Ci sono problemi connessi alla scelta degli elementi di partenza (Deuterio, Trizio, Elio...)? Qualisi prospettano come più vantaggiosi?

No, almeno su questo la scelta è praticamente obbligata: per un reattore da sempre si è capito che la reazione è deuterio-trizio. Recentemente ho letto nel web di proposte di usare invece deuterio e elio-3, ma al momento non ci sono studi seri, e la reperibilità dell'elio-3 sarebbe un grosso problema (la proposta più concreta è estrarlo dalla luna!). La reazione deuterio-trizio è molto "probabile" (ovvero avviene con molta più frequenza) di tutte le altre, non presenta problemi di reperibilità se, come riteniamo (ma non abbiamo mostrato ancora sperimentalmente), riusciremo a produrre il trizio in situ. Inoltre, producendo neutroni e particelle alfa, questa reazione avrebbe già un portatore di energia per il reattore (il neutrone, che non risente dei campi magnetici e quindi non resta confinato) e invece un "riscaldatore" per il plasma, ovvero il nucleo carico (e quindi confinato) che è appunto la particella alfa, che poi è un nucleo di elio-4.

Dal processo al reattore: cosa si intende per fattibilità scientifica e fattibilità tecnologica?

Non è facile dividere fattibilità scientifica e fattibilità tecnologica. Se dimentichiamo per ora il discorso economico, ovvero quanto costerà un kWh generato dalla fusione, la maggior parte dei problemi tecnologici sono legati alla fisica. La maggior parte degli incidenti derivano da instabilità fisiche. La necessità di riparare delle parti solamente da remoto è dovuta all'attivazione (nel senso della radioattività) delle pareti della camera, che impediscono di intervenire manualmente sui componenti. Le stesse dimensioni dell'impianto, e quindi la sua complessità in termini di controllo, sono fissate dalle conoscenze fisiche delle perdite del calore. La tollerabilità dei picchi di calore da smaltire per unità di superficie è messa a rischio da instabilità del plasma al bordo.

Tuttavia la distinzione fra fattibilità scientifica e tecnologica ha senso. Per noi scienziati, ITER avrà successo se dimostrerà di poter produrre una potenza di fusione decupla di quella che immettiamo nel plasma. Ci domandiamo anche se riusciremo ad avere la densità del plasma abbastanza alta al centro, dove il plasma è più caldo, e se riusciremo a governare le instabilità più deleterie con quello che abbiamo imparato sui tokamak attuali.

Per gli ingegneri sarà un successo quasi tutto il resto: se dimostreranno l'operabilità di ITER. Se non dovremo fermare ITER per un anno per un piccolo incidente (cosa che al momento non credo che possiamo escludere). Se riusciremo a gestire le piccole riparazioni con la robotica progettata per questo scopo. Se non dovremo cambiare le pareti troppo frequentemente. Se la macchina reggerà alle forze meccaniche che si realizzano in caso di "disruzioni", instabilità che portano allo "sparimento" del plasma in tempi rapidissimi.

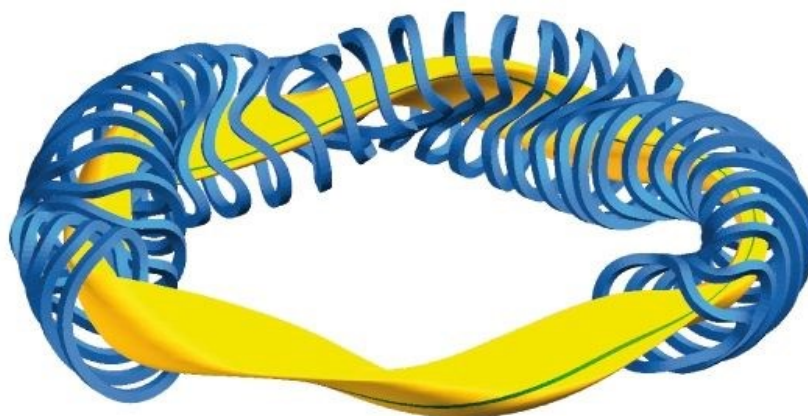
Quali sono i principali programmi in atto nel mondo?

Ho già parlato diffusamente di ITER, che è in costruzione e potrebbe dare i suoi risultati finali verso la fine degli anni 30. Per quanto riguarda gli stellarator, il Max-Planck-Institut (per cui lavoro) ne ha costruito uno ottimizzato a Greifswald, sul Mar Baltico,

che costituisce un salto qualitativo e quantitativo notevole, fornendo il miglior confinamento finora osservato per uno stellarator. Per la fusione inerziale il progetto di punta è la National Ignition Facility (NIF) che ha pubblicato i risultati recenti in cui la fusione ha prodotto 1.5 volte tanto la potenza immessa nei "target" di deuterio e trizio. Un filone in crescita, soprattutto nel mondo dell'impresa privata, sono i tokamak o stellarator ad alto campo, che scommettono sulla recente tecnologia dei superconduttori ad alta temperatura.

Sintetizzare le principali sfide aperte di ogni "linea" di ricerca è un po' ambizioso, ma ci provo, a costo di qualche ripetizione con le risposte precedenti.

1) Il tokamak convenzionale, ovvero a basso campo, come ITER, avrà sempre dei limiti intrinseci di durata della reazione (a causa del solenoide trasformatore) e di densità del plasma. Le sfide aperte sono il controllo o anche la prevenzione di instabilità deleterie non solo per la performance, ma persino per la vita stessa dell'impianto. Vantaggi: siamo molto più avanti come generazione, abbiamo molta più esperienza e a tuttora un confinamento neppure lontanamente eguagliato da altri tipi di impianto. L'autosufficienza della produzione del trizio è tutt'altro che dimostrata, così pure un compromesso accettabile fra dimensioni elevate necessarie per un buon confinamento e dimensioni ridotte per gestire il controllo delle instabilità.



Modello di Stellarator (Max-Planck Institut für Plasmaphysik)

2) Lo stellarator convenzionale deve dimostrare un confinamento sufficiente. Anche se l'ultima generazione ha rappresentato un salto notevole da questo punto di vista, resta ancora un gap significativo e non sarà semplice costruire uno stellarator molto più grande di quelli attuali, sia da un punto di vista logistico (spazio) sia da un punto di vista della tenuta meccanica di bobine dalla forma irregolare e dimensioni cospicue. A tutt'oggi esistono studi per la prossima generazione di stellaratori, ma siamo lontani da un vero e proprio design con scenari realistici, insomma non si intravede un "ITER" degli stellaratori ma potrebbe esserci un'accelerata grazie ai risultati dello stellarator di ultima generazione, W7X.

3) Tokamak e stellarator ad alto campo sono un'alternativa molto attraente su cui puntano soprattutto le start-up e compagnie private in genere. Il grande beneficio sarebbe nelle dimensioni più ridotte - ma i costi non molto, in quanto il campo magnetico moltiplicato per il volume è un discreto indicatore del costo finale. Quindi logistica più compatta, densità di plasma più alta e condizione di ignizione più facile da raggiungere, anche a potenze di fusione minori (che per il danneggiamento delle pareti non è per forza uno svantaggio). Qui la difficoltà maggiore è probabilmente tecnologica: occorrono magneti superconduttori ad alte temperature. Questi esistono ma non sono mai stati dimostrati nell'ordine di grandezza delle dimensioni che servono già anche per un tokamak dimostrativo, più piccolo e ancora non performante come ITER. Inoltre, avendo da smaltire grandi flussi di calore in dimensioni spaziali ridotte, si acuisce un problema annoso di ogni camera a confinamento, ovvero lo smaltimento di calore dalle componenti più colpite dai prodotti di reazione. Per questa linea, il progetto più concreto e interessante è il tokamak SPARC, progettato e in costruzione da parte della ditta privata Commonwealth Fusion Systems, che ha saputo attrarre capitali notevoli e un know how di tutto rispetto

4) Fusione inerziale: come ho detto sopra, le difficoltà sono dovute alla performance di NIF molto ridotta rispetto agli obiettivi originali, per cui si è molto lontani dalla condizione di ignizione e persino da un vero break-even, ma soprattutto c'è un forte limite tecnologico legato al tasso di ripetizione della reazione, che deve essere aumentato di 4-5 ordini di grandezza rispetto alle performance attuali. Non è chiaro in quale misura l'aspetto energetico della fusione inerziale sia realmente perseguito, dal momento che NIF è stato ufficialmente dichiarato un impianto per la ricerca militare.

