

La fusione nucleare

LA LEZIONE

Il sole nero

Tra la dimostrazione del funzionamento della pila di [Fermi](#) (necessaria per produrre il plutonio e base dei successivi [reattori nucleari](#)) nel dicembre 1942 e il test di Alamagordo del 16 luglio del 1945 del primo ordigno a fissione trascorse un tempo di

poco superiore ai due anni e mezzo.

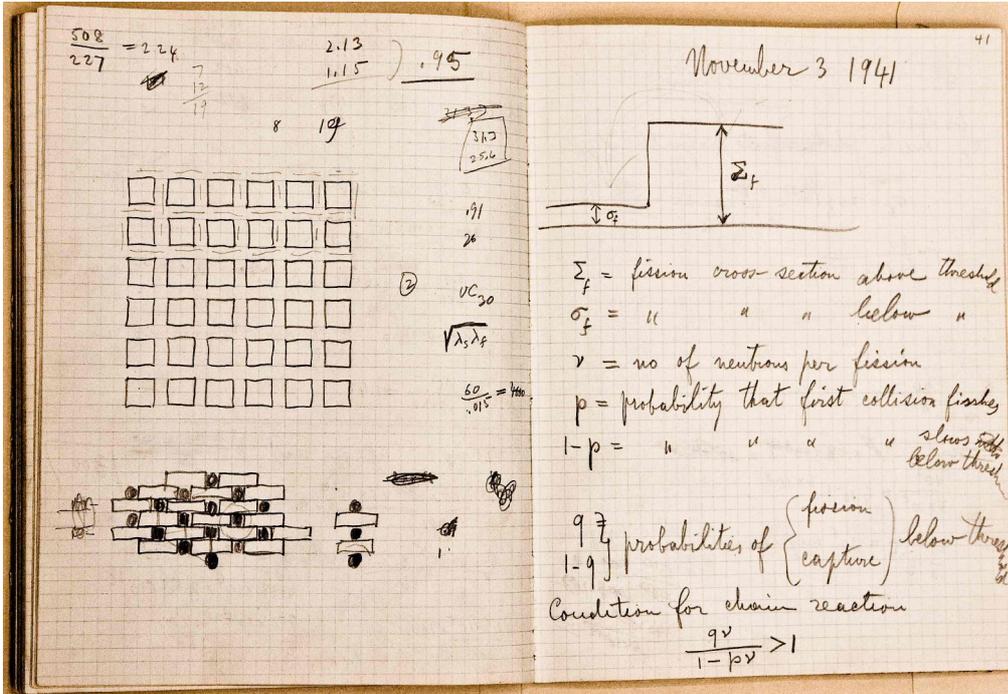


fig.1 Appunti di Fermi sulla prima pila atomica



fig.2 Militari e civili controllano i resti della torre del Trinity test dopo la prima esplosione nucleare. Al centro della foto si riconoscono il direttore scientifico del progetto Manhattan R. Oppenheimer e il colonello L. Groves

Negli Stati Uniti il fisico italiano fece parte fino al 1950 della ristrettissima elite di scienziati interpellati come esperti dai politici e dai militari. Dopo il drammatico dibattito sull'uso delle bombe atomiche, Fermi si trovò coinvolto, insieme a [Oppenheimer](#), sulle polemiche suscitate dalla presentazione del disegno di legge sulla energia nucleare. Gli scienziati organizzati nei centri di Oak Ridge, Los Alamos e Chicago che aveva dato vita al gruppo FAS (*Federation of Atomic Scientists*), si

opposero fortemente e il loro atteggiamento contribuì alle profonde modifiche del Congresso sui poteri della nascente Commissione dell'Energia Atomica (AEC).

J. R. Oppenheimer, E. Fermi e E. O. Lawrence, invece intervennero in appoggio alla bozza contestata. Nell'agosto 1946 venne approvata la legge statunitense sulla regolamentazione della attività concernenti l'energia nucleare. Nel gennaio 1947 Fermi fu nominato membro del *General Advisory Committee (GAC)*, con a capo Oppenheimer, organo consultivo della AEC. Due anni più tardi, il 29 agosto 1949 avvenne l'esplosione della prima atomica russa RDS 1 (che aveva seguito un percorso simile a quella americana al plutonio, con la creazione del reattore F1). La Commissione fu chiamata a esprimersi sui futuri programmi di sviluppo di una superbomba. Il GAC votò all'unanimità la decisione di non sviluppare il programma, anche se sulle motivazioni Fermi e Oppenheimer si divisero. Fermi e Rabi argomentarono: *"Il fatto che la capacità di distruzione di questa arma sia illimitata fa sì che la sua stessa esistenza e la conoscenza del modo di costruirla rappresentino un pericolo per l'intera umanità. È ineluttabilmente un male sotto qualsiasi punto di vista. Per queste ragioni ci pare importante che il Presidente degli Stati Uniti dichiari all'opinione pubblica americana e al mondo intero che in base a principi etici fondamentali noi giudichiamo che sia un grave errore intraprendere lo sviluppo di quest'arma."* (Segrè p. 169).

Harry Truman il 31 gennaio 1950 annunciò invece di continuare la ricerca su tutte le forme di armi atomiche, inclusa la bomba a idrogeno detta anche la 'superbomba'. Le difficoltà tecniche, che fino a quel momento avevano convinto la maggioranza degli esponenti del progetto Manhattan che non fosse realmente possibile arrivare alla fusione artificiale, furono superate con il metodo associato ai nomi di due esuli europei: il polacco [Stanislaw Ulam](#) e l'ungherese [Edward Teller](#). Nel maggio 1951 fu realizzato il primo test chiamato anche 'Greenhouse Item'.

Con riferimento alla figura 3, che riproduce in maniera schematica le bombe della fine degli anni Cinquanta, l'innesco dell'arma a fusione è una piccola bomba atomica utilizzata per generare temperature e pressioni incredibili capaci di innescare uno schema: fissione, fusione, fissione.

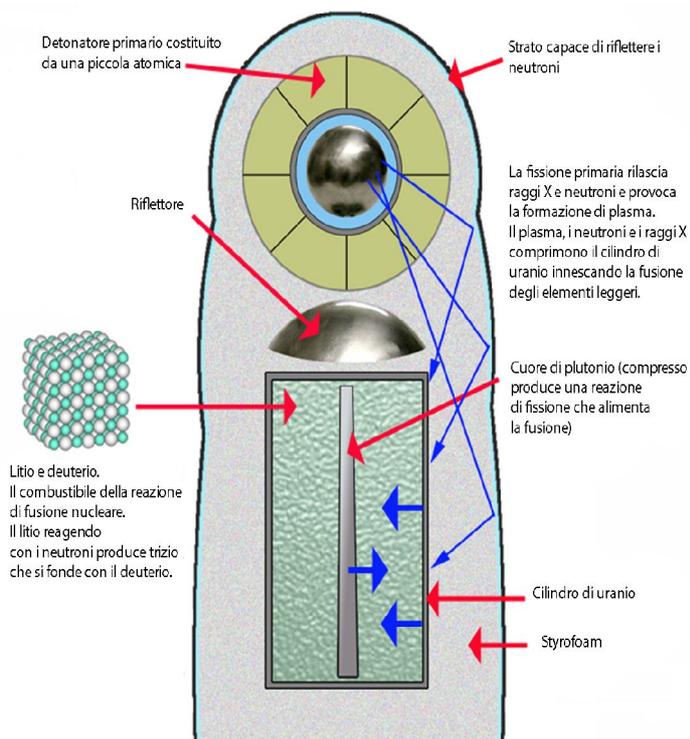
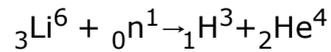


fig.3 Schema del funzionamento di una bomba a fusione sviluppata secondo il metodo Ulam-Teller

La reazione di fusione di due nuclei di deuterio (isotopo dell'idrogeno di massa 2) ${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^2$ ha, con uguale probabilità, la formazione come prodotti di reazione un nucleo dell'isotopo trizio più un protone (${}_1\text{H}^3 + {}_1\text{H}^1$) con lo sviluppo di 4,03 MeV di energia oppure un neutrone più l'isotopo dell'elio di massa 3 (${}_0\text{n}^1 + {}_2\text{He}^3$) con un'energia di 3,27 MeV. Inserendo perciò del litio in un apparato secondario è possibile allora realizzare la reazione:



La reazione deuterio e trizio (${}_1\text{H}^2 + {}_1\text{H}^3 \rightarrow {}_0\text{n}^1 + {}_2\text{He}^4$, $\Delta\Delta E = 17,6$ MeV) procede a una velocità superiore di 100 volte a quella deuterio-deuterio e l'energia sviluppata è quattro volte superiore.

Il primo ordigno termonucleare a idrogeno esplose il 31 ottobre 1952 con un'energia equivalente a oltre 10 milioni di tonnellate equivalenti di tritolo.

Da allora sono seguiti oltre duemila esperimenti (per la precisione 2054) con armi atomiche di grande potenza il 50% (1030) svolti dalle forze armate statunitensi.

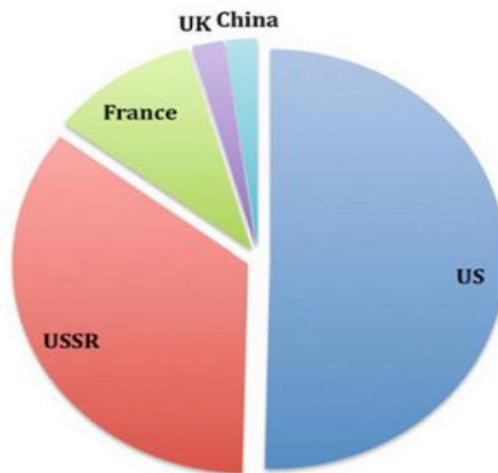


fig.4 a sinistra, Ivy Mike test; fig.5 a destra, Test nucleari realizzati tra il 1946 e il 1996. Le aree sono la rappresentazione grafica del numero di test

Il plasma e la fusione

La fiamma di una candela, il vento solare, la ionosfera, le scariche elettriche a bagliore, gli archi ad alta pressione, la corona solare, sono esempi di plasma a diverse temperature e densità. Il quarto stato della materia, secondo I. Langmuir, modellabile facilmente (si pensi come la fiamma di una candela segua un refolo di vento), è costituito da un gas di ioni, elettroni, atomi o molecole, complessivamente neutro. Gli effetti elettrici collettivi dominano. La sua trattazione è, per distribuzioni di velocità vicine a quelle maxwelliane, quella della teoria cinetica. Distinguendo però il gas di elettroni da quello degli ioni, ognuno con una propria temperatura assoluta (oppure un'energia che si ottiene moltiplicando la temperatura assoluta per la costante di Boltzmann). La sua energia interna è la somma delle energie cinetiche delle particelle e delle energie potenziali coulombiane d'interazione tra le cariche.

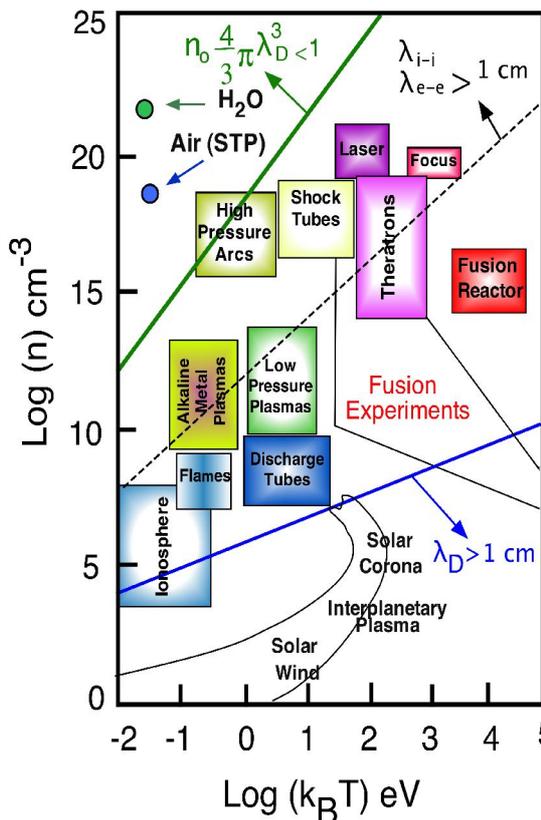


fig.6 Diagramma della densità n (numero di atomi per unità di volume) e della temperatura T dei principali plasmi naturali e prodotti in laboratorio

Se si considera come gas l'idrogeno la possibilità di realizzare la fusione del plasma, come accade nel Sole o nelle bombe a fusione, implica portare i nuclei del plasma a distanze prossime al raggio d'azione delle forze nucleari, superando la barriera costituita dalla forza elettrica. Ciò è possibile trasferendo ai nuclei energia cinetica aumentando la temperatura, oppure esercitando notevoli pressioni e quindi facendo crescere la densità del plasma.

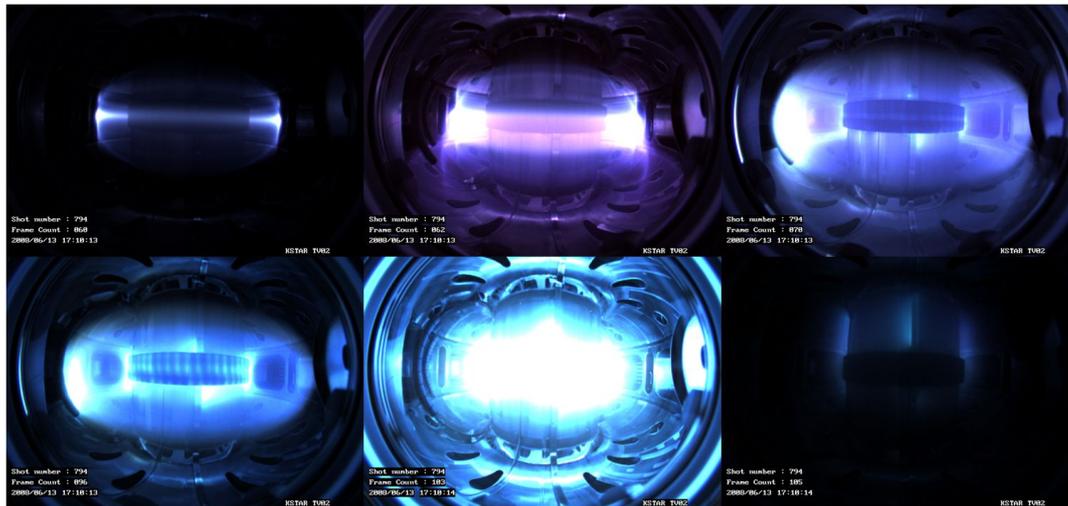
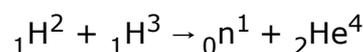


fig.7 Immagini del plasma all'interno del KSTAR (Korea Superconducting Tokamak Advanced Research)

Tra le possibili reazioni dei nuclei degli isotopi dell'idrogeno, la più efficiente è quella tra i nuclei di deuterio e di trizio (anche se il trizio è un elemento artificiale che come abbiamo ricordato può essere prodotto bombardando il litio con neutroni) :



La massa dei nuclei reagenti è $8,35 \cdot 10^{-27}$ kg e quella dei prodotti finali (il neutrone e il

nucleo di elio) è uguale a $8,32 \cdot 10^{-27}$ kg. Il difetto di massa $\Delta\Delta m = 0,03 \cdot 10^{-27}$ kg corrisponde a un'energia relativistica:

$\Delta E = \Delta m c^2$ (con c velocità della luce nel vuoto) pari a $2,7 \cdot 10^{-12} \text{ J} = 17,6 \text{ MeV}$ (ricordando il valore della carica elementare $e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, $1 \text{ MeV} = 1,6 \cdot 10^{-13} \text{ J}$).

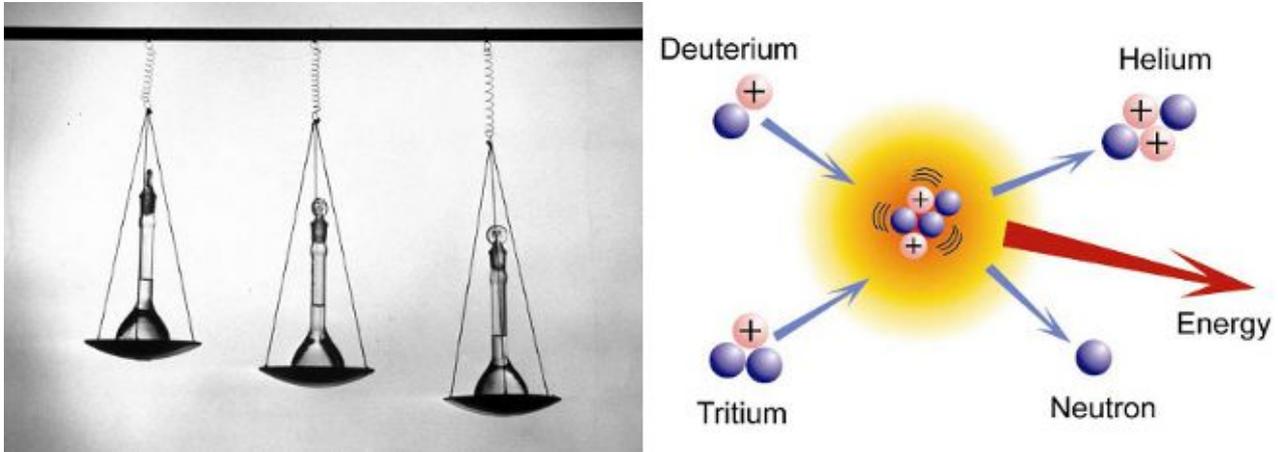


fig.8 Allungamenti di una molla causati da uno stesso volume, rispettivamente da sinistra, di acqua, acqua pesante (contenente isotopi di deuterio) e acqua in cui parte degli atomi di idrogeno sono stati sostituiti con il trizio; *fig.9* Fusione deuterio trizio

Tutte le reazioni di fusione emettono grandi quantitativi di energia, ma è possibile realizzare nei laboratori una fusione controllata per produrre energia?

Confinamento inerziale

Per innescare una reazione termonucleare di fusione è possibile produrre in un plasma un processo di implosione concentrando energia (raggi ultravioletti o raggi X) su una piccolissima sfera (diametro di circa 2 mm) contenente deuterio e trizio. Per ottenere le elevatissime temperature e densità necessarie alla fusione nei laboratori del Lawrence Livermore National Laboratory, i partecipanti al progetto NIF (*National Ignition Facility*) concentrano 192 fasci di un medesimo laser a luce ultravioletta di energia 1MJ sul minuscolo bersaglio posto nella camera di scarica ad alto vuoto, per tempi dell'ordine dei nanosecondi.

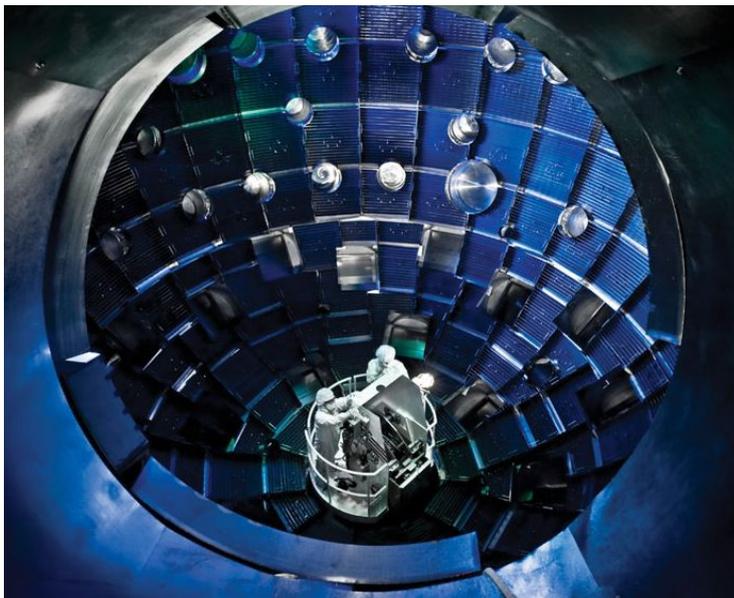


fig.10 Preparazione della camera di scarica del NIF (*National Ignition Facility*)

La radiazione ultravioletta del laser può essere utilizzata per produrre raggi X incidendo su un piccolo cilindro metallico, raffreddato a 18 K, che racchiude la sferetta. In questo modo si evita la necessità di collimare perfettamente i diversi fasci.

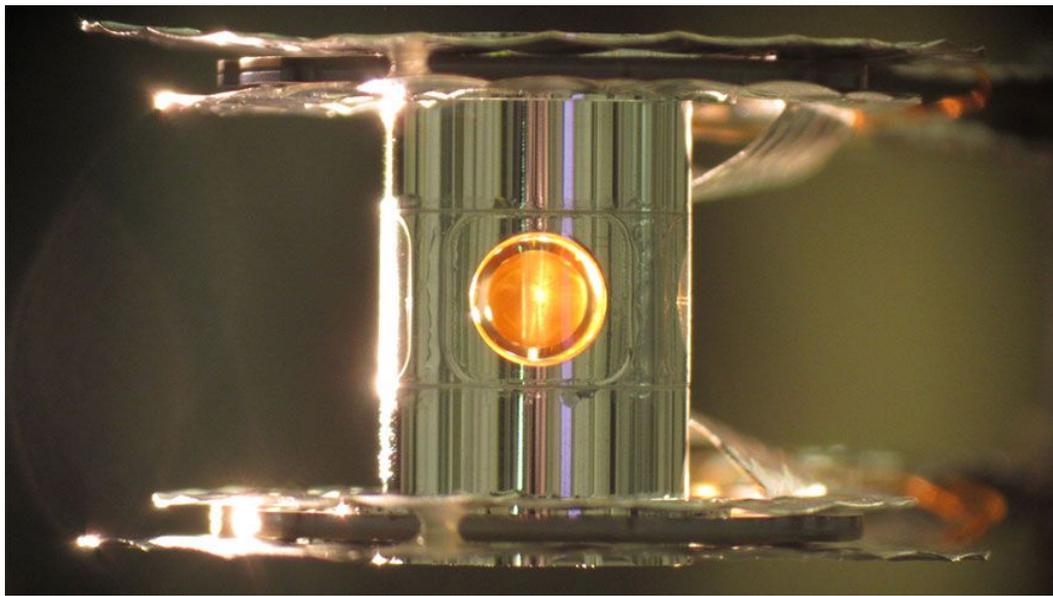


fig.11 Piccolo cilindro d'oro (hohlraum) contenente il bersaglio. L'interazione con i raggi laser ultravioletti determina nel metallo l'irradiazione di raggi X e la fusione nucleare della sferetta contenente deuterio e trizio. Un sistema criogenico mantiene la temperatura iniziale a 18 K

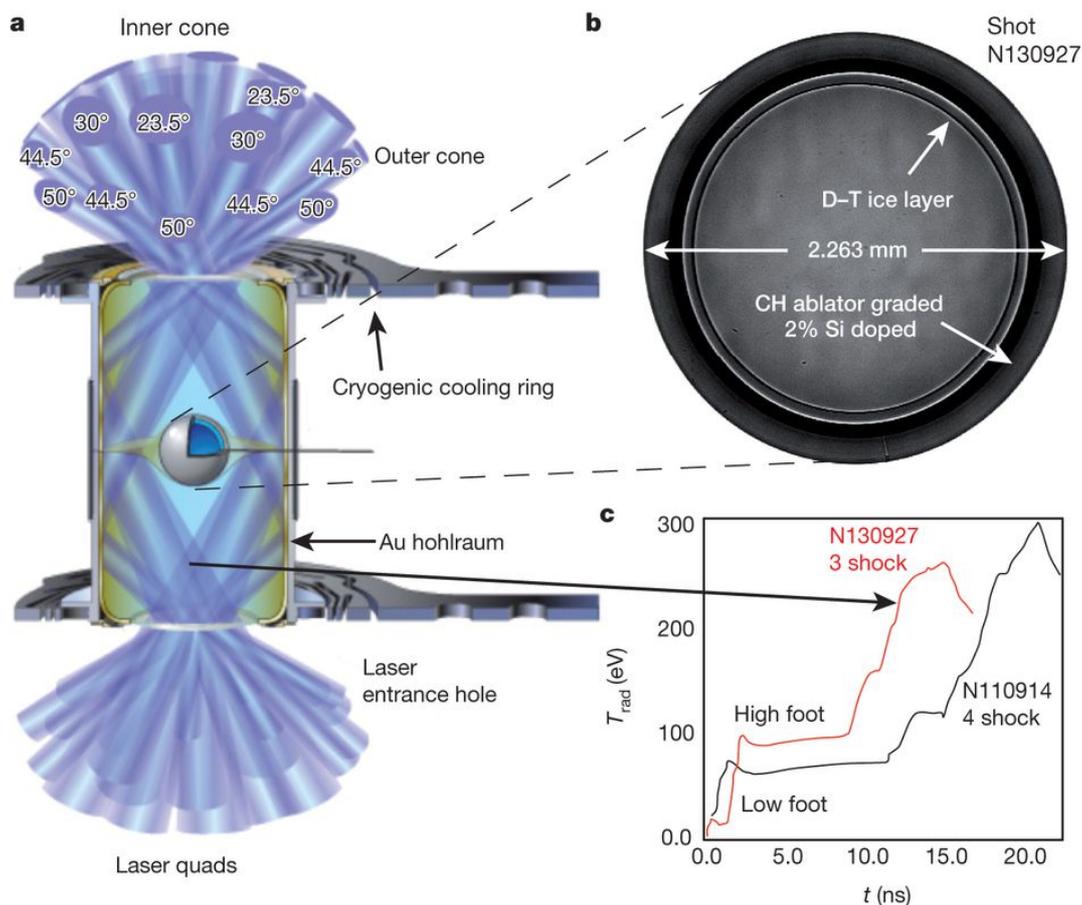


fig.12 Un confinamento inerziale del combustibile (deuterio e trizio) si può ottenere irradiando con i fasci laser un involucro d'oro (hohlraum). I raggi X secondari prodotti dall'involucro mantenuto a basse temperature (da anelli cilindrici criogenici) non necessitano in questo caso della focalizzazione caratteristica dell'irradiazione diretta dei laser sul bersaglio costituito da una sferetta di plastica con uno strato di deuterio e trizio nella fase condensata. Nel grafico l'energia del fascio in funzione del tempo che ha permesso di ottenere nel febbraio 2014, con il bersaglio N130927, uno dei risultati di maggiore efficienza di confinamento inerziale

L'elemento di combustibile, costituito da deuterio e trizio in fase condensata è deposto sulla superficie interna di una schiuma plastica di bassa densità. All'interno della cavità del bersaglio si possono formare gas di deuterio e di trizio. Nel momento dell'impulso dovuto all'irradiazione si ha la vaporizzazione (ablazione) degli strati superficiali e l'implosione del combustibile. La presenza di gas all'interno della cavità determina nel cuore del bersaglio una zona di minore densità, ma di temperatura più elevata. La fusione nucleare ha luogo a partire dalla macchia calda e si propaga verso l'esterno, ma non riesce ad autosostenersi.

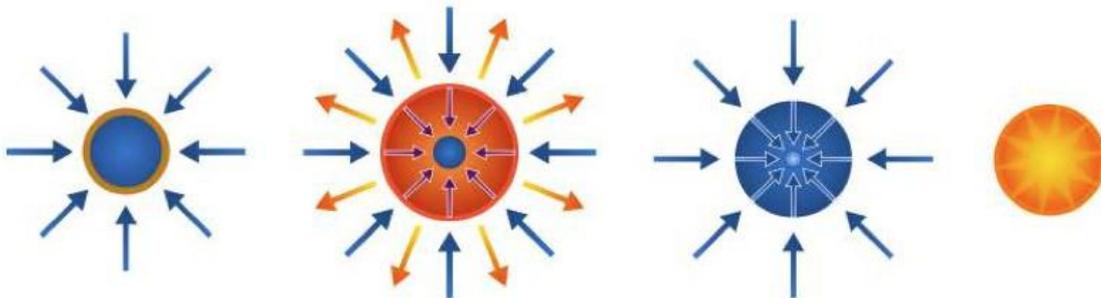


fig.13 Schema dell'implosione di un bersaglio nelle esperienze di confinamento inerziale

In questo tipo di confinamento del plasma, detto inerziale, la produzione di energia dovrebbe avvenire con l'impiego di un insieme di sferette di deuterio e trizio di pochi milligrammi immesse nella camera di scarica con frequenza elevata. Il processo è tipicamente impulsivo. Il fattore di guadagno termonucleare G rappresenta allora il rapporto tra l'energia termonucleare prodotta e quella degli impulsi impiegati per realizzare la fusione. Nel febbraio 2014 ricercatori del NIF su Nature hanno annunciato di aver prodotto una reazione con il valore di G maggiore di 1.

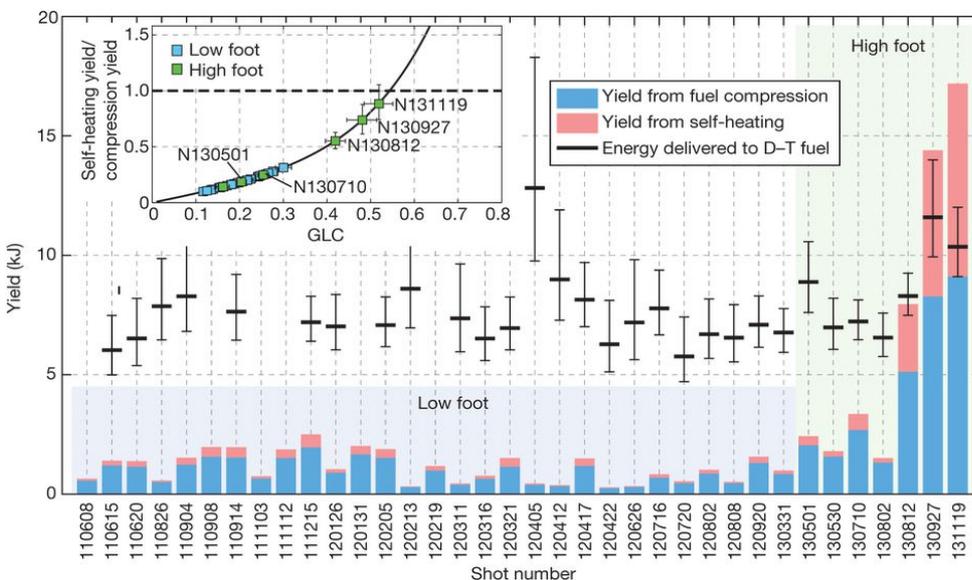


fig.14 Progressivo aumento dell'energia prodotta negli esperimenti da fusione ottenuti al NIF fino al risultato record, a destra, del febbraio 2014

Siamo ancora però lontani dall'ignizione termonucleare, dal processo in cui la fusione si autosostiene a partire proprio dall'energia delle particelle alfa prodotte dalla fusione stessa. In tal modo tutto il combustibile costituito dagli elementi di più basso numero atomico si fonderebbe dando luogo a un guadagno elevato.

Il confinamento magnetico

L'alternativa al processo di confinamento inerziale è quella di contenere il plasma in uno spazio limitato non con un'onda d'urto, ma sfruttando le proprietà elettriche collettive del gas ionizzato. La configurazione magnetica più studiata è quella di un anello toroidale chiamato tokamak per il contributo degli scienziati russi all'avvio di queste ricerche.

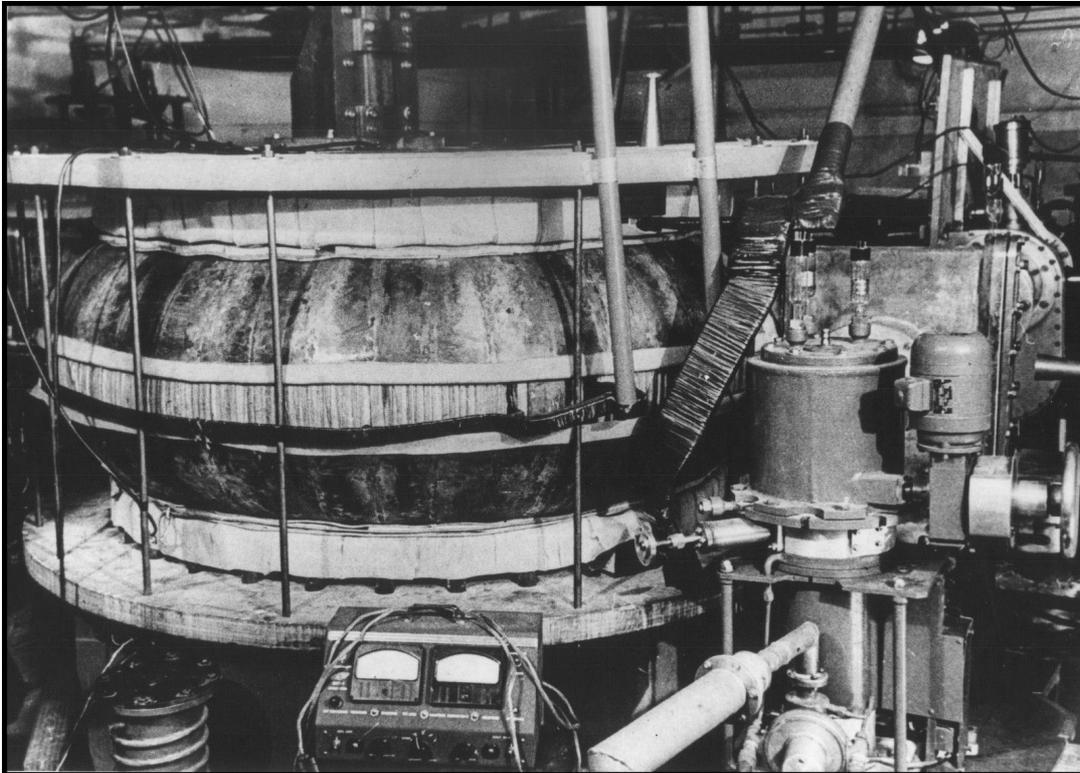


fig.15 Il primo tokamak russo

In esso il plasma deve essere riscaldato e isolato dalle pareti. Un contatto con le stesse creerebbe la contaminazione del plasma con elementi di elevato numero atomico e il suo raffreddamento. Secondo lo schema della figura 16 il campo più intenso del tokamak è toroidale ed è realizzato da bobine che avvolgono le pareti della ciambella.

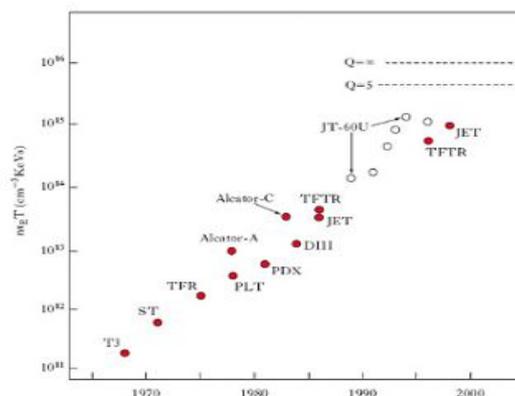
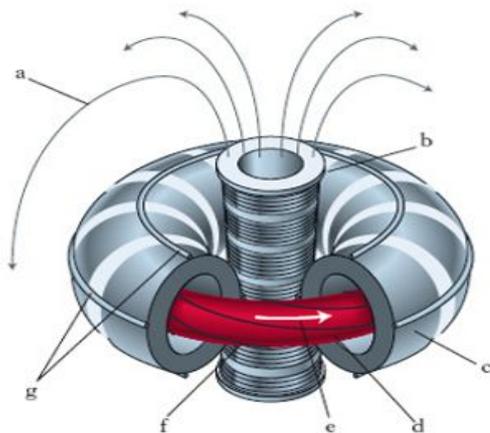


fig.16 Configurazione magnetica prodotta nella camera della macchina a confinamento magnetico tokamak: a, linee del campo magnetico; b, avvolgimento primario del trasformatore; c, bobine del campo toroidale; d, plasma; e, corrente toroidale; f, linee del campo magnetico; g, bobine di equilibrio; fig.17 Evoluzione delle macchine tokamak nella strada verso l'ignizione

Nella camera di scarica viene immesso il gas. Un secondo campo magnetico poloidale, perpendicolare al primo, è creato dal solenoide centrale. La variazione di flusso dell'induzione magnetica provoca una scarica e la formazione di plasma. Per effetto Joule il plasma si riscalda, ma ciò non sarebbe sufficiente per raggiungere le temperature e le densità necessarie per la fusione della miscela di deuterio e trizio. Vengono così utilizzati per il riscaldamento del plasma sistemi ausiliari: l'impiego di microonde e fasci di atomi ad alta energia. Nonostante il perfezionamento delle macchine tokamak (fig. 17) il cammino verso il reattore è ancora lunghissimo. L'ignizione, l'autosostentamento della fusione, dovrebbe tra le altre cose formare, in un ipotetico reattore, il trizio grazie ai neutroni prodotti nelle reazioni di fusione e alla presenza di uno strato di litio collocato in prossimità del plasma. Il confinamento magnetico degli ioni e degli elettroni del plasma dovuto alle forze di Lorentz dei campi di intensità prossimi a 10 tesla ha necessità di superconduttori raffreddati con elio liquido, mentre le correnti nel plasma si valutano nell'ordine di 10 MA. Il progetto di fattibilità di future centrali a fusione è stato demandato da una comunità di stati a un prototipo sperimentale di potenza 500 MW e dal costo dell'ordine di 20 miliardi di dollari. Il progetto ITER (*International Thermonuclear Experimental Reactor*) coinvolge Unione Europea, Stati Uniti, Russia, Cina, Giappone, Corea del Sud, India, e sta lentamente prendendo forma a Cadarache, nel sud della Francia. Diversi autori evidenziano problemi tecnici e l'elefantina burocrazia che segue il progetto: tutto ciò induce a pensare che non sarà semplice arrivare a risultati concreti nei tempi stabiliti.

Suddivisione dei costi di realizzazione, stimati in 20 miliardi di dollari, tra i diversi Stati

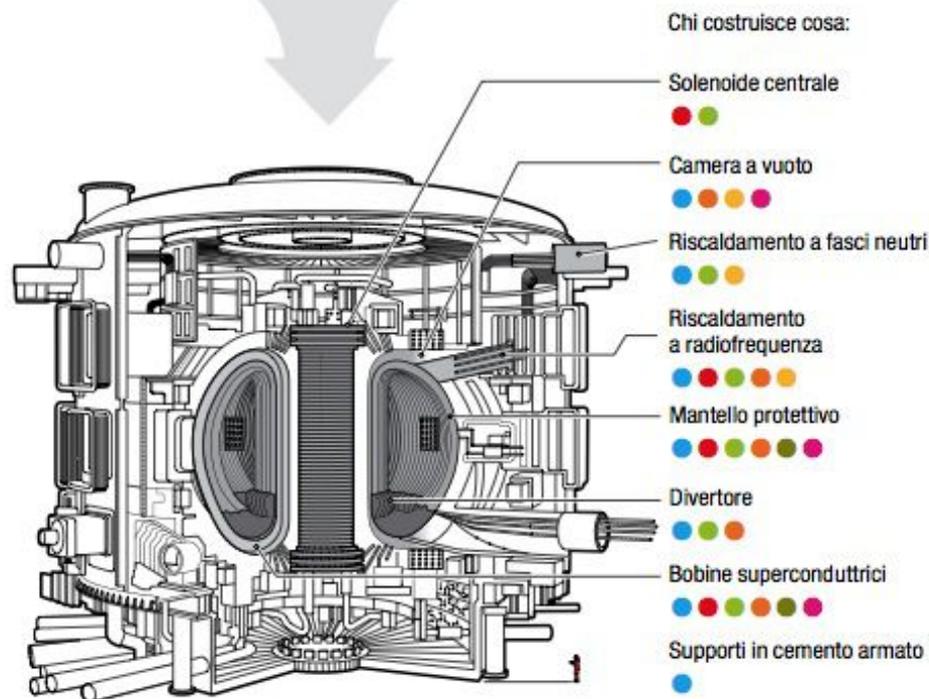


fig.18 Ripartizione delle spese del progetto ITER