

Aspettative dalle ricerche sulla fusione a confinamento inerziale

Produrre energia per impieghi civili dalla fusione nucleare è un importante obiettivo della ricerca energetica mondiale. Nella fusione a confinamento inerziale plasmi di interesse fusionistico sono prodotti mediante l'implosione di piccole quantità di combustibile che restano compresse per inerzia alcuni nanosecondi prima di disgregarsi. Affinché nel periodo di confinamento la reazione di fusione si inneschi, diverse difficoltà scientifiche e tecnologiche devono essere superate. Quest'articolo presenta una panoramica sulle varie problematiche e sullo stato dell'arte

■ Riccardo De Angelis

Stato e prospettive della fusione termonucleare controllata

Lo sfruttamento dell'energia prodotta da reazioni di fusione nucleare è uno degli obiettivi fondamentali della ricerca energetica mondiale. L'abbondanza e la diffusa disponibilità del combustibile, una miscela di deuterio e trizio (D-T), isotopi dell'idrogeno, limitano costi e semplificano le strategie di approvvigionamento. Rispetto alle centrali nucleari a fissione, sono rilevanti i vantaggi in termini di sicurezza intrinseca e minori quantità di prodotti radioattivi. D'altro canto la complessità della realizzazione di un reattore a fusione ha causato notevoli ritardi rispetto alle ottimistiche previsioni del secolo scorso. Infatti, se la produzione di reazioni di fusione in modo non controllato o per scopi scientifico-tecnici è alla portata delle conoscenze attuali, la possibilità di realizzare impianti per la produzione di energia per uso civile non è ancora dimostrata. Per

definire il progetto di un reattore è necessaria la sperimentazione su macchine complesse e lo sviluppo di nuove tecnologie con tempi e costi di realizzazione non indifferenti. Grazie alle conoscenze maturate negli ultimi decenni, sono in corso di realizzazione progetti dimostrativi dell'effettiva produzione di energia; sono inoltre in fase di definizione i progetti di proto-reattori, con distribuzione di energia nella rete elettrica, che opereranno prevedibilmente nella seconda metà del secolo.

L'approccio fondamentale per la fusione termonucleare controllata consiste nel produrre plasmi (gas ionizzati ad alta temperatura) nei quali le reazioni tra i nuclei di deuterio e trizio possano avvenire "spontaneamente" a causa dell'elevata energia d'interazione tra le particelle; queste, fondendosi, producono nuclei di elio (particelle α) e neutroni di alta energia. Per produrre un numero di reazioni sufficientemente elevato, occorre che la temperatura del plasma sia almeno di 150 milioni di gra-

di e che il prodotto della sua densità per il tempo di confinamento (tempo caratteristico durante il quale si riesce a contenerne l'energia), sia superiore ad un determinato valore (criteri di Lawson). I due approcci di ricerca allo stato più avanzato utilizzano *metodi di confinamento diversi: magnetico e inerziale*.

Nel primo caso, grazie alle sue proprietà elettriche, il plasma è confinato e riscaldato mediante correnti e campi magnetici esterni e con sistemi di riscaldamento addizionale a radiofrequenza e fasci di particelle. Il compito di dimostrare la possibilità di produzione di energia da fusione mediante confinamento magnetico di plasmi è affidato al tokamak ITER, attualmente in costruzione, per il quale si stima una energia prodotta di 500 MW con un guadagno $Q=10$

■ Riccardo De Angelis
ENEA, Unità Tecnica Fusione

rispetto a quella immessa. I plasmi di ITER saranno caratterizzati da una densità massima di 10^{14} particelle/cm³ e tempi di confinamento di alcuni secondi, la macchina opererà in regime quasi continuo (durata della scarica di 1.000 s) e volumi di plasma di 840 m³. Oltre a verificare le leggi di scala che hanno portato alla definizione delle caratteristiche del suo plasma, ITER dovrà anche servire da banco di prova per i materiali di prima parete, che dovranno sopportare carichi termici di 20 MW/m² e flussi neutronici di 10^{17} n s⁻¹m⁻².

Nel *confinamento inerziale* vengono prodotti plasmi di interesse fusionistico attraverso l'implosione di piccole quantità di combustibile, senza altro meccanismo di confinamento. Le densità richieste sono molto maggiori rispetto al confinamento magnetico, 10^{25} particelle/cm³ (migliaia di volte quelle dei liquidi), ma il tempo di confinamento è molto breve (il tempo di disgregamento del plasma compresso e non soggetto ad alcun sistema di confinamento è di alcuni nanosecondi) [1].

Nei due casi il prodotto del tempo di confinamento per la densità del plasma avrà valori simili (questo prodotto viene chiamato "parametro di confinamento" del plasma).

Il confinamento inerziale

Le elevate compressioni richieste possono essere ottenute irraggiando piccole capsule sferiche che racchiudono il combustibile. La deposizione di energia e la formazione di un plasma in espansione sul guscio esterno induce per reazione l'implosione del combustibile interno e la formazione di

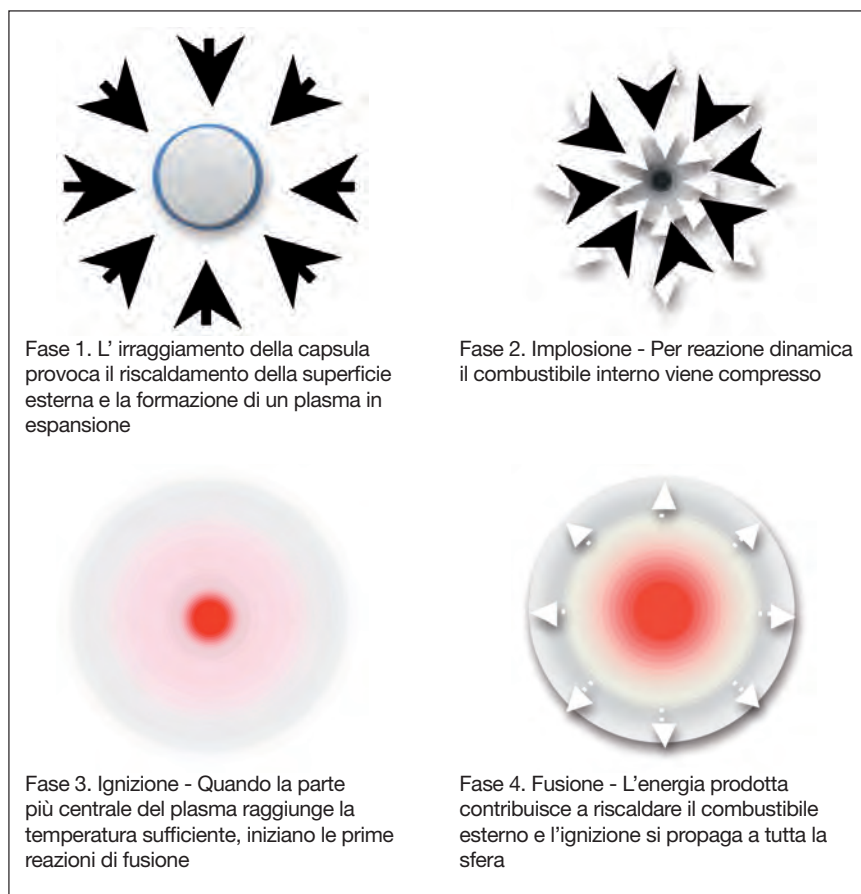


FIGURA 1 Fasi del processo di compressione

un plasma caldo e denso nel quale possono avvenire le prime reazioni di fusione. L'energia prodotta contribuisce a propagare l'innesco a tutta la massa di combustibile.

Le fasi del processo sono schematizzate nella Figura 1.

Il rilascio di energia avviene sotto forma di particelle α e di neutroni. L'energia prodotta da 1 grammo di combustibile D-T (3.4×10^{11} J/g) è già così grande che non potrebbe essere rilasciata senza danni nella camera di un reattore. Affinché il processo possa essere controllato

ogni capsula avrà una massa di pochi milligrammi, in tal modo l'energia rilasciata in ogni implosione è relativamente piccola. Un reattore della potenza di 1 GW richiede il bruciamento di circa 10 capsule al secondo.

La sorgente di irraggiamento

Per creare un plasma alle temperature necessarie per la fusione, partendo da una capsula contenente 5 milligrammi di D-T, sarà necessario fornirle alcuni MJ di energia. Con-

siderando il diametro tipico della sfera di alcuni millimetri e il tempo d'implosione di pochi nanosecondi, per l'irraggiamento sarà necessaria una sorgente (driver) che possa focalizzare energie così elevate su dimensioni e tempi così brevi. I principali studi sperimentali sulla fusione inerziale si basano sull'utilizzo di laser di potenza. Il successo di questa linea è legato allo sviluppo tecnologico delle sorgenti laser e al raggiungimento di alte prestazioni non solo riguardo all'energia massima prodotta ma anche relativamente ad altri parametri quali l'efficienza di conversione elettro-ottica, il numero totale di fasci, l'uniformità del singolo fascio, l'efficienza di conversione ad armoniche superiori, la frequenza di ripetizione, l'energia contenuta nello spot focale ecc. L'efficienza dei laser a stato solido è passibile di notevoli miglioramenti con il passaggio dalla tecnologia di pompaggio ottico delle barre di

amplificazione del fascio mediante diodi laser; infatti i diodi possono emettere principalmente nelle bande di lunghezza d'onda effettivamente utili al pompaggio e con migliore direzionalità. A titolo di esempio, il progetto concettuale del reattore americano LIFE prevede di raggiungere un'efficienza del laser superiore al 15%. L'utilizzo di diodi laser apre anche la strada alle alte ripetibilità d'impulso, indispensabili per un reattore.

Una parte importante dell'impegno tecnologico riguardante i laser per la fusione è costituita dai componenti ottici, tra cui esempi significativi sono i cristalli convertitori di armonica (da infrarosso a ultravioletto) e le già citate barre di amplificazione. Le potenze in gioco sono tali che per evitare danni ai componenti è necessario espandere i fasci a dimensioni di decine di centimetri, per distribuirne la potenza su una superficie maggiore, e ricorrere a

elementi ottici enormi. Tutti i componenti ottici sono mantenuti in ambienti con elevato grado di pulizia per evitare danneggiamenti indotti da impurità.

Possibili alternative per i driver per la fusione inerziale sono costituite da acceleratori di ioni pesanti, acceleratori di ioni leggeri e laser ad elettroni liberi. I vantaggi di ogni singolo metodo dipendono da vari parametri: qualità di accoppiamento con i bersagli, efficienza, frequenza di ripetizione, costi ecc.

Schemi di irraggiamento

L'efficienza con la quale l'energia del laser è trasferita al bersaglio è determinata dalle condizioni di "accoppiamento" laser-bersaglio e dai processi idrodinamici durante la fase d'implosione. Vi sono due principali schemi d'irraggiamento[2]:

a) *Irraggiamento diretto* - la luce laser è focalizzata direttamente sul bersaglio e assorbita in un sottile strato di materiale leggero esterno. Per migliorare la penetrazione attraverso il plasma denso, la radiazione del laser di potenza (generalmente infrarossa) è convertita a lunghezze d'onda minori (ultravioletto) mediante l'uso di cristalli non lineari (DKDP). Con irraggiamento diretto ed utilizzando dei triplicatori della frequenza del laser si possono ottenere efficienze di accoppiamento laser-target fino all'80% [3], ma la stabilità dell'implosione è sensibile alle non uniformità del fascio e della superficie del bersaglio. L'utilizzo di lastre ottiche che uniformino il profilo del

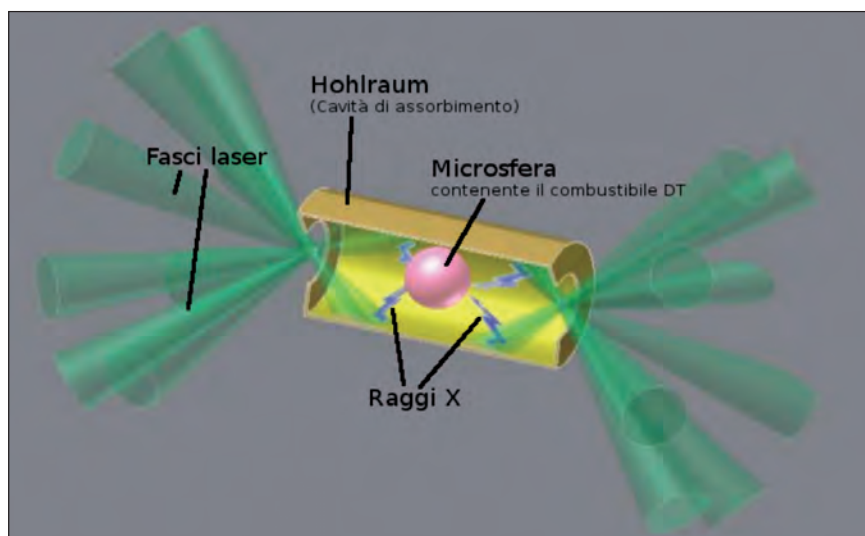


FIGURA 2 Schema di irraggiamento indiretto

fascio può essere rilevante per migliorare la qualità dell'irraggiamento;

- b) *Irraggiamento indiretto* - il laser non illumina direttamente il bersaglio ma la parte interna di un piccolo cilindro metallico che diviene un emettitore di raggi X e a sua volta illumina la capsula di DT posta al suo interno (Figura 2). Questo metodo ha efficienze di accoppiamento inferiori al precedente ma, garantendo maggiore uniformità, migliora la stabilità dell'implosione e fornisce maggiori efficienze idrodinamiche.

Schemi di ignizione

Lo schema meglio conosciuto ('Hot Spot Ignition'), prevede la compressione uniforme del combustibile, ad opera del laser, fino al raggiungimento della temperatura d'ignizione nella zona centrale del plasma. Sono allo studio anche schemi diversi per i quali si prevede un maggiore guadagno di energia.

Nella 'Fast Ignition' [5], i fasci del laser principale producono solo una pre-compressione del combustibile che, prima del raggiungimento della massima densità, è irraggiato da un fascio laser di altissima potenza (alcuni petawatt). Ciò provoca l'innesco delle reazioni di fusione in una piccola parte del combustibile e la rapida propagazione alla massa rimanente. L'accoppiamento efficace di questo impulso con il plasma denso richiede una complessa manifattura del bersaglio e un suo preciso posizionamento angolare.

Nella 'Shock Ignition' [6] l'irraggia-

mento avviene in due fasi: la prima parte dell'impulso produce una compressione lenta e stabile fino a raggiungere il punto di stagnazione dell'implosione, in questo istante si aumenta la potenza dell'impulso laser in modo da generare una onda d'urto che, propagandosi all'interno del plasma, genera la compressione finale e l'ignizione. Rispetto allo schema precedente si ha il vantaggio di utilizzare un unico impianto laser.

Guadagno dei bersagli

Lo sviluppo dei bersagli è uno dei punti chiave per il confinamento inerziale. La composizione e la geometria dei bersagli sono progettate in modo da ottenere la massima stabilità e il minor aumento di entropia durante la fase implosiva. Simulazioni numeriche, associate all'andamento temporale dell'irraggiamento, permettono di stimare il rapporto tra l'energia nucleare prodotta e quella in ingresso (Target Gain).

In generale i migliori risultati di un'implosione si ottengono disponendo il D-T in forma solida criogenica su un sottile guscio sferico che circonda il rimanente D-T in forma gassosa. Un guscio più esterno (ablattore) ha la funzione di assorbire la luce laser e di creare il plasma che espandendosi comprime il combustibile.

Complessivamente solo una piccola frazione dell'energia del laser viene trasferita all' 'hot spot' (<10%) ma, quando l'ignizione viene raggiunta e propagata a tutto il combustibile, quella prodotta dalla fusione può essere più di 1.000 volte maggiore.

Tecnologia dei bersagli

L'ablattore è generalmente un materiale a bassa densità di alcuni μm spessore. Le dimensioni del guscio di D-T (tipicamente di alcuni millimetri di raggio e decine di μm spessore) sono calcolate per ottenere velocità d'implosione $> 3 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$. Nel caso di riscaldamento indiretto, i bersagli devono essere contenuti in cilindretti metallici di pochi millimetri di raggio (hohlraum). La complessità cresce ulteriormente nel caso di target per la 'fast ignition', vista la necessità di avere una parte della microsfera attaccata a un piccolo cono metallico che permette la penetrazione del fascio di altissima potenza verso la zona interna a maggior densità (Figura 3).

Un accurato controllo della finitura del bersaglio è necessario per evitare che le imperfezioni superficiali costituiscano il seme di instabilità. Inoltre i bersagli dovranno avere la necessaria robustezza per evitarne la rottura durante il trasporto verso la camera, che richiede elevate velocità e precisione.

Quanto detto rende un'idea della complessa manifattura del bersaglio. L'installazione per la fabbricazione dei bersagli di un reattore dovrà essere in grado di fornire almeno 500.000 bersagli al giorno riempiti della miscela D-T con un costo individuale di 0,2 \$ (circa 10.000 volte inferiore a quello dei prototipi attuali). Una stima del 2004 [4] indica un costo per l'impianto di fabbricazione e controllo dei bersagli di circa 100 M\$ (per l'irraggiamento diretto).

L'inserzione dei target avviene per mezzo di un complesso braccio

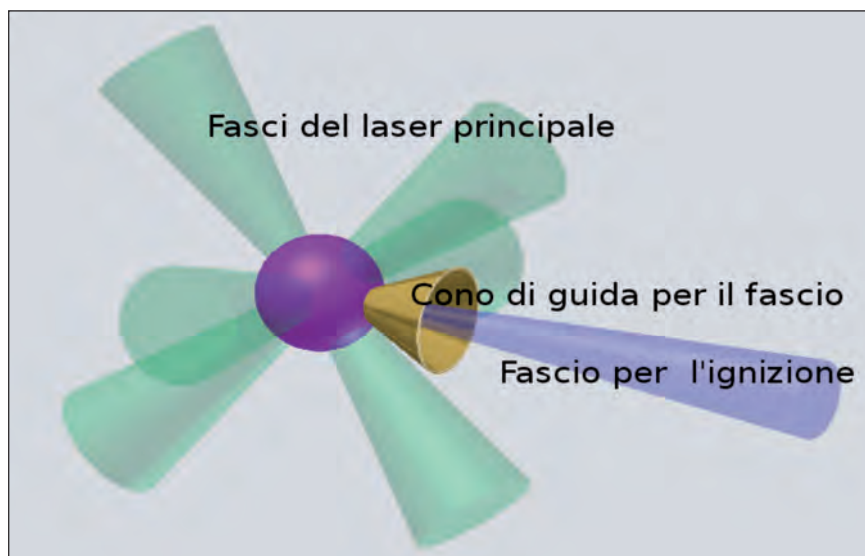


FIGURA 3 Schema di irraggiamento per l'ignizione veloce

criogenico che permette di mantenere il bersaglio alla temperatura di 18,5 °K e di regolarne la posizione entro pochi μm .

Risultati recenti

Negli Stati Uniti è in corso la National Ignition Campaign, che si propone la dimostrazione dell'ignizione mediante riscaldamento indiretto, utilizzando l'impianto NIF (National Ignition Facility, LLNL, CA). Per la campagna sperimentale, iniziata nel 2010, sono ora disponibili tutti i 192 fasci laser che illuminano il bersaglio con una potenza di 525 TeraWatt, corrispondente a circa 1.875 MegaJoule di luce blu. Le implosioni di bersagli di D-T criogenico, rivestiti da ablatori multistrato, hanno prodotto risultati prossimi a quanto richiesto per l'ignizione in termini di densità areale ($\rho R=1,2 \text{ g/cm}^2$), densità massima della misce-

la ($\rho_{\text{fuel}} \approx 850 \text{ g/cm}^3$), pressione del plasma ($P \approx 150 \text{ Gbar}$), Temperatura della cavità bersaglio ($T_{\text{hohlraum}} \approx 300 \text{ eV}$) e velocità di implosione ($v_{\text{imp}} > 370 \text{ km/s}$). Con una produzione di $\approx 10^{15}$ neutroni da fusione per sparo si è a meno di un fattore 10 dal regime di plasmi dominati dalla produzione di particelle α . I ricercatori della NIF ritengono che in queste condizioni si debba solo proseguire con un paziente lavoro di ottimizzazione operando sulla forma temporale dell'impulso laser, la geometria dei bersagli, il materiale e lo spessore dell'ablatore, al fine di ottenere il miglior controllo della fase d'implosione e la riduzione delle instabilità.

Diagnostiche

La misura delle grandezze fisiche d'interesse per la fusione a confinamento inerziale pone richieste

stringenti. Molte grandezze devono essere misurate con risoluzioni temporali di pochi picosecondi e fornire dettagli spaziali su scale micrometriche. La presenza di forti flussi neutronici e radiativi rende le condizioni ambientali molto ardue per i sistemi sperimentali. Diagnostiche ottiche, basate sulla spettroscopia e interferometria nella regione visibile dello spettro, sono utilizzate per misurare la velocità d'implosione del target, la quantità di luce non assorbita, l'insorgenza d'instabilità durante la compressione. Dati di fondamentale importanza sull'irraggiamento del target e sulle temperature raggiunte dal plasma, provengono da immagini e spettri a raggi X.

Le prestazioni fusionistiche di un target (numero di reazioni prodotte, temperatura ionica, istante di massima produzione, densità areale, rapporto tra fusioni D-T e D-D) sono ricavate principalmente dalle misure dei neutroni emessi il cui spettro è misurato con diverse tecniche. Immagini neutroniche rendono anche conto della qualità del centro del plasma all'ignizione. Nella campagna fusionistica della NIF ci si aspetta di produrre fino a $5 \cdot 10^{19}$ neutroni [7].

Esperimenti attuali e futuri

Le richieste sull'energia e sulla simmetria e uniformità d'irraggiamento inducono ad architetture del laser su numerosi fasci, che rendono grandiosi gli apparati sperimentali. Il progetto americano NIF ha recentemente iniziato le operazioni su tutti i suoi 192 fasci ognuno

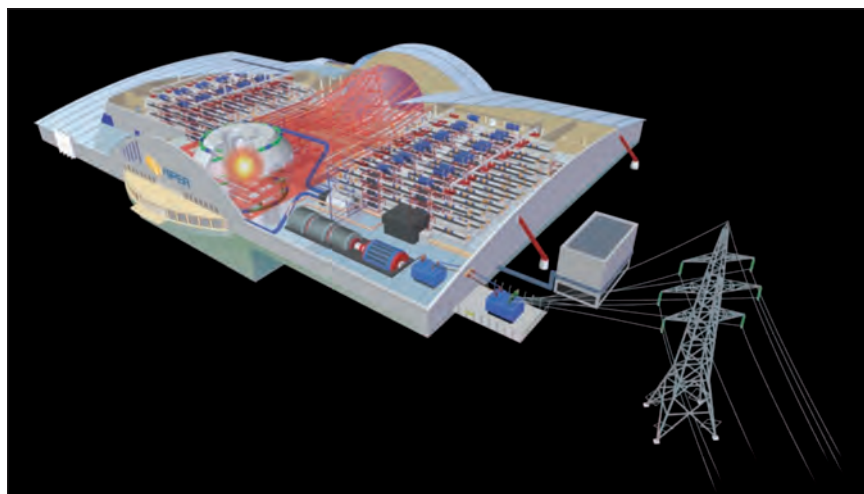


FIGURA 4 Progetto concettuale di HiPER per la ricerca su schemi di ignizione avanzati

dei quali trasporta un'energia di 21 kJoule infrarossi e di 10 kJoule dopo la conversione in ultravioletto. Il progetto francese LMJ (Laser Megajoule), che entrerà in operazione nel 2014, avrà 176 fasci ai quali sarà associato il laser di alta potenza PETAL. Il costo di questi progetti è rispettivamente di 5,5 M\$ e 6,6 M€. Per il progetto del reattore LIFE si prevedono 384 fasci. LIFE costituirà un prototipo di reattore commerciale a fusione (o ibrido), nel quale saranno sottoposte a test anche soluzioni operative sulla trasmissione di potenza, sull'alta temperatura di esercizio, la rimozione dei residui dei target, la produzione di trizio per successivi utilizzi etc. alla frequenza di 15 spari al secondo. Il Giappone prevede di dimostrare la fattibilità di un reattore basato sulla 'fast ignition' entro il 2030 attraverso il programma FIREX. In Cina è in corso di sviluppo un analogo progetto che prevede la costruzione finale del laser SG-IV da 1,4 MJ.

In Europa è in corso il progetto di HiPER (High Power Laser for Energy Research), per la ricerca su schemi di ignizione avanzati, che mira a costi più contenuti per le strutture e a una maggiore flessibilità per l'impiego in studi di fisica di base e applicata.

A differenza degli altri grandi progetti NIF e LMJ, che sviluppano in prevalenza programmi militari, il progetto dell'Unione Europea avrà unicamente finalità civili e affiancherà lo studio della materia in condizioni di temperatura e pressione estreme, d'interesse in astrofisica e altro, a esperimenti d'interesse energetico [8], [<http://www.hiper.org/>].

Il programma di ricerca fusionistico si propone lo studio di bersagli ad alto guadagno ($G=150$) utilizzando il riscaldamento diretto e lo schema di 'fast ignition' e mantiene comunque la massima flessibilità per potersi adattare agli sviluppi della ricerca. Lo sforzo tecnologico sarà

rivolto a ottenere laser di efficienza elevata 7% ed elevata ripetibilità.

Il laser utilizzato per la compressione avrà un'energia complessiva di 250 kJ suddivisa in 60 fasci ai quali si aggiungerà un impulso di circa 100kJ in 10 ps.

Il progetto concettuale e la fase preparatoria di HiPER (Figura 4) sono stati completati nel 2011. È prevista una fase di definizione della durata di 2 anni ed una fase di costruzione con una previsione di completamento nell'anno 2020.

Partecipano al progetto HiPER 10 Paesi europei, cui si aggiunge la collaborazione di USA, Canada, Corea del Sud, Giappone e Cina. ●

bibliografia

- [1] S. Atzeni and J. Meyer-ter-vehn, *The Physics of Inertial Fusion* (Oxford University Press) 2004
- [2] J. D. Lindl, R. L. McCrory, and E. M. Campbell. Progress toward ignition and burn propagation in inertial confinement fusion. *Physics Today*, September 1992, pag 32
- [3] M. D. Rosen. The physics issues that determine inertial confinement fusion target gain and driver requirements: A tutorial. *Phys. Plasmas* 6, 1690 (1999); <http://dx.doi.org/10.1063/1.873427>
- [4] D.T. Goodin et al 2004. A cost-effective target supply for inertial fusion energy. *Nucl. Fusion* 44 S254 doi:10.1088/0029-5515/44/12/S17
- [5] Max Tabak et al. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers. *Phys. Plasmas* 1, 1626 (1994); <http://dx.doi.org/10.1063/1.870664>
- [6] L. J. Perkins, R. Betti, K. N. LaFortune, and W. H. Williams. Shock Ignition: A New Approach to High Gain Inertial Confinement Fusion on the National Ignition Facility. *Physical Review Letters* 103.045004 (2009) doi:10.1103/PhysicalReviewLetters103.045004
- [7] V. Yu. Glebov et al. Development of nuclear diagnostics for the National Ignition Facility. *Review of Scientific Instruments* 77, 10E715 (2006) doi: 10.1063/1.2236281
- [8] S. Atzeni, D. Batani, L. A. Gizzi, HiPER: un laser europeo per studi di fusione inerziale. *Il Nuovo Saggiatore*, Vol. 23, No. 2-3, pp. 64-75 (2007)