

ABC

Un laser per la fusione

Tutor:

Fabrizio Consoli

Mattia Cipriani

Email:

fabrizio.consoli@enea.it

mattia.cipriani@enea.it

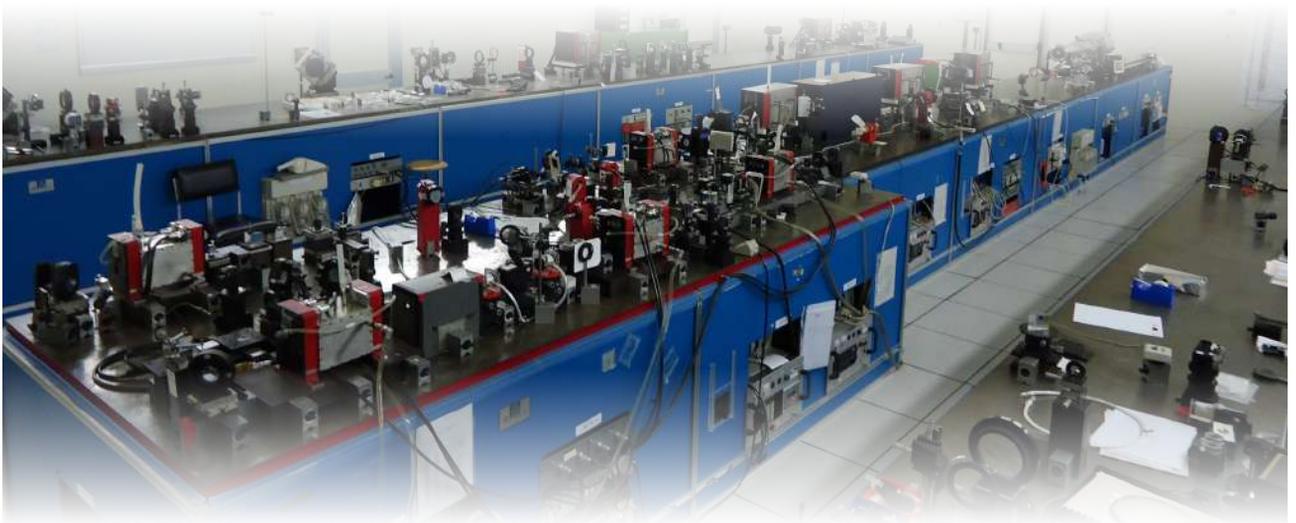
Introduzione all'argomento

La *fusione a confinamento inerziale* è uno schema per la produzione di energia tramite la *fusione termonucleare controllata*. In questo approccio una sferetta di *combustibile nucleare* (una miscela di isotopi dell'idrogeno, cioè di atomi con un protone come l'idrogeno, ma con in più nel nucleo anche uno o due neutroni) viene compressa ad altissime pressioni per innescare le reazioni di fusione. Il processo di compressione può essere realizzato grazie all'irraggiamento della sfera con dei fasci di luce laser ad alta potenza.



Bersaglio sferico per fusione a confinamento inerziale

L'impianto laser ABC si inserisce in questo ambito di ricerca, studiando gli effetti del laser su vari materiali, l'ottimizzazione dell'irraggiamento e la possibilità di utilizzare combustibili alternativi.



ABC è un impianto laser ad alta energia in grado di produrre due fasci di luce infrarossa da 100 J ciascuno alla lunghezza d'onda di 1054 nanometri. Questa energia viene liberata in tre miliardesimi di secondo su un'area con un diametro di 50 milionesimi di metro. In un esperimento tipico, un bersaglio costituito dal materiale da studiare viene posto al centro di una camera sferica di acciaio entro la quale viene creato il vuoto. Quando l'impulso laser colpisce il bersaglio questo viene trasformato nella zona di interazione in *plasma*, un gas ionizzato ma globalmente neutro. Il suo studio è possibile grazie ad una serie di strumenti che misurano varie sue caratteristiche, tra cui la sua densità, la luce visibile ed i raggi X emessi, le particelle cariche - come protoni, elettroni e ioni - accelerate durante l'interazione e l'impulso elettromagnetico a microonde generato dal loro movimento. Tutti i dati vengono poi raccolti e studiati nell'ambito dei progetti di ricerca del laboratorio.

II LASER

Introduzione

Un *LASER* (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) è un dispositivo in grado di emettere un fascio di luce con particolari caratteristiche che risultano essere molto utili per un gran numero di applicazioni.

Queste caratteristiche sono:

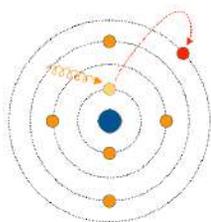
- la *monocromaticità*: si intende che la banda spettrale del laser è molto stretta (la quantità di componenti luminose che la compone), in parole povere il suo colore è molto puro;
- la *coerenza*: si dice che la luce è coerente quando due fotoni si “ricordano” di essere stati emessi dalla stessa sorgente, cioè sono in una relazione di fase costante. Pertanto, sono in grado di riconoscersi e di interagire dando luogo ai fenomeni di *interferenza*. La coerenza temporale indica quanto tempo dura questa “memoria”, quella spaziale la distanza trasversa dall’asse di propagazione a cui si mantiene la memoria;
- la *direzionalità*: vuol dire semplicemente con la luce laser si è in grado di produrre fasci in una direzione ben precisa e che si allargano molto poco;
- la *brillanza*: non è altro che un parametro che indica quanta luce viene emessa da una sorgente. La brillantezza di un laser può essere molto alta, tale anche da provocare danni alla retina di un soggetto esposto o l’*ablazione* (ovvero la rimozione di materiale) da una superficie esposta.



A queste caratteristiche si deve aggiungere la possibilità di creare impulsi brevissimi, in grado di trasferire in tempi rapidi l’energia del laser al bersaglio esposto.

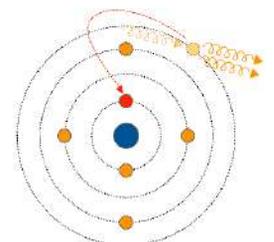
Funzionamento

L’emissione e l’assorbimento della luce da parte della materia sono principalmente guidati da tre effetti: l’*assorbimento*, l’*emissione spontanea* e l’*emissione stimolata*.



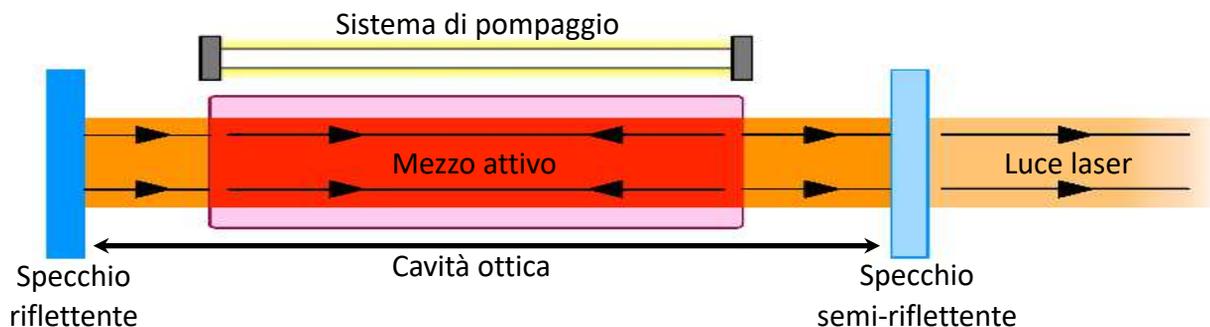
La prima avviene quando un fotone (che è la quantità più piccola di luce ad una certa frequenza) attraversando un solido o un gas incontra un atomo e viene da esso assorbito (la frequenza, cioè il suo colore, deve essere una di quelle che l’atomo può assorbire). L’atomo incamera questa energia cambiando la sua conformazione, e si dice che si *eccita* o che è in *stato eccitato*. Una volta che si trova nello stato eccitato l’atomo può riemettere questa energia sotto forma di uno o più fotoni, che possono essere di una delle frequenze che l’atomo può emettere, secondo lo stato eccitato in cui si trova. Questo meccanismo è l’*emissione spontanea*, e si dice che l’atomo si è *diseccitato*.

Se un fotone incontra un atomo nello stato eccitato che può portare all’emissione di un fotone della sua stessa frequenza allora può avvenire l’*emissione stimolata*: il fotone in arrivo forza l’atomo ad emettere un fotone in tutto e per tutto identico a quello in arrivo: non solo in frequenza ma anche in direzione e in tutte le altre sue caratteristiche.



II LASER

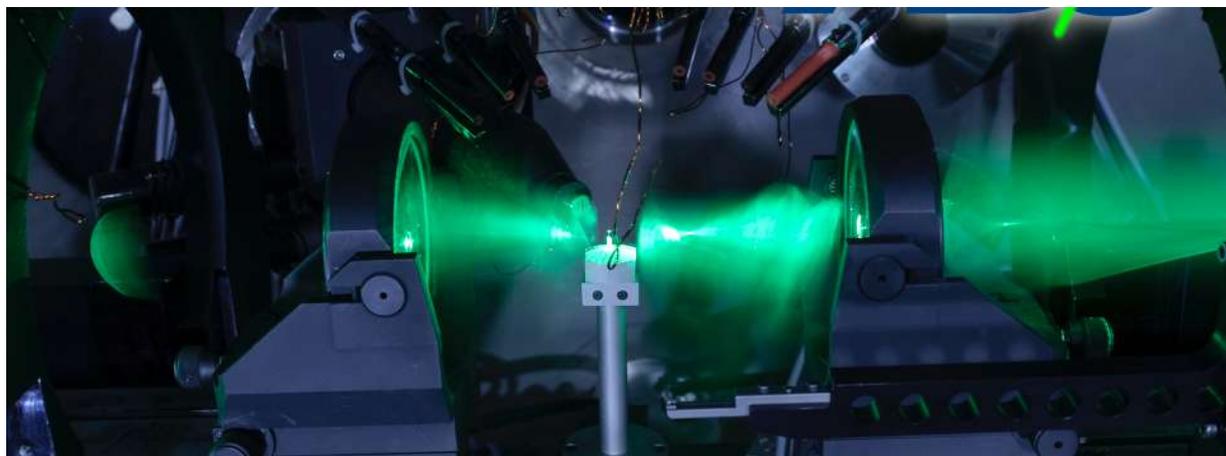
Un laser sfrutta il fenomeno dell'emissione stimolata per creare una grandissima quantità di fotoni "cloni", che hanno collettivamente le caratteristiche di monocromaticità, coerenza, direzionalità e brillantezza esposte in precedenza. Per avere un così gran numero di fotoni cloni, però, bisogna che nel materiale un fotone possa incontrare con più facilità degli atomi da diseccitare (da cui si può ottenere un ulteriore fotone clone) che non atomi da eccitare (i quali sono invece capaci di assorbire il fotone in arrivo).



Questa situazione viene chiamata *inversione di popolazione* e si può ottenere in determinati materiali, detti *mezzi attivi*. Si realizza con un adeguato *sistema di pompaggio* che ecciti abbastanza atomi da raggiungerla e, a causa dello spopolamento dovuto all'emissione laser, mantenerla per il tempo necessario. Per selezionare, tra tutte quelle possibili, la direzione e la frequenza desiderate il sistema viene racchiuso in una *cavità ottica* (detta anche *oscillatore* o *risonatore*), solitamente formata da due o più specchi tra i quali la radiazione rimbalza, passando più volte attraverso il mezzo attivo e amplificandosi, la cui geometria determina la direzione e la frequenza del laser. Tra questi specchi, quello ad una estremità è tale da lasciare uscire una parte della luce, che è l'effettiva luce laser che vediamo fuori dalla cavità.

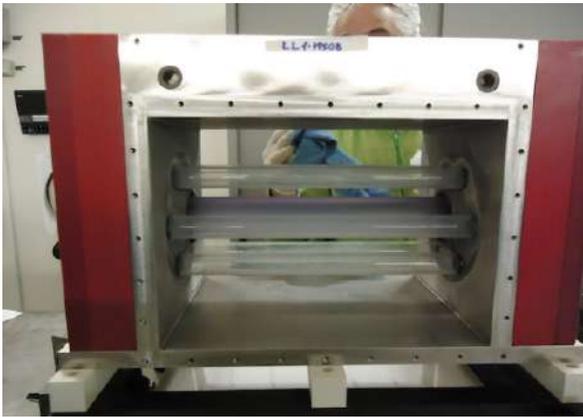
Il laser ABC

Il laser ABC usa come mezzo attivo delle barre di vetro fosfato arricchito con Neodimio, che fissa la lunghezza d'onda di operazione di 1054 nm, nel vicino infrarosso. E' formato da un oscillatore che produce un impulso lungo di bassa energia, da cui viene ritagliato un impulso più corto, grazie a degli *otturatori elettro-ottici*. Questo impulso corto viene amplificato durante il passaggio attraverso una serie di *teste amplificatrici*. Viene poi separato in due parti, che vengono ulteriormente amplificate e mandate nella camera sperimentale dove vengono focalizzate sul bersaglio per la sperimentazione.



II LASER

Le teste amplificatrici sono tra loro molto simili, con differenze legate solo alle dimensioni. Anche lo stesso oscillatore, all'interno del quale si genera l'impulso, differisce dalle teste solo per la presenza di una cavità ottica.



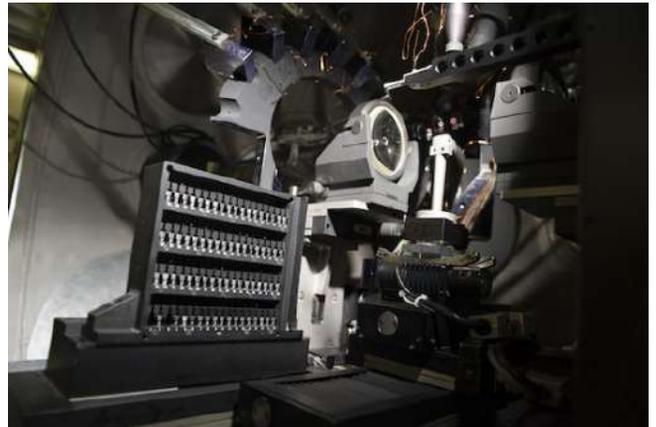
All'interno di una testa di amplificazione si trovano tutti i componenti necessari per il suo funzionamento. Al centro è collocata la barra di vetro arricchita con il Neodimio, che presenta un colore violaceo proprio a causa della presenza di questo elemento. Intorno alla barra si trovano i flash, visibili nella foto come tubi trasparenti. Queste lampade si accendono in corrispondenza dello sparo e rimangono accese per circa 100 millisecondi, un tempo molto più lungo della durata dell'impulso laser, in modo da assicurare una corretta eccitazione degli atomi di Neodimio e quindi una più efficace amplificazione.

I flash sono circondati da dei riflettori d'oro che permettono di migliorare l'illuminazione del mezzo attivo e, una volta chiuso ermeticamente il corpo della testa di amplificazione, questa viene riempita con uno speciale liquido refrigerante, per evitare il surriscaldamento dei componenti durante le operazioni.

I due fasci entrano nella camera di interazione lungo la stessa direzione ed in versi opposti (si dicono contro-propaganti), ed incidono sul bersaglio posto al centro della camera sull'apposito supporto.

Una piccola parte del fascio viene raddoppiata in frequenza facendola diventare verde, e viene usata per proiettare delle immagini in ombra (dette *shadowgraphies*) del bersaglio durante l'esperimento.

Oltre a queste immagini, l'impianto ha una grande varietà di strumenti diagnostici che permettono di analizzare l'interazione tra il laser e la materia, il plasma formatosi, le particelle cariche accelerate e le reazioni avvenute.

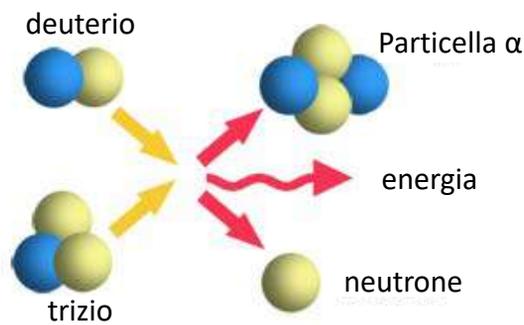


La fusione a confinamento inerziale

Cosa è la fusione nucleare?

La *fusione nucleare* è uno dei meccanismi innovativi studiati per ottenere energia da fonti rinnovabili, nonché la fonte di energia che permette alle stelle di brillare e di mantenere la propria forma durante la loro vita.

Per produrre energia tramite il processo di fusione nucleare si ha bisogno del *Deuterio* e del *Trizio*, due *isotopi* dell'Idrogeno. L'Idrogeno è costituito da un protone e da un elettrone che vi orbita intorno, il Deuterio è identico all'Idrogeno ma ha un neutrone legato al protone nel nucleo, il Trizio ha due neutroni nel nucleo. Il deuterio è molto abbondante in natura nelle molecole di acqua, l'acqua pesante (D_2O), in cui sostituisce l'Idrogeno; il Trizio invece non può essere trovato in natura perché non è stabile e tende a trasformarsi in Elio attraverso un processo detto decadimento radioattivo; deve essere quindi prodotto tramite processi nucleari, dove un neutrone possa legarsi al nucleo di deuterio.



La produzione di energia avviene tramite la *fusione nucleare*. La fusione nucleare è il processo per cui due nuclei di due atomi diversi si fondono per formare il nucleo di un atomo nuovo. Nel caso che stiamo considerando, i nuclei di Deuterio e di Trizio si fondono, generando un nucleo di Elio ed un neutrone libero. L'energia in eccedenza che si guadagna dalla reazione è tutta contenuta nell'energia cinetica del neutrone libero che è stato generato.

Produrre energia tramite la fusione nucleare

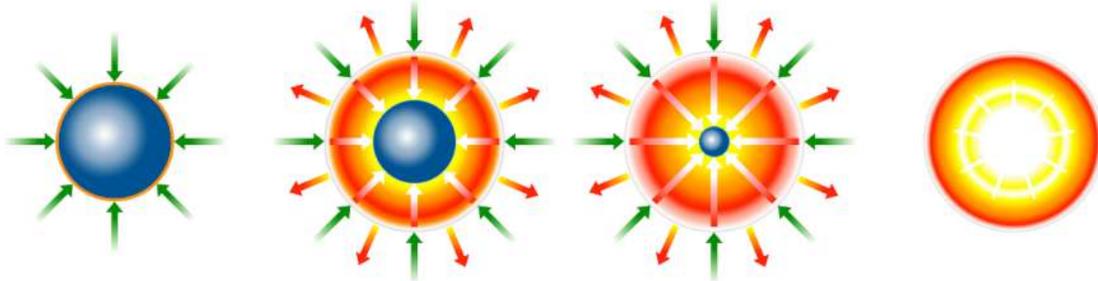
La strategia per la futura produzione di energia tramite reazioni di fusione nucleare prevede di utilizzare appositi materiali in cui rallentare i neutroni liberi prodotti dalle singole reazioni. In questo modo, l'energia cinetica del neutrone si trasforma in calore che riscalda il materiale. Recuperando tale calore tramite per esempio delle condutture di acqua si può ottenere energia convertibile in elettricità, principio oltretutto usato in tutte le centrali elettriche a combustibile.

Per produrre reazioni di fusione nucleare, i due isotopi Deuterio e Trizio devono essere privati ognuno del proprio elettrone tramite il processo di ionizzazione e poi portati nelle condizioni favorevoli alla fusione, che in genere corrispondono ad alte densità e temperature. Per farlo si trasforma la miscela di gas di deuterio e trizio nel quarto stato della materia, chiamato *plasma*, in modo che sia possibile innescare la reazione di fusione. Nel plasma, gli elettroni non sono più legati ai nuclei di Deuterio e Trizio e sono in grado di avvicinarsi più facilmente e innescare reazioni di fusione.

La fusione a confinamento inerziale

La fusione e il laser

Una strategia per raggiungere lo scopo di produrre energia tramite reazioni di fusione nucleare è la cosiddetta *fusione a confinamento inerziale*. In questo approccio si utilizza un laser di alta energia per comprimere un bersaglio di combustibile nucleare.



Irraggiamento e riscaldamento iniziali

Inizio della compressione

Massima compressione

Reazioni di fusione innescate

Un certo numero di fasci laser irraggia il bersaglio, che è in genere una sfera di combustibile nucleare (Deuterio e Trizio) criogenico. Quando i laser colpiscono la sfera strappano del materiale da essa sotto forma di plasma, ovvero fanno *ablazione*. Per il principio fisico di azione e reazione, la parte ancora solida del bersaglio viene spinta verso il centro della sfera, formando quella che si chiama un'onda d'urto (o di shock). Inoltre l'energia che il laser deposita nel plasma formato riscalda anche la parte di bersaglio che viene compressa e la trasforma in plasma. Alla fine del processo, il bersaglio trasformato in plasma raggiunge una densità massima di oltre 30 volte quella del Piombo ed una temperatura di 100.000.000 °C. In queste condizioni le reazioni nucleari diventano possibili ed iniziano ad innescarsi a catena.

Comprimere una sfera come descritto sopra è un po' come tentare di schiacciare un palloncino con le mani. Mentre si schiaccia tra le mani e tra le dita il palloncino si deforma, si allunga e non si schiaccia in modo simmetrico in tutte le direzioni. Durante la compressione con i laser si verifica lo stesso problema: se la luce laser non investe il bersaglio nello stesso modo da tutte le direzioni, questo tenderà a deformarsi ma non a comprimersi.

I due schemi proposti



Irraggiamento diretto. In questo schema il bersaglio è illuminato con molteplici fasci laser provenienti da tutte le direzioni, cercando così di limitare le deformazioni non volute del bersaglio. A causa della difficoltà di puntare un grande numero di fasci su un bersaglio molto piccolo illuminandolo in modo omogeneo, questo schema non è quello oggi in uso nei principali impianti nel mondo.

Irraggiamento indiretto. In questo caso il bersaglio si trova all'interno di un cilindro d'oro, detto *hohlraum*, e non viene direttamente illuminato dai laser. I fasci laser illuminano invece l'interno del cilindro passando attraverso dei fori producendo una grande quantità di raggi X. Il cilindro si trasforma quindi in un "forno" per il bersaglio: il bersaglio viene illuminato dai raggi X in modo omogeneo. Purtroppo, solo una piccola percentuale di energia viene usata per la compressione. Questo è ad oggi lo schema più promettente.

