

Tecniche di accelerazione laser-plasma Il progetto FLAME

L'idea originaria di focalizzare la luce sulla materia per riscaldarla e modificarne lo stato di aggregazione è probabilmente attribuibile ad Archimede di Siracusa (287-212 a.C.), con i suoi tentativi di incendiare le navi romane che assediavano la città. Oggi, in numerosi laboratori nel mondo la materia viene portata alle condizioni "estreme" di un **plasma** con temperature fino a miliardi di gradi usando, esattamente come Archimede, specchi parabolici per focalizzare la luce sul bersaglio, ma con due ulteriori "migliorie". In primo luogo, la luce emessa da un **laser** può essere focalizzata su di un'area di dimensioni prossime alla lunghezza d'onda (micrometri) della luce stessa; in secondo luogo, la tecnologia attuale consente di concentrare quantità "ordinarie" di energia (decine di Joule) in tempi dell'ordine dei femtosecondi ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$, ovvero un milionesimo di miliardesimo di secondo). Mettendo insieme questi numeri si vede come sia possibile arrivare ad intensità di irraggiamento dell'ordine di 10^{23} W/cm^2 (per confronto, l'intensità della luce solare sulla superficie della Terra è appena 0.1 W/cm^2).

A questi livelli d'intensità l'interazione laser-materia è in un regime che va oltre l'ambito tradizionale della fisica della materia, dell'ottica e dell'elettronica quantistica. Ad esempio, per intensità superiori a 10^{16} W/cm^2 il campo elettrico dell'onda elettromagnetica diviene maggiore del campo che tiene legato l'elettrone nell'atomo di idrogeno e l'impulso laser è in grado di produrre una ionizzazione istantanea della materia portandola ad uno stato di plasma. Se l'intensità supera 10^{18} W/cm^2 la velocità di oscillazione degli elettroni nel campo elettromagnetico diviene prossima alla velocità della luce.

Altra quantità che caratterizza l'interazione superintensa è la **pressione di radiazione** (il rapporto tra l'intensità e la velocità della luce), che può assumere valori sin oltre 10^{16} N/m^2 (centinaia di miliardi di atmosfere), valori raggiunti in natura solo all'interno delle stelle.

In tali regimi la pressione di radiazione domina largamente l'idrodinamica del plasma prodotto, imprimendo alla materia accelerazioni estreme, dell'ordine di quelle ottenibili in prossimità di **stelle pulsar**.

L'ampiezza e il carattere interdisciplinare di questo campo di ricerca è all'origine delle tante iniziative, in tutto il mondo, volte allo sviluppo di nuove infrastrutture basate su laser di potenza. In Italia, l'INFN ha avviato un Progetto Strategico, denominato PLASMONX, che prevede la realizzazione di un laser (FLAME: Frascati Laser for Acceleration and Multidisciplinary Experiments) capace di produrre nell'infrarosso ($\lambda \approx 0.8 \mu\text{m}$) impulsi da circa 6 J con durata 20 fs e frequenza di ripetizione pari a 10 Hz. FLAME è attualmente il laser impulsato con il più alto valore di potenza media, 60 W.



Nella foto è riprodotto l'ultimo stadio di amplificazione di FLAME. E' ben visibile la luce verde proveniente dai dieci laser al Neodimio (Nd-YAG), duplicati in frequenza, indirizzati sul cristallo di Titanio-Zaffiro, raffreddato all'interno di un criostato. La radiazione laser emessa dal Titanio-Zaffiro, seppur fortemente amplificata, non è visibile nella foto, in quanto emessa nel vicino infrarosso. FLAME in congiunzione con il **LINAC** da 200 MeV del progetto **SPARC**, consentirà esperimenti unici al mondo in cui impulsi laser e pacchetti di elettroni interagiranno consentendo lo studio dell'accelerazione a plasma e la realizzazione di sorgenti di raggi X e γ basate sul processo di diffusione Thomson.

ACCELERAZIONE LASER DI ELETTRONI NEI PLASMI

L'attuale freno allo sviluppo ulteriore della ricerca nel campo delle particelle elementari, strettamente connesso alla capacità di accelerare particelle ad energie sempre più elevate, sta nel gigantismo degli

acceleratori di particelle e nel loro costo ormai difficilmente sostenibile anche da parte di consorzi multinazionali come il CERN.

I campi elettrici all'interno di un plasma possono essere milioni di volte più intensi di quelli utilizzabili negli acceleratori convenzionali. Per questo motivo i plasmi sono stati da tempo considerati come sede ideale dove accelerare particelle cariche, raggiungendo in prospettiva, energie del TeV (mille miliardi di elettronVolt) su distanze dell'ordine di appena 1 metro. Per confronto, anche realizzando i più intensi campi elettrici sopportabili da un materiale, dell'ordine del 10^6 V/m, occorrerebbero circa 10^3 km per raggiungere le stesse energie.

Campi elettrici così elevati in un plasma possono essere quelli associati ad un'onda elettronica di plasma, il cui campo elettrico longitudinale (cioè nella direzione di propagazione dell'onda) è adatto ad accelerare particelle cariche che si muovano in quella direzione con velocità prossima alla **velocità di fase** dell'onda. Il meccanismo è analogo a quello mediante il quale un appassionato di surf acquista energia cinetica (velocità) discendendo dalla cresta dell'onda che sta cavalcando.



L'unica differenza è nella natura della forza responsabile dell'aumento della velocità: quella di gravità nel caso del surfer; forza di Coulomb per un elettrone in un'onda di plasma.

SORGENTI X E γ DA SCATTERING THOMSON

La diffusione (scattering) Thomson di un fascio laser da un pacchetto di elettroni ultrarelativistici può essere utilizzata come base per una sorgente di radiazione X/ γ altamente monocromatica ed accordabile in un ampio intervallo di frequenze. La possibilità di disporre di una sorgente di questo tipo presenta parecchi vantaggi in svariate applicazioni nel campo della fisica

dei materiali e, in particolare, in quello della diagnostica medica. L'uso della radiazione monocromatica, non solo consente una maggiore risoluzione nell'immagine radiografica, ma soprattutto una sensibile riduzione della dose impartita al paziente. Il principale interesse nello sviluppo di un tale tipo di sorgente sta nel fatto che le sue dimensioni (e conseguentemente il costo) risultano decisamente più contenute rispetto a quelle basate sull'uso della radiazione di sincrotrone.

ACCELERAZIONE LASER DI IONI E SUE APPLICAZIONI

All'inizio di questo secolo, tre diversi gruppi sperimentali hanno riportato l'osservazione di intensi getti di protoni, con energie di decine di MeV, emessi dal retro (cioè dalla faccia opposta alla superficie irraggiata) di bersagli metallici sottili dove i protoni sono presenti come impurezze superficiali.

Alla base del grande interesse in sorgenti di protoni e ioni energetici c'è la proprietà unica di questi di rilasciare la propria energia nella materia principalmente alla fine del proprio cammino, il che li rende più adatti di elettroni e fotoni per applicazioni dove è richiesta una deposizione molto localizzata di energia. È questo il caso dell'**adroterapia oncologica**, praticata con successo in centri di cura che usano acceleratori "tradizionali" come sorgente di radiazioni. La prospettiva di utilizzare sorgenti laser-plasma a tale scopo è legata alle possibilità di raggiungere le energie necessarie (circa 200 MeV) e un adeguato grado di monocromaticità dello spettro, ma soprattutto di poter ottenere queste condizioni con sistemi laser "compatti" e ad alta frequenza di ripetizione. Ciò consentirebbe un significativo contenimento della spesa rispetto ad acceleratori tradizionali.

Le innovative tecniche di amplificazione degli impulsi laser ultracorti, hanno avviato una corsa che sembra inarrestabile, verso intensità sempre più elevate.

Gli scenari fisici che così vanno dischiudendosi e le applicazioni che ne seguono stanno impegnando numerosi gruppi di ricerca in tutto il mondo. L'aspetto forse più saliente di questo campo di ricerca consiste nella sua interdisciplinarietà, che sta coinvolgendo assieme esperti di fisica del plasma, fisica nucleare e delle particelle elementari o di astrofisica, così come scienziati interessati in applicazioni tecnologiche che vanno dalla fisica dei materiali alla medicina, in una "avventura" della quale è ancora difficile prevedere tutta la portata.