

Relazione scientifica

Programma:

Short-term mobility 2010

Fruitore:

Petra Maria Koester

Titolo:

Studio della generazione e del trasporto di elettroni veloci prodotti da interazione laser-materia con rilevanza per la fusione a confinamento inerziale nello schema dell'ignizione veloce

Introduzione

Lo studio delle caratteristiche della generazione e del trasporto di elettroni veloci durante l'interazione laser-materia ad alta intensità laser è di grande interesse per una gamma di applicazioni come lo sviluppo di sorgenti X di breve durata [1], l'accelerazione di protoni e ioni [2] e per la fusione a confinamento inerziale nello schema dell'ignizione veloce [3].

Nello schema dell'ignizione veloce la fase di compressione della capsula di combustibile è disaccoppiata dalla fase di ignizione. La capsula viene precompressa mediante irraggiamento simmetrico con fasci laser ad intensità intermedie ($\sim 10^{14}$ W/cm²). Un fascio laser ad alta intensità (10^{19} - 10^{20} W/cm²) interagisce poi con il combustibile precompressa per generare elettroni con energie medie di 1-3 MeV, che devono attraversare la corona di plasma creato durante la compressione per raggiungere la zona di alta densità. Nello schema dell'ignizione veloce si prevede che gli elettroni depositano la loro energia in questa zona di alta densità per raggiungere le condizioni di ignizione.

Per non essere assorbiti nella corona di preplasma, gli elettroni veloci devono essere generati vicini alla zona di alta densità (~ 100 micron). Due schemi diversi vengono studiati per raggiungere questo obiettivo. Nel primo schema un primo impulso laser viene utilizzato per creare un canale nel plasma. Il secondo impulso si propaga nel canale preformato per raggiungere la regione di densità più alta dove avviene l'interazione con la conseguente generazione di elettroni veloci. I primi studi sperimentali hanno mostrato le difficoltà di questo approccio motivando quindi l'ideazione di uno schema alternativo. Nel secondo schema infatti, un cono di Au viene inserito nella capsula sferica [4]. Le pareti del cono inserite schermano la direzione di propagazione del laser di ignizione dal plasma. In questo modo il fascio laser interagisce con la punta del cono generando gli elettroni veloci vicini alla zona di più alta densità.

Per rendere efficiente lo schema dell'ignizione veloce, una frazione significativa di energia laser deve essere trasferita all'energia cinetica degli elettroni veloci (alcune decine di %). Recenti simulazioni *particle-in-cell* (PIC) suggeriscono che l'assorbimento laser e la generazione degli

elettroni veloci dipende fortemente dalla presenza di un preplasma [5] e dal materiale irraggiato [6]. Inoltre le caratteristiche della propagazione degli elettroni veloci dipende dal numero atomico Z . Gli spettri degli elettroni dopo 15 micron di propagazione in materiali diversi ottenuti da simulazioni PIC [7] sono presentati nel grafico di fig.1. Con l'aumentare di Z , le collisioni degli elettroni con gli atomi diventano più importanti risultando in una maggiore diffusione trasversale. Il trasporto in avanti degli elettroni è quindi ridotto per materiali ad alto Z come si vede chiaramente in fig.1.

Una dettagliata conoscenza delle caratteristiche sia della generazione degli elettroni veloci (spettro energetico, distribuzione angolare e efficienza di conversione) e delle loro proprietà di propagazione (effetti collisionali e collettivi) attraverso il materiale del cono e all'interno del plasma denso è quindi di fondamentale importanza per la realizzazione dello schema dell'ignizione veloce.

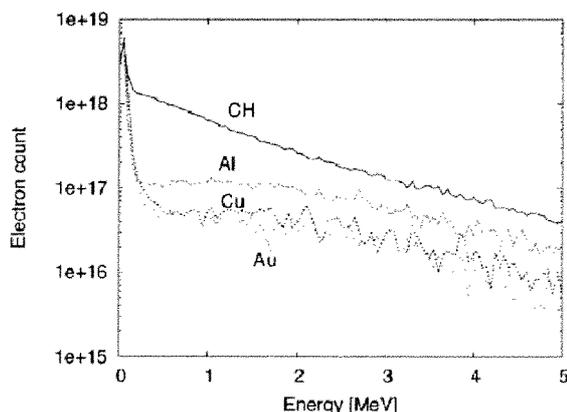


Fig.1: Distribuzione energetica degli elettroni veloci a 15 micron dalla superficie del bersaglio per diversi materiali come ottenuti da simulazioni PIC [7].

Obiettivi

Lo scopo dell'esperimento condotto in collaborazione con altri gruppi internazionali è lo studio sistematico delle caratteristiche dell'assorbimento laser e della generazione e del trasporto di elettroni veloci generati mediante irraggiamento laser di bersagli solidi in funzione del numero atomico Z del materiale irraggiato.

Attività svolte

L'esperimento è stato condotto utilizzando il laser Titan presso la Jupiter Laser Facility al Lawrence Livermore National Laboratory in California. L'impulso laser ha una durata di 700 fs, un'energia di 150 kJ e un'intensità di picco di 6×10^{19} W/cm². Il fascio laser viene focalizzato mediante un'ottica in riflessione sulla superficie del bersaglio. I bersagli utilizzati sono bersagli multistrati. Nei bersagli è inserito uno strato di Cu per le misure di radiazione $K\alpha$ generata dal passaggio degli elettroni veloci nello strato stesso. Infatti, tra i vari processi di interazione degli

elettroni con il materiale del bersaglio occorre la ionizzazione interna (della *shell* K in particolare) degli atomi e la conseguente emissione di radiazione $K\alpha$ caratteristica del materiale impiegato. Le misure della radiazione $K\alpha$ emessa permettono quindi di ottenere informazioni sugli elettroni veloci generati durante l'interazione. Si utilizzano bersagli di due tipi diversi. Nel primo tipo di bersaglio lo strato irraggiato viene variato utilizzando materiali di numero atomico diverso (CH, Al, Mo, Au) per studiare l'effetto del numero atomico del materiale irraggiato sull'assorbimento dell'energia laser e sulla generazione di elettroni veloci. Si utilizzano sia bersagli piani che bersagli con un cono rientrante inserito nel primo strato del bersaglio. Nel secondo tipo di bersaglio invece viene variato il numero atomico del materiale di uno strato interno al bersaglio per studiare le caratteristiche del trasporto degli elettroni veloci in funzione del numero atomico Z.

Per caratterizzare gli elettroni veloci generati durante l'interazione laser-materia viene utilizzata una gamma di diagnostiche. Uno schema del setup sperimentale è presentato in fig.2. Due spettrometri magnetici posti dietro il bersaglio (cioè dalla faccia opposta a quella irraggiata dal fascio laser) misurano direttamente gli elettroni veloci emessi dal bersaglio ottenendone lo spettro energetico. Le diagnostiche utilizzate per la caratterizzazione della radiazione $K\alpha$ emessa dallo strato di Cu includono uno spettrometro X basato sull'utilizzo di un cristallo piano (HOPG) in configurazione alla Bragg calibrato assolutamente per le misure di flusso della radiazione $K\alpha$. Inoltre vengono utilizzati un cristallo curvo di quarzo e un microscopio alla Kirkpatrick-Baez per ottenere immagini 2D della regione di emissione della radiazione $K\alpha$ del Cu (8048 eV). Le diagnostiche sono completate da misure di caratterizzazione della bremsstrahlung emessa utilizzando i cosiddetti spettrometri bremsstrahlung, basati sull'utilizzo di un sistema multistrato di spessori opportuni di diversi metalli per attenuare la radiazione e di strati di *imaging plates*, sensibili alla radiazione X. Il segnale rilevato nei vari strati viene deconvoluto con un'apposito algoritmo per ricostruire lo spettro della radiazione X in entrata al rivelatore.

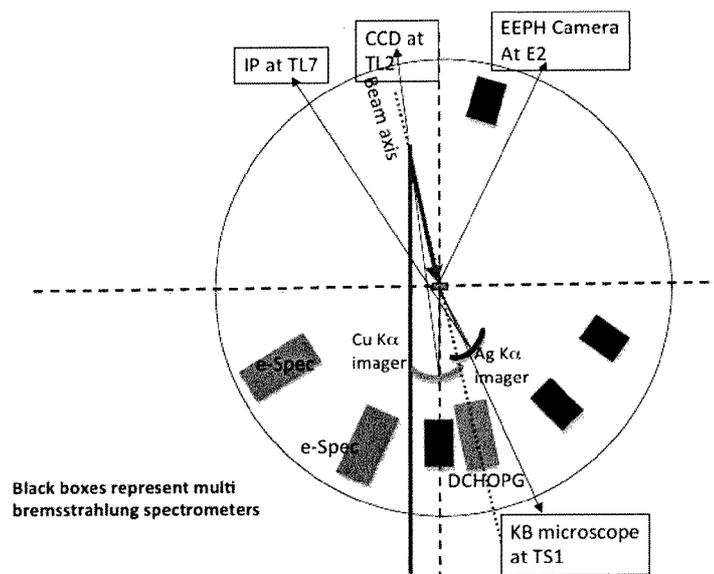


Fig. 2: Schema del setup sperimentale

Inoltre viene monitorato il livello di preimpulso del fascio laser durante l'esperimento per ottenere informazioni sul preplasma prodotto sul bersaglio prima dell'arrivo dell'impulso laser principale.

In questo esperimento è stato inoltre montato una diagnostica sviluppata recentemente presso il laboratorio ILIL a Pisa, la *Energy-Encoded Pinhole-Camera* (EPPHC). Questa nuova tecnica diagnostica si basa sull'utilizzo di un *pinhole-array* equipaggiato con un rivelatore CCD che lavora in regime a singolo fotone. In questo regime di lavoro il numero di fotoni che impingono sul chip è molto minore del numero di pixel contenuti nel chip e la linearità del rivelatore permette di ricostruire l'energia di ogni singolo fotone oltre alla sua posizione sul chip. Con un'apposito algoritmo si possono quindi ricostruire immagini 2D della zona di emissione X in vari range di energie [8]. Per il funzionamento della EPPHC è importante ridurre il rumore dovuto a fotoni ad alta energia (>100 keV) ed a emissione secondaria originando dall'interazione degli elettroni veloci prodotti con il materiale presente nella camera di interazione. In questo esperimento uno studio di caratterizzazione del rumore è stato eseguito con la EPPHC mediante l'impiego di diversi filtraggi.

Risultati preliminari

I dati raccolti durante l'esperimento sono attualmente in fase di analisi. Tuttavia, dai risultati preliminari emergono alcune tendenze chiare.

Per quanto riguarda l'assorbimento laser e la generazione di elettroni veloci, dalle misure di intensità integrata della radiazione $K\alpha$ si osserva che per i bersagli piani l'efficienza di conversione dall'energia laser all'energia cinetica degli elettroni veloci decresce con l'aumentare dell'intensità laser per i materiali irraggiati di alto numero atomico Z .

Inoltre si trova che per i bersagli con un cono rientrante l'efficienza di conversione in elettroni veloci è ridotta rispetto ai bersagli piani. Per il caso di intensità laser massima questa riduzione è di un fattore 2, mentre per una più bassa intensità del laser (ridotta di un fattore 2), l'efficienza di conversione è ridotta di un fattore 1.5 rispetto al caso di bersagli piani. I dati ottenuti dall'irraggiamento di bersagli con cono rientrante mostrano inoltre la generazione di code ad alta energia nello spettro degli elettroni veloci che indicano la presenza di interazioni nonlineari del fascio laser con il plasma preformato all'interno del cono.

Per quanto riguarda le caratteristiche del trasporto degli elettroni veloci, le misure effettuate mostrano che il flusso di elettroni veloci decresce sistematicamente all'aumentare del numero atomico Z dello strato di trasporto inserito nel bersaglio. Infatti, il flusso di elettroni veloci si riduce di un fattore 2 dopo la propagazione in uno strato di Au rispetto alla propagazione in uno strato di Al. Questo risultato è qualitativamente in accordo con i risultati di simulazioni PIC (vedi fig.1).

Inoltre sono state effettuate misure con la diagnostica EPPHC per caratterizzare la regione di provenienza e lo spettro del rumore. Un'analisi dettagliata di questi dati permetterà il disegno di

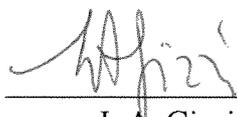
una schermatura della diagnostica per ridurre al minimo il rumore e quindi di entrare in condizioni di effettuare misure di radiazione X in condizioni estremi quali quelli dell'interazione laser-materia ad altissima intensità caratterizzati dalla presenza di una quantità significativa di elettroni e di fotoni ad alta energia.

Riassunto

È stato condotto uno studio sperimentale dell'assorbimento laser e della generazione e del trasporto di elettroni veloci prodotti da irraggiamento laser in funzione del numero atomico Z del materiale del bersaglio. Gli andamenti osservati sono in accordo con i risultati da simulazioni numeriche. In particolare, le misure indicano che il trasporto degli elettroni veloci è favorito in materiali di basso numero atomico Z. Per quanto riguarda lo schema dell'ignizione veloce per la fusione a confinamento inerziale, le osservazioni suggeriscono quindi che l'utilizzo di un cono di un materiale a basso Z faciliterebbe l'accoppiamento dell'energia laser al combustibile precompressso.

Referenze

- [1] J.C. Kieffer et al., *J. Opt. Soc. Am.* **13**, 132 (1996).
- [2] E. L. Clark et al., *Phys. Rev. Lett.* **84**, 670 (2000).
- [3] M. Tabak et al., *Phys. Plasmas* **1**, 1626 (1994).
- [4] R. Kodama et al., *Nature* **412**, 798 (2001); R. Kodama et al., *Nature* **418**, 933 (2002).
- [5] B. Chrisman et al., *Phys. Plasmas* **15**, 056309 (2008).
- [6] J. Johzaki et al., *Plasma Phys. Control. Fusion* **51**, 014002 (2009).
- [7] Y. Sentoku "Numerical modeling of ultra-fast heated Au target by intense laser light", presented at the 10th International Workshop on Fast Ignition of Fusion Targets, 9-13 June 2008, Crete, Greece.
- [8] L. Labate et al., *Rev. Sci. Instrum.* **78**, 103506 (2007).



L.A. Gizzi (Proponente)



P. Koester (Fruitore)

