



Consiglio Nazionale delle Ricerche

Istituto di Fisica Atomica e Molecolare

Rapporto Interno IFAM - 01-072000

ALLA SCOPERTA DI NUOVE SORGENTI DI RAGGI X

Leonida A. Gizzi

Alla scoperta di nuove sorgenti di raggi X

Raffinate metodologie di rivelazione della radiazione X offrono eccitanti prospettive nella ricerca fondamentale e stimolano lo sviluppo di nuove sorgenti di interesse applicativo

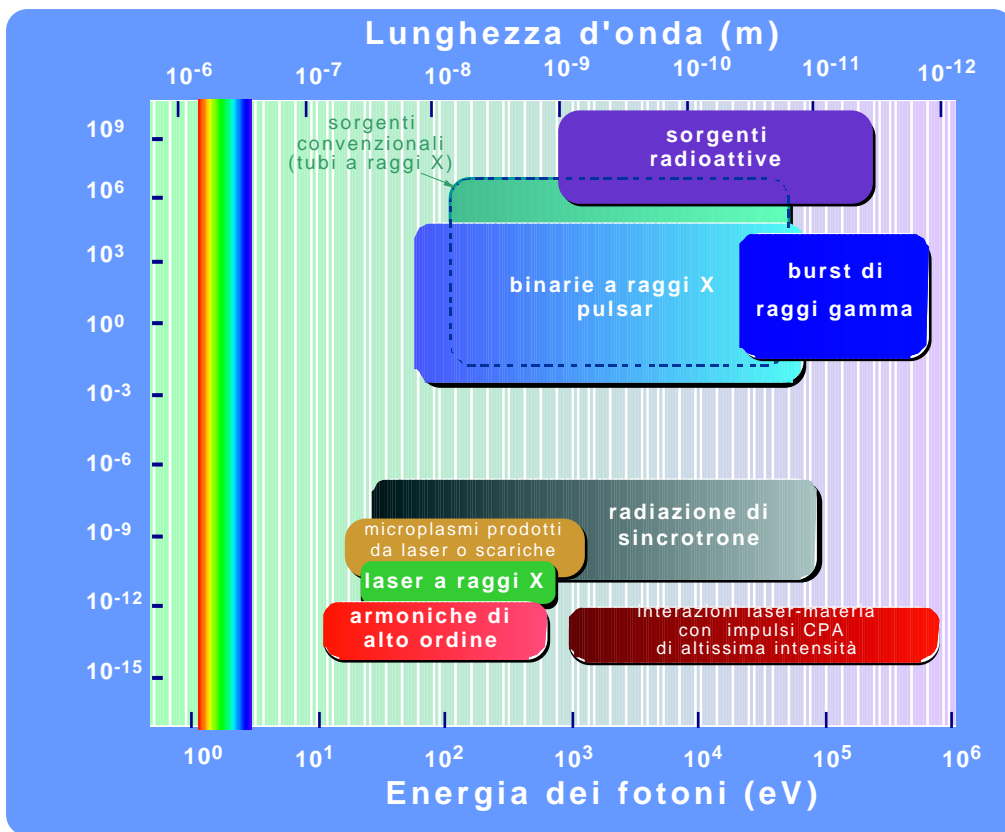
di Leonida A. Gizzi

Istituto di Fisica Atomica e Molecolare, Area della Ricerca del CNR, 56010 - Pisa

La ricerca di nuove sorgenti di radiazione X ha compiuto, negli ultimi anni, grandi progressi sia in campo astronomico che in laboratorio. I nuovi satelliti per astronomia X svelano un universo animato da continue esplosioni di grandissima energia, insospettato solo fino a pochi anni fa. La enorme quantità di dati che giunge da questi strumenti apre ulteriori interrogativi sulla struttura dell'universo e stimola lo sviluppo di nuove e complesse strategie di studio sperimentale.

Tra le nuove sorgenti di radiazione X di laboratorio, particolare interesse ha suscitato negli ultimi anni la realizzazione del primo laser a raggi X molli. Nuovi schemi di laser a raggi X proposti recentemente fanno ben sperare nello sviluppo di sistemi compatti e disponibili per applicazioni su larga scala. La brillantezza delle sorgenti di radiazione di sincrotrone dell'ultima generazione è in continuo aumento e rende possibili sempre nuove applicazioni. Tra le più interessanti ci sono sicuramente il microscopio a raggi X e la microlitografia X che stanno uscendo ora dalla fase sperimentale.

Tra gli schemi completamente nuovi per la generazione di radiazione X coerente c'è quello basato sulla generazione di armoniche di alto ordine da interazioni di impulsi laser ultra-corti con gas o con solidi. In alcuni importanti esperimenti effettuati recentemente negli Stati Uniti si è riusciti a generare fino alla 299-esima armonica della frequenza del laser Titanio-Zaffiro (800nm) corrispondente ad una lunghezza d'onda di 27.3 Å, ovvero a fotoni di energia di circa 0.5keV. Il flusso di fotoni disponibili in questi ordini di armonica così elevati è ancora insufficiente per applicazioni su larga scala, ma sono già allo studio tecniche di amplificazione.



Principali sorgenti di radiazione X/gamma di origine terrestre ed “extraterrestre” classificate in base alle loro proprietà spettrali dominanti e al loro tempo caratteristico di emissione. Lo studio di questa grande varietà di sorgenti richiede molteplici metodi di rivelazione, alcuni dei quali oggi in fase di rapido sviluppo. Particolare attenzione viene dedicata in questi anni allo sviluppo di rivelatori ultraveloci e di sistemi "ottici" per la concentrazione della radiazione. Questi ultimi sono particolarmente richiesti nell'astrofisica delle alte energie per lo studio dei deboli flussi di radiazione provenienti da sorgenti lontanissime. I rivelatori ultraveloci sono invece strumenti fondamentali di indagine nello studio dell'interazione laser materia ad alta intensità, in grado di generare potenti impulsi di radiazione X della durata di frazioni di miliardesimi di secondo.

Tra le sorgenti X non-coerenti, sempre maggior rilievo stanno assumendo quelle basate su impulsi di potenza. Di grande accessibilità anche per laboratori di piccola scala solo le sorgenti puntiformi di alta brillantezza ottenute da impulsi laser di alta potenza focalizzati su bersagli solidi così da produrre dei microplasma (plasma-laser). Negli ultimi anni la tecnologia dei laser di potenza ha infatti compiuto progressi rapidissimi nella messa a punto di sistemi di potenza sempre più elevate. Con l'introduzione negli anni sessanta della tecnica *Q-switch* e successivamente del *mode-locking* si generavano impulsi che opportunamente amplificati potevano arrivare a potenze del gigawatt (10^9 Watt) ed, in poche grandi

installazioni, fino al terawatt (10^{12} Watt). Oggi, grazie alla *Chirped Pulse Amplification* (CPA) è possibile arrivare alle decine di TW (10^{12} Watt) con sistemi di dimensioni ridotte (*table-top*). L'impiego di sistemi laser CPA nell'interazione laser-materia ha portato recentemente alla generazione degli impulsi di radiazione X più brevi e più potenti mai realizzati fino ad ora.

Lo sviluppo di queste nuove sorgenti X e lo studio delle loro proprietà si avvale di metodi di rivelazione sempre più sofisticati. Se ci concentriamo sulle sorgenti astronomiche e su quelle prodotte da irraggiamento laser, è interessante osservare come i relativi campi di ricerca, apparentemente disgiunti, presentino suggestive analogie. Importanti instabilità magnetoidrodinamiche, di fondamentale importanza in astrofisica, nello studio di oggetti stellari nei loro stadi evolutivi estremi, nane bianche, stelle di neutroni o buchi neri, possono ora essere studiate anche in laboratorio con tecniche consolidate negli esperimenti di interazione laser-materia.

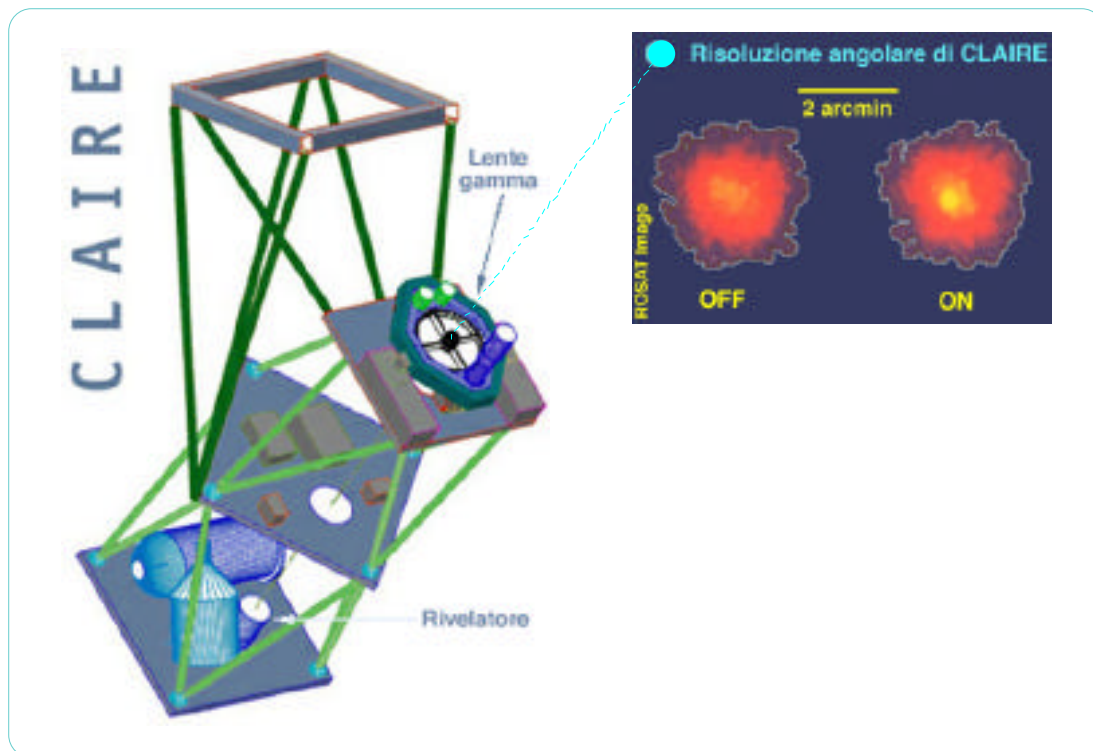
Lo studio delle proprietà fisiche dei *burst* di raggi gamma, prodotti da eventi di altissima energia che hanno luogo su scale astronomiche, si avvale di tecniche sperimentali sempre più simili a quelle usate per lo studio dei rapidissimi ed intensi *flash* di radiazione X/gamma che si generano in laboratorio nell'interazione di impulsi laser ultracorti di altissima potenza con la materia. La rivelazione di questi impulsi di radiazione, la determinazione del loro spettro o della loro distribuzione angolare, ad esempio, sono fondamentali per la comprensione di fenomeni fisici nuovi e finora inaccessibili.

Nell'astrofisica sperimentale, come nella fisica dei plasmi prodotti da laser o nelle facility di luce di sincrotrone si fa uso di tecniche di raccolta, selezione e rivelazione della radiazione X basate su molteplici principi fisici e sull'impiego di nuovi materiali. Sempre più frequentemente tecniche messe a punto in uno di questi settori, risultano efficacemente esportabili in altri settori. Le metodologie di concentrazione della radiazione costituiscono uno degli esempi più attuali di ricerca di enorme interesse scientifico e applicativo comune a tutti questi settori.

Infatti, uno degli aspetti caratterizzanti dell'astrofisica sperimentale delle alte energie è proprio la bassa intensità dei flussi di radiazione da misurare. Allo scopo di ottenere misure

con rapporto segnale/rumore sufficientemente elevato si ricorre spesso a delle “ottiche” di concentrazione, in grado di aumentare l’area efficace del rivelatore e quindi la sua capacità di raccogliere fotoni. D’altra parte, lo sviluppo di queste ottiche è di grande importanza per tutte le ricerche sulle sorgenti X, siano esse convenzionali, da plasmilaser o di sincrotrone. Nel caso dei plasmilaser, ad esempio, date le dimensioni microscopiche di queste sorgenti, l’impiego di ottiche consente di ottenere, tra l’altro, fasci molto collimati o di realizzare concentratori e obiettivi per microscopia X.

Le tecniche impiegate per realizzare questi concentratori sfruttano diversi principi fisici in base all’energia dei fotoni in gioco. Per energie sufficientemente basse (fino a qualche centinaia di eV) le tecniche di deposizione multistrato consentono di realizzare veri e propri specchi con riflettività molto elevate, fino all’ 80%. La loro selettività in energia li rende particolarmente indicati nelle applicazioni basate sull’impiego di radiazione quasi-monocromatica. Le tecniche ad incidenza radente sono invece efficacemente impiegate per riflettere e concentrare fotoni con energie fino al keV. Per energie superiori gli angoli in gioco diventano eccessivamente piccoli per poter essere sfruttati agevolmente. Si ricorre quindi a tecniche di diffrazione da strutture ordinate (cristalli) in configurazioni Bragg (in riflessione) per energie fino a qualche keV, o Laue (in trasmissione) per energie ancora più elevate, fino a centinaia di keV. Quest’ultimo meccanismo è appunto alla base del telescopio gamma di nuova generazione CLAIRE, attualmente in fase di realizzazione nell’ambito di una collaborazione internazionale presso il *Centre d’Etude Spatiale des Rayonnement, Tolosa, Francia*. Il cuore del telescopio è una “lente” gamma costituita da 576 cristalli di germanio posti su anelli concentrici fino ad un diametro massimo di 45cm. I cristalli, allineati in configurazione Laue, concentrano la radiazione incidente a 170keV su un rivelatore costituito da una matrice 3x3 di germanio purissimo posto alla distanza focale di 276cm. La lente consente un aumento dell’area efficace di raccolta dei fotoni di circa un fattore dieci a parità di livello di rumore, legato essenzialmente al volume del rivelatore.



Schema del telescopio CLAIRE per astronomia gamma ad alta risoluzione angolare. Il cuore dello strumento, in fase di realizzazione nell'ambito di una collaborazione internazionale presso il Centre d'Etude Spatiale des Rayonnement di Tolosa, è una "lente" per la concentrazione della radiazione gamma costituita da 576 cristalli di germanio allineati in configurazione Laue. Uno dei primi obiettivi osservativi di CLAIRE sarà la nebulosa del Granchio, una delle sorgenti di raggi X più esplorate nella regione dei raggi X molli. CLAIRE permetterà di ottenere immagini in radiazione gamma con una risoluzione vicina a quella ottenuta dal satellite ROSAT nei raggi X molli. L'insero mostra due immagini della nebulosa prese dal satellite ROSAT durante le fasi off (sinistra) e on (destra) dell'impulso di radiazione emesso dalla pulsar situata all'interno della nebulosa. Il disco in alto a sinistra rappresenta la proiezione sulla sfera celeste della risoluzione angolare di CLAIRE. Quale sarà l'aspetto della nebulosa del Granchio vista in radiazione gamma?

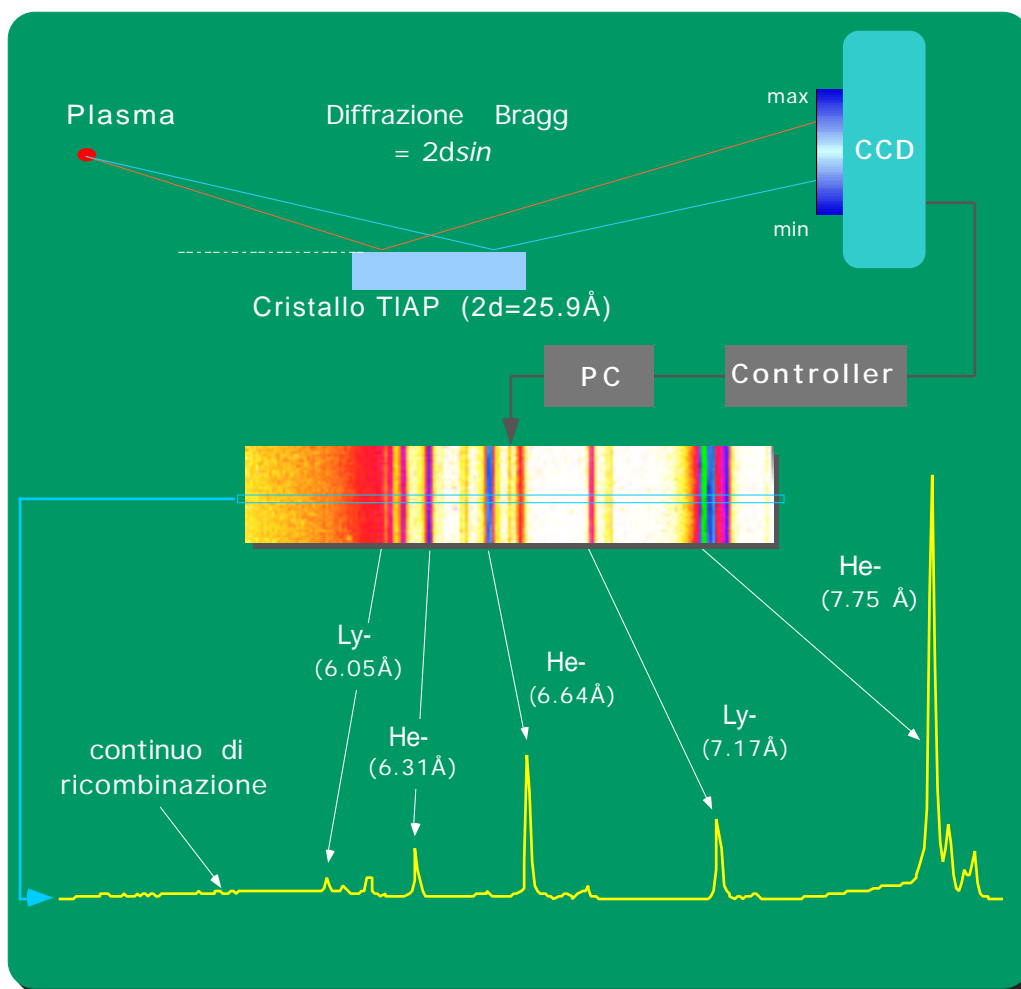
Scopo di CLAIRE sarà quello di osservare, a bordo di un pallone stratosferico, sorgenti extraterrestri di radiazione gamma con una risoluzione angolare di poche decine di secondi d'arco, irraggiungibili con le tecniche finora in uso quali collimatori a modulazione, maschere codificate o telescopi ad effetto Compton. Uno dei primi obiettivi osservativi di CLAIRE sarà la nebulosa del Granchio, una delle sorgenti di raggi X più esplorate e meglio caratterizzate nella regione dei raggi X molli. CLAIRE permetterà di ottenere immagini in radiazione gamma con una risoluzione simile a quella ottenuta dal satellite ROSAT nella regione della radiazione X molle. Queste informazioni consentiranno, tra l'altro, di testare i

vari modelli teorici sviluppati per descrivere l'interazione tra il cuore pulsante di questa sorgente, una pulsar, e la nebulosa che la circonda.

L'efficacia della tecnica di concentrazione impiegata in questo complesso dispositivo è già stata ampiamente dimostrata nella rivelazione di radiazione X generata da sorgenti X convenzionali (tubi) o naturali (sorgenti radioattive). Si potranno presto impiegare queste lenti anche nella concentrazione di radiazione generata da altre sorgenti X/gamma. Nel caso delle sorgenti da interazione laser-materia nel regime dei femtosecondi, ad esempio, queste lenti consentiranno di focalizzare su una piccola superficie la radiazione emessa dal plasma-laser in un ampio angolo solido e in una certa banda spettrale. I flussi di radiazione ottenibili in queste condizioni sono di sicuro interesse sia nell'ambito della medicina nucleare, sia come ulteriore strumento di ricerca scientifica.

Nello studio di una sorgente X, i fotoni devono essere rivelati con strumenti in grado di estrarre informazioni sulla loro energia, la loro posizione e il loro tempo di arrivo. Le tecniche a disposizione si differenziano in base alle caratteristiche dei fotoni da rivelare. Alcuni di questi rivelatori presentano caratteristiche uniche di versatilità e potenzialità applicative che li rendono strumenti insostituibili nella ricerca sperimentale.

Un rivelatore di radiazione diffusissimo anche in apparecchi commerciali (come telecamere, fotocamere digitali) è quello noto con la sigla CCD (Charge Coupled Device). In realtà, questa sigla indica una classe molto ampia di rivelatori di radiazione in grado di misurare l'intensità della radiazione incidente su un determinato punto del rivelatore stesso. Ogni sensore CCD è costituito da una matrice di elementi sensibili (i più recenti possono averne fino ad alcuni milioni) concentrati in una superficie di poche decine di millimetri quadrati. Ogni elemento sensibile è sostanzialmente un fotodiodo le cui caratteristiche fisiche, elettroniche e costruttive determinano il comportamento dell'intero rivelatore. Le caratteristiche più interessanti che questi sensori offrono oggi per uso scientifico sono la grande linearità, la amplissima regione spettrale di sensibilità, dall'infrarosso vicino ai raggi X, il bassissimo livello di rumore termico, ottenibile con tecniche di raffreddamento termoelettrico o ad azoto liquido, ed una elevata dinamica (rapporto tra livello di saturazione e livello di rumore).



Spettro della radiazione X emessa da plasmi prodotti da irraggiamento di un bersaglio di alluminio con un laser al Neodimio ad alta potenza della durata di 3ns presso l'Istituto di Fisica Atomica e Molecolare del CNR, Pisa. Lo spettro, ottenuto per mezzo di uno spettrometro a cristallo in configurazione Bragg è stato rivelato da un sensore CCD di nuova concezione. In questo tipo di CCD, i fotoni incidenti giungono direttamente nella zona attiva del sensore. Grazie a questi accorgimenti si può rivelare con continuità radiazione dal visibile ai raggi X. La bassa temperatura del sensore, fino a -70°C , consente poi di ridurre il rumore di origine termica. Nello spettro mostrato in figura sono visibili le righe di risonanza delle specie ioniche dominanti nel plasma. Il simbolo. In analogia con l'atomo di idrogeno, il simbolo Ly (Lyman) indica le righe di risonanza dell'Al idrogenoide (alluminio ionizzato 12 volte o Al^{12+}). Il simbolo He- indica invece l'emissione da ioni di tipo elioide (Al^{11+}). L'intensità dominante della riga He- α fa di questi plasmi delle sorgenti quasi monocromatiche di radiazione X di alta brillantezza.

Queste caratteristiche sono di enorme vantaggio, ad esempio, nella spettroscopia tradizionale in quanto consentono di rivelare simultaneamente componenti spettrali di intensità molto differente tra loro, fino a circa centomila volte.

Spettri della radiazione X emessa da sorgenti puntiformi come i plasmi-laser possono essere ottenuti con un sensore CCD abbinato ad uno spettrometro a cristallo in configurazione Bragg. La radiazione X incide su un cristallo, caratterizzato da una certa spaziatura reticolare $2d$, con un angolo di incidenza θ che dipende dal punto di incidenza sul cristallo. Qui per convenzione l'angolo θ è l'angolo tra la direzione della radiazione ed il piano del cristallo, ovvero il complementare dell'angolo di incidenza usato in ottica. Per un certo angolo θ solo la radiazione la cui lunghezza d'onda λ soddisfa la relazione di Bragg ($\lambda = 2d \sin \theta$) verrà riflessa specularmente dal cristallo e inciderà sul sensore formando così lo spettro. Dalle intensità relative delle varie componenti spettrali è possibile risalire alle condizioni fisiche del plasma, ovvero a parametri quali la temperatura e la densità.

L'impiego di speciali CCD raffreddate, basate su sensori dell'ultima generazione, consentono di determinare simultaneamente le componenti continue ed eventuali "satelliti" delle righe principali, fino a migliaia di volte meno intensi delle righe stesse e quindi difficilmente osservabili con i rivelatori impiegati in passato, perchè troppo rumorosi o con dinamica insufficiente. Sono proprio questi "satelliti" a rivelare effetti anomali come, ad esempio, modifiche nella distribuzione energetica della popolazione elettronica. Da sottolineare che la linearità del meccanismo alla base della rivelazione nei sensori CCD non richiede alcuna delle complesse tecniche di calibrazione che si rendevano necessarie con l'impiego di pellicole X o altri rivelatori analoghi.

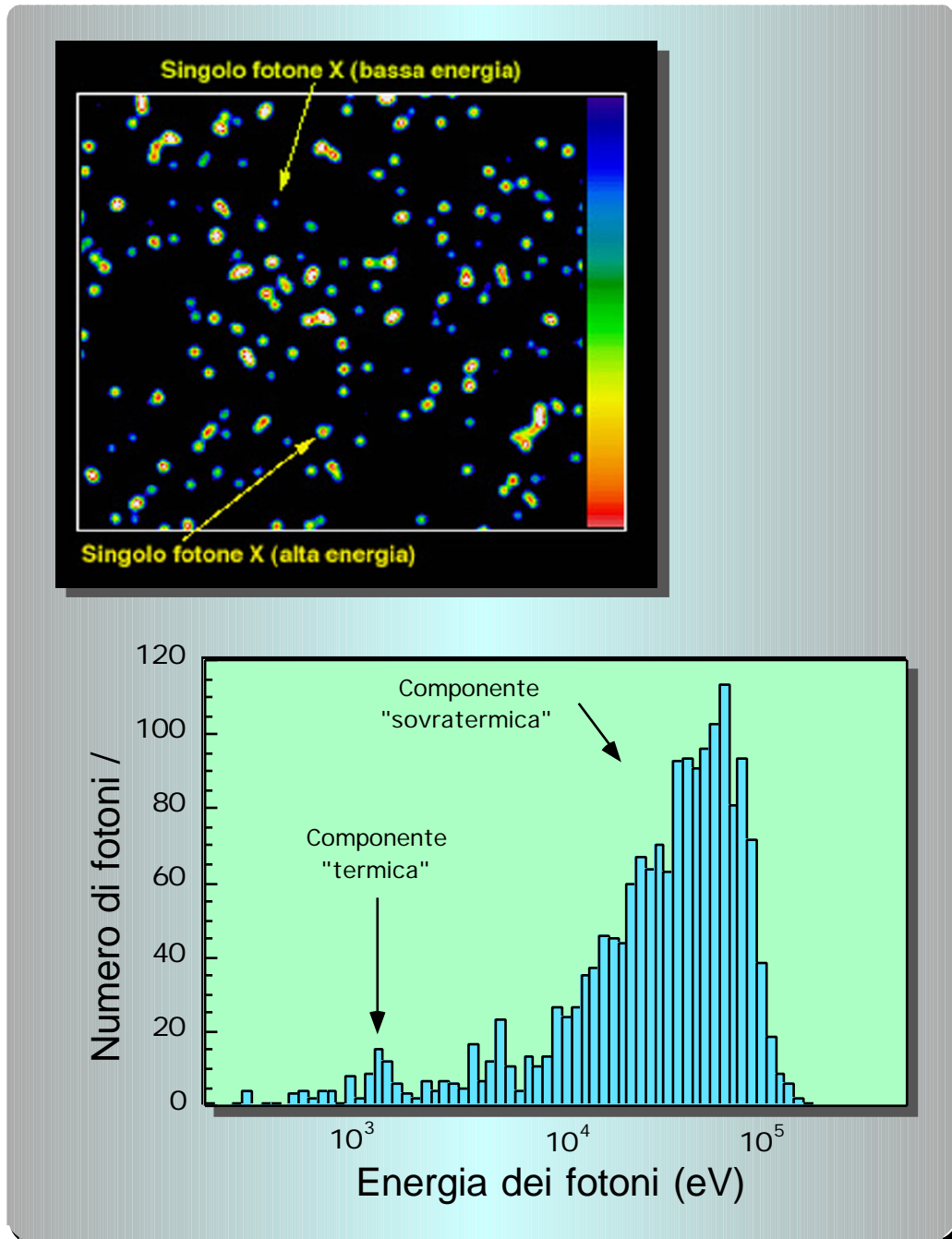
Quello appena descritto è solo uno dei possibili impieghi classici dei sensori CCD come rivelatori sensibili alla posizione impiegati in spettroscopia. Grazie alle loro proprietà uniche questi rivelatori possono essere impiegati per misure assolute di flussi di fotoni. Infatti, il basso rumore ed l'elevata dinamica permettono di realizzare un nuovo tipo di spettroscopia, senza necessità di alcun elemento dispersivo (spettrometro), a condizione di operare in regime cosiddetto di *singolo fotone*. Per flussi molto deboli di radiazione incidente sul rivelatore la probabilità che su un singolo elemento sensibile del CCD incidano due o più fotoni può essere molto bassa. In questo caso, l'assorbimento di un fotone genera una carica proporzionale all'energia del fotone stesso. Se questa carica è distinguibile dal rumore strumentale (termico ed elettronico), è possibile misurare il segnale generato dal fotone e quindi la sua energia.

Tutto ciò può verificarsi per una frazione notevole di elementi sensibili così da consentire una misura statistica dello spettro della radiazione incidente basata su un campione significativo di fotoni. C'è una evidente analogia con la tecnica *multi-channel* impiegata nella fisica nucleare per misure di spettroscopia di particelle e fotoni di alta energia. In questa tecnica il sensore è costituito da un fotomoltiplicatore accoppiato ad uno scintillatore. Il fotomoltiplicatore permette di rivelare il debole lampo di luce emesso dallo scintillatore in seguito all'assorbimento, totale o parziale della particella. L'impulso elettrico generato dal fotomoltiplicatore viene poi classificato in base alla sua ampiezza massima che è legata all'energia della particella assorbita. Particella dopo particella è quindi possibile costruire uno spettro della radiazione incidente. La tecnica basata sull'impiego di CCD, grazie all'elevato numero dei sensori a disposizione, può essere considerata quindi come una tecnica di *multi-channel in parallelo*.

La regione spettrale di applicabilità di questa tecnica è limitata verso le alte energie dal diminuire della probabilità di interazione del fotone con il sottile strato sensibile del rivelatore e verso le basse energie dal rumore termico ed elettronico. In pratica la regione utile si estende da qualche decina di eV a qualche decina di keV.

Rispetto alla spettroscopia con l'uso dei cristalli descritta in precedenza, nella spettroscopia in regime di singolo fotone l'ampia dinamica del rivelatore viene sfruttata per ampliare la larghezza della regione spettrale investigata. La risoluzione spettrale di questa tecnica è legata invece al rumore statistico, ovvero alle fluttuazioni del livello di rumore intorno al suo valor medio. Nella regione del keV è possibile raggiungere risoluzioni di qualche per cento ($\Delta E/E \approx 0.05$), più che sufficienti, ad esempio, a separare le componenti spettrali principali da atomi fortemente ionizzati.

Il dato "grezzo" che si ottiene da queste misure è costituito da una immagine simile ad un "cielo stellato" nel quale ogni "stella" rappresenta l'assorbimento di un singolo fotone e la carica totale corrispondente a questo evento è proporzionale all'energia del fotone. Il risultato finale è invece un istogramma che dà il numero di fotoni raccolti dal sensore per intervallo di energia, in pratica lo spettro della radiazione.

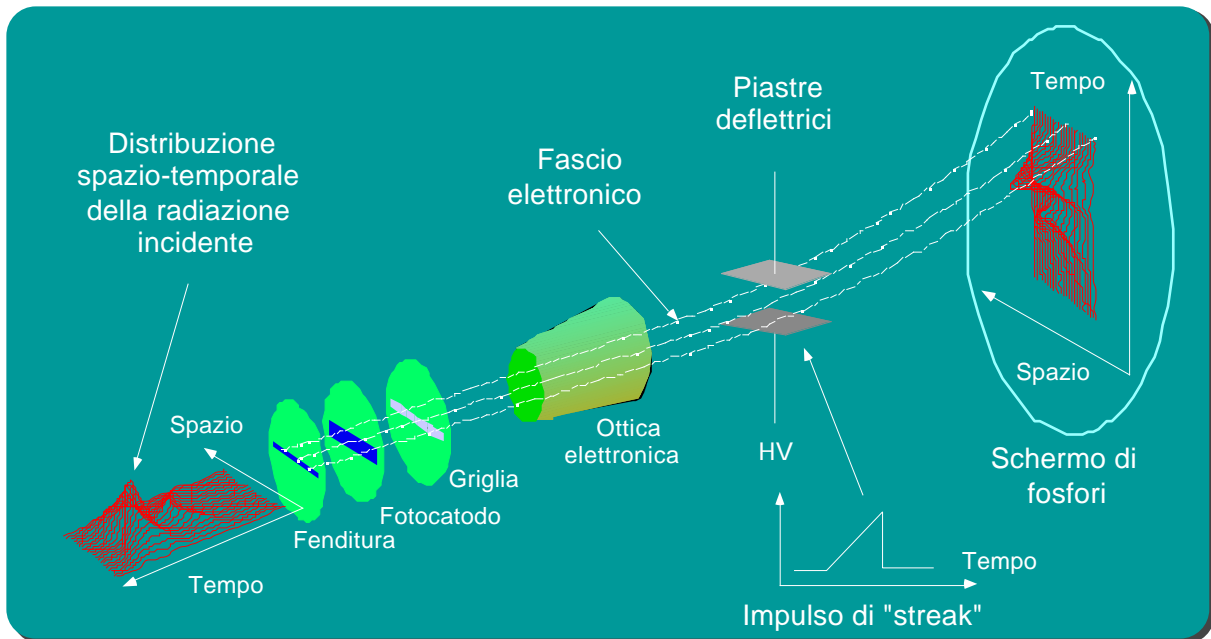


Esempio di misura di spettroscopia nel regime di singolo fotone basata sull'impiego di sensori CCD a basso rumore ed elevata dinamica. In alto: Immagine di eventi di assorbimento di fotoni X da parte di un sensore CCD raffreddato. I fotoni sono stati generati in un esperimento di interazione laser materia realizzato con un impulso laser della durata di circa 150 fs prodotto da un laser Titanio-Zaffiro del tipo Chirped Pulse Amplification presso il Laboratoire d'Optique Appliquée, Francia. L'intensità di irraggiamento laser sul bersaglio era superiore a 10^{17} W/cm², corrispondente ad un campo elettrico dell'ordine di 10^{12} V/m. Ogni "stella" corrisponde all'assorbimento di un singolo fotone che produce una carica proporzionale alla sua energia. Dall'analisi di queste immagini si ottiene un istogramma (in basso) che rappresenta lo spettro della radiazione X su un'ampia regione spettrale ottenuto senza l'ausilio di alcun elemento dispersivo. In questo

esperimento, la radiazione X che giunge sul sensore è caratterizzata da una componente "sovratemica" di emissione X dominante, generata per frenamento (*bremsstrahlung*) di elettroni molto energetici accelerati dall'intenso campo elettrico della radiazione laser e da una componente di radiazione cosiddetta "termica", cioè dovuta ad effetti di collisioni tra elettroni e ioni.

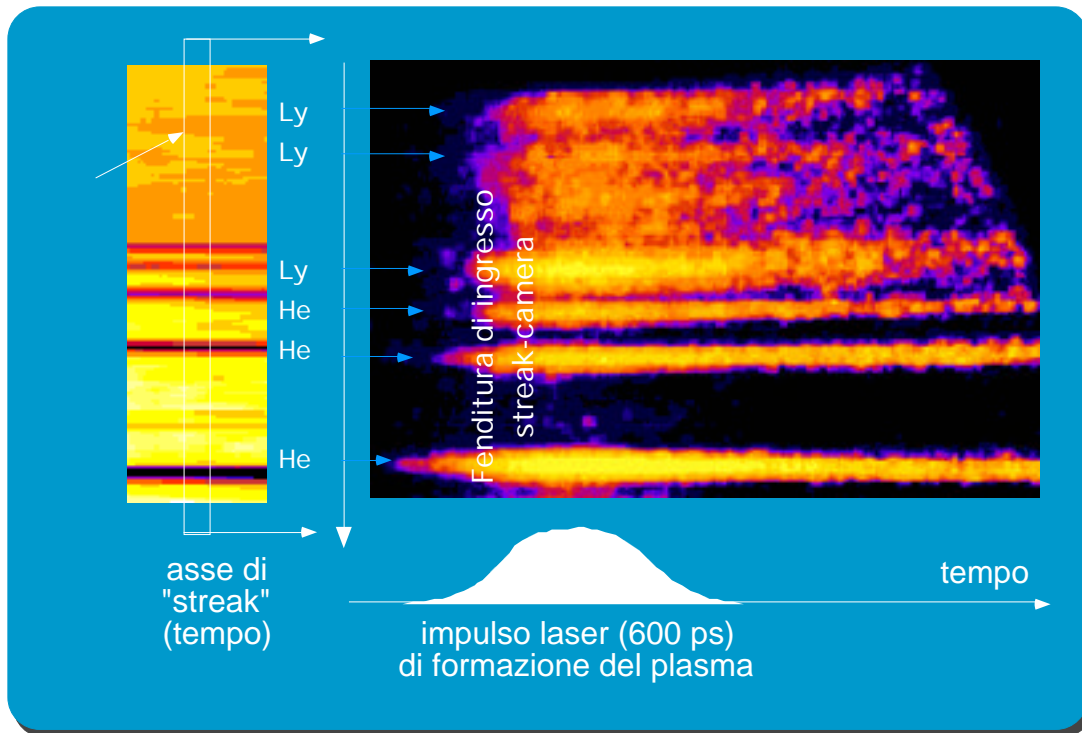
Questa tecnica è particolarmente adatta alla spettroscopia della radiazione X generata nell'interazione laser-materia nel regime dei femtosecondi ($1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ sec}$). In questi esperimenti l'intensità di irraggiamento laser sul bersaglio può raggiungere valori superiori a 10^{18} W/cm^2 , corrispondente ad un campo elettrico dell'ordine di 10^{12} V/m . Questo enorme campo elettrico, paragonabile al campo elettrico atomico in prossimità del nucleo, ionizza la materia investita nel giro di uno o due periodi dell'onda (pochi femtosecondi). Gli elettroni, sotto l'azione dell'intenso campo elettrico, acquistano energie di decine o centinaia di keV prima che la materia, investita nella piccola zona irraggiata da enormi densità di energia, si espanda esplodendo. Le forti accelerazioni fino a velocità relativistiche danno luogo ad una intensa emissione di radiazione elettromagnetica di frenamento (*bremsstrahlung*) su un'ampia regione spettrale e di durata paragonabile a quella dell'impulso laser stesso. In questi casi, la spettroscopia di singolo fotone con CCD consente di ottenere in un'unica misura, informazioni sulla distribuzione energetica degli elettroni nel plasma generato dall'interazione, un passo fondamentale per la comprensione di meccanismi di generazione di radiazione X finora mai investigati.

Quando si ha a che fare con fenomeni fisici altamente transienti, è di fondamentale importanza l'analisi dell'evoluzione temporale dei processi emissivi. I tempi caratteristici in gioco sono legati sia alle proprietà dei processi elementari di emissione che alla scala spaziale delle sorgenti. Nel caso di strutture di natura cosmica si ha a che fare con emissioni di tipo non-periodico come ad esempio i *burst* X/gamma, o a carattere periodico, spesso legati a rotazioni e rivoluzioni di stelle nei loro vari stadi di evoluzione. In questi casi i periodi variano molto; la nebulosa del Granchio, ad esempio, ha un periodo di 33ms mentre la sorgente Cigno X-1, il più famoso candidato buco nero, ha un periodo di 5.6 giorni. In generale, normali tecniche di *multi-channel* impiegate nella fisica nucleare sono spesso sufficientemente veloci da descrivere l'evoluzione temporale di questi fenomeni.



Le attuali tecnologie elettro-ottiche consentono di realizzare dispositivi in grado di analizzare l'evoluzione temporale della radiazione elettromagnetica con risoluzioni temporali fino a frazioni di picosecondi ($1\text{ps} = 10^{-12}\text{ sec}$) su un'ampia finestra spettrale che va dall'infrarosso vicino ai raggi X di qualche keV. La figura mostra lo schema di principio di una streak-camera. La distribuzione spaziale di intensità di radiazione X incidente sulla fenditura viene convertita dal fotocatodo in una distribuzione di elettroni che, tramite un sistema di lenti elettroniche, viene trasferita su uno schermo di fosfori e riconvertita in fotoni, questa volta visibili. Per esaminare l'evoluzione temporale di questa distribuzione è sufficiente applicare un campo elettrico uniforme, rapidamente variabile tra gli elettrodi. Il fascetto di elettroni viene rapidamente deflesso (come avviene in un televisore) e la strisciata che appare sullo schermo rappresenta l'andamento temporale come una variazione spaziale di intensità luminosa.

I plasmi da laboratorio hanno tempi caratteristici molto più brevi, dato il meccanismo di generazione impulsato e l'elevata densità di energia (rapporto tra l'energia depositata in una regione microscopica ed il volume della regione stessa). Un plasma prodotto da un laser impulsato, ad esempio, vive solo pochi miliardesimi di secondo, il tempo necessario affinché l'espansione idrodinamica (esplosione) della materia riscaldata dall'irraggiamento (frazioni di millimetro cubo) lo porti a raffreddarsi. La fase di interesse poi è spesso ancora più breve; in molti casi è limitata alla presenza della sorgente di energia che può durare migliaia o milioni di volte meno del plasma. Questo accade ad esempio nei plasmi prodotti con impulsi laser ai femtosecondi.

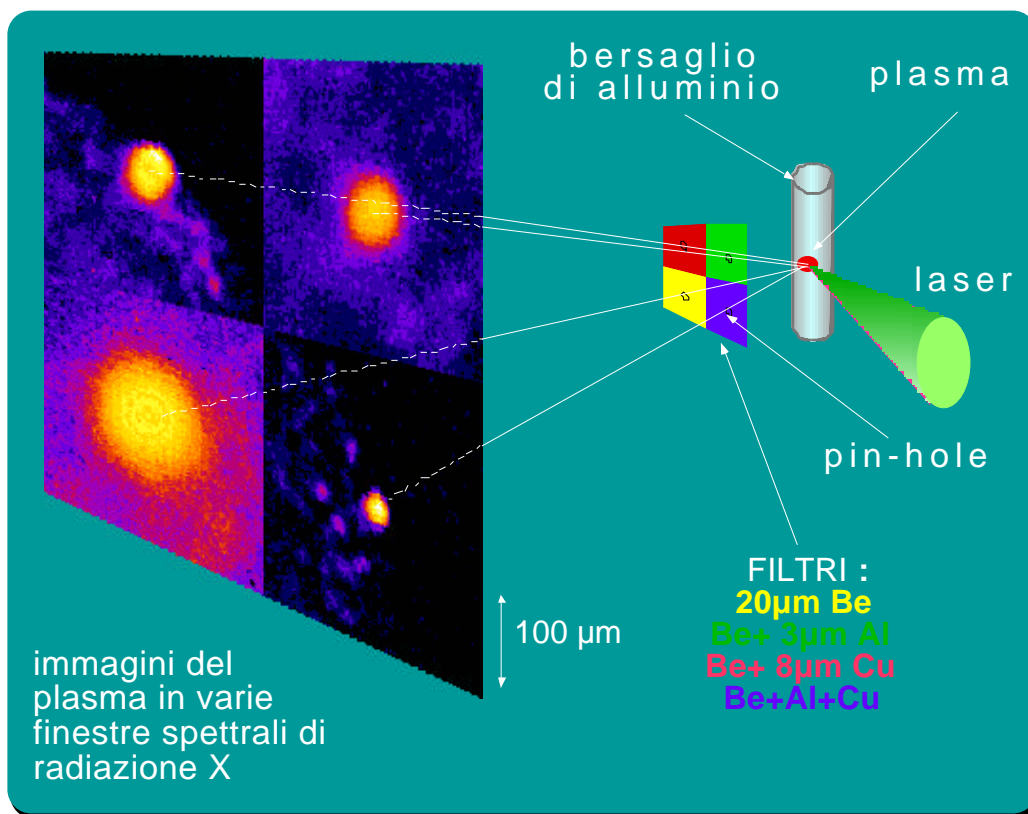


L'impiego della streak-camera è particolarmente adatto allo studio dell'evoluzione temporale di spettri di radiazione emessa da sorgenti impulsate. L'immagine mostra l'evoluzione temporale dello spettro di emissione X da un plasma di Al prodotto per irraggiamento tramite un laser al Nd di grande potenza presso il Rutherford Appleton Laboratory, UK. La radiazione X, dispersa da uno spettrometro a cristallo, giunge sul fotocatodo della streak-camera. La fenditura d'ingresso della streak-camera seleziona una porzione di questo spettro che viene poi "strisciata" nella direzione perpendicolare all'asse spettrale. Il risultato finale, qui rappresentato in falsi colori, mostra righe molto intense generate da ioni di tipo idrogenoide (Lyman) ed elioide (He). Questi spettri permettono di determinare l'evoluzione temporale dei processi, sia ionici che collettivi, responsabili dell'emissione di radiazione dal plasma sorgente e di stimare la temperatura del plasma.

Si pone quindi il problema di misurare l'intensità spettrale della radiazione emessa da regioni di questi plasmi spesso di dimensioni micrometriche, su scale temporale molto brevi. A questo scopo si impiegano speciali rivelatori quali la *streak-camera* o la *framing-camera*. Questi rivelatori, basati su principi elettro-ottici, sono in grado di risolvere temporalmente una distribuzione di intensità unidimensionale o bidimensionale su tempi estremamente rapidi. Oggi, grazie alle sempre nuove esigenze sperimentali della fisica degli impulsi di potenza, questi rivelatori hanno subito un notevole sviluppo fino a raggiungere risoluzioni temporali di frazioni di picosecondo ($1\text{ps} = 10^{-12}\text{ sec}$).

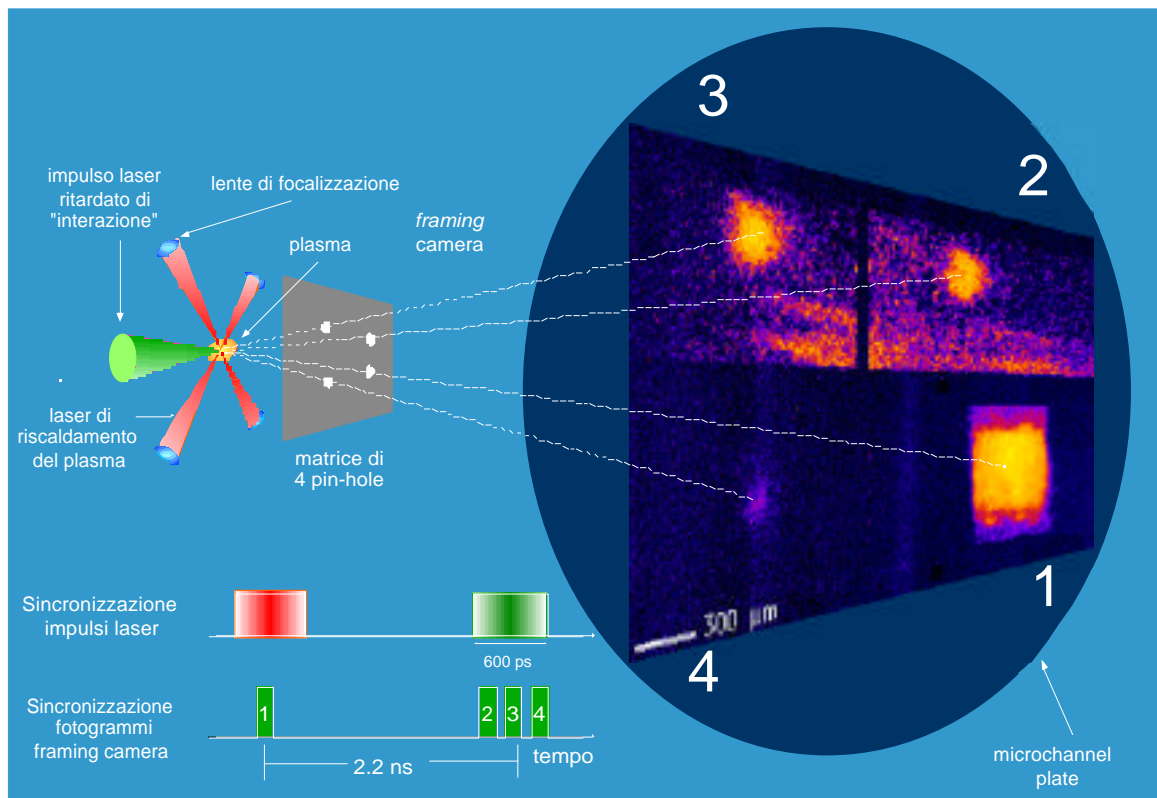
Di più recente sviluppo è una classe di rivelatori a *framing-camera* in grado di "fotografare" una sorgente di radiazione elettromagnetica con tempi di esposizione di frazioni

di nanosecondo, fino a poche decine di picosecondi. Questi rivelatori sfruttano i *micro-channel plates*, rivelatori sensibili alla posizione e capaci di elevati guadagni di intensità. I fotoni giungono sulla superficie d'ingresso del microchannel plate dove generano elettroni per emissione fotoelettrica. Questi elettroni vengono guidati nei microscopici canali del microchannel plate da intensi campi elettrici e qui moltiplicati. L'elevata densità di canali sulla superficie di questi sensori permette di riprodurre la distribuzione spaziale di radiazione X incidente in una distribuzione uscente di elettroni che vengono poi accelerati da ulteriori campi elettrici e inviati su uno schermo di fosfori. La funzione di "otturatore" in questa speciale camera è svolta appunto da questi campi elettrici che vengono attivati solo per il tempo richiesto.



Immagini di sorgenti X molto intense si ottengono con la tecnica della "camera oscura" (pin-hole camera). Un foro microscopico, in una lamina di materiale opaco alla radiazione X, posto in prossimità della sorgente forma un'immagine capovolta ed ingrandita della sorgente stessa. Opportuni filtri, costituiti da sottili fogli di vari materiali, provvedono ad eliminare la luce visibile ed a selezionare la finestra spettrale di interesse. La figura mostra quattro immagini in radiazione X dello stesso plasma, prodotto da irraggiamento laser visto attraverso quattro differenti filtri. Filtri più "duri", ovvero costituiti da materiale a più alto numero atomico, selezionano fotoni più energetici, provenienti dalle regioni più calde della sorgente.

Questi rivelatori sono impiegati in particolare per la micro-fotografia X risolta nel tempo in esperimenti di fusione termonucleare per confinamento inerziale. In uno degli schemi di fusione per confinamento inerziale (ICF) (vedi l'articolo *Progressi nella fusione nucleare con il laser*, Le Scienze n.218 ottobre 1986), una capsula sferica contenente combustibile nucleare (deuterio o trizio), viene irraggiata uniformemente da radiazione laser impulsata ad alta potenza. L'esplosione del guscio esterno della capsula esercita una grande pressione sulla capsula stessa e la comprime facendone aumentare la densità fino a migliaia di volte.



Microfotografia a raggi X con alta risoluzione temporale. L'impiego di una pin-hole camera in combinazione con un sensore framing-camera consente di seguire l'evoluzione dell'emissione di radiazione X da un micro-plasma laser sulla scala delle centinaia di picosecondi. Questa sequenza è stata ottenuta in un esperimento dedicato allo studio di plasmi di interesse fusionistico basato sull'impiego di un rivelatore X del tipo framing-camera. Il rivelatore, basato sulla tecnologia dei microchannel-plates (MCP), consente di acquisire una sequenza di quattro fotogrammi consecutivi con tempi di esposizione di circa 100ps. L'obiettivo di questa speciale macchina fotografica è costituito da quattro fori (pin-holes) di pochi micrometri di diametro. Ognuno di questi pin-hole forma un'immagine del plasma su un elemento sensibile della framing-camera in base al principio della camera oscura. Il plasma è stato generato e riscaldato per esplosione di una pellicola di alluminio di forma rettangolare di 0.3mm per 0.7mm di 0.5μm di spessore tramite quattro fasci laser della durata di 600ps focalizzati simultaneamente. Un quinto fascio detto di "interazione", anch'esso della durata di 600ps, giunge sul plasma con un ritardo di 2.2ns. La sequenza delle immagini, sincronizzata con gli impulsi laser come mostrato in figura, permette di separare la fase di formazione del plasma da quella successiva di "interazione".

Questo aumento di densità ed il conseguente aumento di temperatura fino a decine di milioni di gradi, porta il materiale nucleare in condizioni di innesco per reazioni nucleari di fusione. La framing-camera X viene impiegata per "fotografare" la capsula nelle sue varie fasi di compressione per evidenziare così eventuali deformazioni o asimmetrie e studiarne l'evoluzione.

Il futuro della ricerca nel campo della radiazione X sarà sempre più legato alla possibilità di manipolazione "ottica" e di rivelazione selettiva, finalizzata cioè ad analisi spaziali, temporali e spettrali sempre più accurate. L'impiego di queste nuove metodologie di rivelazione sta già consentendo, da un lato di sviluppare nuove sorgenti di radiazione X di grandi potenzialità applicative, e dall'altro di studiare fenomeni fisici nuovi e finora inaccessibili.

APPROFONDIMENTI

CHANDRASHEKHAR J. JOSHI AND PAUL B. CORKUM, *Interactions of Ultra-Intense Laser Light with Matter*, «Physics Today», 1, pp.36-43, 1995.

E. COSTA ET AL., *Discovery of an X-ray afterglow associated with the γ -ray burst of 28 February 1997*, «Nature», 387, pp. 783-785, 1997.

DANILO GIULIETTI AND LEONIDA A. GIZZI, *X-Ray Emission from Laser Produced Plasmas*, «La rivista del Nuovo Cimento», in stampa 1999.

INDIRIZZI WEB PER ULTERIORE APPROFONDIMENTO:

Ricerche sui plasmi prodotti da laser all'IFAM-CNR:
<http://xray.ifam.pi.cnr.it>

Sito di descrizione del progetto CLAIRE
http://www.cesr.fr:80/~pvb/Claire/C_ho_e.html

Rete Europea sulla generazione e le applicazioni di impulsi di radiazione X:
http://www.amolf.nl/external/wwwlab/atoms/TMR_XRAY/index.html

Rete Europea sull'interazione di impulsi superintensi con i solidi:
<http://www.physik.th-darmstadt.de/tqe/silasi/>