

*Dall'oggetto all'immagine: giornate su microscopie, segnali, immagini e tecniche associate*  
Area della Ricerca, CNR, Pisa 27–28 giugno 2001

## **MICRO-IMAGING CON SORGENTI DI RAGGI X DA PLASMI PRODOTTI DA LASER**

Leonida A. GIZZI, Alessandro BARBINI, Marco GALIMBERTI<sup>☆</sup>,  
Antonio GIULIETTI, Danilo GIULIETTI<sup>☆</sup>, Luca LABATE<sup>⊕</sup>,  
Roberto NUMICO, Paolo TOMASSINI

Laboratorio di Irraggiamento con Laser Intensi, IFAM  
Area della Ricerca CNR, Via G. Moruzzi, 1 - 56124 Pisa, Italy

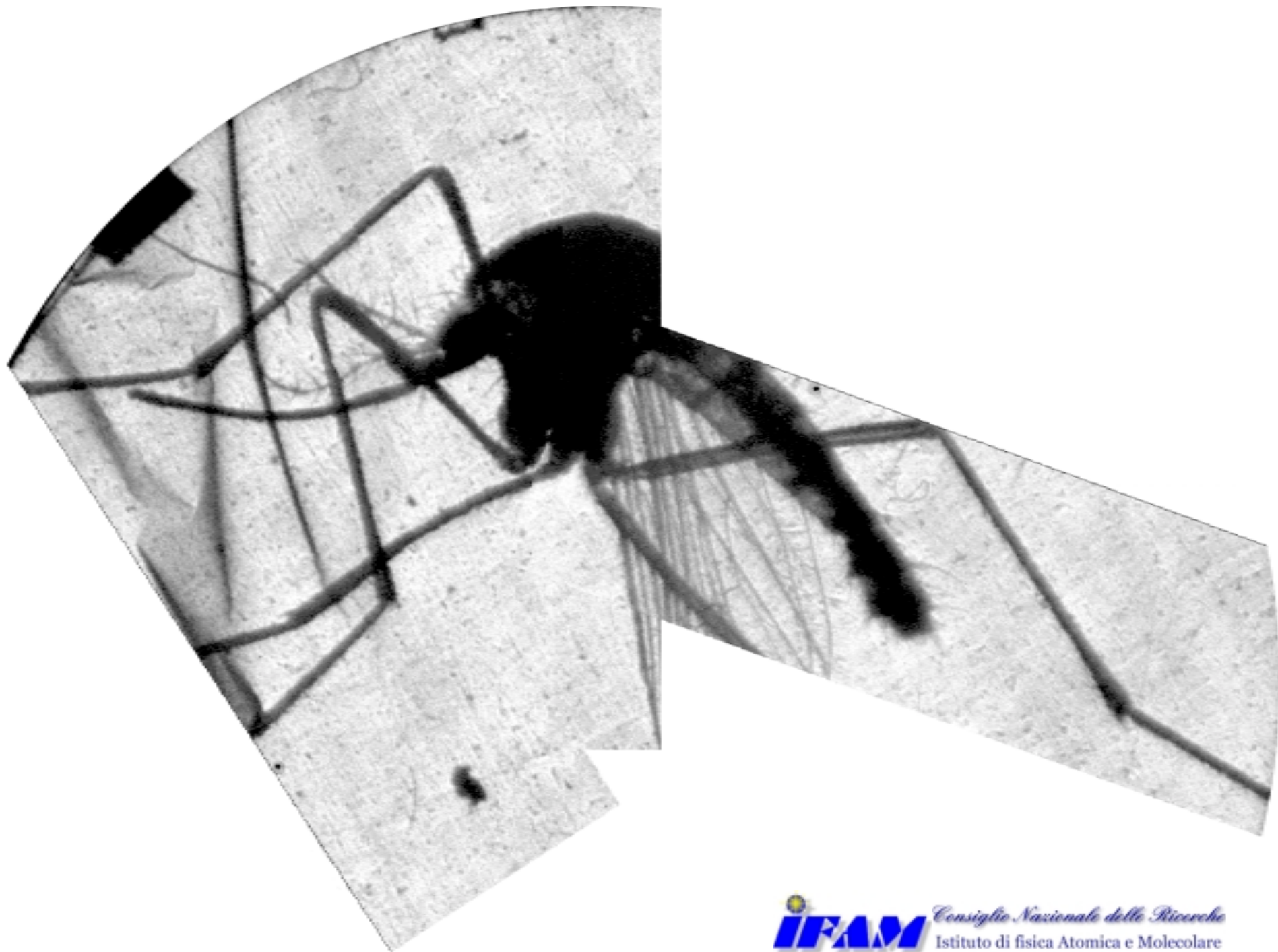
<sup>☆</sup> anche Dipartimento di Fisica e INFM - Univ. Pisa.

<sup>⊕</sup> anche Dipartimento di Fisica - Univ. Bologna.



*Consiglio Nazionale delle Ricerche*  
Istituto di fisica Atomica e Molecolare







# SOMMARIO

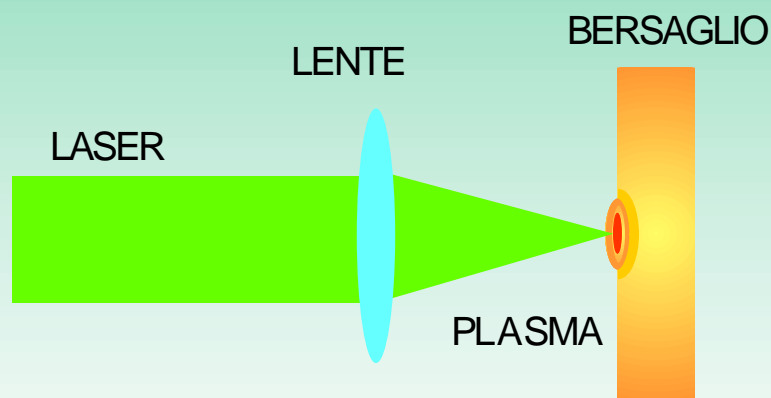


# SOMMARIO

- Generazione di micro-plasmi tramite laser di alta potenza
- Emissione di radiazione X da plasmi-laser
- Spettroscopia X con risoluzione spaziale e temporale
- PLX - la sorgente X da plasmi-laser dell'IFAM
- Prime applicazioni alla microscopia
- Prospettive e conclusioni.

# PLASMI PRODOTTI DA LASER

*I parametri fisici del plasma dipendono dalla durata, dalla lunghezza d'onda e dall'intensità sul bersaglio della radiazione laser*



PLASMA TRANSVERSE SIZE 10  $\mu\text{m}$  to  $\approx 1$  mm

EXPANSION VELOCITY  $\approx 10^6 - 10^7$  cm/s

ELECTRON TEMPERATURE 100 eV to  $\approx 1000$  eV

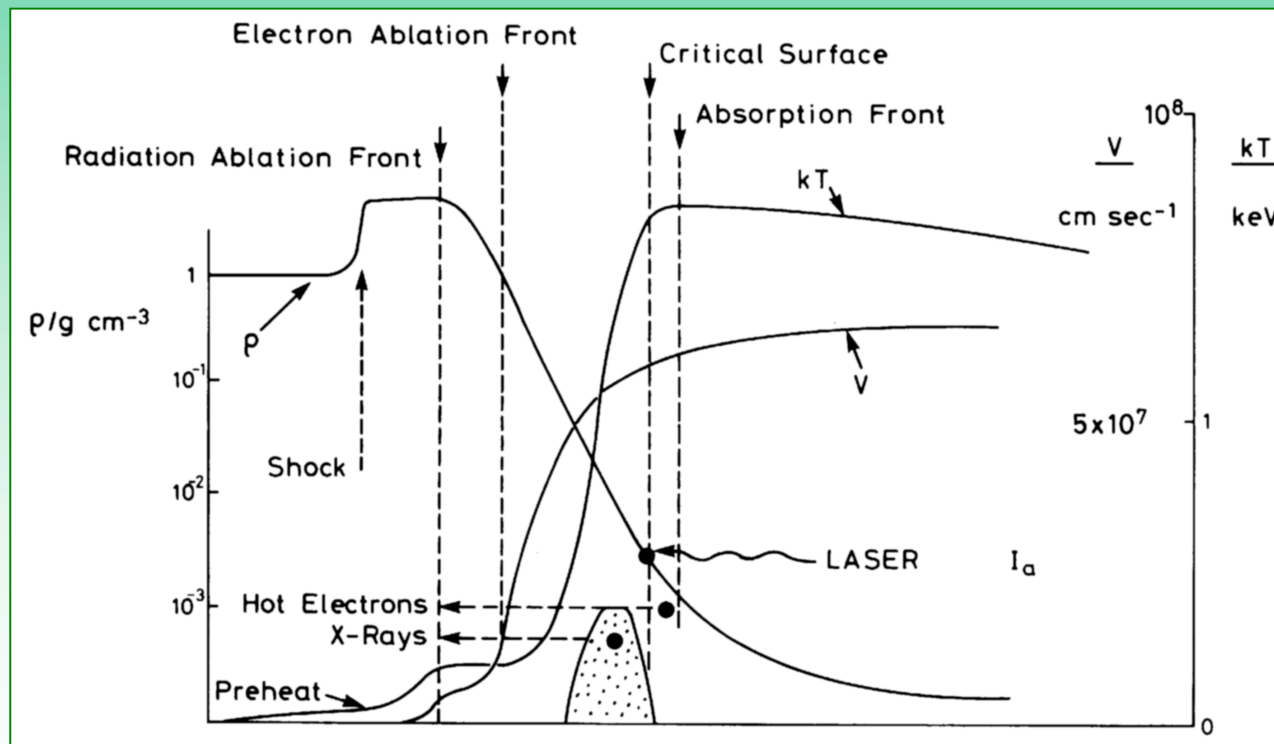
ELECTRON DENSITY up to  $10^{24}$  cm $^{-3}$

ION TEMPERATURE  $\leq T_e$

ION DENSITY  $\approx N_e$

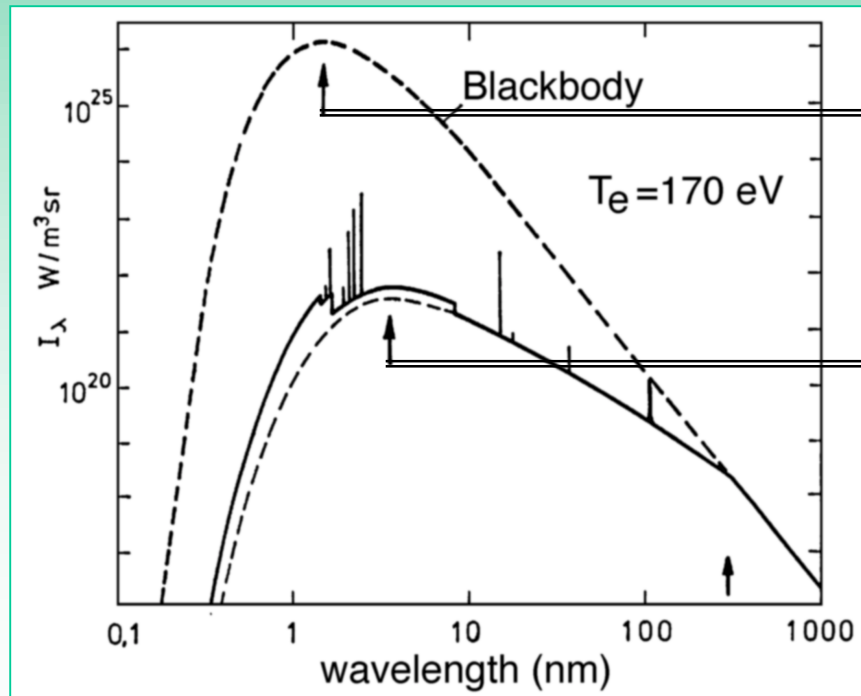
# INTERAZIONE LASER-MATERIA

*La formazione del plasma avviene grazie al trasferimento di energia dall'onda elettromagnetica alla materia*



# MECCANISMI FONDAMENTALI DI EMISSIONE DI RADIAZIONE X

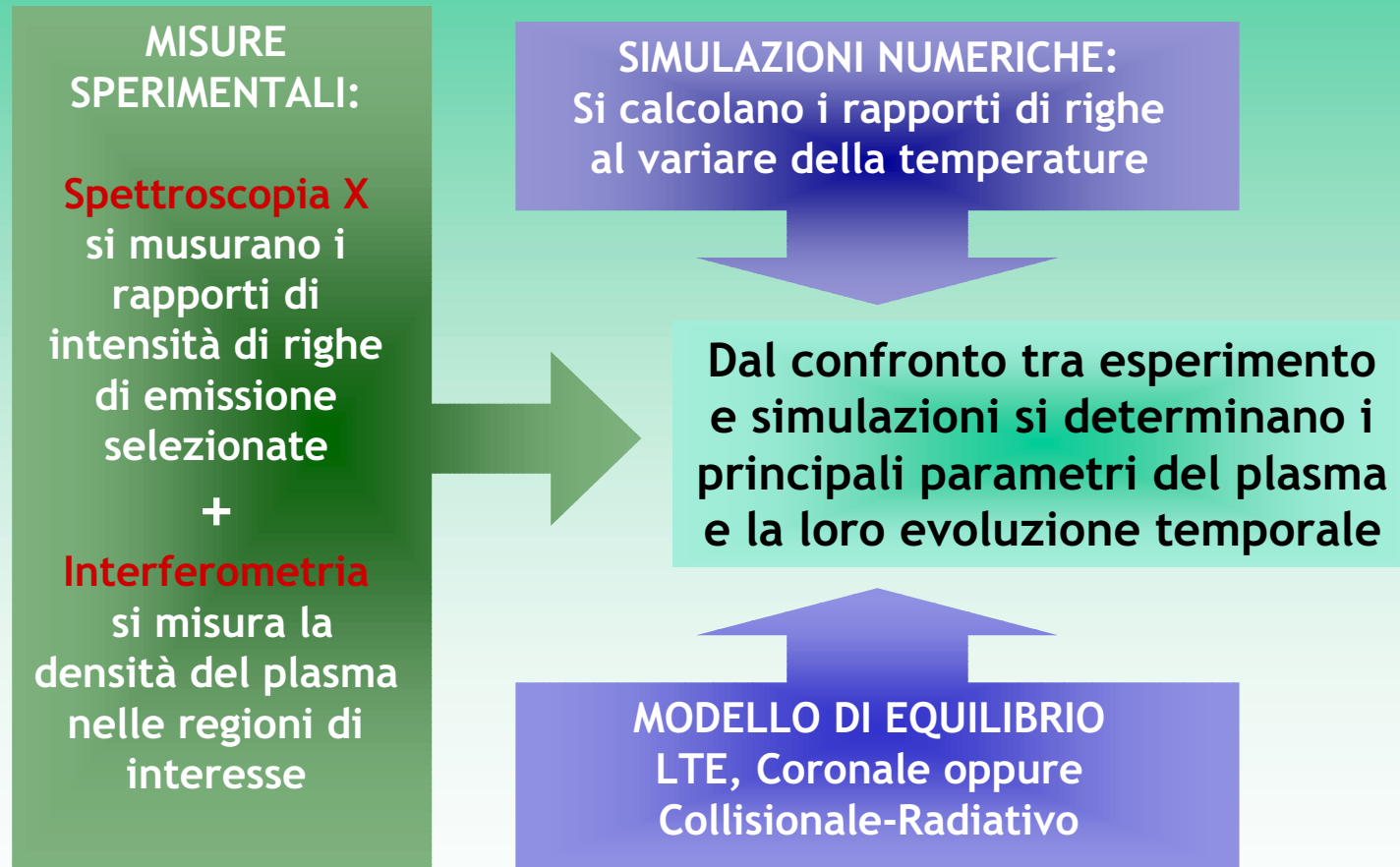
*In generale lo spettro di emissione di un plasma-laser consiste di righe di emissione sovrapposte ad una emissione di continuo dovuta al bremsstrahlung e alla ricombinazione*



$$\lambda_{\max} (\text{\AA}) = 2500/T_e (\text{eV})$$

$$\lambda_{\max} (\text{\AA}) = 6200/T_e (\text{eV})$$

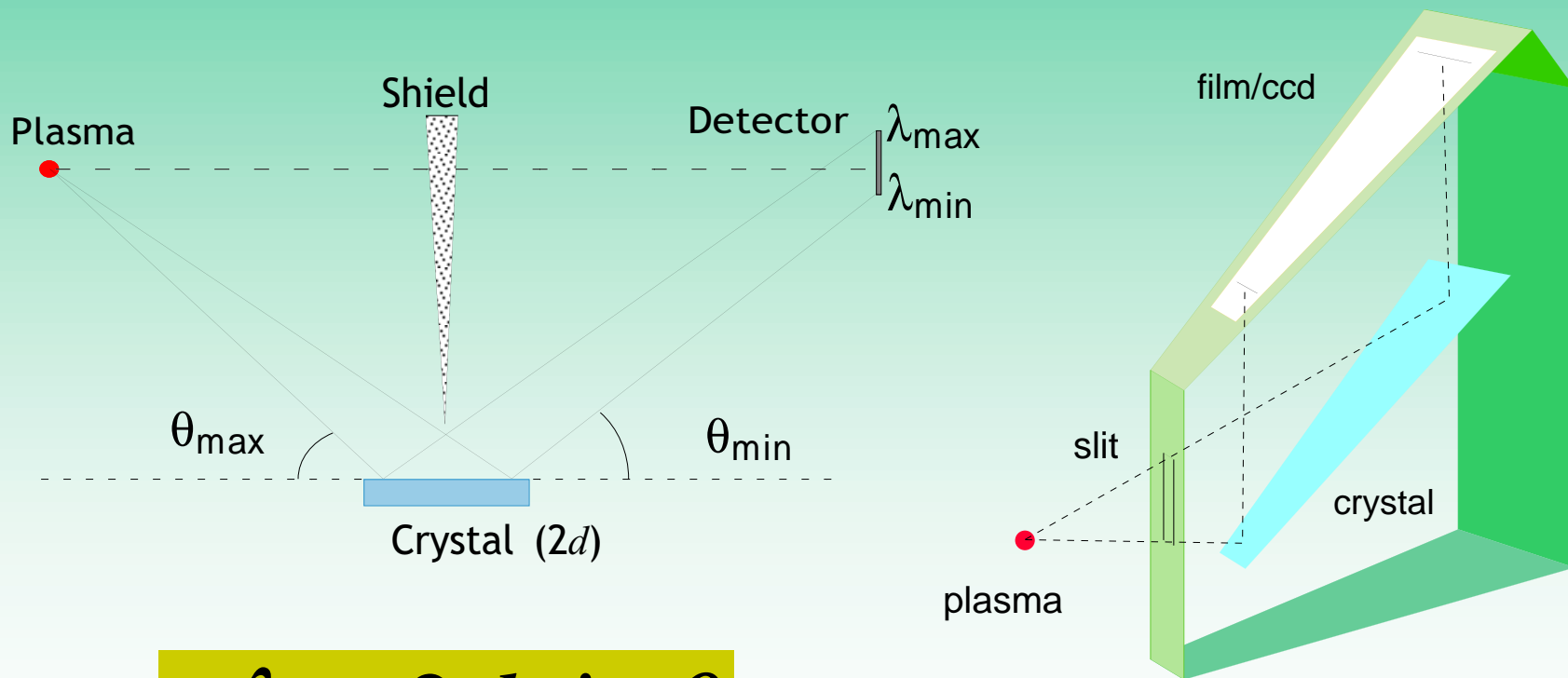
# CARATTERIZZAZIONE DI PLASMI-LASER





# SPETTROMETRO COMPATTO PER MISURE NELLA REGIONE 1-15 Å

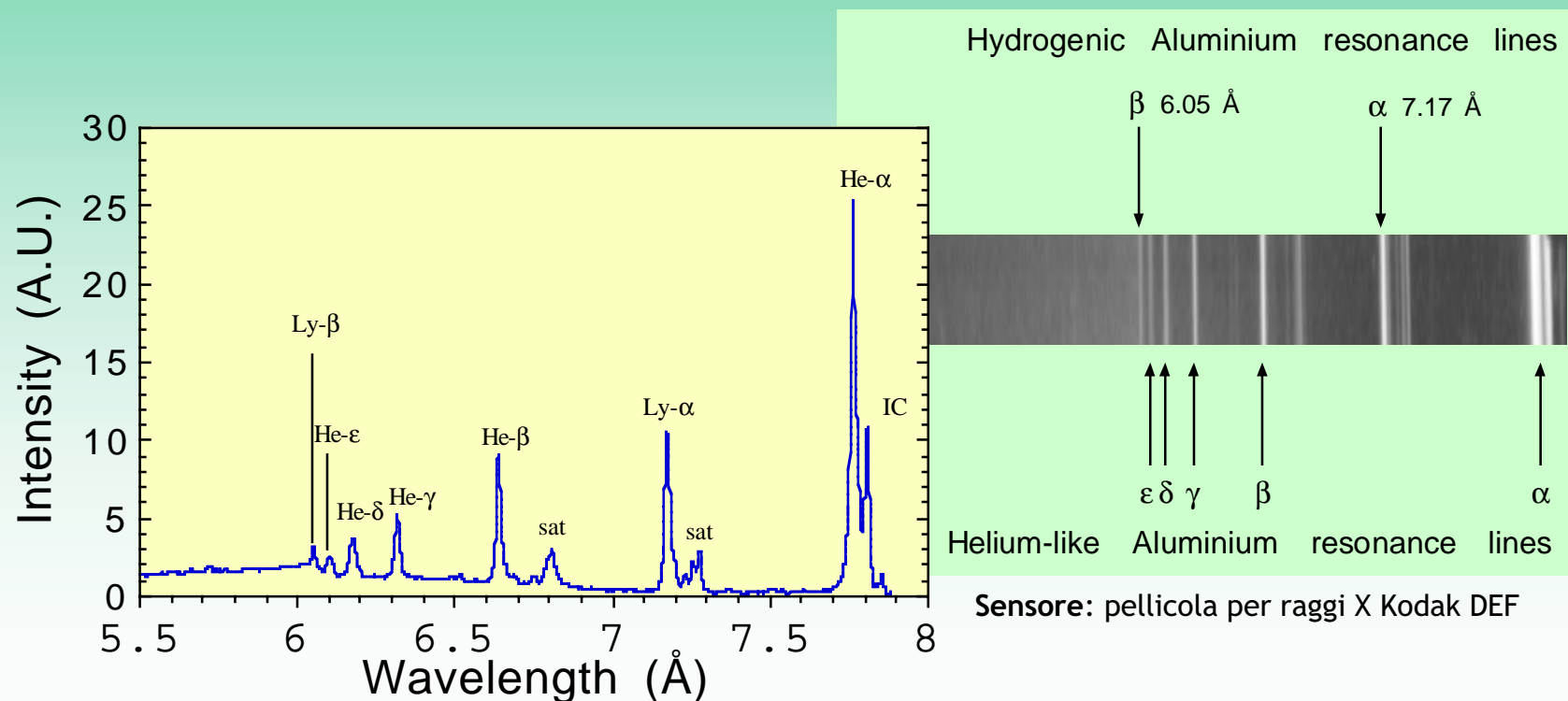
*Il metodo si basa sulla diffrazione alla Bragg da cristalli di caratteristiche note come Si, TlAP, KDP, ADP etc.*



$$n\lambda = 2d \sin \theta$$

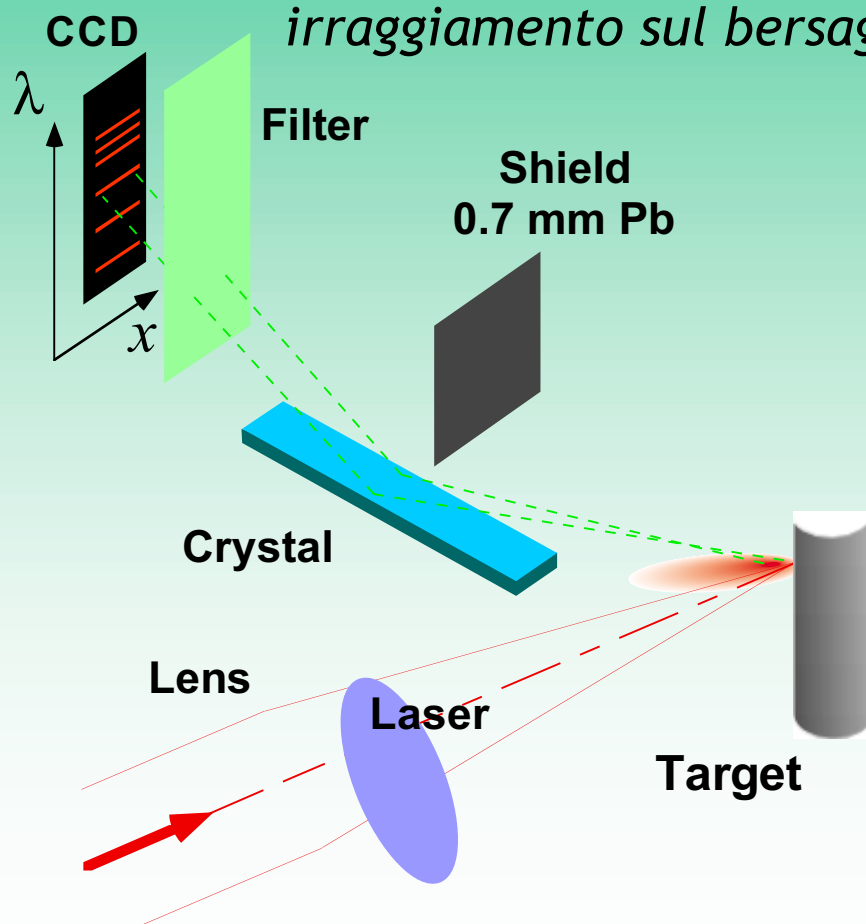
# SPETTRO DI PLASMA PRODOTTO DA IRRAGGIAMENTO LASER DI UN BERSAGLIO DI ALLUMINIO

*In questo caso il plasma è stato prodotto da un impulso di 3ns e l'intensità di irraggiamento sul bersaglio era  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>*



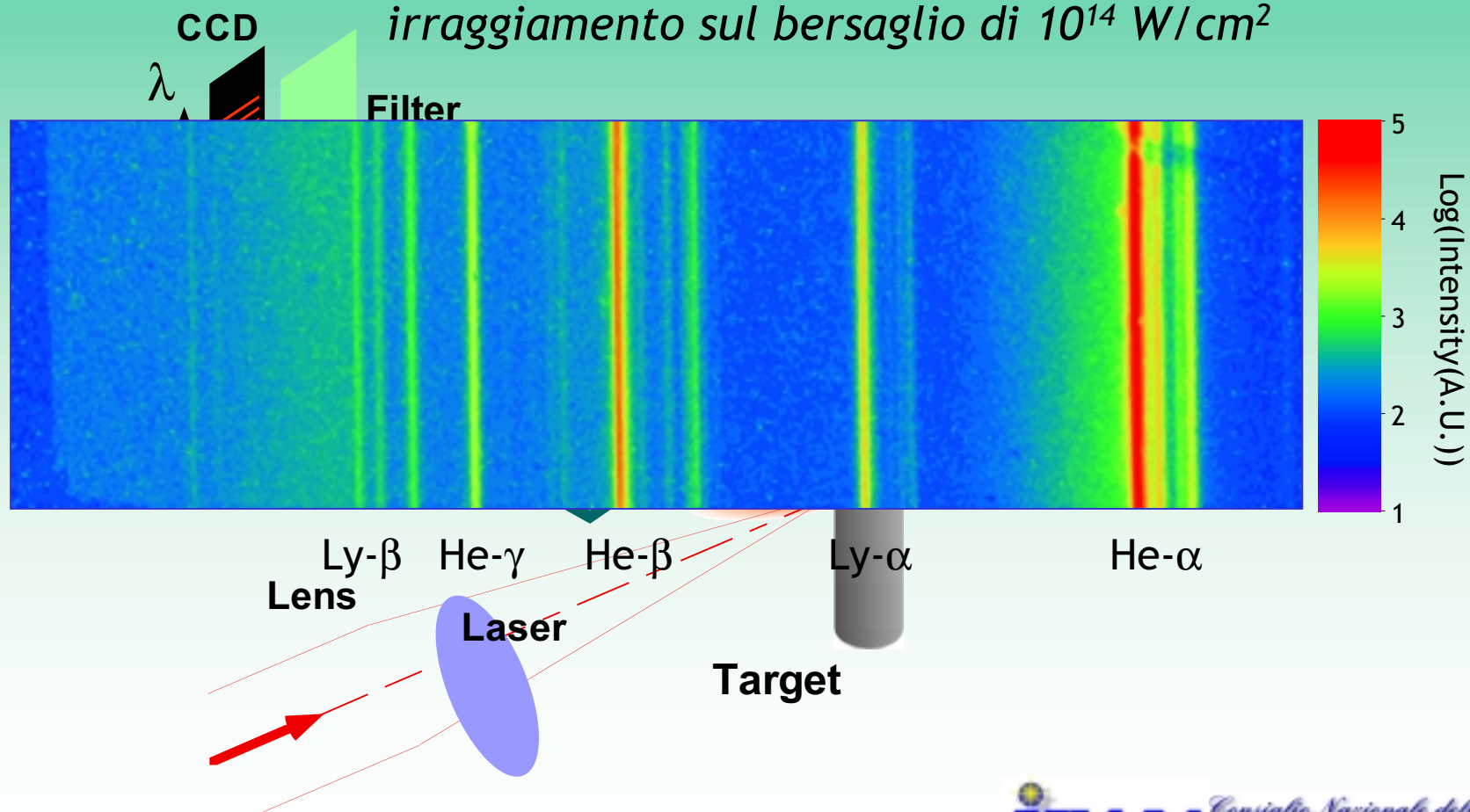
# SPETTRO DI PLASMA DI ALLUMINIO OTTENUTO CON CCD AD ALTA DINAMICA

*Plasma prodotto da un impulso di 3ns con una intensità di  
irraggiamento sul bersaglio di  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>*



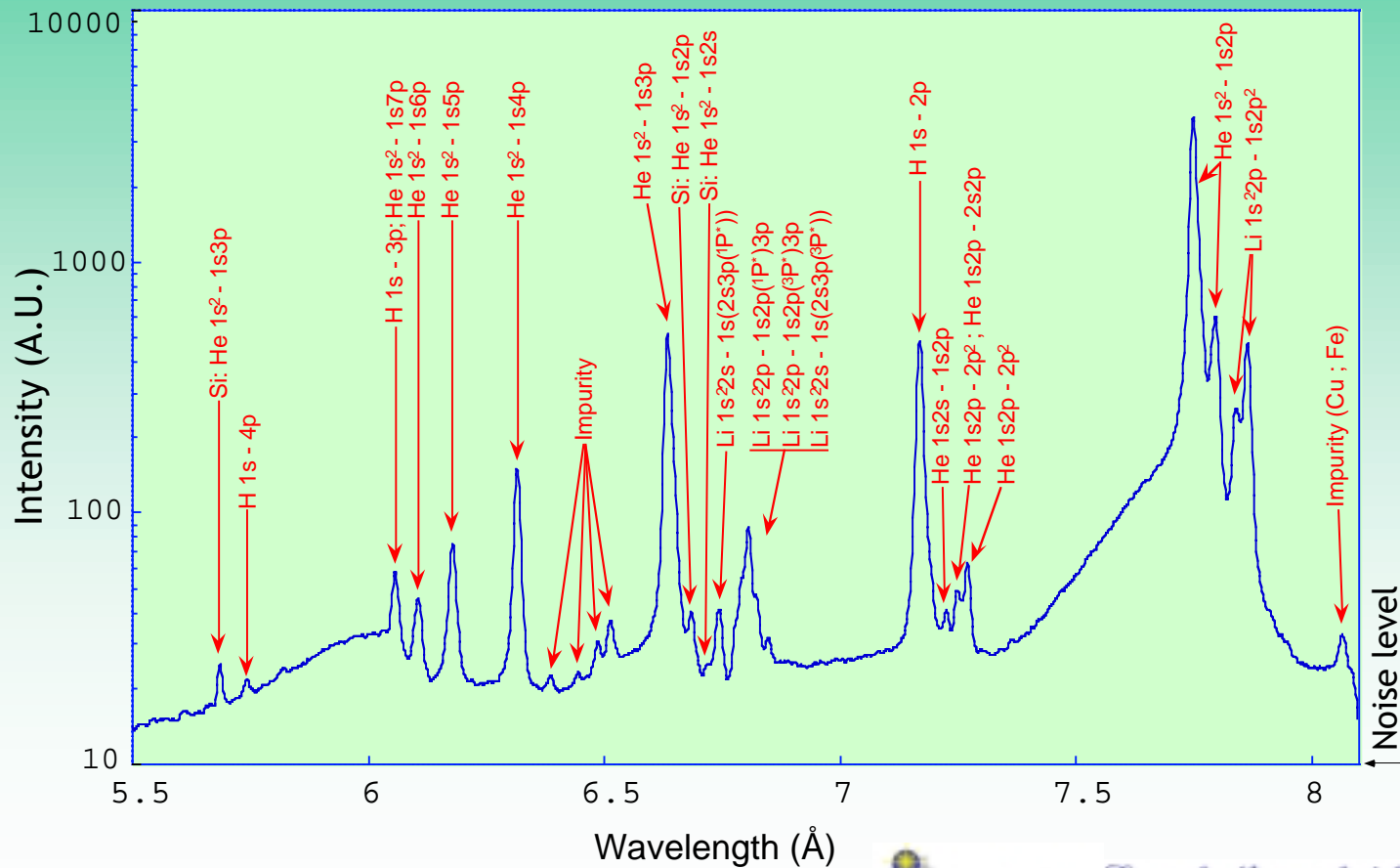
# SPETTRO DI PLASMA DI ALLUMINIO OTTENUTO CON CCD AD ALTA DINAMICA

*Plasma prodotto da un impulso di 3ns con una intensità di  
irraggiamento sul bersaglio di  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>*



# SPETTRO DI UNA PLASMA-LASER DI ALLUMINIO

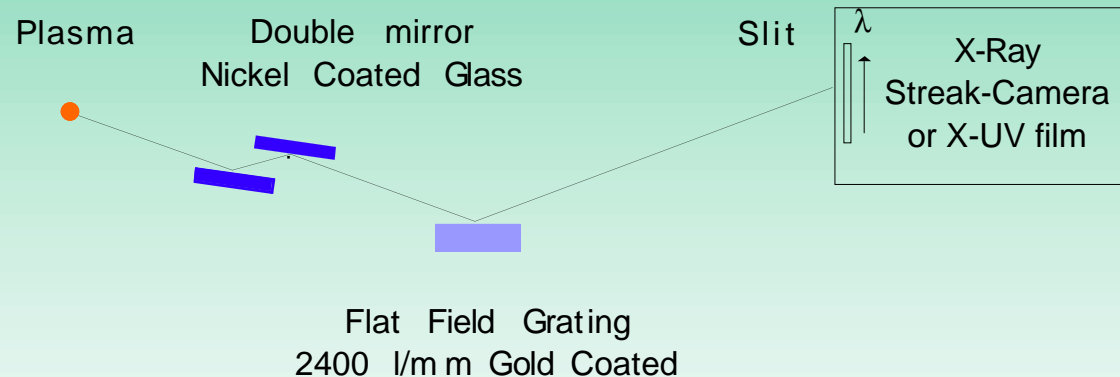
*Profilo dello spettro ottenuto con un sensore CCD ad alta dinamica*



(\*) Anticorodal: Al with addition of Si 1.4%; Fe 0.5%; Mg 0.6%; Mn 0.3%; Cr -0.1%; Zn 0.1%; Ti, Cu <0.1%

# SPETTROMETRO PER MISURE NELLA REGIONE 15-100 Å

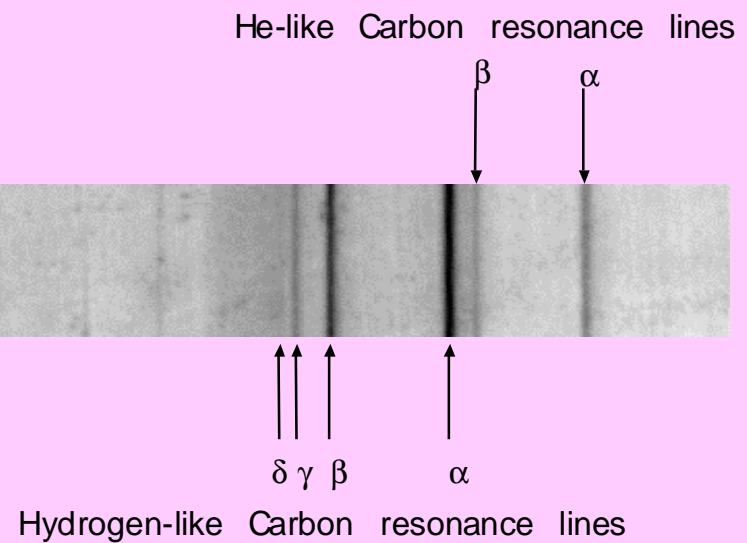
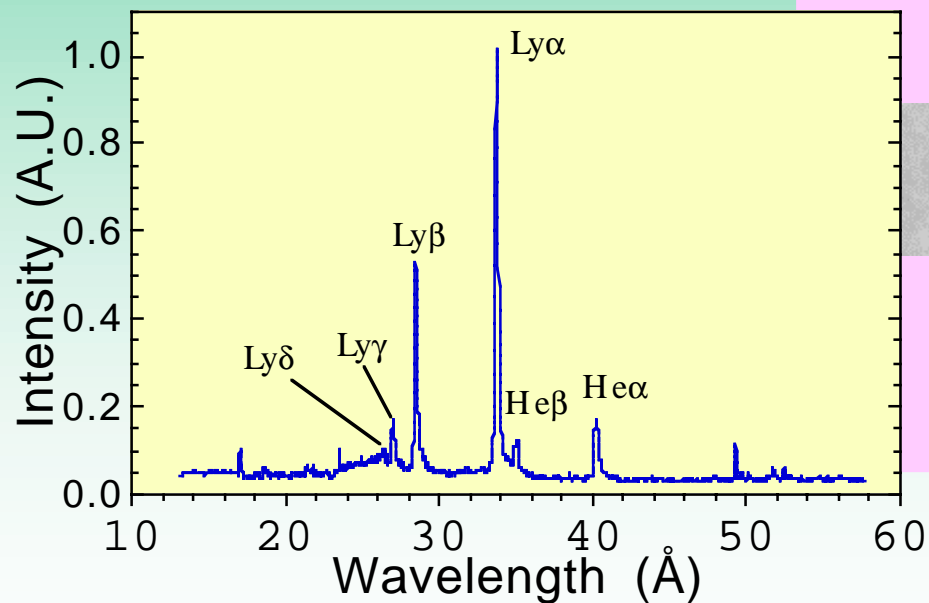
*Il metodo si basa sull'impiego di reticoli ad incidenza radente in grado di produrre uno spettro in condizione di flat field.*



Specchi ad incidenza radente vengono impiegati come filtri *passa-basso* per ridurre il contributo di ordini superiori al primo.

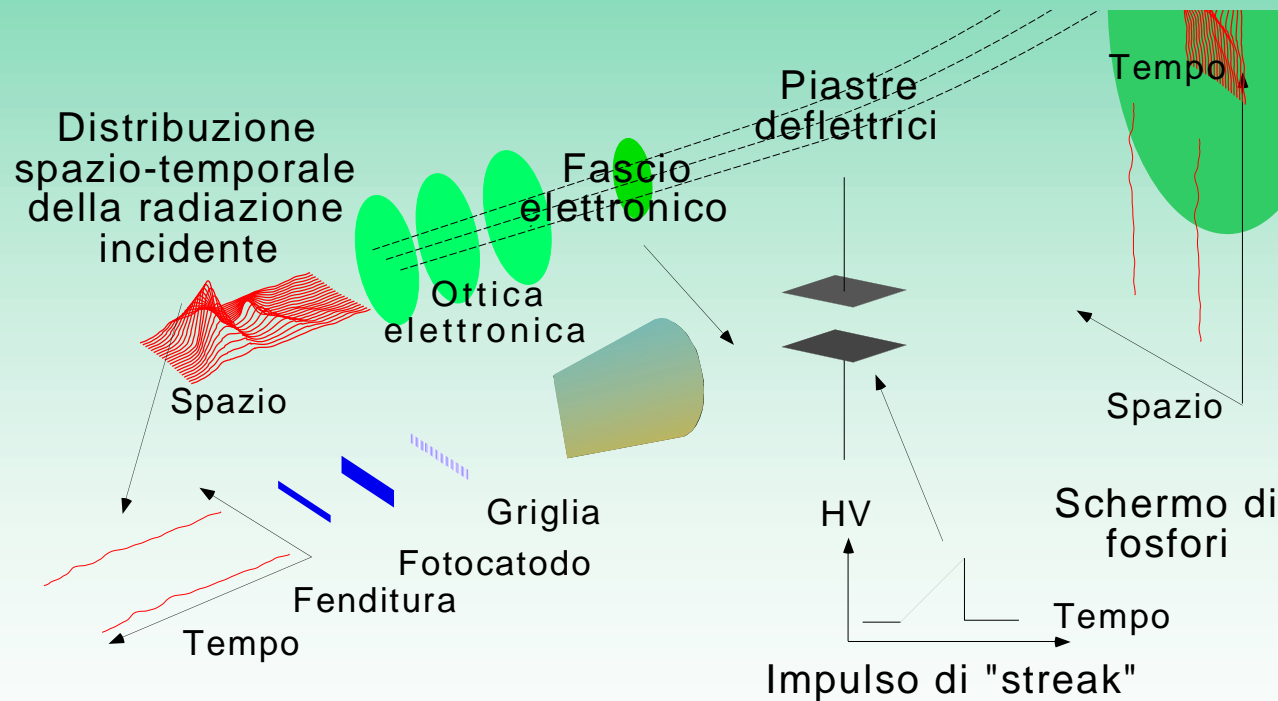
# SPETTRO DI PLASMA PRODOTTO DA IRRAGGIAMENTO LASER DI UN BERSAGLIO CONTENENTE CARBONIO

*In questo caso il plasma veniva prodotto da un impulso di 10ps (laser SPRITE-RAL) ed una intensità sul bersaglio di  $10^{17}$  W/cm<sup>2</sup>*



# SPETTROSCOPIA RISOLTA NEL TEMPO

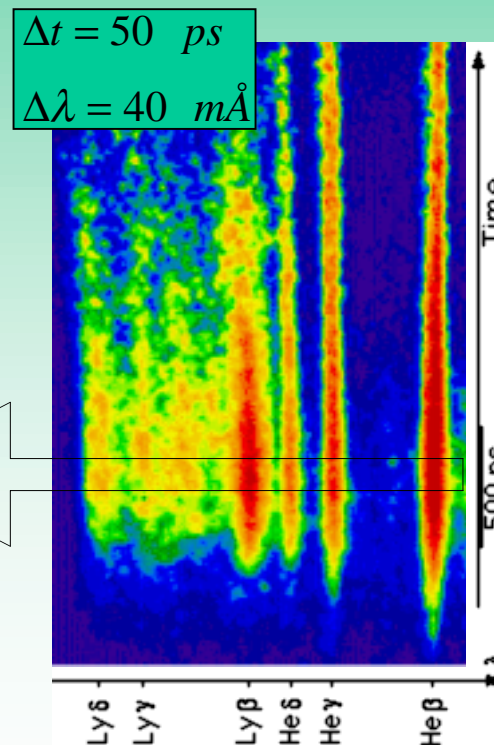
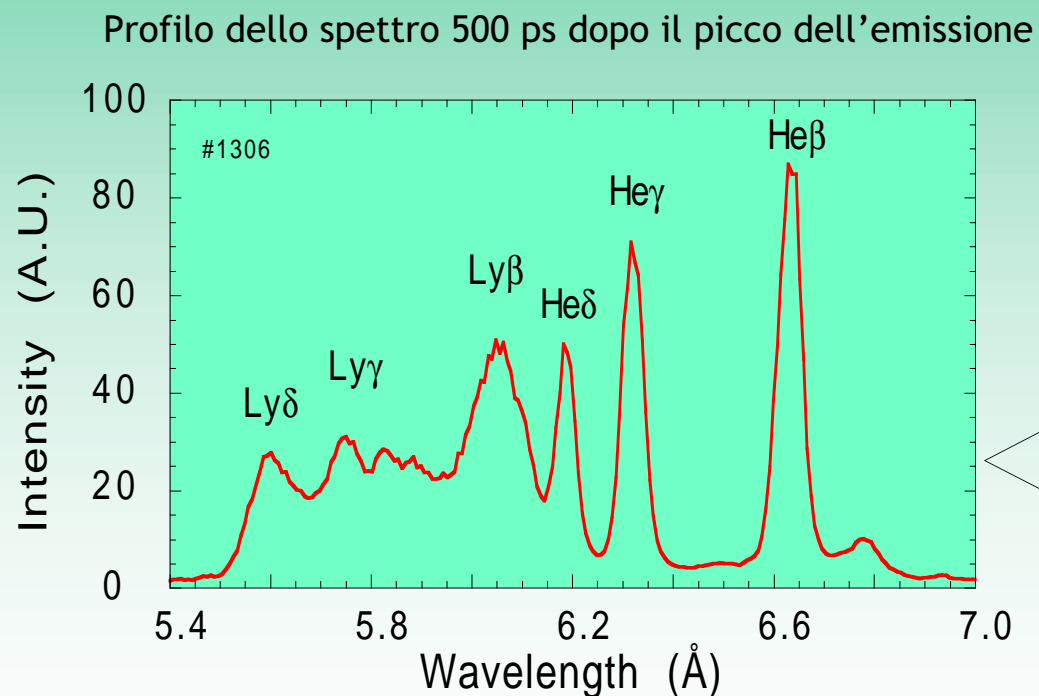
*L'andamento temporale delle varie componenti spettrali viene studiato tramite una streak-camera*





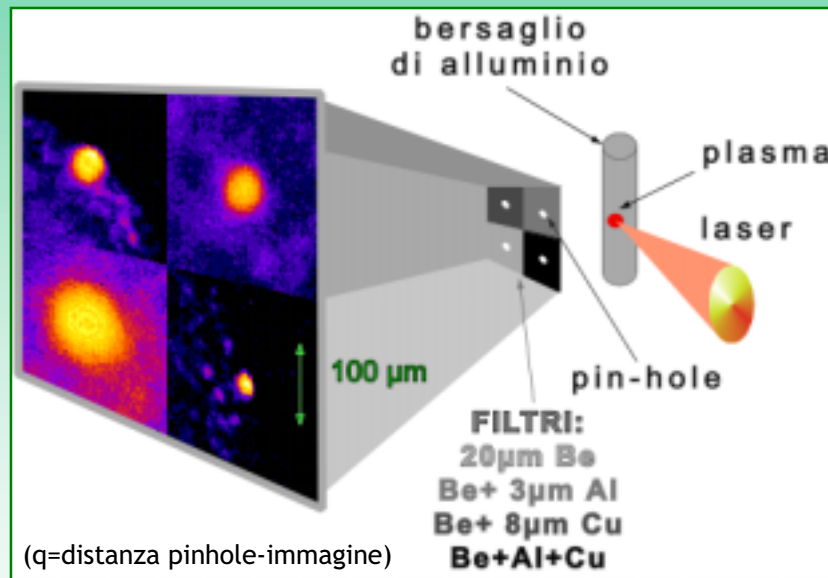
# SPETTRO RISOLTO NEL TEMPO DELL'EMISSIONE X DA UN PLASMA DI ALLUMINIO

*Il plasma viene generato dall'interazione di un impulso laser di 1ns  
(laser VULCAN-RAL) con un foglio sottile (0.6 $\mu$ m) di alluminio*



# $\mu$ -IMAGING DEL PLASMA: PIN-HOLE CAMERA

*Una stima grossolana delle dimensioni del plasma può essere ottenuta semplicemente con la tecnica della camera oscura*



L'impiego di array di pin-hole con filtri differenti consente di misurare le dimensioni efficaci del plasma in differenti regioni spettrali di radiazione X

Diametro ottimale del pin-hole

$$d_{ph} = \sqrt{2.44 \lambda q / (1 + M)}$$

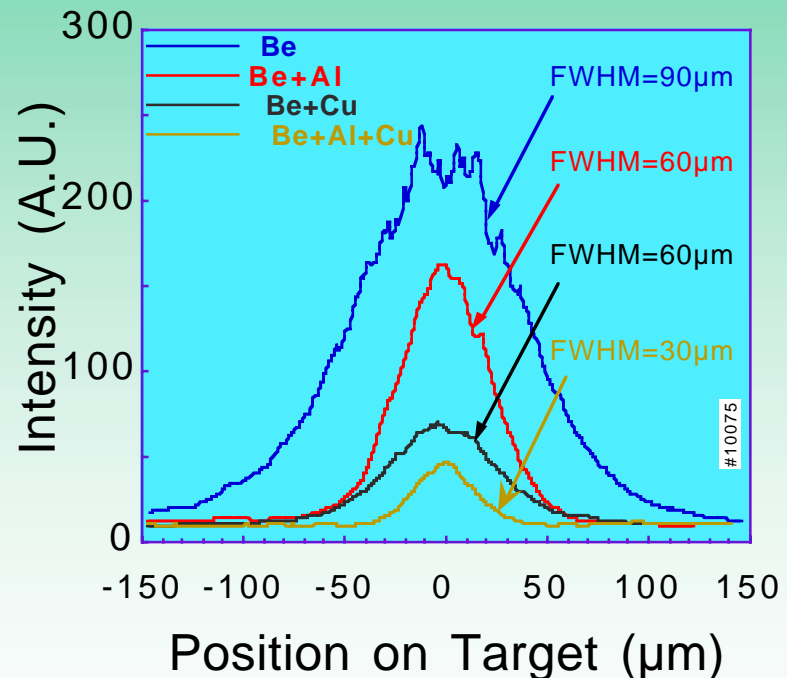
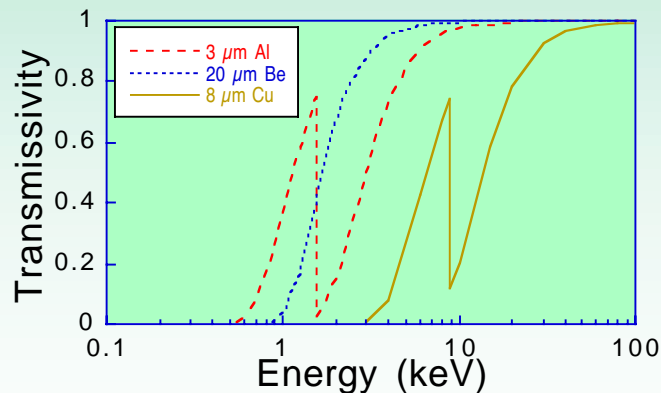
Risoluzione spaziale

$$\Delta x_{plasma} = d_{ph} (1 + 1/M)$$

# DIPENDENZA SPETTRALE DELLE DIMENSIONI EFFICACI DELLA SORGENTE

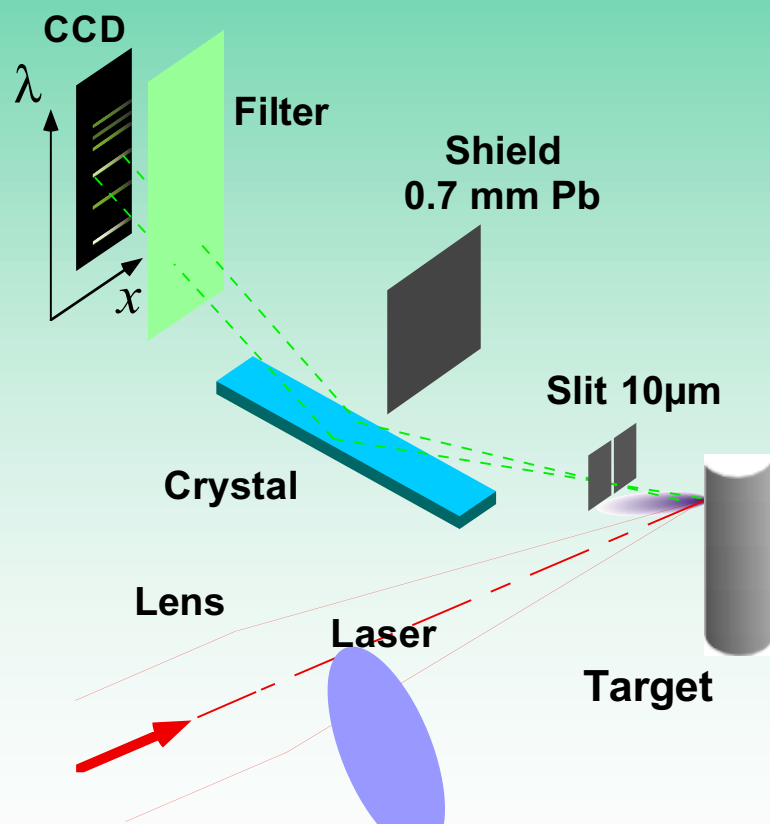
*In questo caso il plasma è prodotto da un bersaglio di alluminio irraggiato con un impulso laser di 12 ps in uno spot focale di 25 $\mu$ m di diametro.*

L'osservazione con una pin-hole camera a 4-pin-hole mostra come a filtri più "duri" corrispondano dimensioni efficaci via via più piccole.



# SPETTROSCOPIA CON RISOLUZIONE SPAZIALE

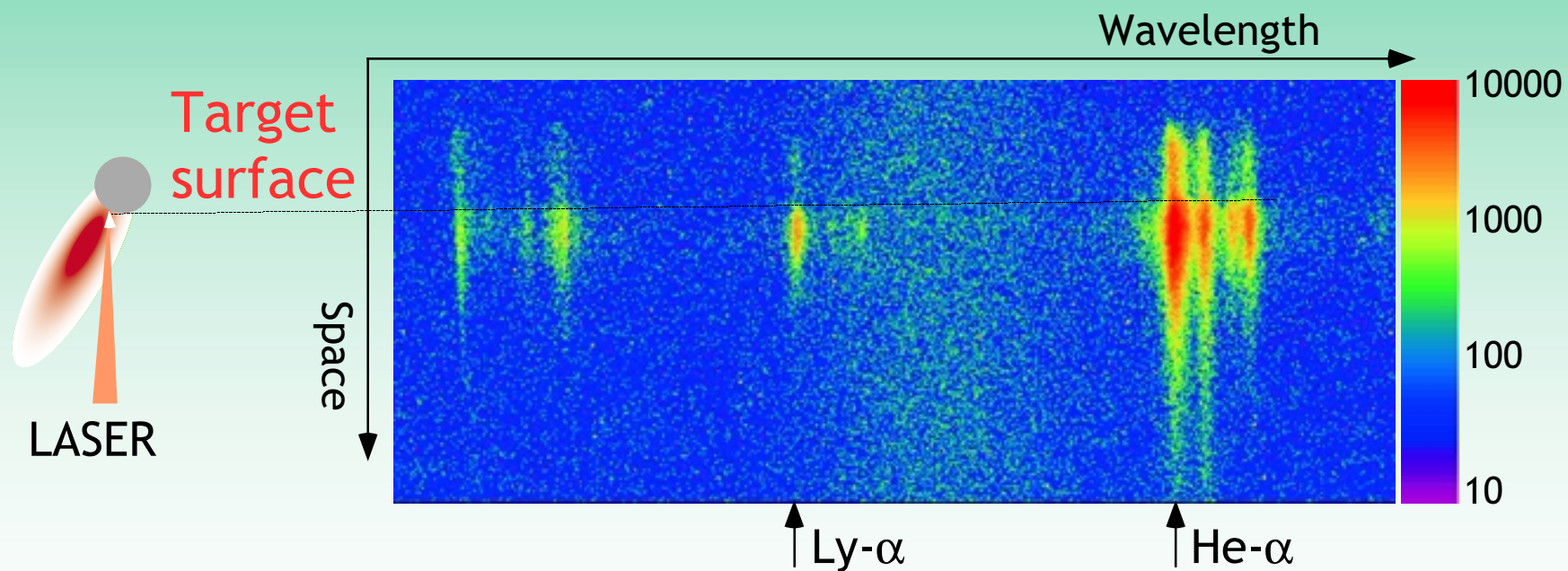
*La struttura spettrale della sorgente può essere determinata "risolvendo" spazialmente lo spettro tramite una micro-fenditura*



Con l'introduzione di una **micro-fenditura**, orientata parallelamente alla direzione di dispersione spettrale, si risolve anche spazialmente l'emissione nella direzione ad essa perpendicolare. La **risoluzione spaziale** è quella della "camera oscura" equivalente.

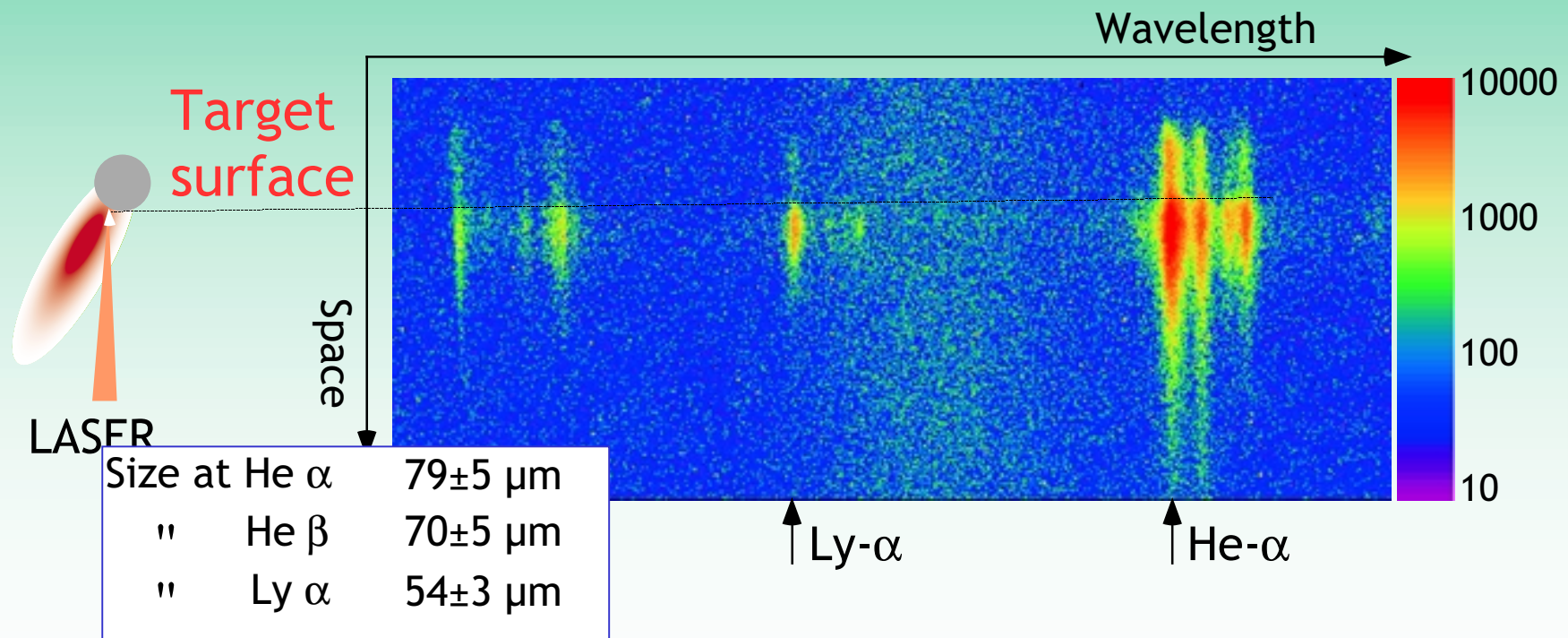
# SPETTRO DI UN PLASMA DI ALLUMINIO RISOLTO SPAZIALMENTE

*Il plasma prodotto da un impulso di 3ns focalizzato su un cilindro di Al, si espande in direzione perpendicolare alla superficie. Ad ogni riga spettrale corrisponde una immagine unidimensionale e monocromatica della sorgente.*



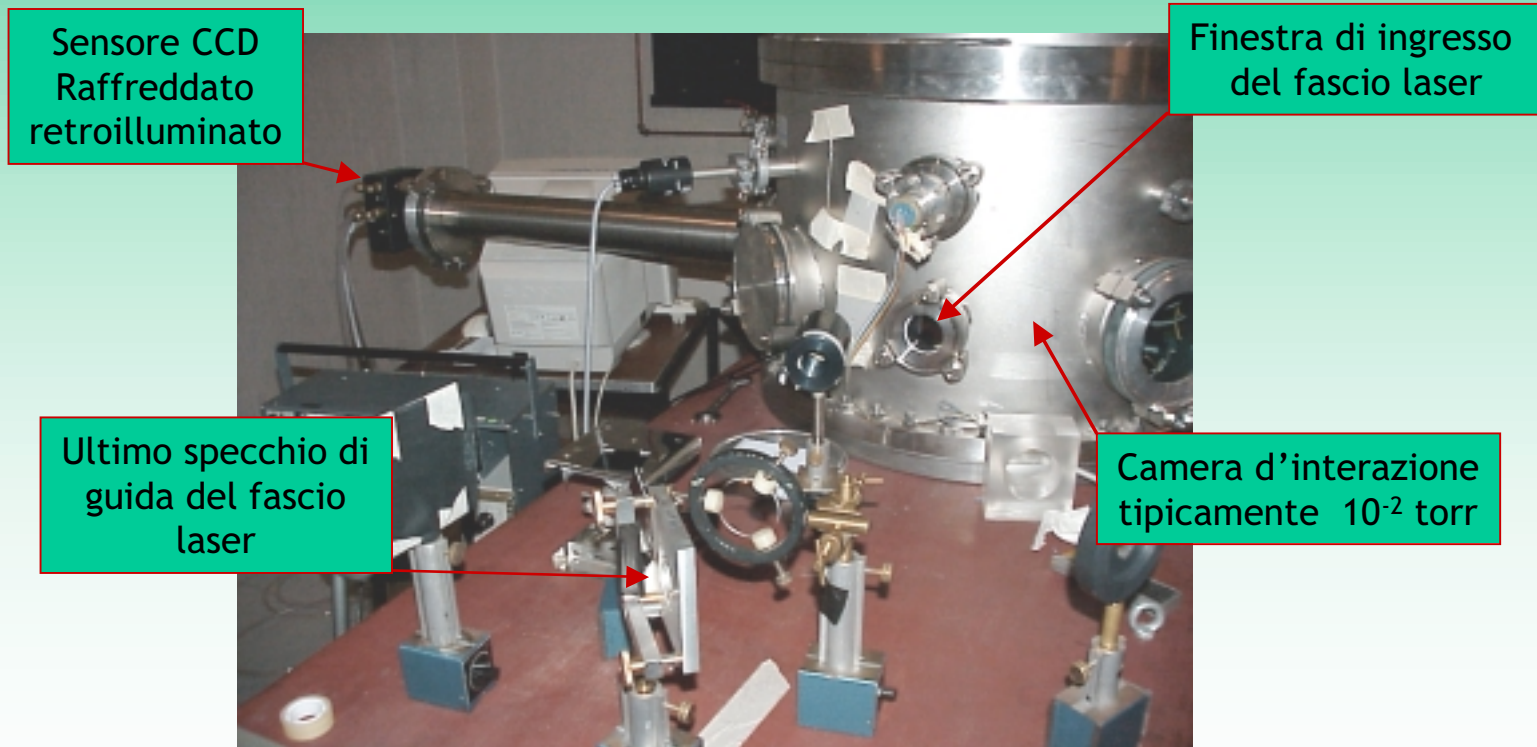
# SPETTRO DI UN PLASMA DI ALLUMINIO RISOLTO SPAZIALMENTE

*Il plasma prodotto da un impulso di 3ns focalizzato su un cilindro di Al, si espande in direzione perpendicolare alla superficie. Ad ogni riga spettrale corrisponde una immagine unidimensionale e monocromatica della sorgente.*

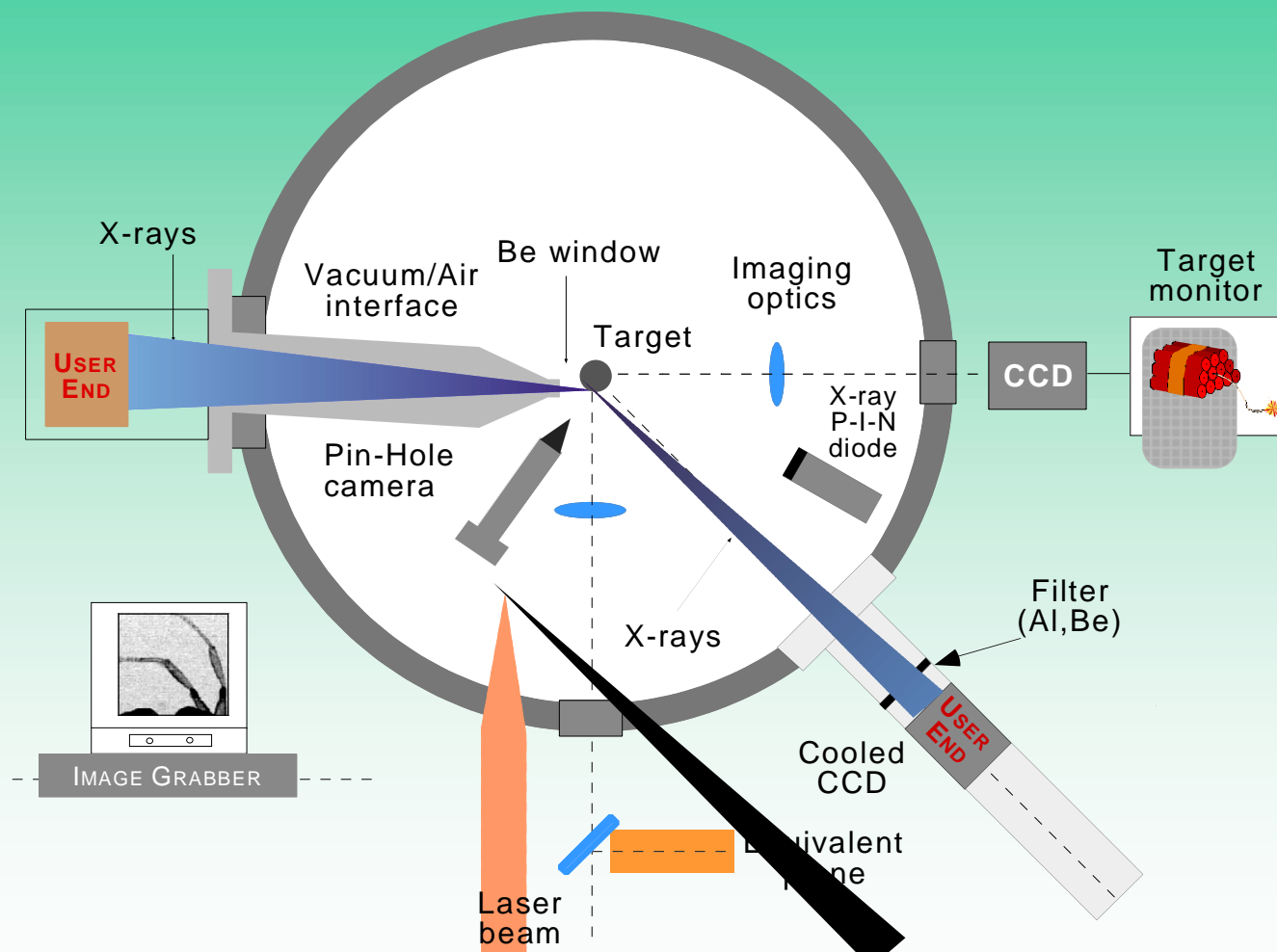


# PLX - LA SORGENTE X DA PLASMI-LASER DELL'IFAM

*Il micro-plasma viene generato focalizzando l'impulso laser sulla superficie di un bersaglio cilindrico posto all'interno della camera di interazione.*

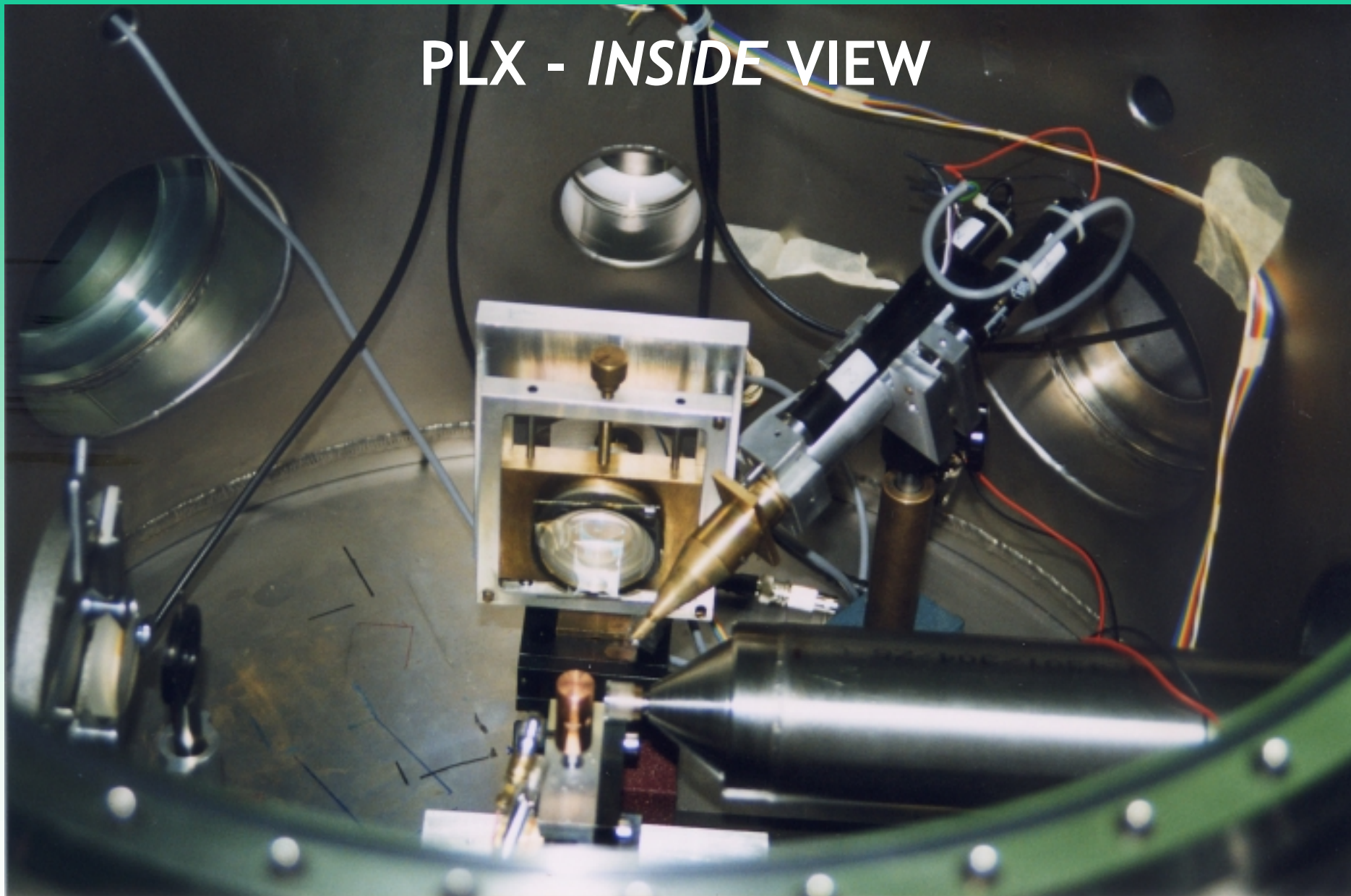


# PLX - LA SORGENTE X DA PLASMI-LASER DELL'IFAM

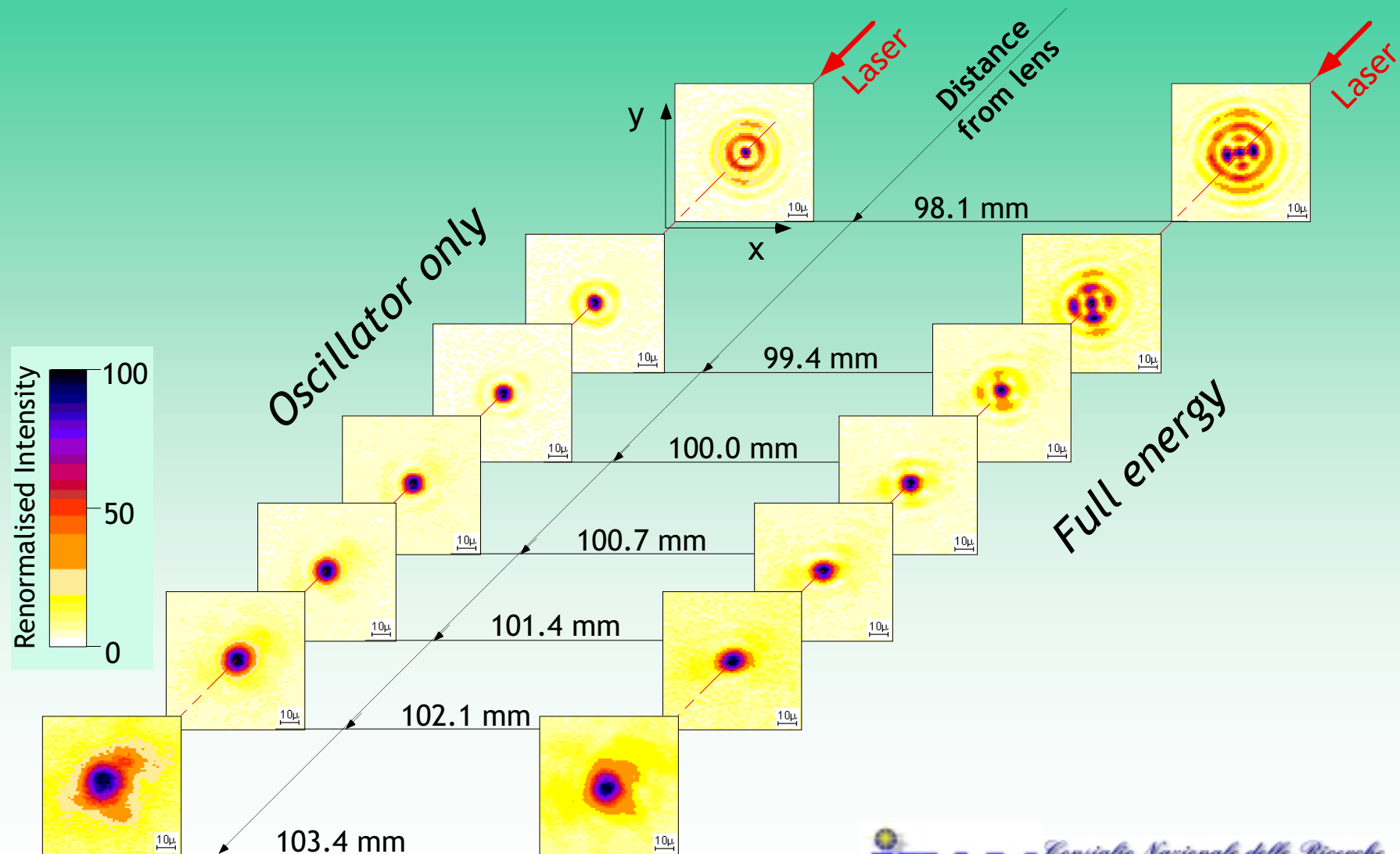




# PLX - INSIDE VIEW

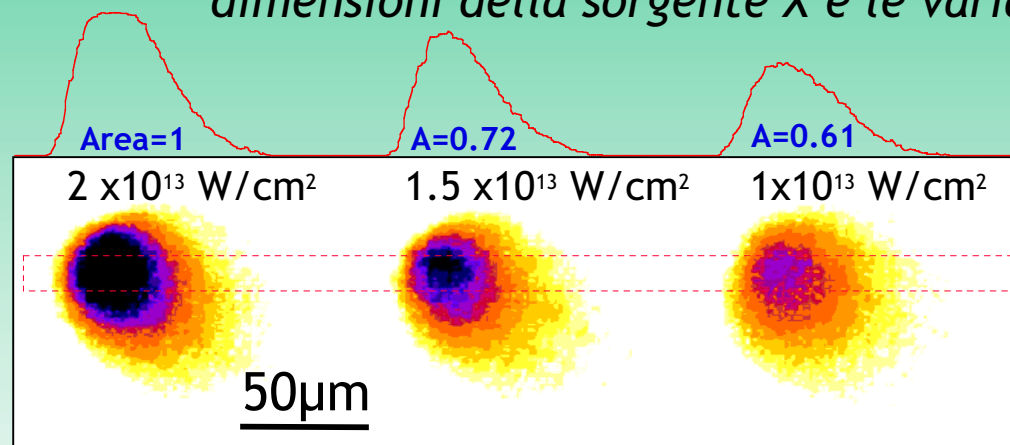


# PLX - CARATTERIZZAZIONE DELLO SPOT DEL LASER



# PLX - DIMENSIONI DELLA SORGENTE X

Le dimensioni efficaci della sorgente dipendono dalla *durata dell'impulso laser* e dalla *regione spettrale* considerata. Una pin-hole camera equipaggiata con una CCD standard viene impiegata per monitorare le dimensioni della sorgente X e le variazioni di intensità.



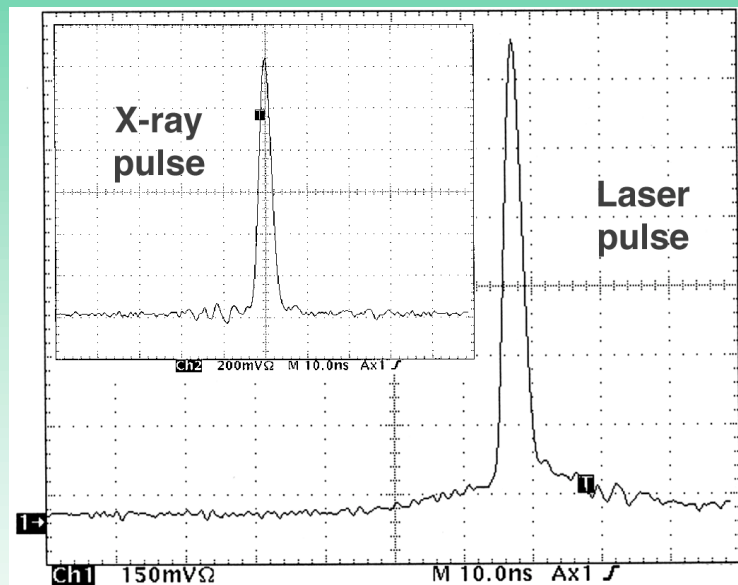
*Impulso laser di 3ns su bersaglio di rame.*

Per piccole variazioni, l'intensità della sorgente cresce linearmente con l'intensità della radiazione laser sul bersaglio.

Le dimensioni dipendono dall'espansione idrodinamica del plasma:  
*Dimensioni sorgente  $\approx$  durata impulso laser  $\times$  velocità del suono*

# PLX - DURATA DELL'IMPULSO DI RAGGI X

*Per ogni impulso laser viene generato un impulso di radiazione X di durata paragonabile a quella dell'impulso laser.*

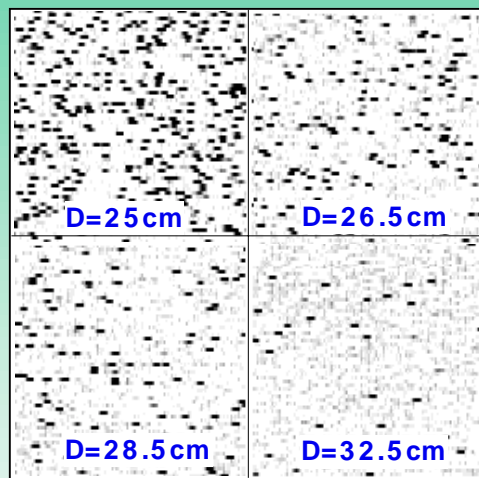


La durata e l'intensità relativa dell'impulso di radiazione X vengono monitorate colpo su colpo tramite **diodi P-I-N** equipaggiati con filtri ottimizzati per diverse regioni spettrali. Per impulsi laser di 3-7 ns, la durata dell'impulso X è sostanzialmente quella dell'impulso laser.

Con il laser Q-switch come sorgente primaria, la durata dell'impulso di radiazione X di PLX può essere scelta tra **3ns e 7ns**. Questa durata scende a **≈50 ps** nel caso del laser mode-locked.

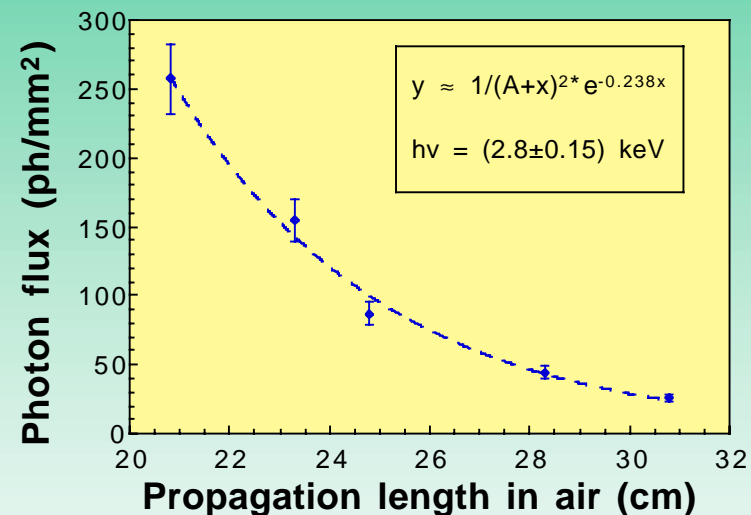
# PLX - MISURE DIRETTE DI FLUSSO DI FOTONI X

*Il flusso di fotoni incidente su un campione (a pressione atmosferica) viene misurato direttamente impiegando CCD in regime di singolo fotone.*



Cu target - 3ns -  $2 \times 10^{13}$  W/cm<sup>2</sup>

I fotoni che si propagano in aria, oltre la finestra di berillio, vengono assorbiti rapidamente dall'aria.



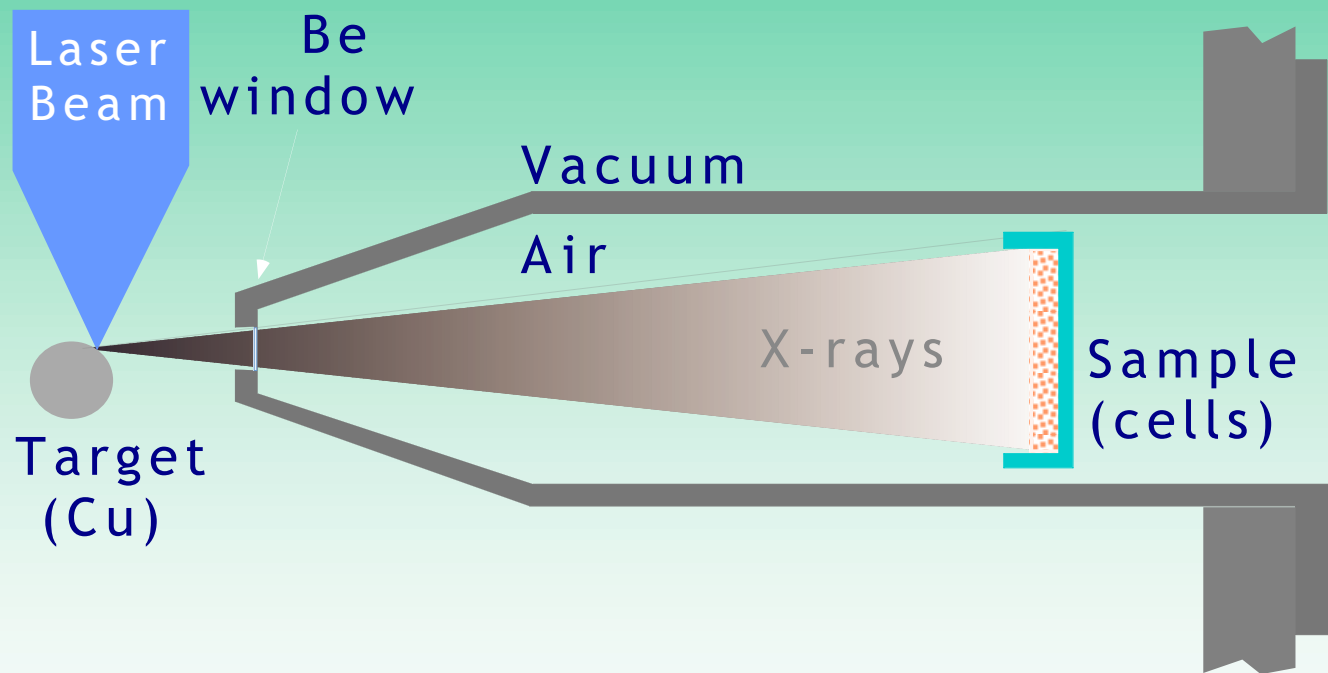
Nel caso di un bersaglio di Cu, l'energia dei fotoni dopo la propagazione in aria è di  $\approx 3$  keV mentre il flusso alla distanza minima accessibile è di circa  $10^7$  ph/cm<sup>2</sup>

# PLX: QUADRO RIASSUNTIVO

- Spettro: 1-10 keV, in base al bersaglio impiegato;
- Durata: 50 ps oppure 3-7ns, in base alla sorgente laser;
- Dimensioni tipiche a 1 keV: 20-25  $\mu\text{m}$ ;
- Distribuzione angolare: massimo (blando) lungo l'asse del plasma;
- Frequenza di ripetizione: dipende da quella del laser;
- Flusso disponibile per impulso (1-3 keV):  $10^{10}$  fotoni/ $\text{cm}^2$  ;
- Flusso disponibile a pressione atmosferica (3 keV):  $10^7$  fotoni/ $\text{cm}^2$  ;

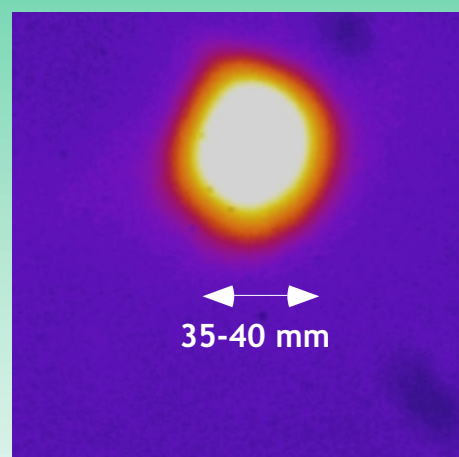
# PLX: APPLICAZIONI ALLO STUDIO DEL DNA

*Il campione, costituito da globuli bianchi, viene sottoposto ad irraggiamento con dosi controllate di radiazione X, direttamente in aria.*

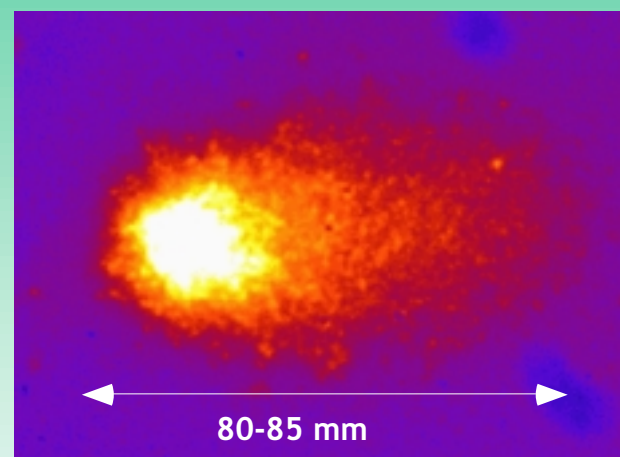


# PLX: TEST DELLA COMETA SU NUCLEI CON DNA DANNEGGIATO

*Il danno indotto dalla radiazione X sul DNA viene determinato tramite microscopia a fluorescenza di campioni sottoposti ad elettroforesi.*



Nucleo non danneggiato (classe 1)



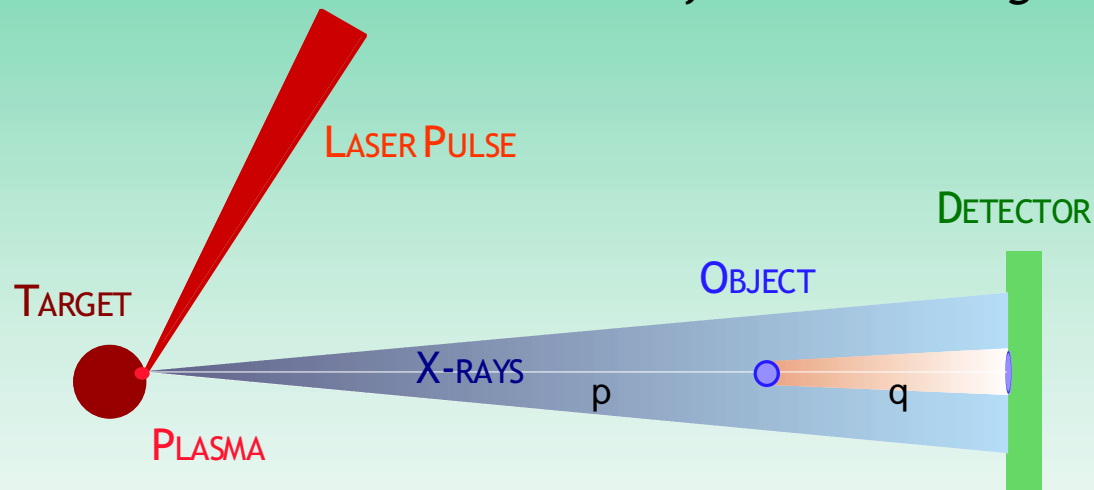
Nucleo danneggiato (classe 3)

L'entità del danno e della successiva riparazione viene valutata misurando la lunghezza della "coda della cometa"



# PLX: MICRO-IMAGING A SINGOLO IMPULSO

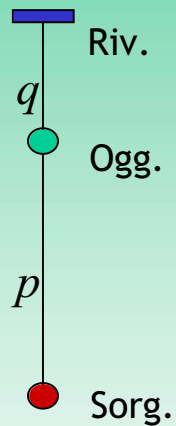
*Grazie alle ridotte dimensioni della zona di emissione X e all'elevata intensità, è possibile realizzare micro-imaging con elevata risoluzione spaziale e con un singolo impulso laser. La risoluzione spaziale ultima del sistema è limitata dal maggiore tra il limite diffrattivo ed il limite geometrico dovuto alle dimensioni finite della sorgente.*



Per ottenere la **migliore risoluzione** possibile, la geometria del sistema viene ottimizzata in base alle caratteristiche del sensore. Nel caso di impiego di sensori del tipo Charge Coupled Device, le **dimensioni del pixel** sono il parametro chiave.

# PLX: RISOLUZIONE SPAZIALE DEL MICROSCOPIO

Il dettaglio minimo osservabile,  $\delta_h$  dipende dalle dimensioni della sorgente,  $\delta_s$  e dalle dimensioni del pixel della CCD,  $\delta_p$ . La geometria del sistema è definita poi dalla distanza oggetto-sorgente,  $p$  e oggetto-rivelatore,  $q$ .



$$\delta_h = \frac{\max(\delta_s(M-1), \delta_p)}{M}, \quad M = 1 + \frac{q}{p}, \quad M > 1$$

$$\text{Se } M=1 \text{ (contatto)} \Rightarrow \delta_h = \delta_p$$

$$\text{Se } M \gg 1 \Rightarrow \delta_h \approx \delta_s$$

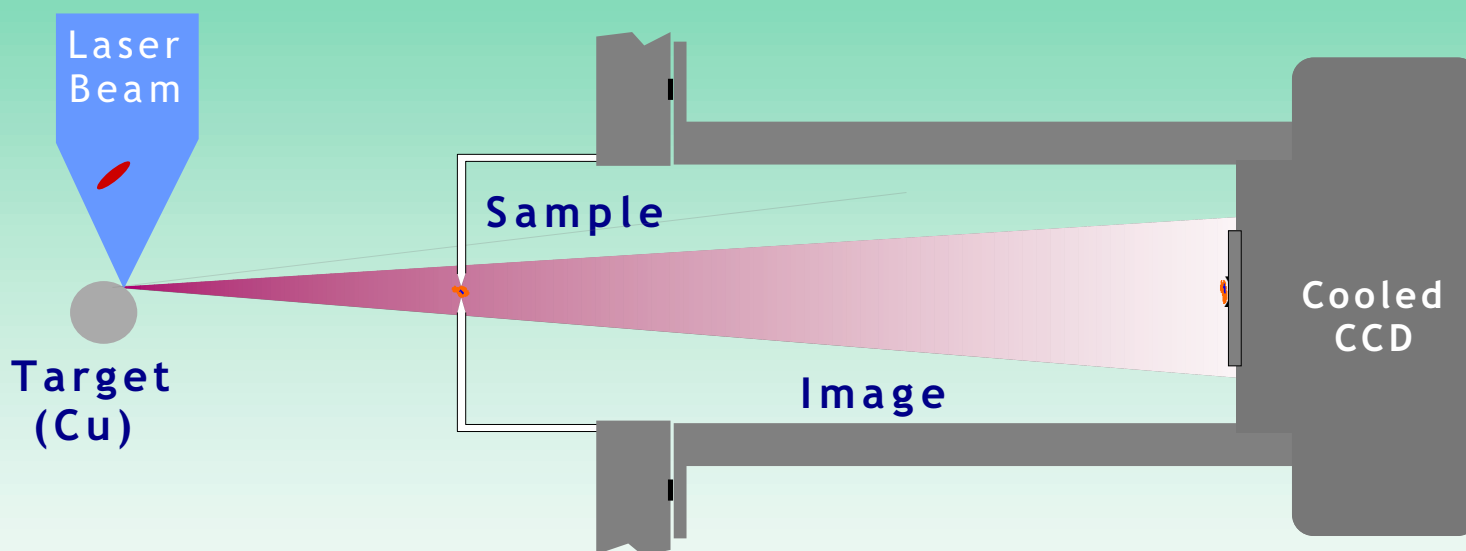
$$\text{Se } 1 \leq M < 1 + \delta_p/\delta_s \text{ e } \delta_p > \delta_s \Rightarrow \delta_h = \delta_p/M$$

L'uso di CCD con pixel di grandi dimensioni (e grande well capacity) riduce i problemi di saturazione tipici della rivelazione di radiazione X.

In realtà, nota la **forma della sorgente** (misurabile a varie lunghezze d'onda con pin-hole camera ad alta risoluzione), è possibile, entro certi limiti, adottare tecniche di **deconvoluzione** per aumentare ulteriormente la risoluzione.

# PLX: SET-UP SEMPLICE PER MICROSCOPIA "A PROIEZIONE"

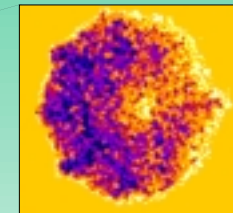
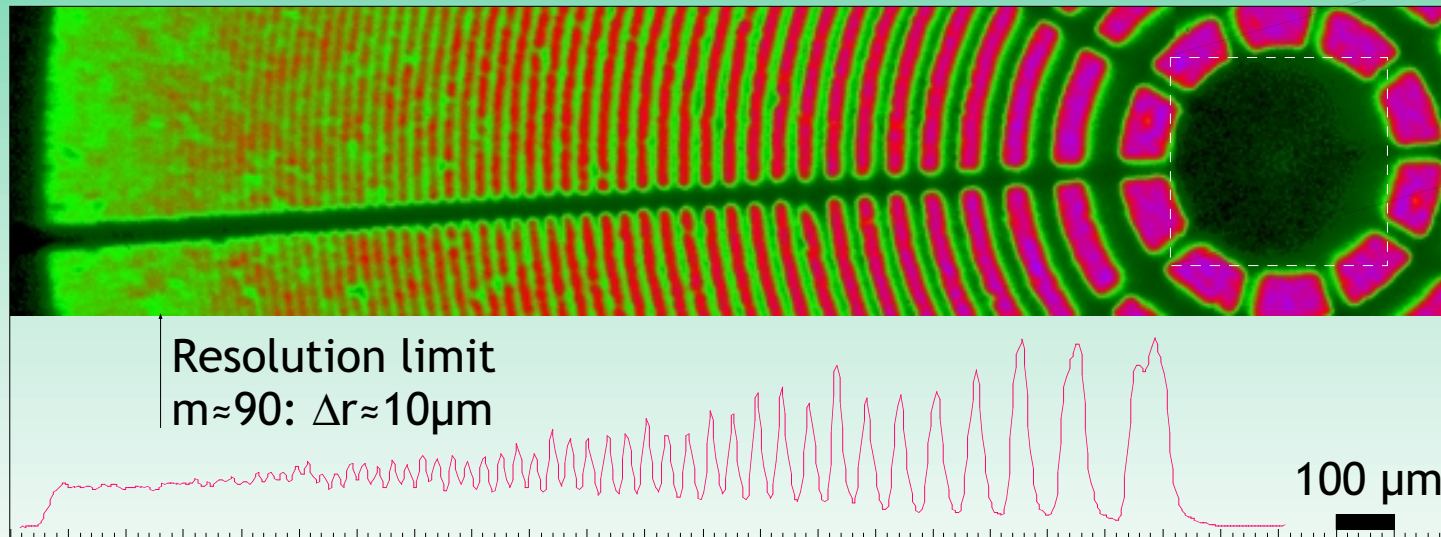
*Il campione viene posto in prossimità della sorgente ed sul piano immagine viene posto un sensore CCD ad alta dinamica (pixel  $(24\mu\text{m})^2$ )*



L'ingrandimento geometrico del sistema è circa  $M=5$  e quindi la risoluzione spaziale attesa è  $\delta_h \approx 0.8 \delta_S$

# PLX: TEST DI RISOLUZIONE SPAZIALE CON ZONE-PLATE

*Il sistema di  $\mu$ -imaging è stato caratterizzato impiegando come oggetto una zone-plate dalle caratteristiche note ( $r_m \approx 195 \mu\text{m m}^{1/2}$ ), per determinare la risoluzione spaziale limite*



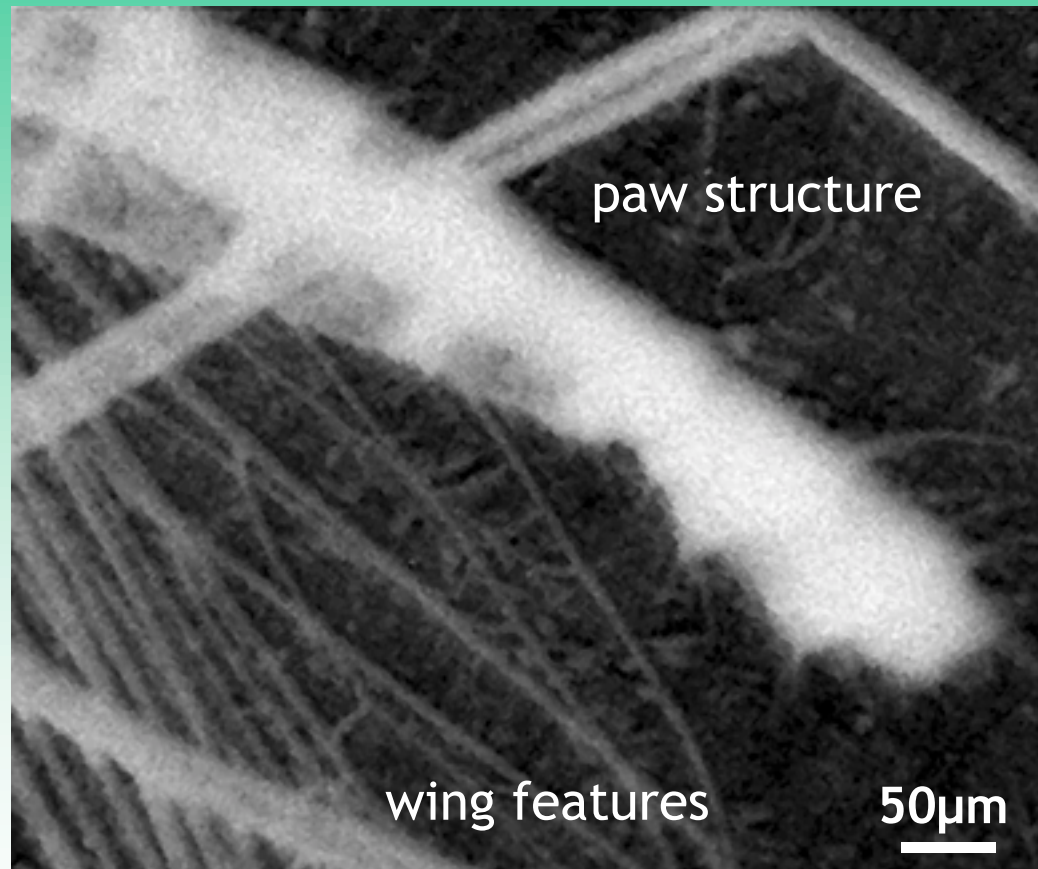
Single shot on  
Cu target  
Laser intensity  
 $1\text{E}13 \text{ W/cm}^2$   
X-ray filter:  
8 $\mu\text{m}$  Be  
Typical  $h\nu$ :  
1keV

La risoluzione è in effetti limitata dalla diffrazione. Infatti, con l'angolo di diffrazione  $\lambda/d \approx 10\text{\AA}/10\mu\text{m} = 1\text{E-}4$  a  $L = 2.5\text{m}$  abbiamo  $\Delta x = 2.5\text{mm}$  che è appunto dell'ordine di  $\Delta r$  sul piano del rivelatore.

# PLX: MICRO-RADIOGRAFIA DI ZANZARA



# PLX: MICRO-RADIOGRAFIA DI ZANZARA - DETTAGLIO



## MICRO-IMAGING CON PLX: QUADRO RIASSUNTIVO

- Versatilità: il campione può essere posto in *aria o in vuoto*;
- Elevatissima risoluzione temporale: tempo di esposizione inferiore ad un *miliardesimo di secondo*;
- Ottima risoluzione spaziale per *campioni di piccole dimensioni* (<1cm);
- Possibilità di aumentare ulteriormente la risoluzione dell'immagine tramite *deconvoluzione della forma* della sorgente.
- Tempo di acquisizione dell'*immagine in pochi secondi* tramite acquisizione con CCD;
- Immagini ad *elevata dinamica* (rapporto saturazione/rumore) grazie all'impiego di sensori CCD raffreddati con pixel di grandi dimensioni;
- Spettro modificabile in base al tipo di bersaglio: possibilità di selezionare componenti spettrali di riga per *esposizione monocromatica*;

# PLX: PROSPETTIVE

*Le limitazioni dell'attuale schema di sorgente dipendono essenzialmente dalle caratteristiche della sorgente primaria (il laser). In prospettiva c'è il passaggio ad un sistema basato su un laser Chirped Pulse Amplification (CPA).*

I vantaggi dei laser CPA rispetto a quelli Q-switch o mode-locked sono molteplici:

- 1) Impulsi di **brevissima durata** (tipicamente 100 fs);
- 2) Elevata qualità del fascio che consente focalizzazioni al **limite diffrattivo**
- 3) Elevate **potenze** (facilmente superiori al TW) in sistemi compatti (table top);
- 4) **Rate di ripetizione** elevati (fino a 100 HZ in sistemi di media potenza).



# PLASMI PRODOTTI DA LASER CPA

- La principale caratteristica dei plasmi prodotti da laser CPA è **l'assenza di effetti idrodinamici**. Infatti, l'entità della espansione idrodinamica del plasma durante l'impulso è  $\approx 10^{-5}$ cm.
- Le dimensioni del plasma e, quindi, della massima zona di emissione di radiazione X sono uguali a quelle dello **spot focale**.
- Questa caratteristica, unita alla elevata focalizzabilità, consente di ridurre le dimensioni del plasma dagli attuali 30-35  $\mu\text{m}$  **a meno di 5 $\mu\text{m}$** .
- L'elevata intensità d'irraggiamento disponibile con i laser CPA consente di produrre **elettroni sovratermici** ed attivare quindi meccanismi di produzione di raggi X con energie fino a **decine di keV**.
- Infine, grazie all'elevata frequenza di ripetizione dei laser CPA, è possibile realizzare sorgenti X con plasmi-laser con **elevata potenza media**, enormemente superiore a quella possibile con laser Q-switch o mode-locked.

# CONCLUSIONI

- Sono stati prodotti plasmi-laser in diverse condizioni di interazione.
- Sono state sviluppate metodiche sperimentali che consentono una completa caratterizzazione di questi plasmi-laser come sorgenti X.
- Le ridotte dimensioni e l'elevata brillantezza di picco della sorgente PLX dell'IFAM offrono condizioni ideali per numerose applicazioni.
- È stata dimostrata l'applicabilità della sorgente a studi di danneggiamento *controllato* del DNA.
- È stato realizzato uno schema di *μ-imaging digitale a singolo colpo* che ha dimostrato una risoluzione spaziale di 10μm.
- L'impiego di laser CPA nella prossima generazione di sorgenti X da plasmi-laser consentirà di realizzare schemi di μ-imaging con potere risolutivo di pochi μm.