

8. Előadás

Röntgenlézerek

- A röntgenlézerek létrehozásának nehézségei
- Röntgenlézerek gerjesztési sémái
- Alkalmazások, néhány kiválasztott kísérlet

Röntgenlézerek

Miért nehéz röntgenlézert csinálni? 4 problémát említünk.

1. A 10-20 nm közötti vonalak élettartama igen rövid, 100ps nagyságrendű, a 2-4 nm közöttieké még rövidebb, 10ps.

Ok: Az Einstein-koefficiensek hullámhossz-függése.

A spontán emisszió:

$$A_{ki} = \frac{6.67 \times 10^{13}}{\lambda(\text{nm})^2} \frac{g_i}{g_k} f_{ik}, \quad f_{ik} = a_0 + \frac{a_1}{Z} + \frac{a_2}{Z^2} + \dots$$

Ha Z nő, f alig változik mivel az első, hidrogénszerű járulékok dominálnak.

A_{ki} ezért λ^{-2} -vel arányos, ezért rövidebb a röntgenvonalak élettartama.

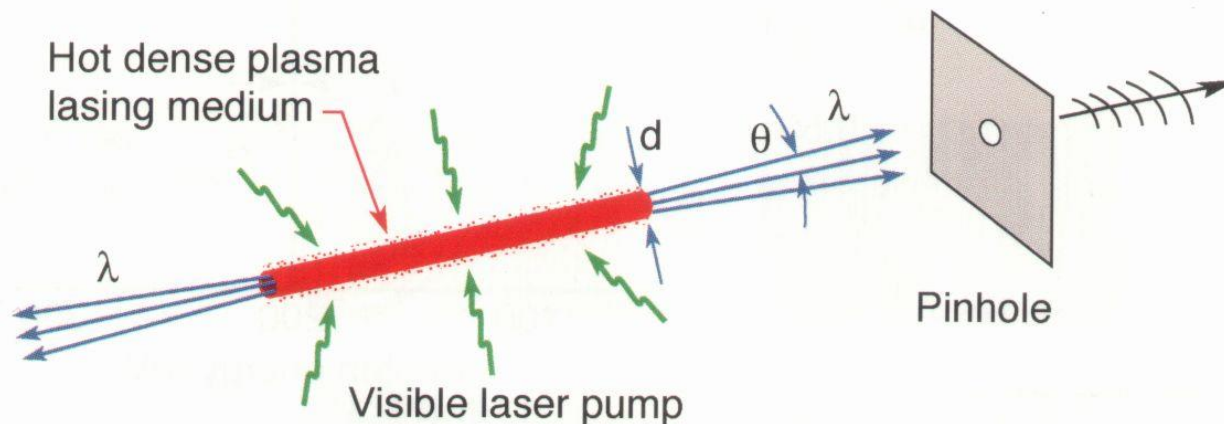
Lézer felső szint rövid élettartamú \rightarrow gyors pumpálás kell, szelektív depopuláció kell az inverzióhoz a plazmában. Alsó szint depopulációja gyors legyen!

2. Az indukált emisszió:

$$B_{ik} = \frac{c^2}{2h\nu^3} \frac{g_k}{g_i} A_{ki} \approx \lambda^3 A_{ki} \sim \lambda f_{ik}.$$

Az indukált emisszió valószínűsége csökken a hullámhossz rövidítésével, a spontán emisszióhoz képest λ^3 szerint. Röntgenlézerek esetén a sugárzás valójában erősített spontán emisszió (ESE lézer).

3. Az atomok és ionok magas gerjesztéséhez magas hőmérséklet kell. A rövid hullámhosszú átmenetek gerjesztéséhez nagy rendszámú atomok belső héjait kell felszabadítani, azaz sokszorosán ionizált atomokat kell létrehozni, ami magas hőmérsékletet, nagy pumpáló energiát követel.
4. Nagyon nehéz ezekre a hullámhosszakra tükröket készíteni. Még nagyobb probléma, hogy a lézerszint rövid gerjesztési élettartama miatt a rezonátor körbefutási ideje pikoszekundum nagyságrendbe kellene essen. A legtöbb röntgenlézer ezért egyszeres átfutású, és ezért a nyaláb minősége gyenge. Tükör-rezonátor probléma (ps, hullámhossz) → egyutas lézer, rossz nyaláb. ASE nő → valójában „ASE lézer”.



Röntgenlézer erősítési tényező

$$\frac{I}{I_0} = e^{GL}$$

$$G = n_u \sigma_{ind} - n_l \sigma_{abs} := n_u \sigma_{ind} F,$$

ahol az inverziós faktor: $F = 1 - \frac{n_l \sigma_{abs}}{n_u \sigma_{ind}}$,

$$\sigma_{ind} = \frac{\pi \lambda^2 r_l}{\Delta \lambda} \left(\frac{g_l}{g_u} \right) f_{lu},$$

$$r_l = e^2 / 4\pi \epsilon_0 m c^2.$$

Akkor van erősítés, ha $n_u \sigma_{ind} FL > 1$.

A szükséges lézerteljesítmény:

$$P = \frac{\hbar \omega n_u F V}{\tau},$$

ahol $n_u F$ az invertált populáció-sűrűség, V a plazmatérfogat és

τ az élettartam(= $1/A_{ul}$). Ebből

$$\frac{P}{V} = \frac{16\pi^2 c^2 \hbar (\Delta \lambda / \lambda) G}{\lambda^4}.$$

Mivel $V=AL$, ezért

$$\frac{P}{A} = \frac{16\pi^2 c^2 \hbar (\Delta\lambda / \lambda) GL}{\lambda^4} \sim \lambda^{-4.5}.$$

A szükséges lézereenergia a hullámhossz rövidülésével nagyon erősen nő!!!

Röntgenlézer gerjesztési sémák

1. Ütközéses gerjesztés (Peter Hagelstein), alapvetően 3-szintesek. Ionizációs üvegnyaknál (bottleneck), azaz ha egy adott ionizációjú állapot még gerjesztődik, de a következő már nehezen.

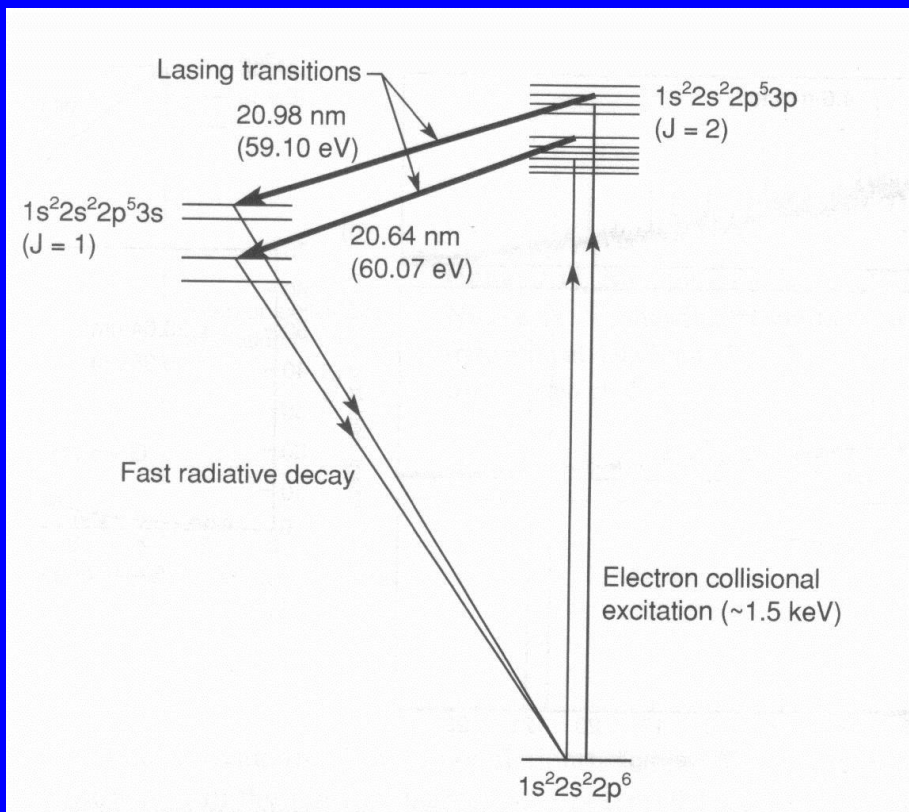
Pl. az Al 12. elektronja eltávolításához 18.8eV kell, a 11.-hez 28.4 eV, de a 10.-hez (nemesgázszerű) már 120eV!

Az elektronhőmérsékletet az adott ion gerjesztéséhez kell választani. Nemesgáz-, Ne-szerű ionok. A felső szintet az elektronok ütközéssel gerjesztik, az alsó szint kell gyorsan rekombinálódjon, kiürüljön. Ez azt jelenti, hogy a felső lézerszint alapállapotba való sugárzásos átmenete tiltott, míg az alsó szint sugárzással gyorsan bomlik.

Általában a $\Delta n=0$ átmenetek alkalmasak.

Hosszú fóliák hengeres megvilágítása, homogén sűrűségprofil.

Első lézer a Ne-szerű Se ($Z=34$, 10 maradék elektron), $T_e \sim 1\text{keV}$.



Ne-szerű Se egyszerűsített sémája.

Az ütközéses gerjesztéshez legalább 1.5 keV elektronok szükségesek.

A pumpálás 2.4 TW, 0.527 μ m lézerrel 450 ps impulzushosszal történt.

(M. Rosen LLNL, D. Attwood könyvében)

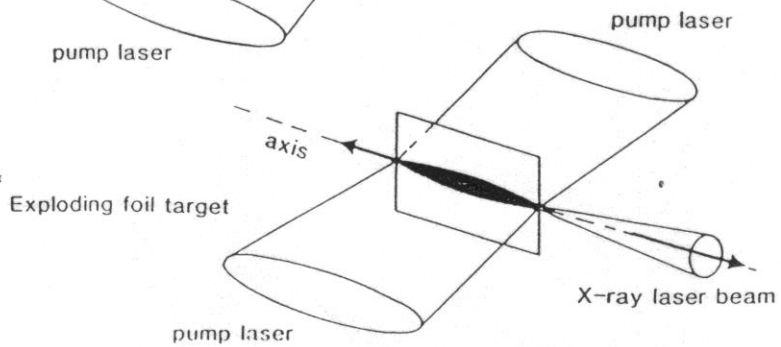
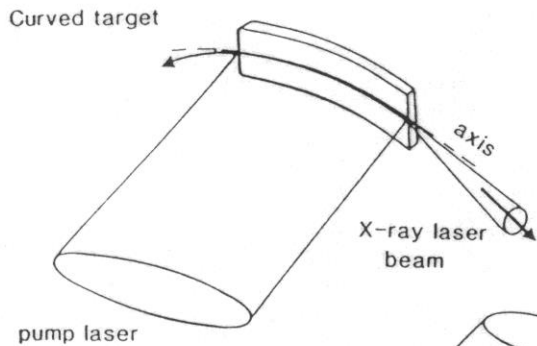
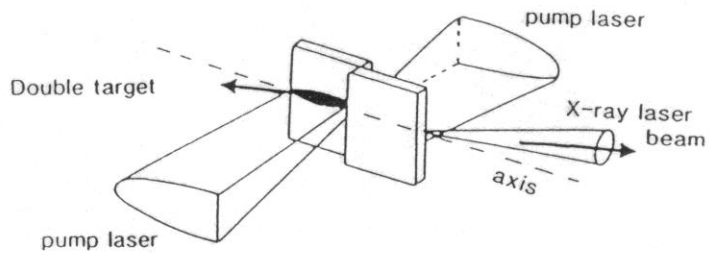
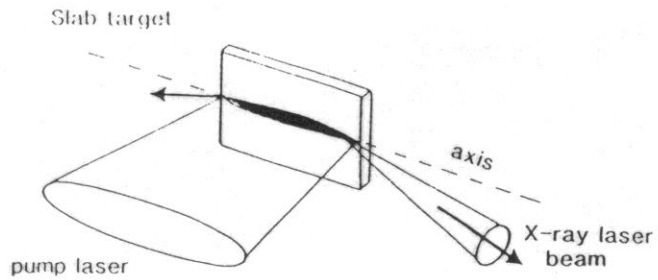
Hasonló a Ne-szerű Ge lézer is.

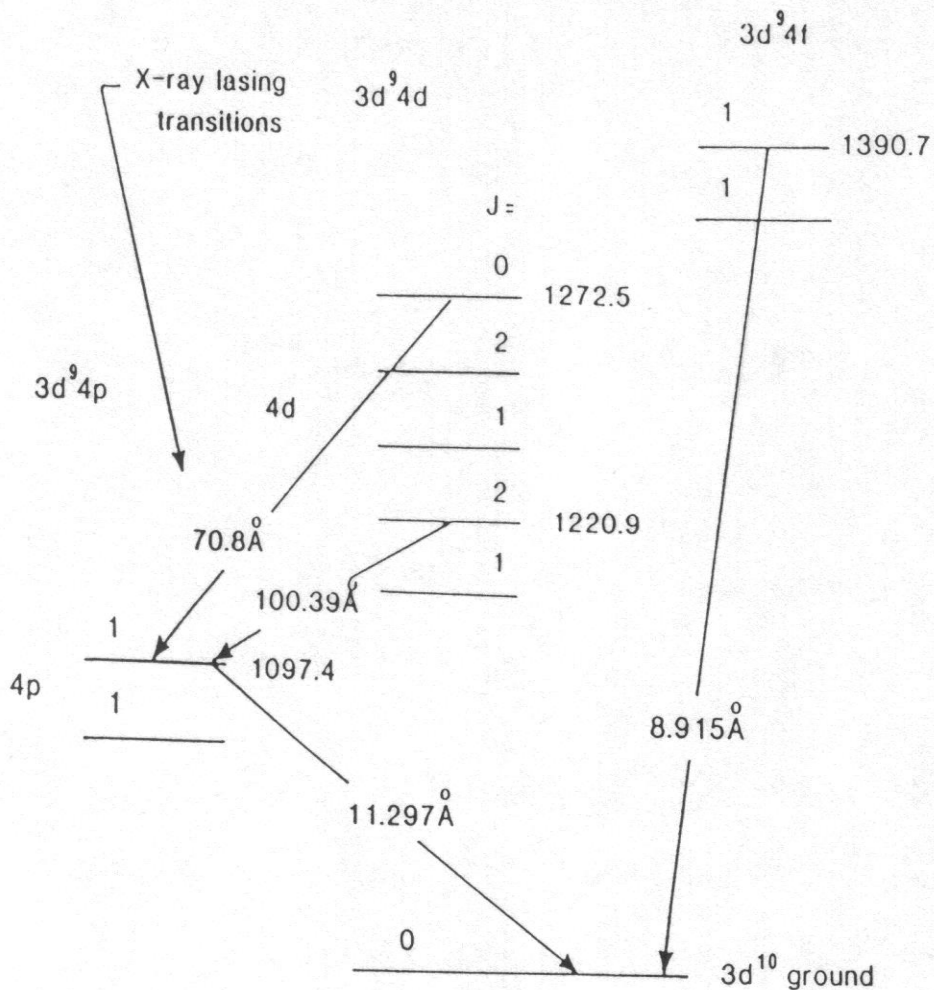
$T_e = 800$ eV, $n \sim 5 \times 10^{20}$ cm^{-3}

$G \sim 4$ cm^{-1} , $L = 1-2$ cm

A séma működik kapilláris kisülésben is Ar gázban (Rocca USA, Kuhlevszkij csoportja Pécsen)

Különböző röntgenlézer-elrendezések





Ni-szerű europium sémája
 $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10} 4d-4p$
 Általában 3d, 4d-4p átmenettel.
 Sm: 7.3nm
 Au: 3.5nm
 $g \approx 2 \text{ cm}^{-1}$
 Rövidebb hullámhossz, mint a
 Ne-szerű ionoknál

Újdonság: Tranziens pumpálás (Nickles, Shlyaptsev):
 Nanoszekundumos impulzus ionizál, ultrarövid impulzus gerjeszt,
 nem stacionárius inverzió.

Ionizálás: 0.6-1ns, 1-15J, max 10^{13} W/cm².

Inverzió: 0.35-7ps, 10^{13} - 10^{15} W/cm².

Késleltetés ~600ps

Kapilláris kisüléssel is összehangolható.

Tranziens gerjesztés eredmények:

RAL: $G=30\text{cm}^{-1}$ (Sm, 7.3nm)

LULI: $G=15\text{cm}^{-1}$

LLNL: $G=24\text{cm}^{-1}$ GL~15

Baj: GL nem túl nagy, telítődik.

Haladó hullámos pumpálás működik, de a GL-t nem javította.

2. Rekombinációs gerjesztésű lézerek:

Úgy kell gerjeszteni egy iont, hogy a következőt már nem, a zárt héj utáni konfiguráció. Ezért a H-szerű, Li-szerű, Na-szerű ionok alkalmasak erre. Az alsó szint gyorsan bomlik (rezonancia-átmenet), de az alapállapotba való átmenet az önabszorpció miatt telítődik.

A plazma legyen hideg és ritka!

Különben az ütközések mindent alapállapotba visznek.

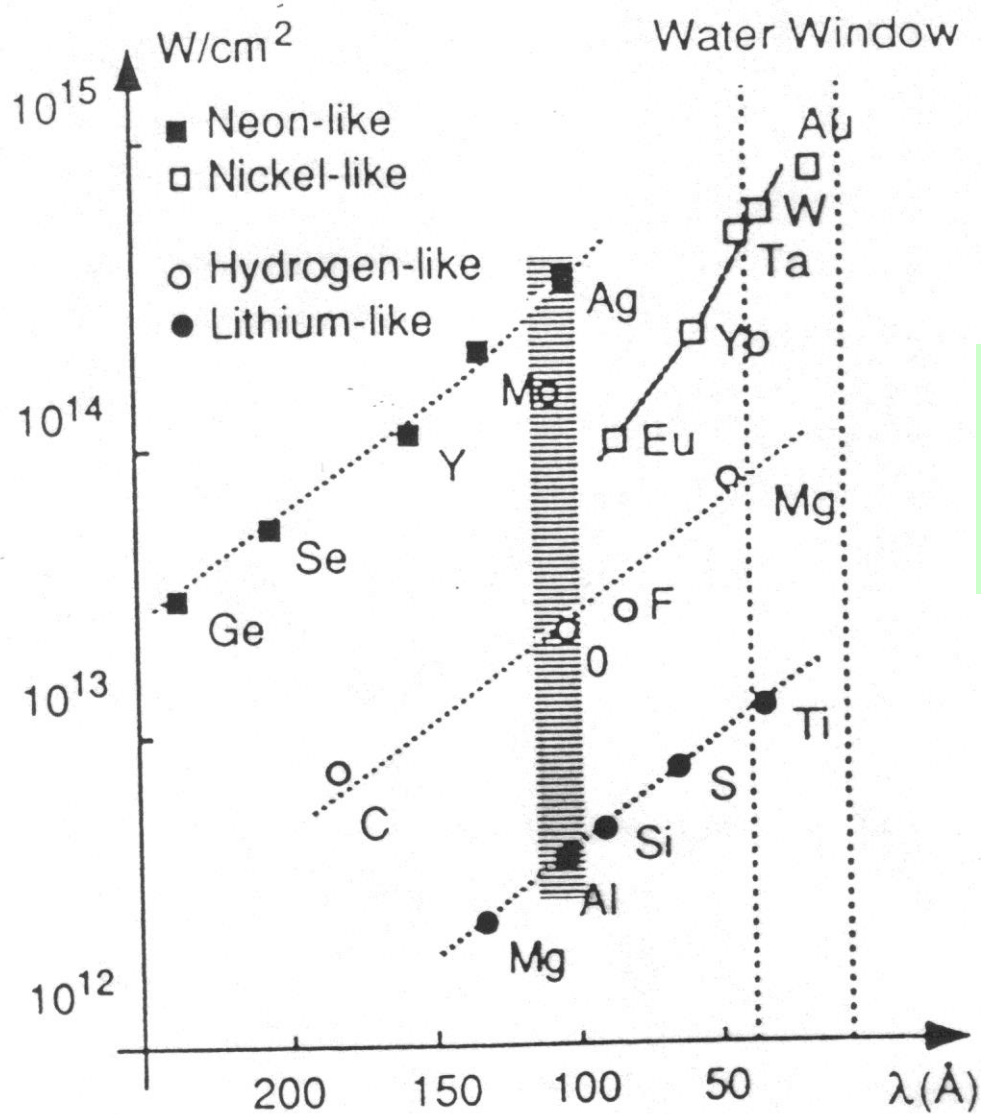
Suckewer et al. (Princeton): Erős mágneses térben C^{5+} 3-2 lézer (300J, 80ns lézerrel).

RIKEN (Japán) Li-szerű Al, 3J/cm pumpálás $GL=4.2$

3d-4f 15.5nm

3d-5f 10.6nm

Mg, Si: 8.9nm lézer.

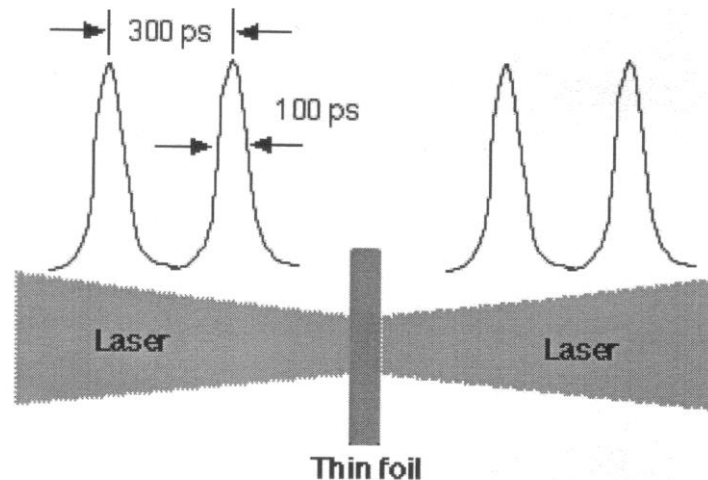


Röntgenlézerek a vízablakig
 (ahol az oxigén, s a víz
 átlátszó, a szén nem)

Az impulzushossz rövidítése

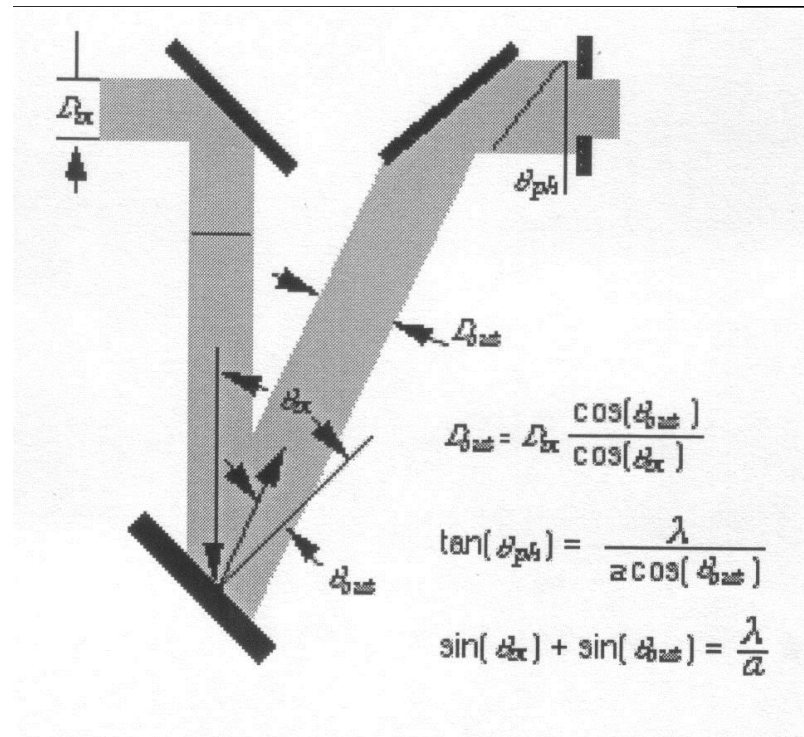
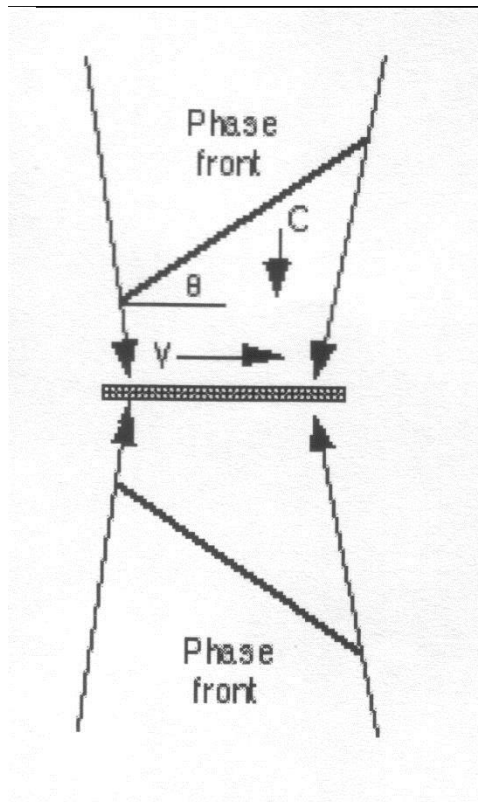
Lássuk, mit is kutatnak most a nagyobb laboratóriumok ezen a téren. R. Lee (LLNL) nyomán.

1. A mutatott röntgenlézerek általában 100-200 ps-os impulzusokat bocsájtanak ki. A gyors folyamatok megfigyeléséhez célszerű ezt rövidíteni. Két impulzusos besugárzással 20 ps és rövidebb impulzus. Az első impulzus hozza létre a plazmát kis gradienssel, a második ionizál és gerjeszt.



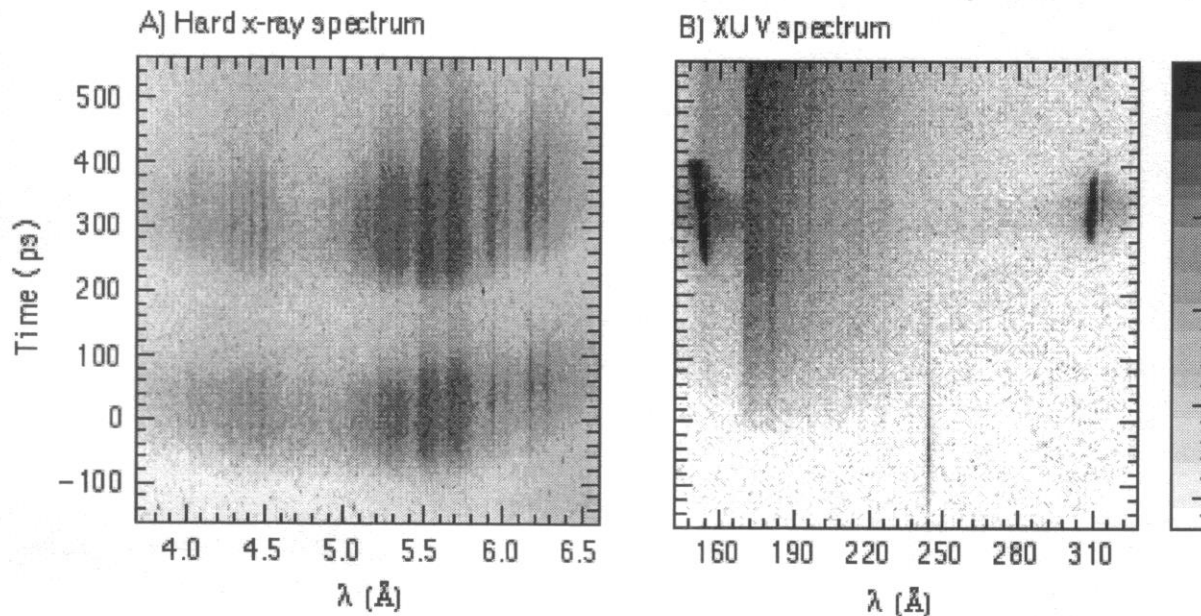
Haladó hullámú gerjesztés

A séma és a rács elrendezése a pumpáló lézertimpulzus fázisfrontjának megfelelő szögbe állításához. 3cm hosszú fólia-target 200 nm yttriumból és 100 nm lexanból (CH polimer), amelyet két oldalról 100 ps hosszú, $0.53\mu\text{m}$ sugároz be. Időkülönbség: 300 ps.



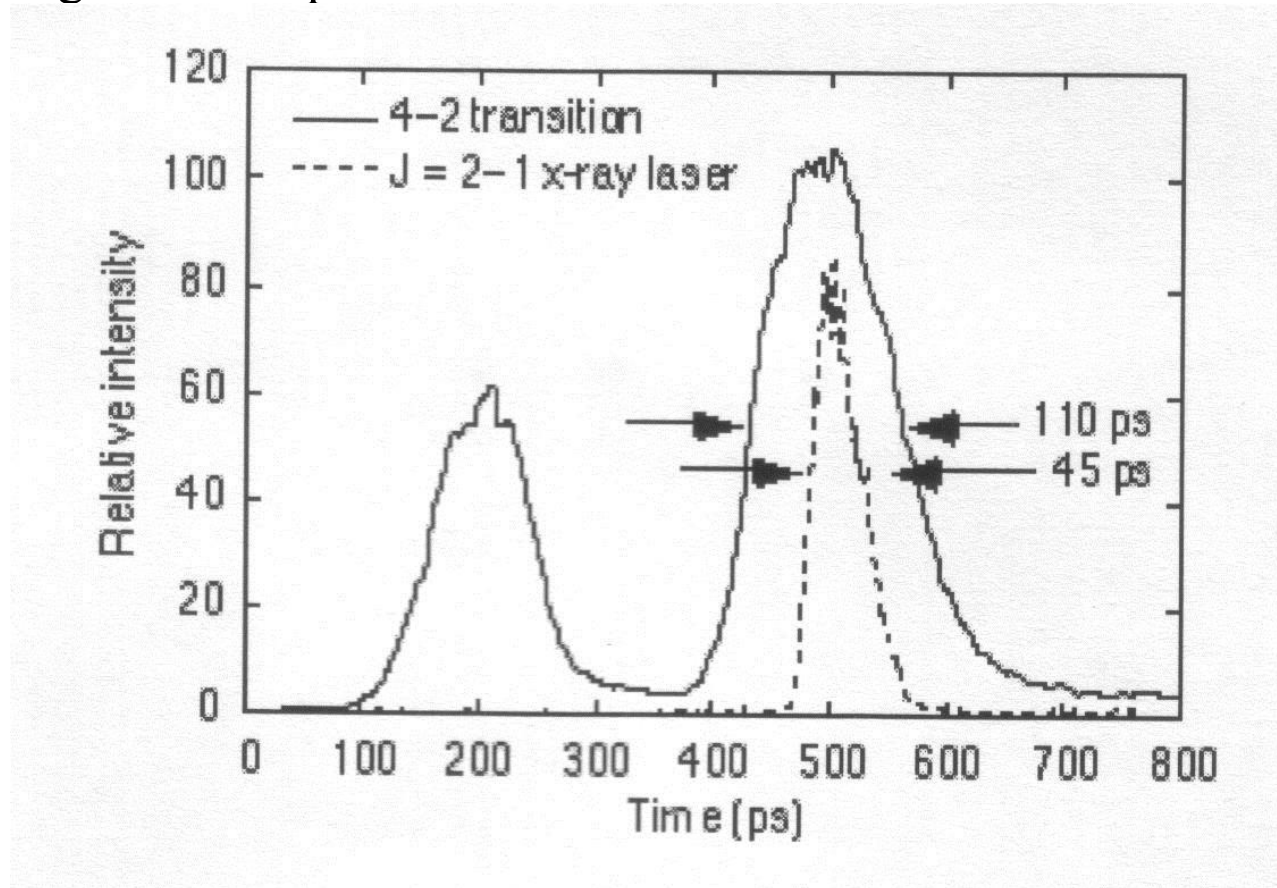
A gerjesztés és a lézerspektrum

Az ábra a neonszerű Y időfelbontásos spektrumát mutatja mind a kemény röntgen, mind az XUV tartományban. A kemény röntgen spektrum (A) a karakterisztikus neonszerű és fluorszerű 3-2 és 4-2 átmeneteket mutatja, ami arra utal, hogy mindkét impulzus alatt a gerjesztési feltételek azonosak voltak. Ezzel szemben az XUV spektrum (B) csak a 2. impulzus alatt mutat erős J=2-1 lézeremissziót 15.5 nm-en. Valószínű magyarázat: Az első impulzuskor még nagy sűrűség-gradiens refraktálja a lézeremissziót, ki az aktív közegből.



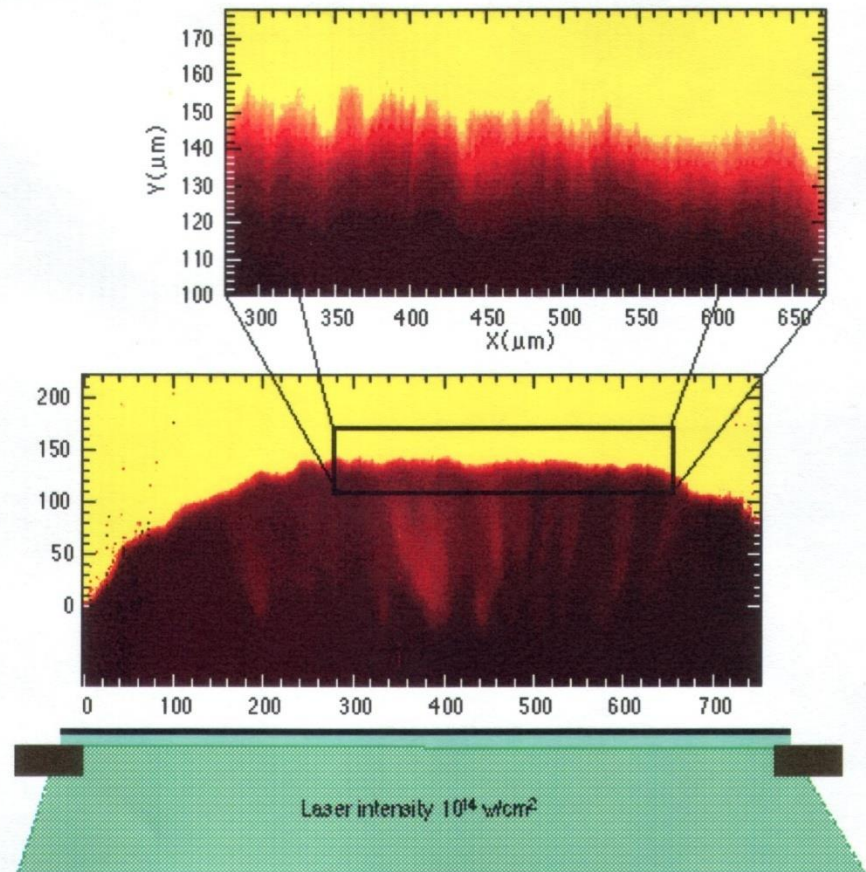
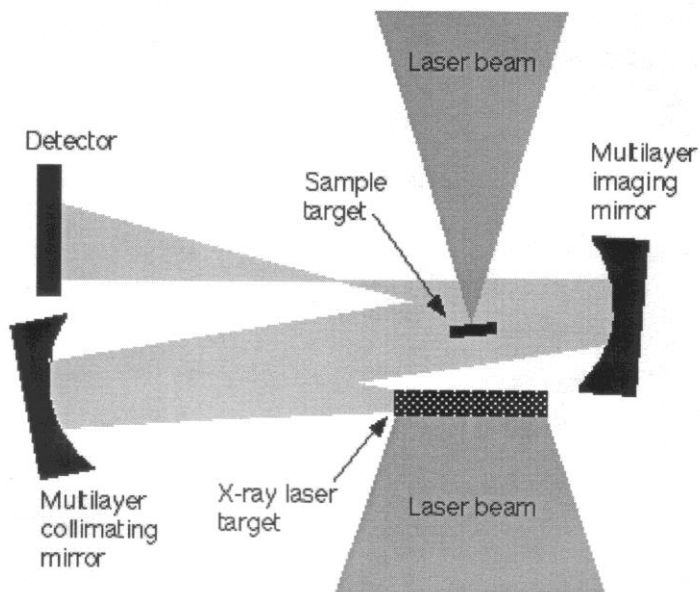
A rövid lézerműködés

A kemény röntgensugárzás és a lézerműködés közös időtörténete 45 ps-os röntgen lézerműködést mutat.



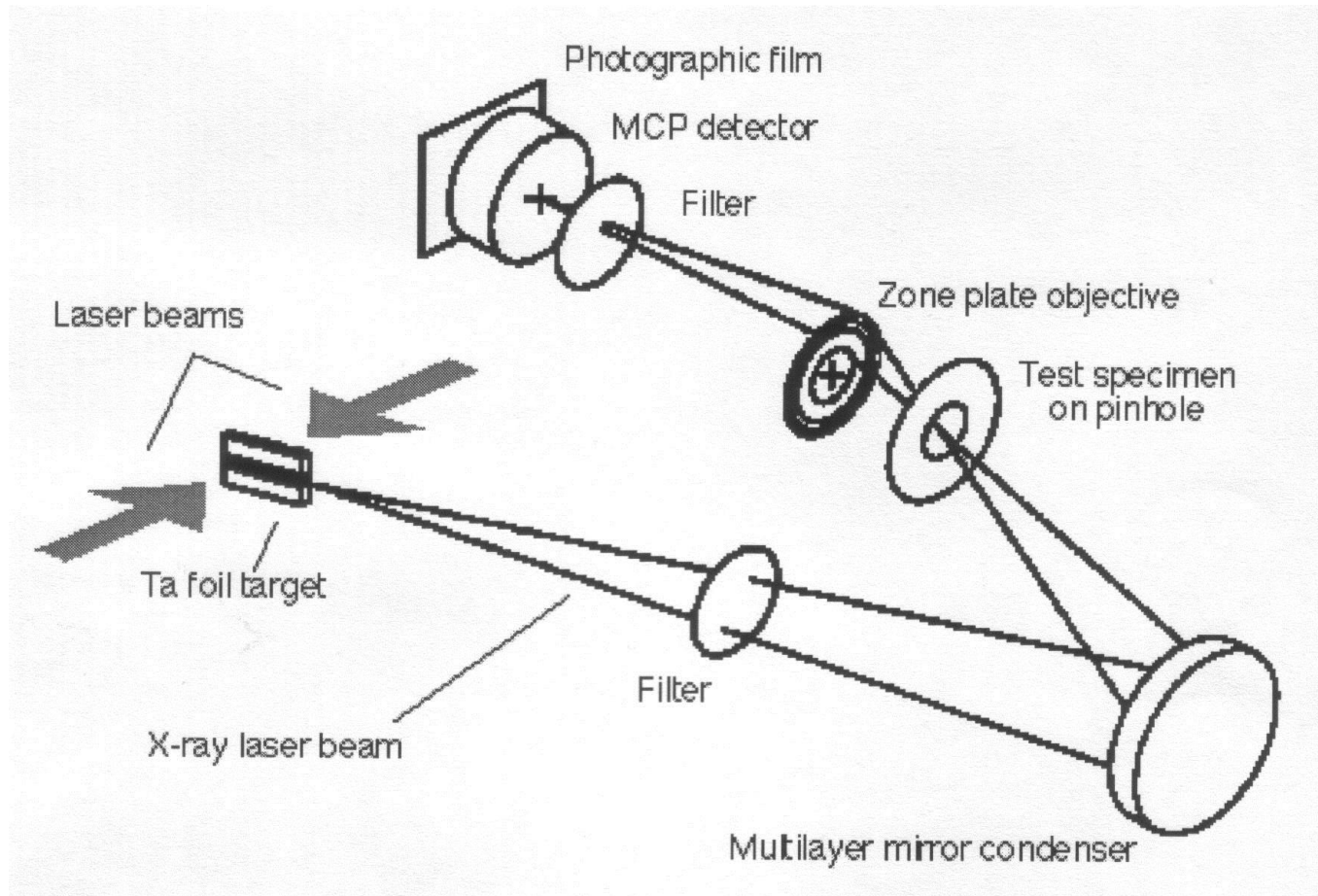
Röntgenlézer-alkalmazások

Röntgen árnykép felvétel lézerplazmáról: $10\ \mu\text{m}$ pasztikon $3\ \mu\text{m}$ Al.
A hátoldalon látszanak az $5\text{--}6\ \mu\text{m}$ -es filamentumok, ami $2\ \mu\text{m}$ felbontásnak felel meg.

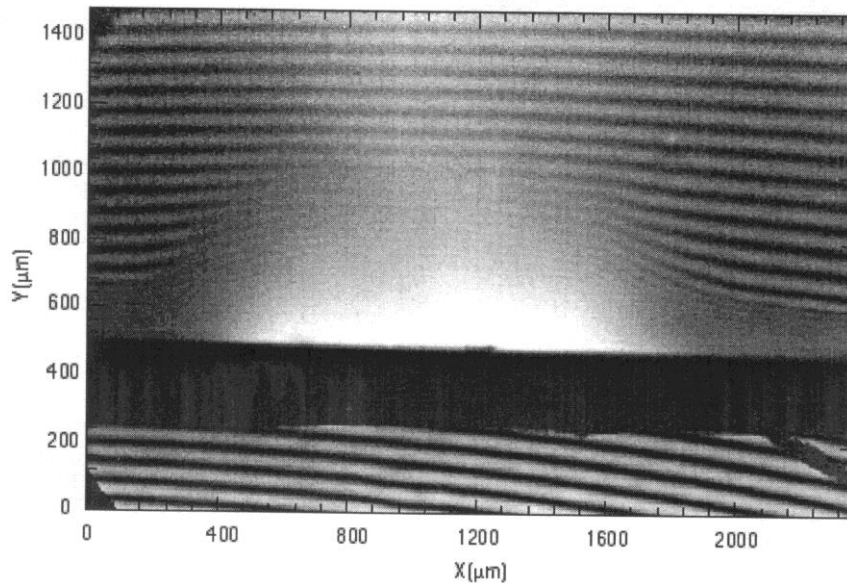
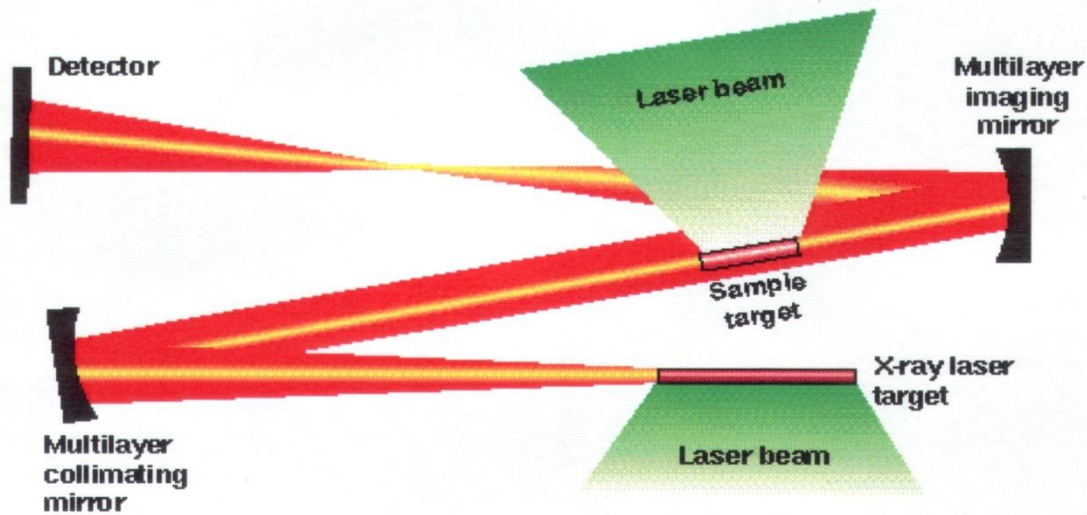


Röntgenmikroszkóp és interferometria

Röntgenmikroszkópiával sikerült 40 nm felbontást elérni, és azzal 40 nm Au szemcsékről és patkány-spermáról felvételeket készíteni.



A Mach-Zehnder interferometer 15.5 nm-en a nagysűrűségű, hosszú plazmáról készített képet. Lézer: 1 mJ, 150 ps.



3. Lézerek alacsonyabb hőmérsékleten, a belső héjak gerjesztésével?

Fotoionizációs lézer (Duguay, Rentzepis):

Az alsó lézerszint lehet alapállapot is, amelyet fotoionizációval mintegy kiürítünk. A kiürítő sugárzás lehet egy másik plazmából eredő vonalas sugárzás, amely vonal alkalmas a fotoionizációra, azaz egybeesés kell. Problémát jelent az, hogy a lézermédium hőmérséklete alacsony kell maradjon, hogy az egyéb folyamatok (fotogerjesztés, rekombináció stb.) elhanyagolhatók maradjanak.

Goodwin, Fill: C Ly- α vonal vonalas pumpálásának elvi lehetősége.

Saját kísérletek: Lehet-e Planck-spektrummal szelektíven fotoionizálni?

Bár inverzióról nem volt szó (nem is volt várható), de a termodinamikai egyensúlytól való eltérés bizonyítható volt.

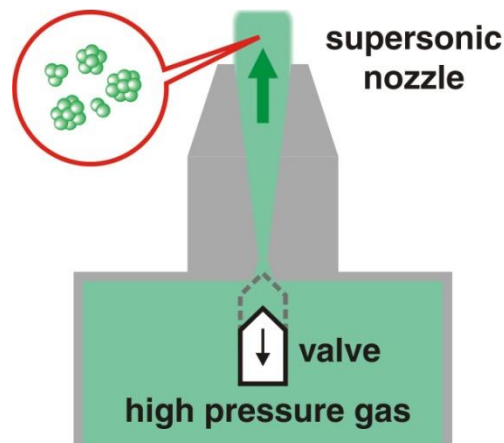
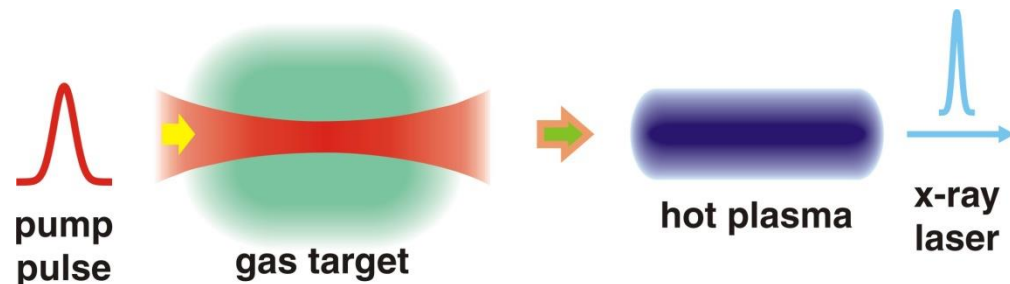
4. Szabad elektron-lézer (DESY).

5. Magas harmonikusok gázokban és plazmákban (Szegeden is).

OFI lézer: egy érdekes alternatíva

Érdekes lehetőség az OFI, azaz az optikai tér ionizációs, ütközéses gerjesztéses lézer. Az optikai tér ionizáció (küszöb fölötti is) elektronokat gyorsít, amelyek az ionokkal ütközve gerjesztik azokat.

A target lehet gáz is, pl. gázjet. Ekkor klaszterek is keletkeznek, amelyek mérete növeli az ütközési hatáskeresztmetszetet, de könnyen elronthatják a homogenitást. Egy kínai csoport 41.8 nm-en látott lézerműködést, a Pd-szerű Xe-on.



What is cluster?

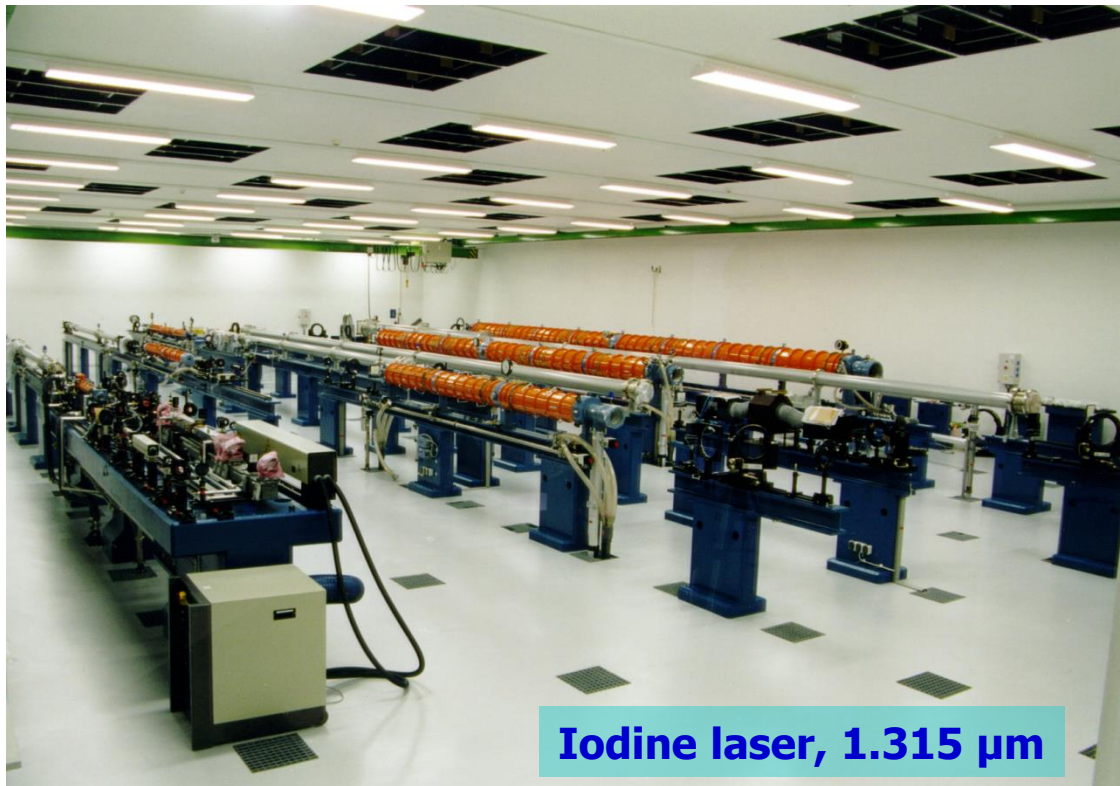
gas atom /
molecule



cluster

held together by
van der Waals
force

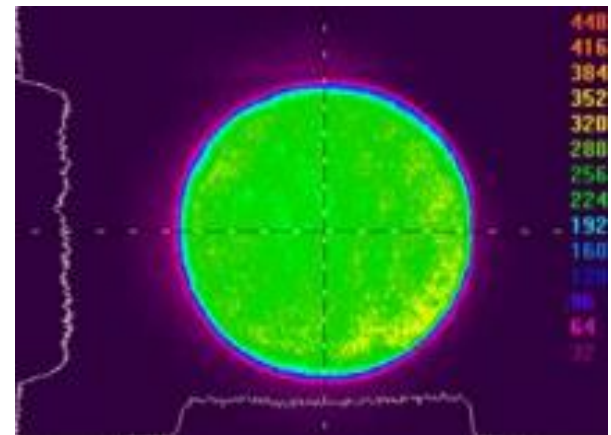
Európa legnagyobb működő röntgenlézere: PALS jódlézer, Prága (Bedrich Rus szegedi IAMPI előadásából, 2006)



Iodine laser, 1.315 μm

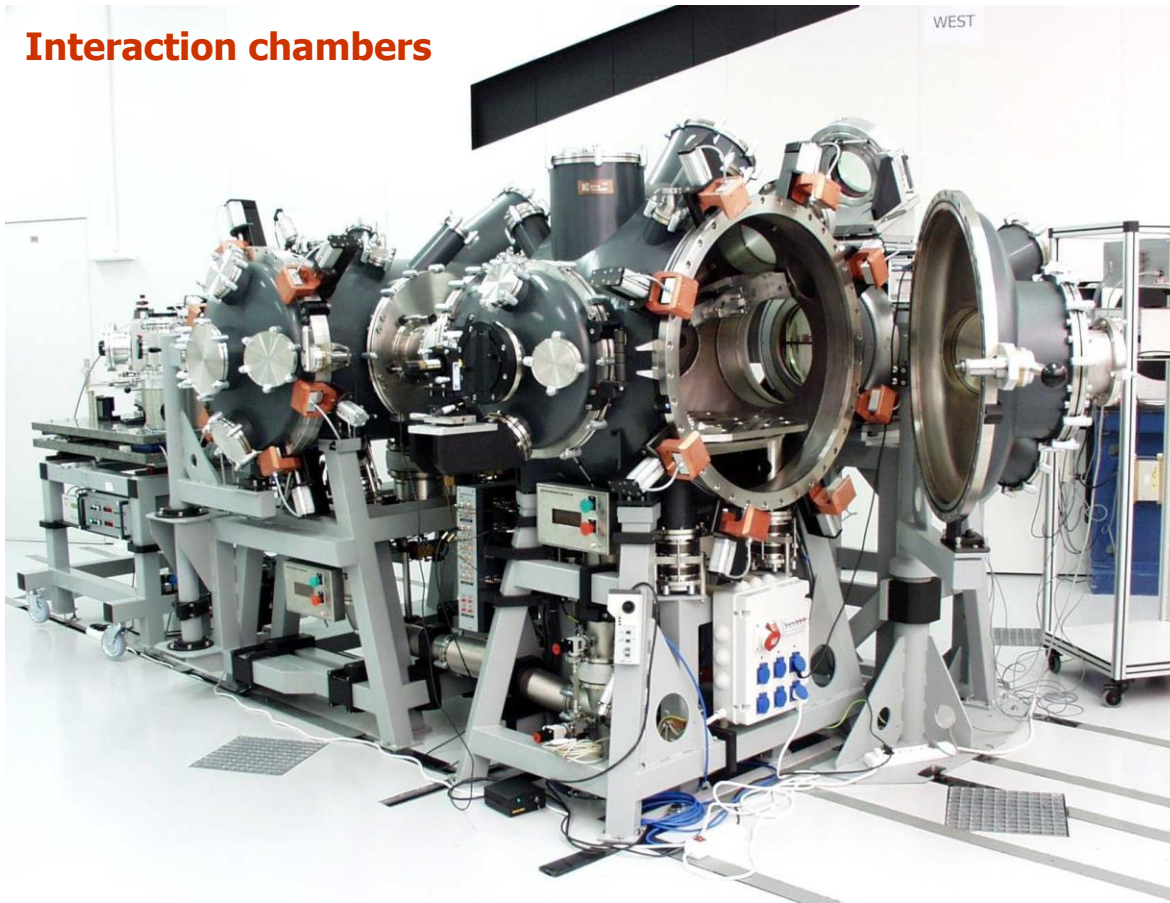
Energy	1 kJ + 100 J aux (two beams)
Pulse length	200-600 ps
Shot rate	20 min

Output beam \varnothing 290 mm

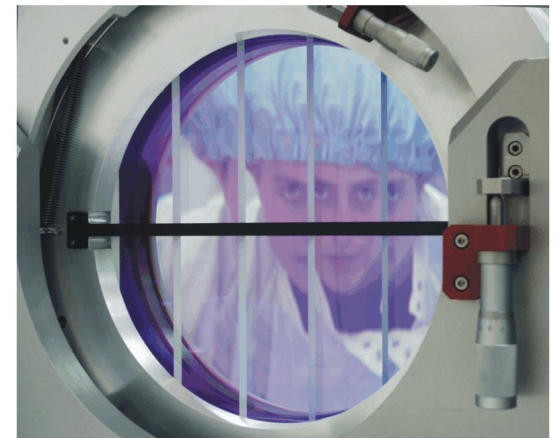


PALS target area

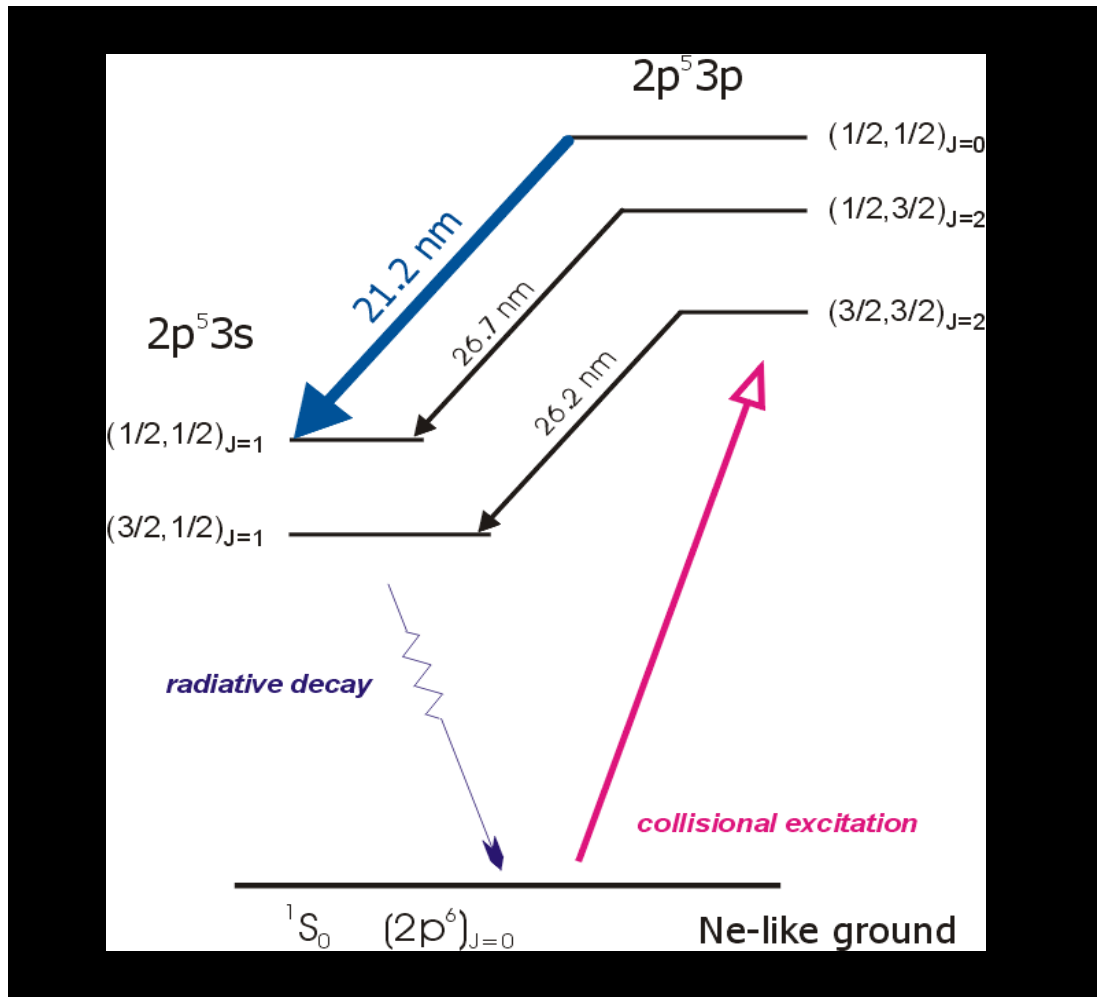
Interaction chambers



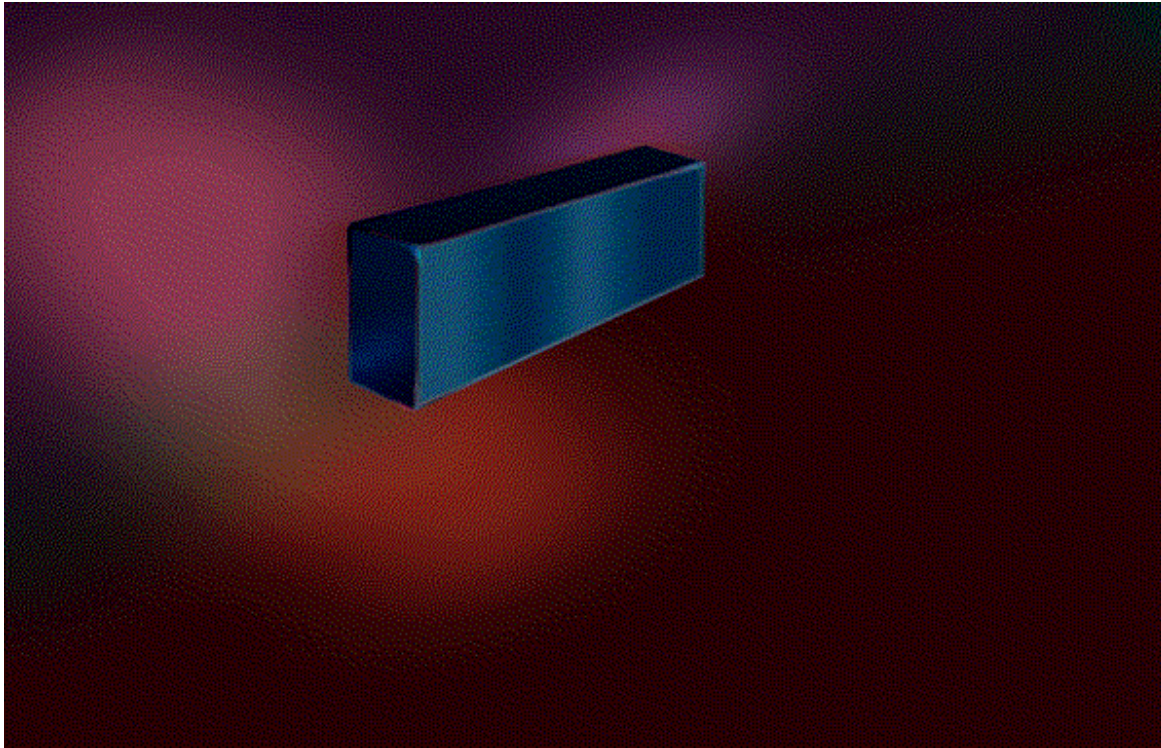
Example of focusing optics:
line focus matrix for X-ray lasers



Ne-like zinc X-ray laser at 21.2 nm (58.5 eV)



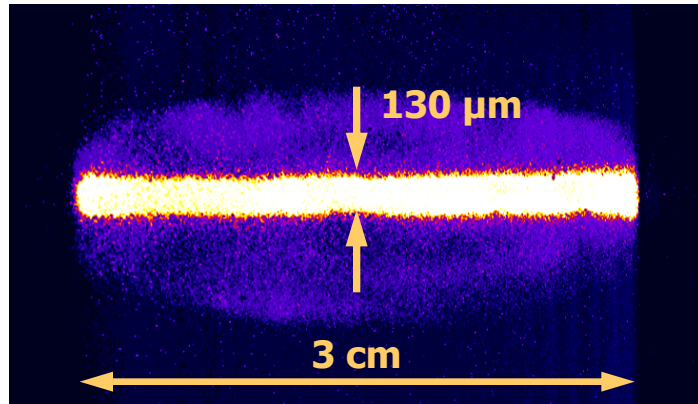
Plasma-based X-ray laser: generic scheme



Conditions for lasing:

- appropriate ionization balance
- high T_e to maximise collisional pumping
- moderate transverse and lateral n_e gradients

Standard pump configuration: 4 mJ output

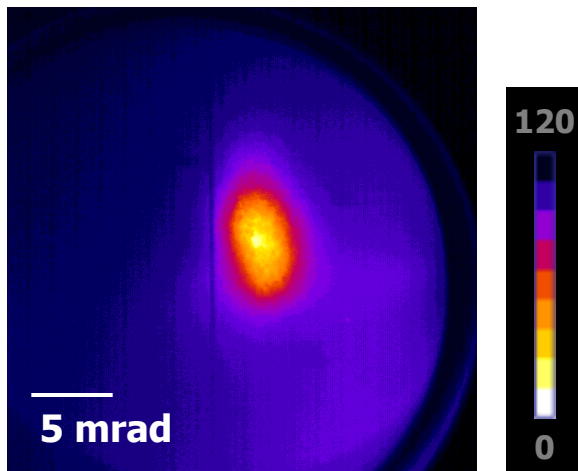


Weak prepulse : 2-10 J

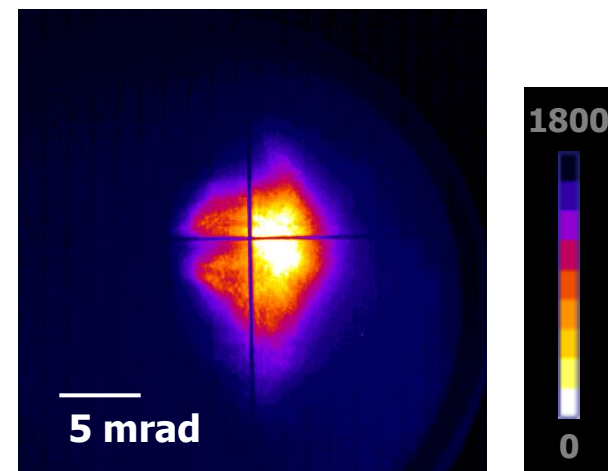
after 10 ns

Main pump pulse: ~450 J

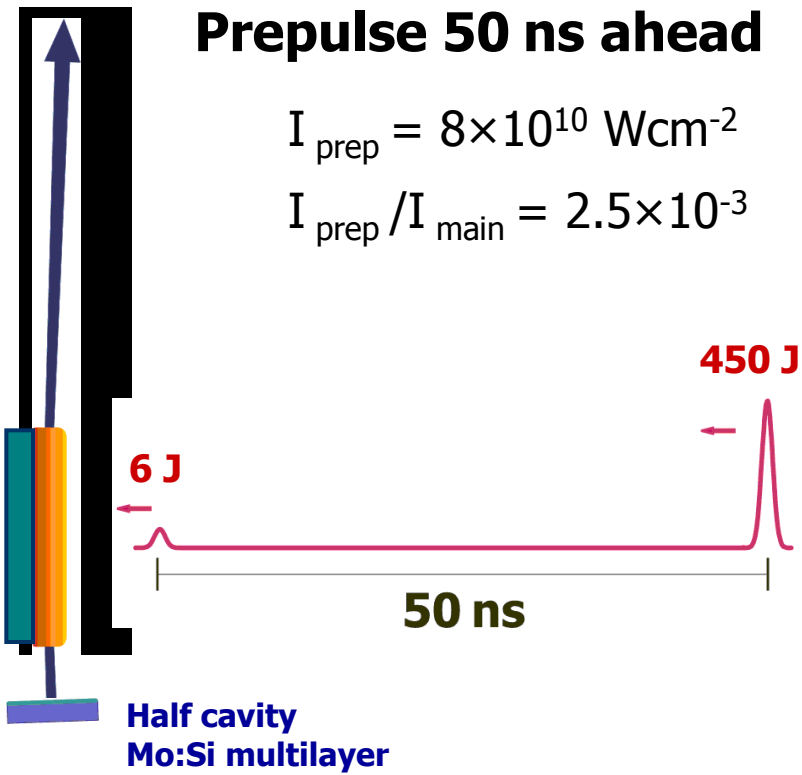
Single-pass beam



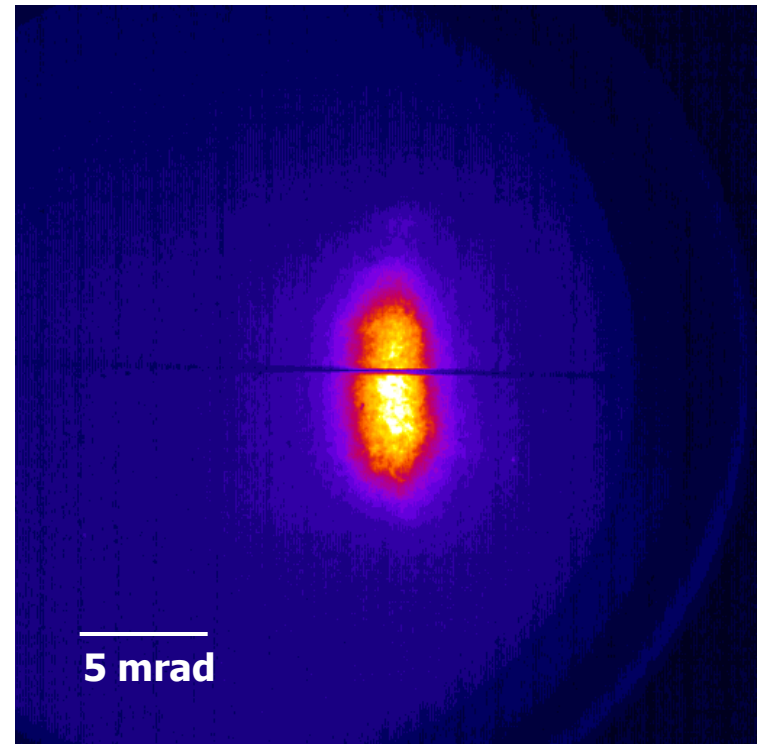
Double-pass beam



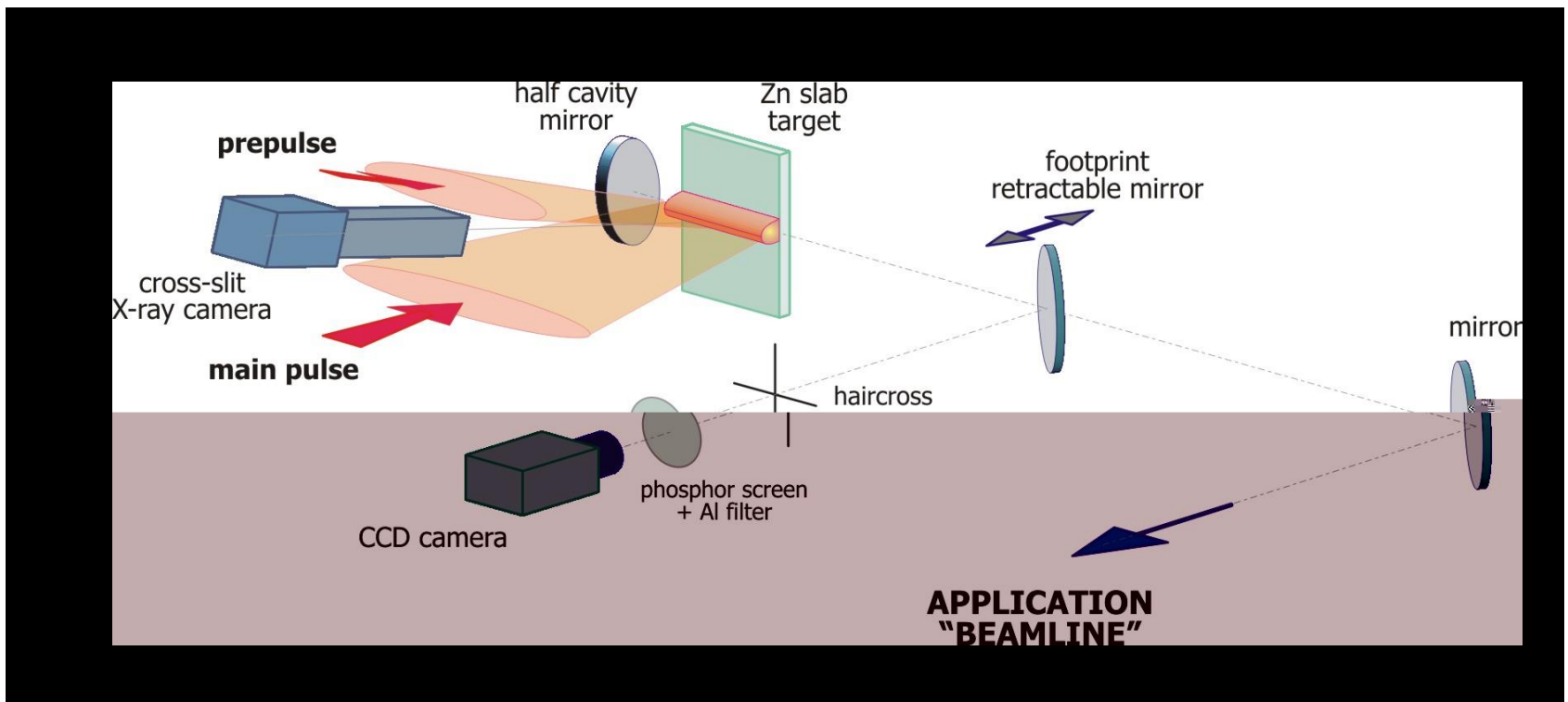
50-ns prepulse: possibility to achieve 10 mJ output



Double-pass beam



Generic experimental scheme



Characteristics of the developed XRL @ 21.2 nm (58.5 eV)

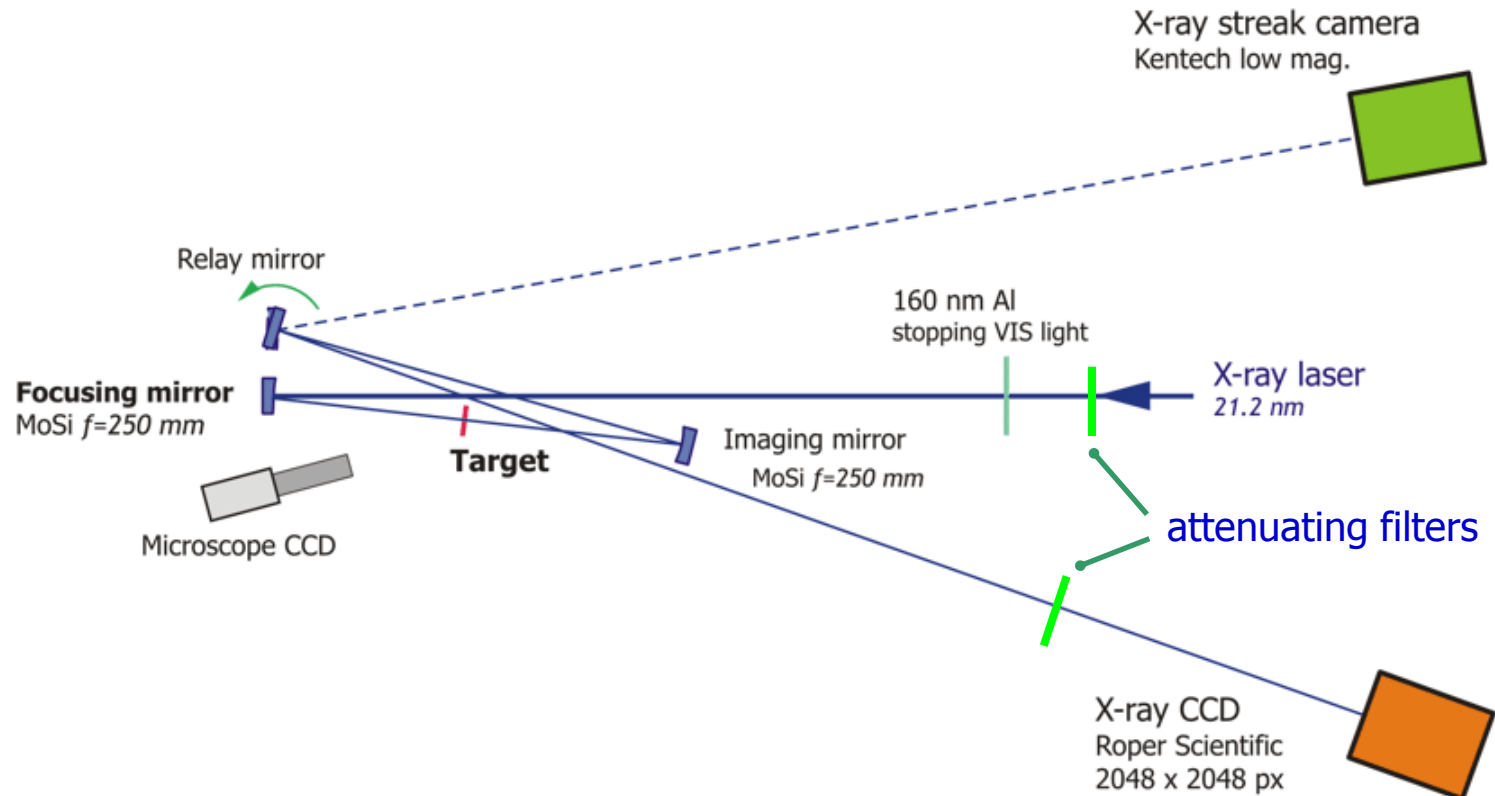
	<u>Prepulse delay</u>	
	10 ns	50 ns
XRL pulse energy	4 mJ	10 mJ
Pulse duration	120-150 ps	
Peak power	30 MW	70 MW
Photons per pulse	3×10^{14}	1.2×10^{15}

Currently the most energetic soft X-ray laboratory source

Experimental arrangement

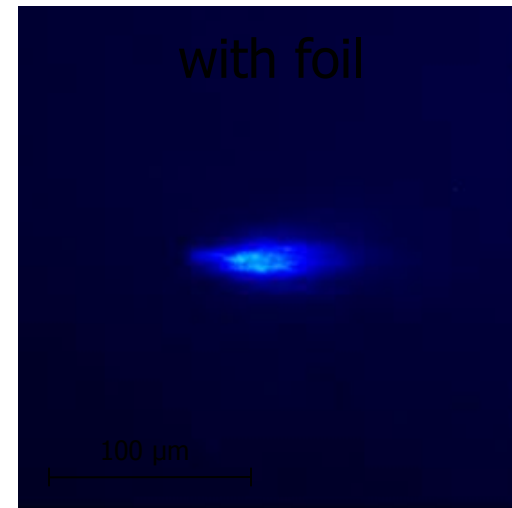
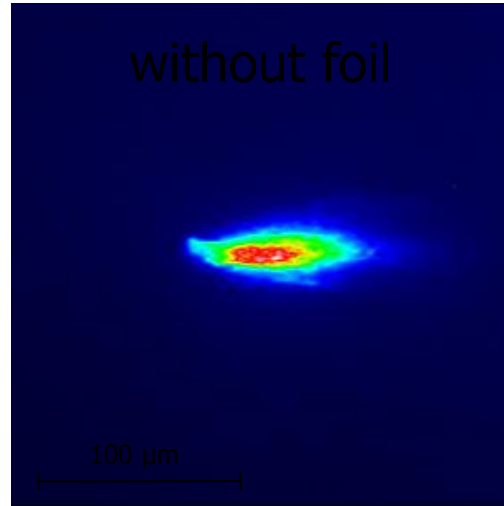
Mo:Si multilayer mirror, $R=0.35$: typically 1.5 mJ of focused energy available

Targets: LUXEL 500 nm Al
160 nm polyimide

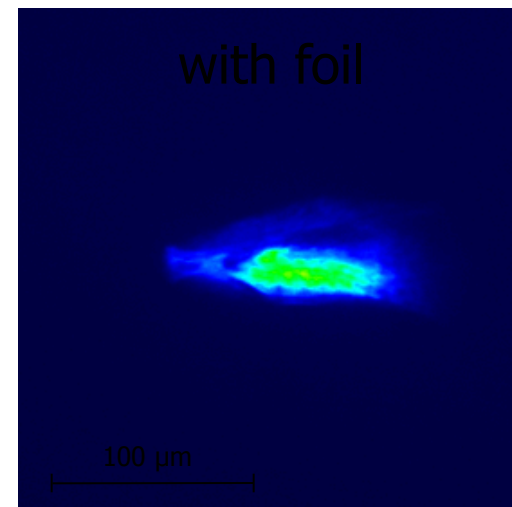
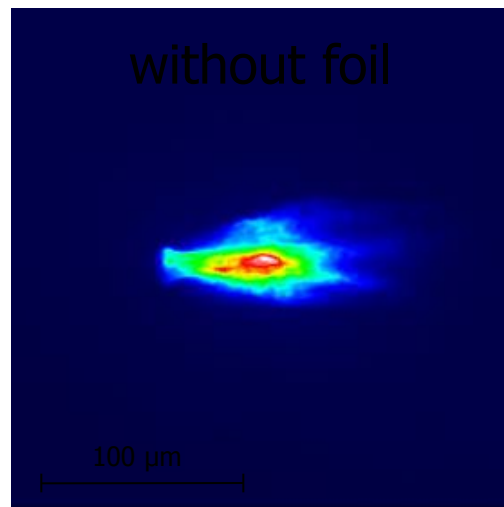


Spatial distribution of the focused 21.1-nm light through 500-nm Al foil

10^{11} Wcm^{-2}



10^{12} Wcm^{-2}



A Rhodes-alternatíva

Charles Rhodes (Univ. Illinois) – 2007-ben Szegeden járt - állítása szerint intenzív lézerműködést tapasztaltak 4.5 keV foton energián.

KrF lézert használtak, a target cluster (gázjet) volt.

A lézernyaláb teljesen elnyelődik, egy filamentum szalad végig. Ez teszi lehetővé a haladó hullámú gerjesztéssel a belső héj kiürítését.

Rácz Ervin több évet Chicagóban dolgozott a témán.

Itthon is megvalósítható (?).

Miről is van szó?

EXPERIMENTAL CONFIGURATION

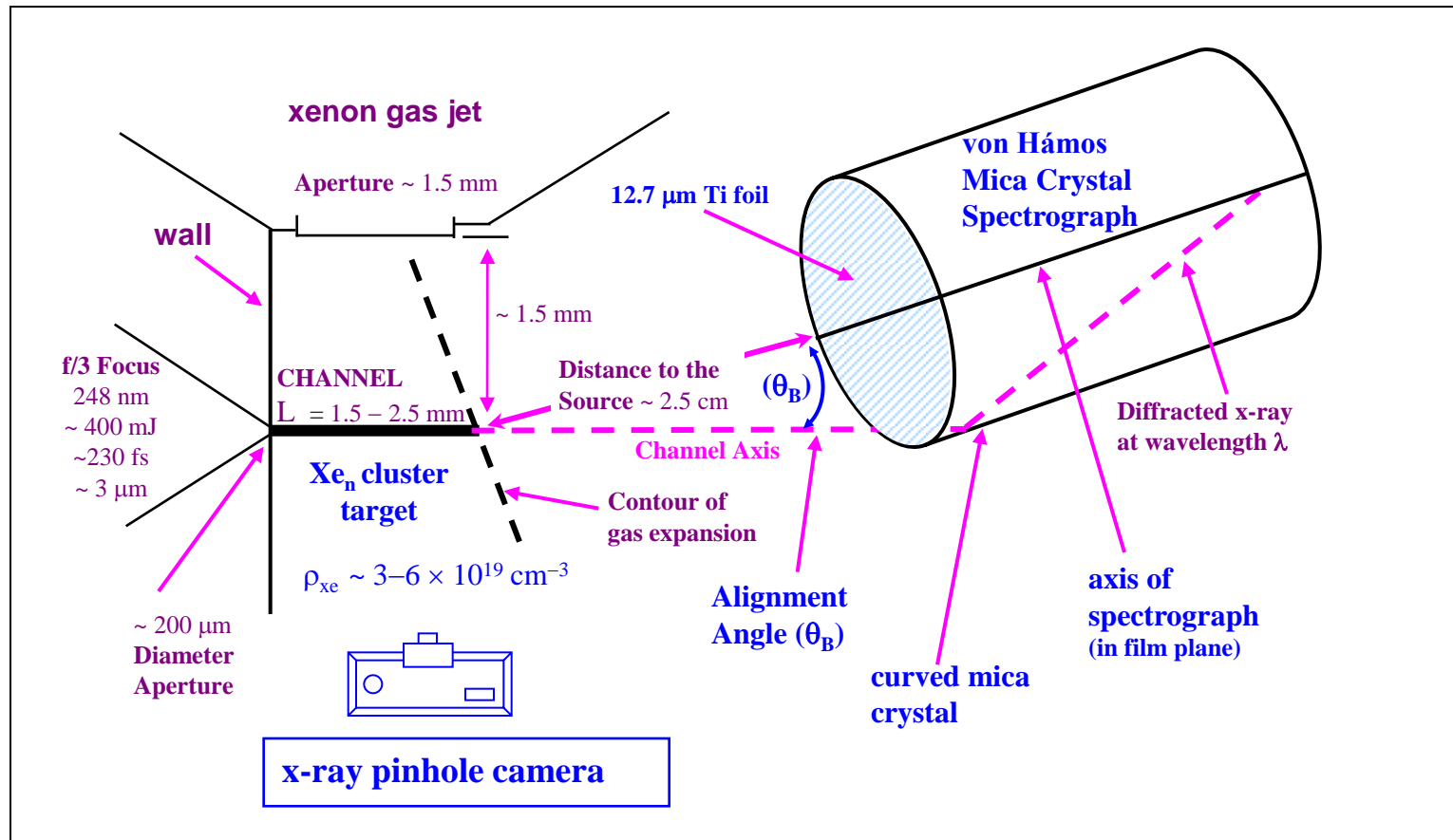
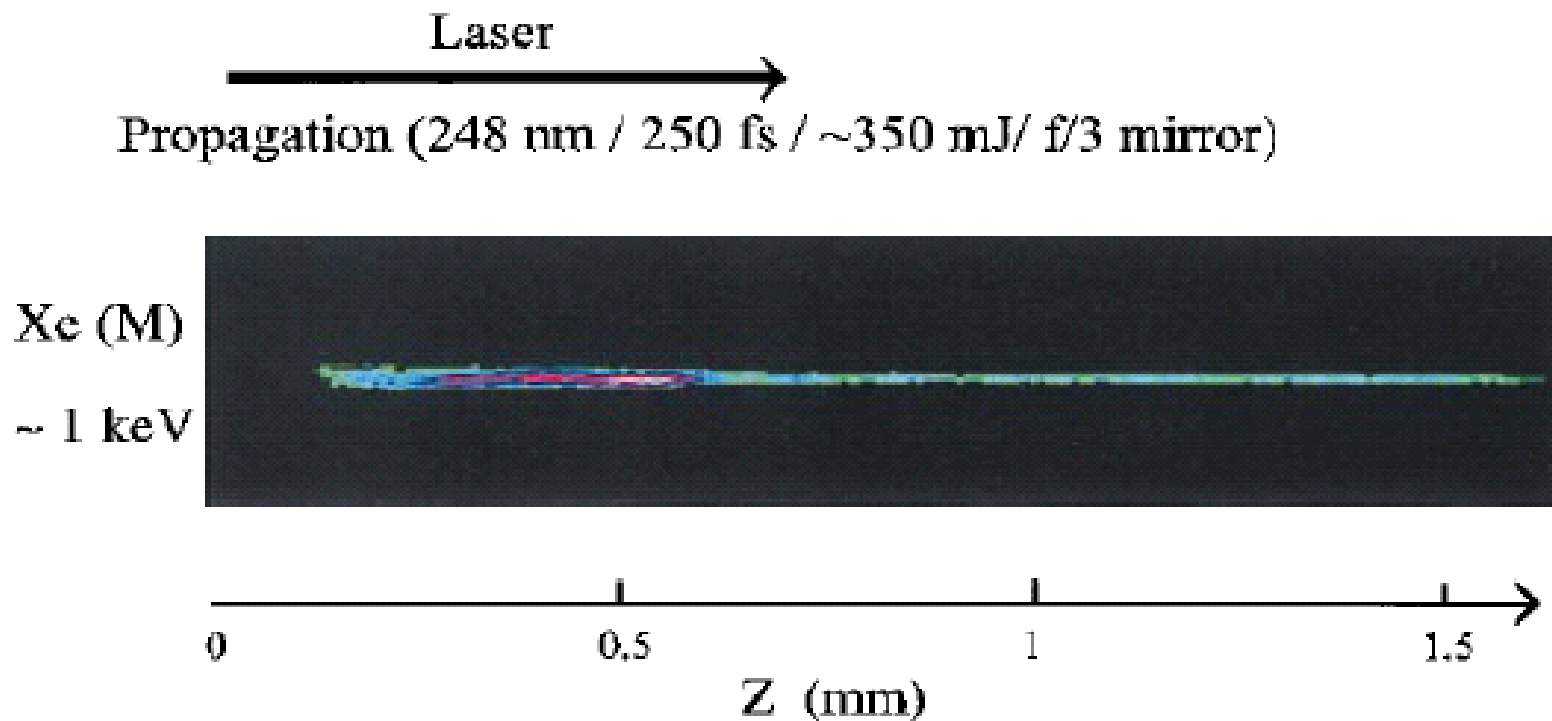


Fig. (2): Experimental configuration used for the observation of amplification of Xe(L) radiation in self-trapped channels inside an evacuated chamber. The x-ray pinhole camera was equipped with a $\sim 10 \mu\text{m}$ thick Be foil enabling the morphology of the channel to be visualized by the Xe(M) emission ($\sim 1 \text{ keV}$). The observed channel length typically is $L \cong 1.5 - 2.5 \text{ mm}$. The wall defining the entrance plane having the $200 \mu\text{m}$ aperture was fabricated from $\sim 100 \mu\text{m}$ thick steel and the incident 248 nm pulse was focused with an f/3 off-axis parabolic optic to a spot size of $\sim 3 \mu\text{m}$. The entrance of the von Hámos spectrograph viewing the forward directed emission was protected with a Ti foil of $12.7 \mu\text{m}$ thickness whose transmission factor in the $2.7 - 3.0 \text{ \AA}$ region is ~ 0.5 . The Bragg angle for the Xe^{34+} component at 2.88 \AA is $\theta_B \cong 26^\circ$. The film plane, which lies on the axis of the instrument, does not have a direct path to the x-ray source and, hence, only receives exposure by diffraction from the curved mica crystal. An identical von Hámos spectrograph, equipped with Muscovite mica from the same cut, was also used to record the spontaneous emission emitted transversely with respect to the channel axis. Not shown is the location of a film pack used for measurement of the amplified x-ray beam composed of a 2 cm square $12.7 \mu\text{m}$ thick Ti foil backed by a matching piece of x-ray film. With removal of the axial von Hámos spectrograph, this detector was placed on the channel axis in a perpendicular orientation at a distance of 12.5 cm from the cluster target.

CHANNEL MORPHOLOGY

Xe(M) ~ 1 keV IMAGE



Xe(L) SPONTANEOUS EMISSION SPECTRUM

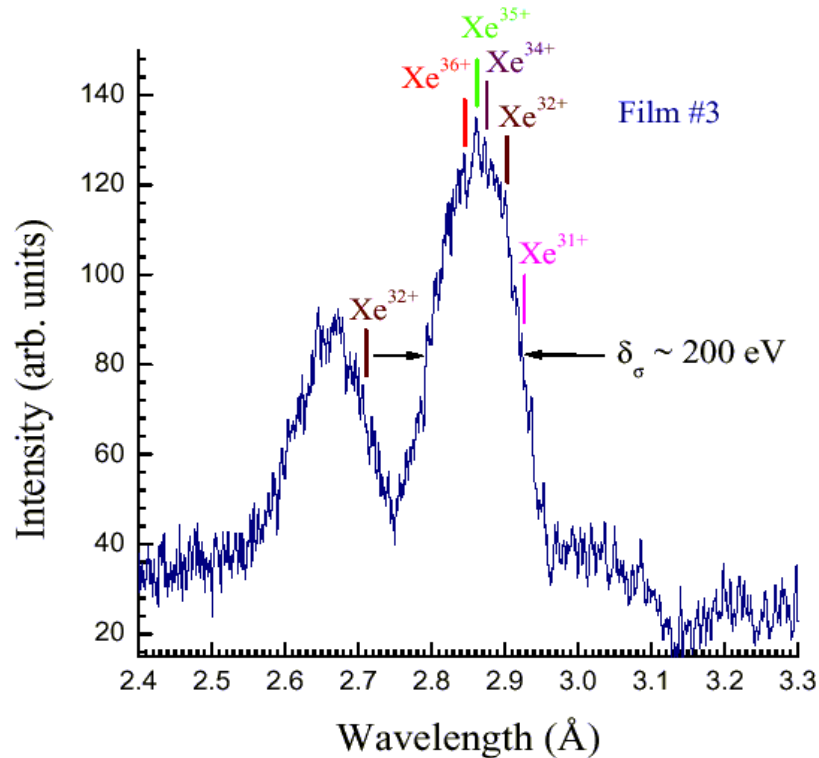
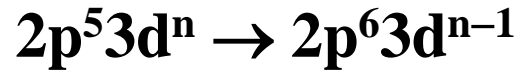
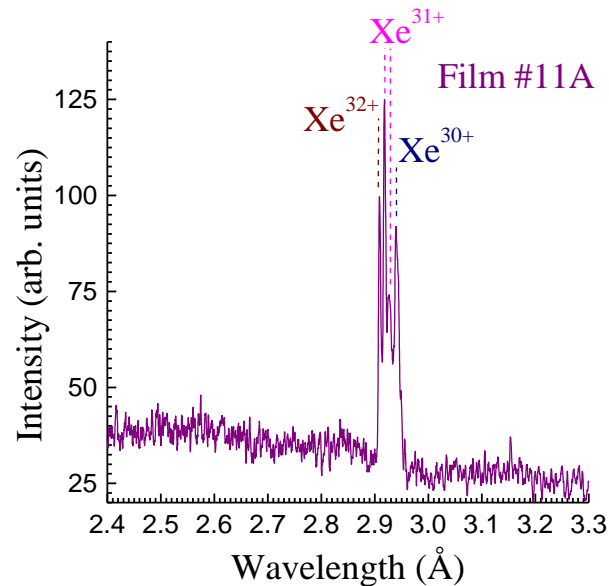
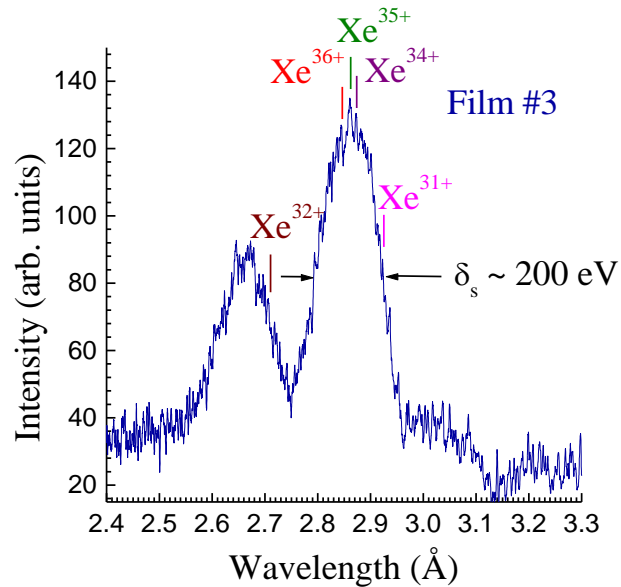


Fig. (1). Unamplified spontaneous emission profile of the Xe(L) 3d–2p hollow atom [7] spectrum (film #3) produced from Xe clusters with femtosecond 248 nm excitation without plasma channel formation. The splitting between the major and minor lobes arises from the spin-orbit interaction of the 2p vacancy. The full width of the main feature is $\delta_\sigma \sim 200$ eV. The positions of selected charge state transition arrays (Xe^{31+} , Xe^{32+} , Xe^{34+} , Xe^{35+} , and Xe^{36+}) are indicated.

Xe(L) Amplification

Xe(L)



Ruby

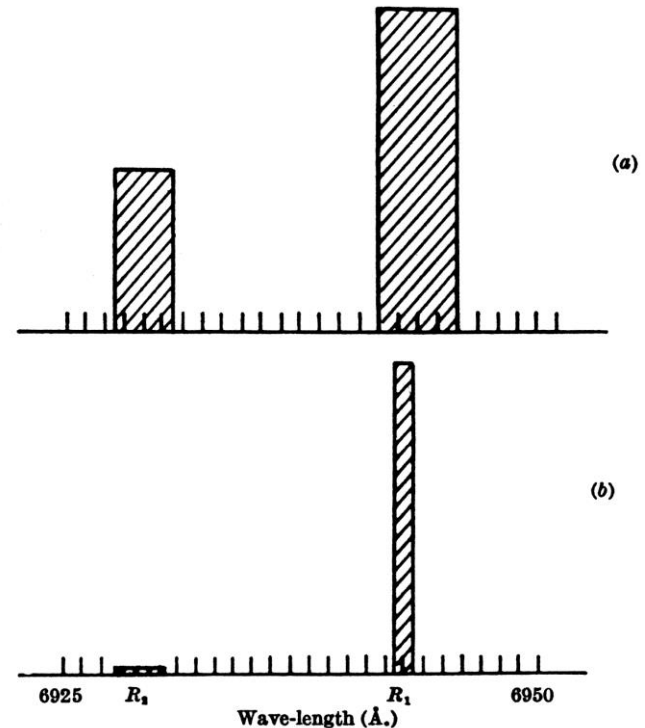


Fig. 2. Emission spectrum of ruby : *a*, low-power excitation ; *b*, high-power excitation

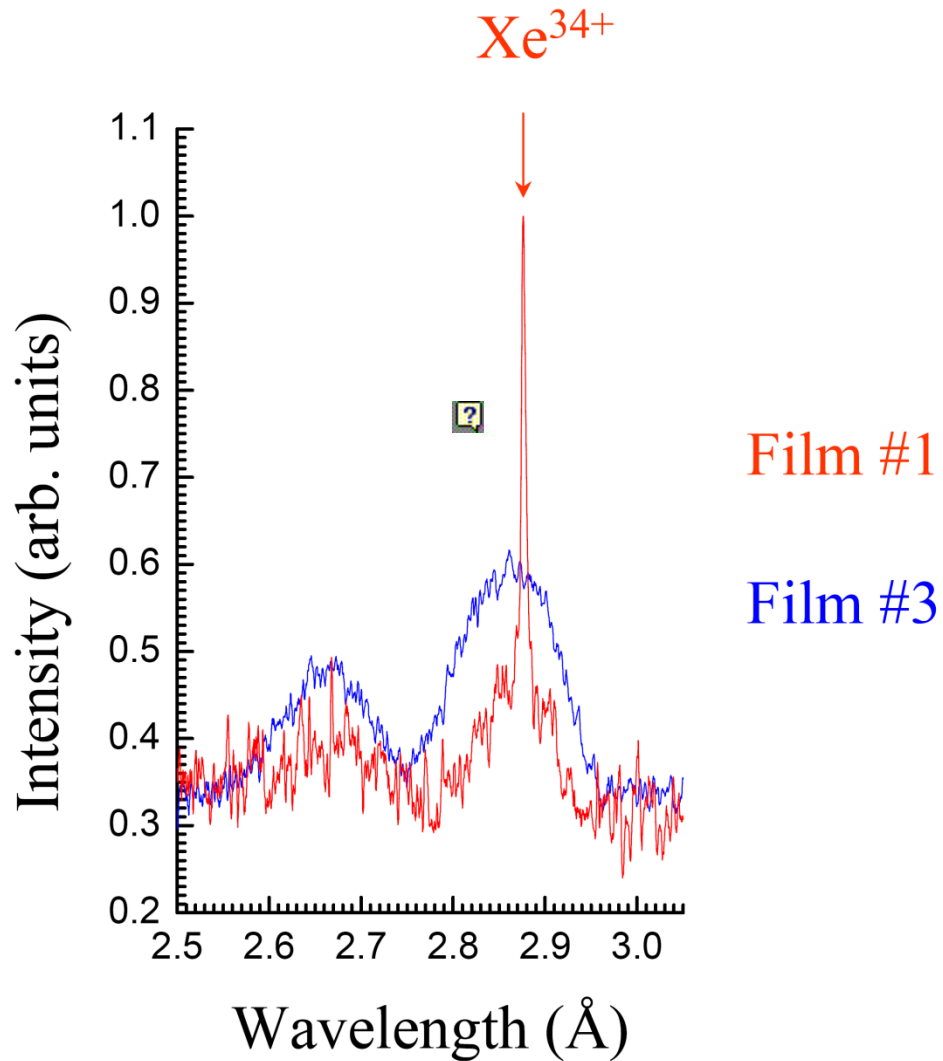
the emission spectrum obtained under these conditions is shown in Fig. 2*b*. These results can be explained on the basis that negative temperatures were produced and regenerative amplification ensued. I expect, in principle, a considerably greater ($\sim 10^8$) reduction in line width when mode selection techniques are used¹.

I gratefully acknowledge helpful discussions with G. Birnbaum, R. W. Hellwarth, L. C. Levitt, and R. A. Satten and am indebted to I. J. D'Haenens and C. K. Asawa for technical assistance in obtaining the measurements.

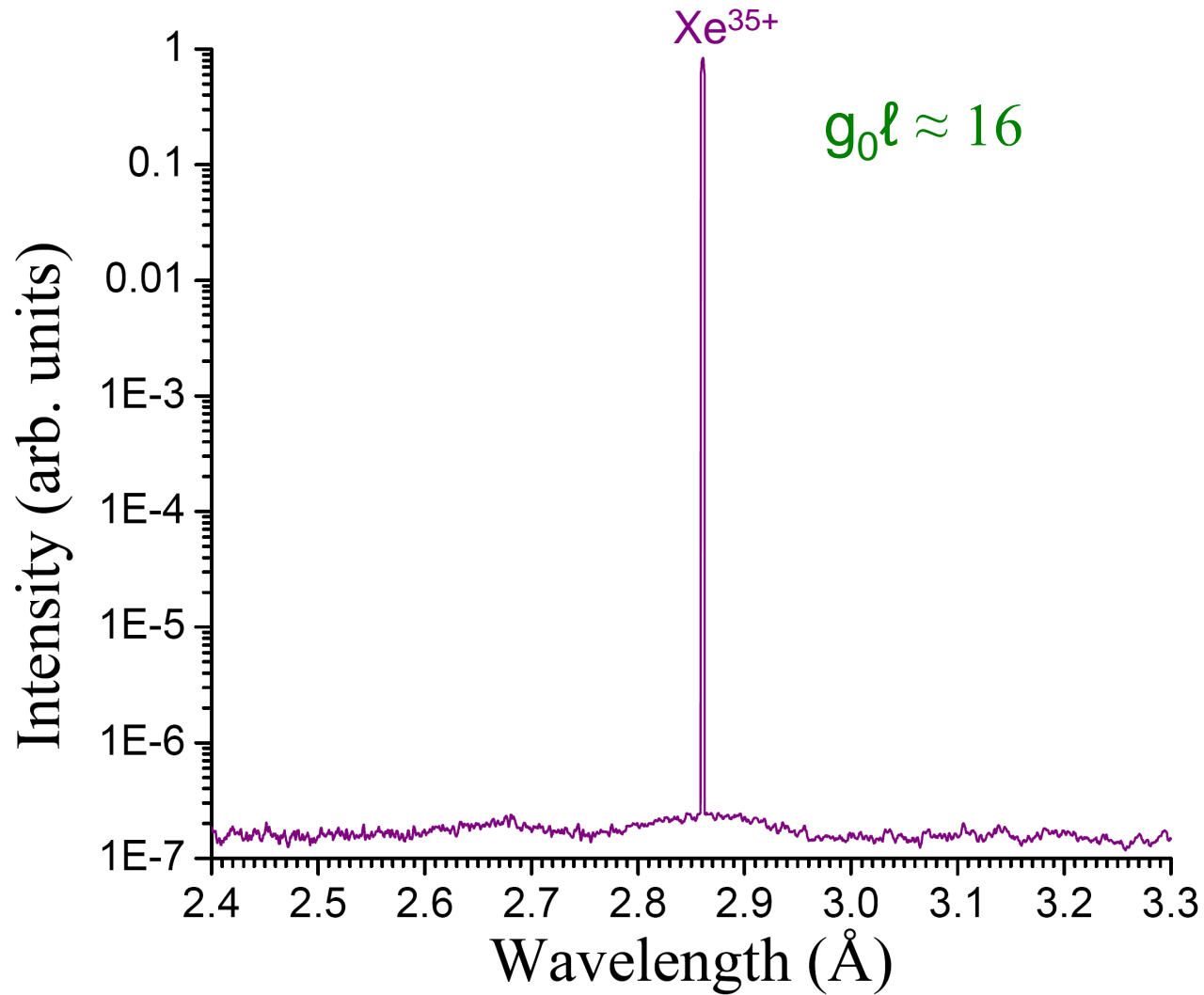
T. H. MAIMAN

Hughes Research Laboratories,
A Division of Hughes Aircraft Co.,
Malibu, California.

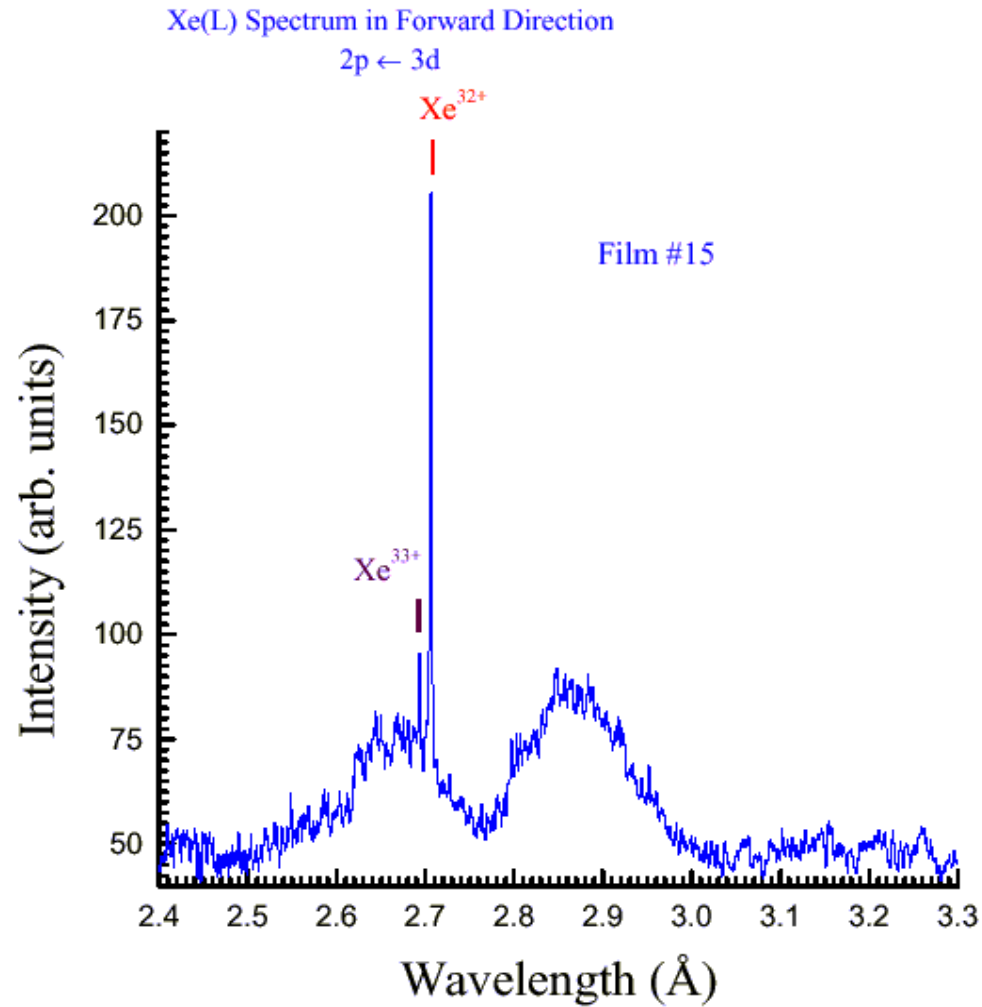
Xe³⁴⁺ Line Amplification



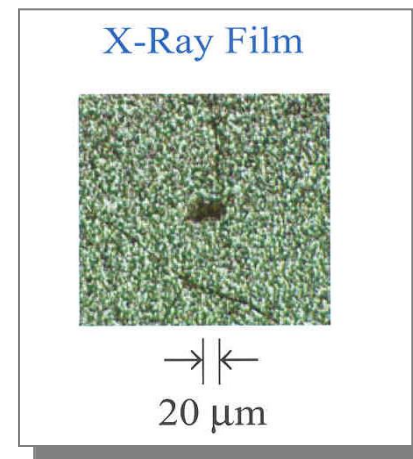
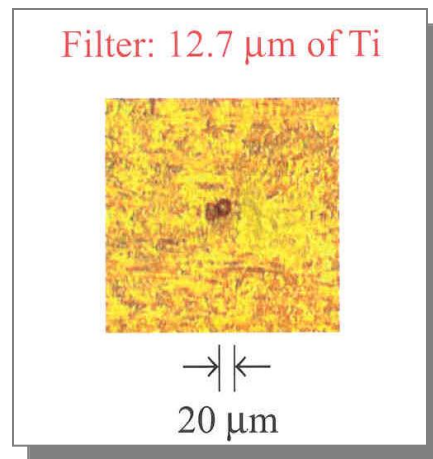
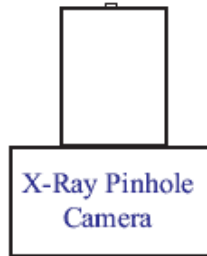
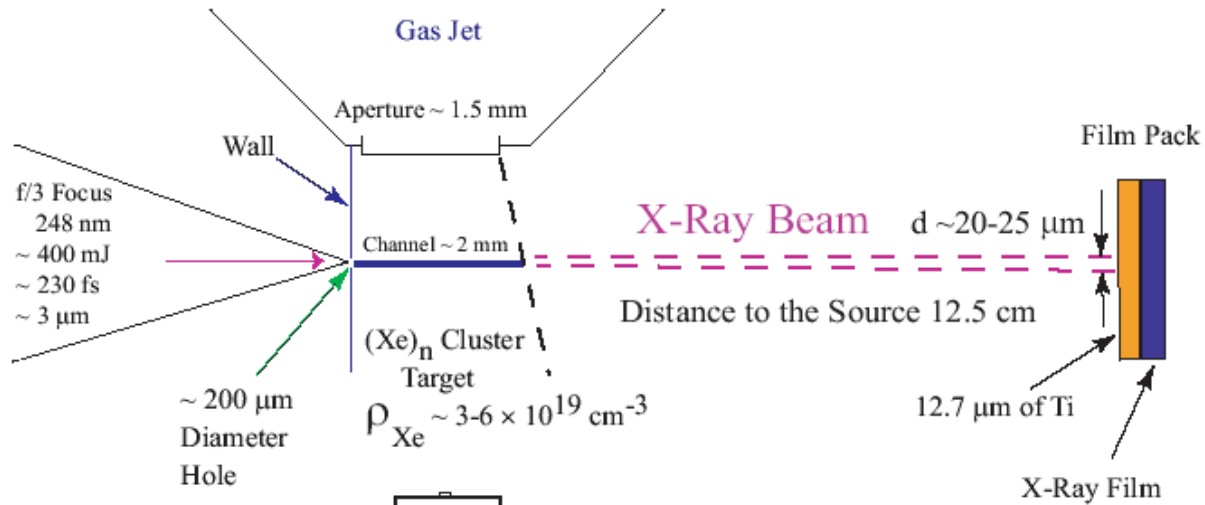
Amplified X-Ray Spectrum



Xe(L) AMPLIFICATION / Xe³²⁺ ~ 2.71 Å



X-RAY BEAM DOUBLE VISION



$$\delta\theta_x \sim 200 \mu\text{r}$$

Állítások és kételyek

- Állítás: $G=10^6$ elképesztő a normál röntgenlézerek $G=10$ -hez képest. Mérés nem abszolút, roncsolódásból, tehát nem megbízható.
- Több, különböző ionizáltságú Xe ionon figyelt meg lézerműködést. Ez egyidejűleg gyakorlatilag kizárt. Rhodes: A szaladó hullámban ezek egymás után gerjesztődnek, azaz különböző időkben.
- Mindazonáltal intenzív röntgenforrás létrehozható ?
- Alkalmazások egészen a röntgen-holográfiáig.
- Mit kell hozzá itthon? Új lézerezősítő.
- Filamentum feltételek teljesíthetők, legalább rövidebb hosszon.

Az eddigiek kombinációja: harmonikus „seed impulzus” erősítése röntgenlézerrel

Egy lézer általában oszcillátorból és erősítőkből áll, ami nehezen kivitelezhető röntgenlézerek esetén. A plazmákban való refrakció torzítja a nyalábot, nem hatékony a csatolás az erősítő fokozatba, ezért az elérhető összenergia alacsony.

Magas harmonikusokkal jó minőségű injektált impulzus állítható elő, ami immár a kisebb sűrűségű, kevesebbet torzító plazmában erősödhet (Zeitoun, 2004). Nagyobb intenzitás, koherensebb nyaláb kapható (Lambert et al., 2008).

Hangolható magas harmonikus seed impulzussal a spektrális szélesség csökkenthető (pl. Aladi, Földes 2014).

