

**ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA STROJNÍ**

**Czech Technical University in Prague
Faculty of Mechanical Engineering**

Jaroslav Kuba

**Výzkum a vývoj transientních rentgenových
laserů**

**Research and Development of Transient X-ray
Lasers**

Summary

In this lecture, research and development of transient x-ray lasers is reported. The lecture shows a rapid development of x-ray lasers from the first examples of x-ray lasers generated by a nuclear weapon or the largest optical lasers in the world to the tabletop high repetition x-ray laser with limited energy consumption that can be employed as a tool for further applications.

The emphasis is placed on experiments and research where the author has had the privilege to participate and bring his own contributions to that fascinating progress. During reported experiments the X-ray laser that employs the travelling wave irradiation geometry was created routinely. We report on an optimization and characterization of the x-ray laser beam in detail. Furthermore, the time-resolved experiments at the Rutherford-Appleton Laboratory (Oxfordshire, UK) are described. They showed that the shortest X-ray laser pulse in a plasma laser can be demonstrated (<2 ps) thanks to the transient scheme. The x-ray laser pulse always appeared in the rising edge of the continuum emission from plasma. This is believed to be a sign, along with the extremely short pulse duration, of a cut-off of the X-ray laser by the over-ionization of the plasma, as it was demonstrated by full-scale numerical simulations, using the EHYBRID atomic/hydrodynamic code. The simulations show a \sim picosecond-long gain duration, which is consistent with the observations, taking additionally into account the raytracing simulations. The increase in the continuum emission is related to the substantial rise of the electron density at a time scale longer than the x-ray laser pulse duration. The ray trace formulae lead to the new "GRIP" x-ray laser scheme that further reduced the energy needs by approx. $1/3$. The GRIP scheme is nowadays routinely utilized to create high-repetition x-ray laser beams for applications. First applications are reported also in this work. The first interferometry application was demonstrated using Fresnel bi-mirror interferometer. The interferograms with a good ($\sim 50\%$) fringe visibility are shown.

Specific properties of transient table top x-ray lasers can be employed in various applications. Short x-ray laser pulse could serve to investigate fast phenomena, such as rapidly developing plasmas interacting with short laser pulses. Furthermore, its high brightness could enable one to demonstrate non-linear interaction with matter, such as two-photon ionization of atoms.

Souhrn

V této přednášce bude představen výzkum a vývoj ve fyzice rentgenových laserů. Zaměřujeme se zejména na experimenty a výzkum, na němž měl autor to štěstí se podílet.

Ve zprávě je popsán postup vývoje a zkoušení transientního rentgenového laseru v geometrii s postupnou vlnou. V experimentech byl jeho svazek optimalizován a popsán v závislosti na parametrech. V rámci experimentů v Rutherford Appleton Laboratory bylo ukázáno, že transientní rentgenový laser umožňuje vytvořit pikosekundový puls, který byl v té době nejkratší puls rentgenového laseru vůbec. Rentgenový puls se vždy objevuje v náběžné hraně rentgenového pozadí kontinuálního záření, což naznačuje, spolu s velmi krátkou délkou pulsu, že doba trvání pulsu je řízena přeionizováním plazmatu. Toto bylo také ukázáno pomocí komplexní simulace podmínek v plazmatu a koeficientu zisku v tomto plazmatu atomovým a hydrodynamickým kódem EHYBRID. Modelování ukazuje, že doba života inverze populace je v oblasti okolo pikosekundy. Vezmeme-li v úvahu také šíření rentgenového svazku v plazmatu zesilovacího média, experimentální výsledky odpovídají simulacím. Simulace také potvrzují, že rentgenový puls laseru je generován v náběžné hraně kontinuálního záření. Jeho nárůst je způsoben podstatným růstem elektronové hustoty v době po ukončení laserového pulsu. Simulace také poskytuje detailní informace o podmínkách v plazmatu, včetně elektronové a iontové teploty a hustoty a průměrné ionizace, při níž je dosaženo maxima zisku. Další vývoj návazně také vedl k zavedení nového schématu „GRIP“, které dále zredukovalo energetickou náročnost rentgenového laseru na zhruba 1/3.

Schéma GRIP je dnes standardně používáno pro vytváření vysokorepetičních rentgenových pulsů pro aplikace. Přednáška představuje velmi rychlý vývoj rentgenových laserů od prvních pokusů vytvářených pomocí nukleární exploze nebo největších optických laserů své doby na světě až po praktický kompaktní rentgenový laser o vysoké kadenci, který se vejde na laboratorní stůl, jehož energetické potřeby jsou výrazně snižené. Tento laser je nyní nástrojem pro další aplikace.

Zde je představen vůbec první interferogram pomocí Fresnelova dvojzrcadla. Pomocí něho byly vytvořeny interferogramy s dobrým kontrastem (~50%), jako první krok směrem k interferometrickým aplikacím pomocí transientních rentgenových laserů.

Relativně krátký puls rentgenového laseru na laboratorním stole může sloužit ke zkoumání krátkých dějů, např. v rychle se vyvíjejících plazmatech, s nimiž interaguje krátký laserový puls (např. v experimentech s inerciální fúzí). Vysoký jas tohoto zdroje by také mohl pomoci prokázat např. dvoufotonovou ionizaci na této vlnové délce.

Klíčová slova: rentgenový laser, fyzika plazmatu, transientní schéma, ASE, laserové plazma, laser bez zrcadel, hydrodynamika plazmatu, atomová fyzika Ni-podobného systému

Key words: x-ray laser, plasma physics, transient scheme, ASE, laser plasma, mirrorless lasers, plasma hydrodynamics, atomic physics of Ni-like systems

(c) České vysoké učení technické v Praze

Obsah

| | |
|--|-----------|
| 1. Rentgenový laser čerpaný laserovým pulsem..... | 6 |
| 2. Charakterizace rentgenového laseru..... | 12 |
| 2.1 <i>Postupná vlna.....</i> | 12 |
| 2.2 <i>Časový rozvoj pulsu rentgenového laseru.....</i> | 14 |
| 2.3 <i>Modelování a analytický popis rentgenového laseru</i> | 16 |
| 3. Aplikace transientního rentgenového laseru: První interferogram..... | 19 |
| 4. Závěr | 20 |
| Literatura | 22 |

1. Rentgenový laser čerpaný laserovým pulsem

Po vytvoření prvního optického laseru v šedesátých letech minulého století se laser velice rychle rozšířil do celého optického spektra a do řady oblastí lidské činnosti. Vytvoření laseru v rentgenové oblasti se ale dlouhou dobu zdálo téměř nemožné. Uvažujeme-li totiž obvyklé schéma laseru založené na inverzi populace, koeficient stimulované emise záření při přechodu elektronů v obalu, B_{21} , je spojen s koeficientem spontánní emise, A_{21} , vztahem

$$A_{21} = \frac{8\pi h B_{21}}{\lambda^3}.$$

Jejich poměr tedy klesá se třetí mocninou vlnové délky fotonu, λ , ve prospěch spontánní emise. Další komplikací může být velká energie rentgenových fotonů, a to i v oblasti XUV (obvykle kladené mezi vlnové délky přibližně 3-60 nm – obr. 1, i když terminologie zde není úplně ustálená), která vyžaduje přechod elektronů mezi velmi vzdálenými hladinami v elektronovém obalu atomu. Pro vytvoření laserového oscilátoru – kavity bychom také potřebovali dvojici zrcadel.

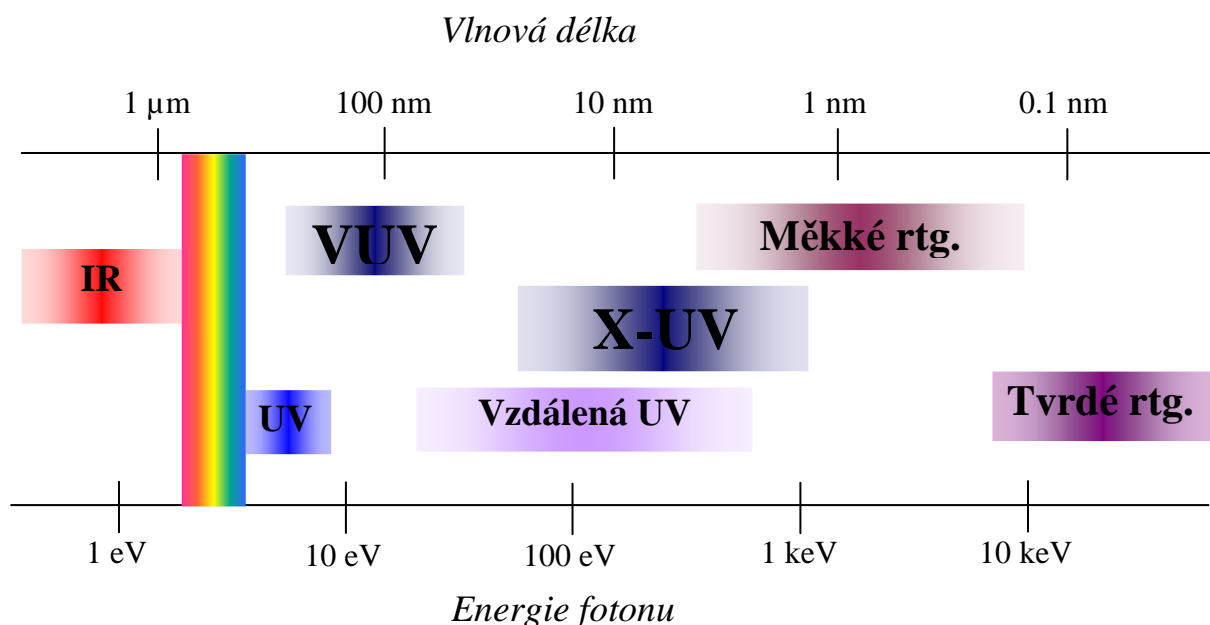
Výzkum se proto ubíral a ubírá i jinými cestami. Například jde o lasery na volných elektronech nebo také o vysoké harmonické optického laseru, která se dostane až do oblasti rentgenového záření. Funkční a spolehlivé řešení se však nejprve našlo pro rentgenový laser založený na inverzi populace, a to v horkém, silně ionizovaném plazmatu. Dnes se tyto typy výzkumu dobře doplňují.

Horké plazma může vznikat

- (1) při výbuchu jaderné pumy (zkoušeno pro tajné rentgenové lasery hvězdných válek),
- (2) samovolně ve vesmíru,
- (3) při mohutném elektrickém výboji (kapilární laser) anebo
- (4) při ozařování látek velmi výkonnými optickými lasery.

Dlouholetý výzkum v několika laboratořích na nejvýkonnějších optických laserech světa (zejména Ecole Polytechnique ve Francii, Rutherford Appleton Laboratory v Anglii a Lawrence Livermore National Laboratory v USA) však nakonec přinesl ovoce při použití výkonů nad 10^{13} W/cm² s délkami pulsů řádově od stovek pikosekund po nanosekundy. V roce

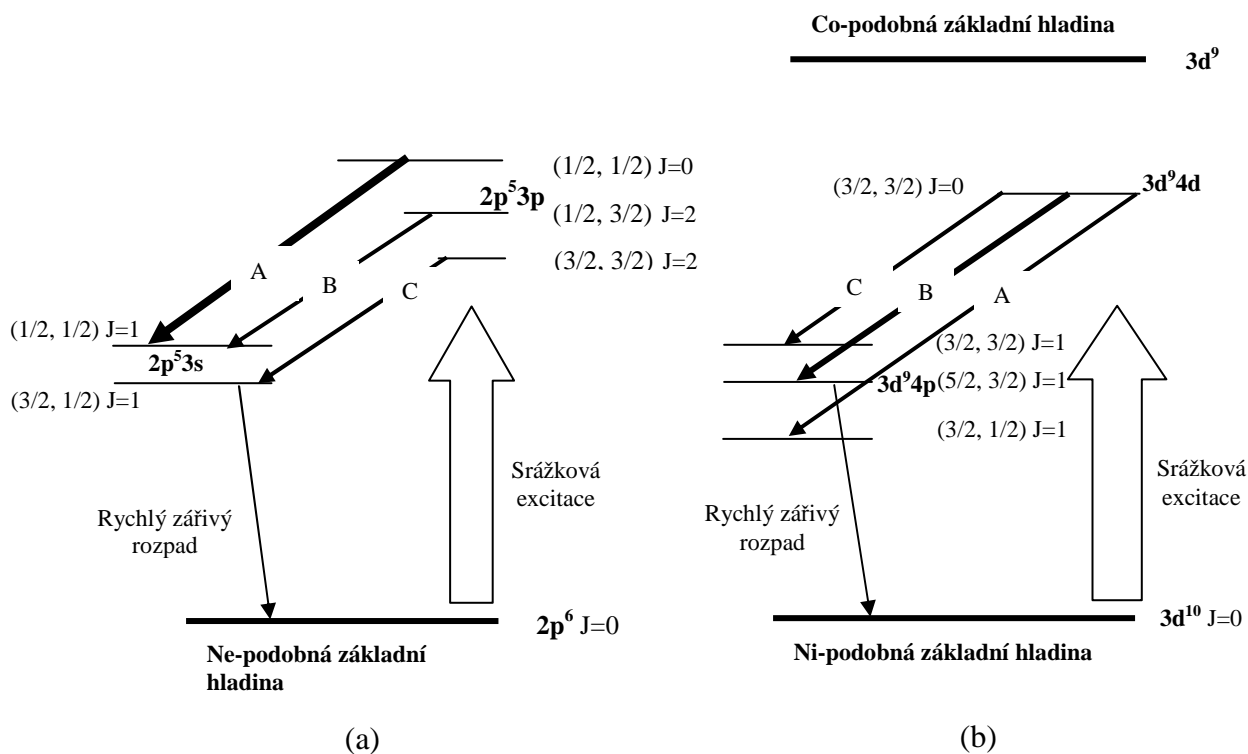
1984 Dennis Matthews z LLNL demonstroval první rentgenový laser [1] v horkém laserovém plazmatu, které vzniklo ozářením pevného terčiku tímto čerpacím laserem. Později se podařilo realizovat i další zmíněné možnosti: kapilární rentgenový laser [2] a také rentgenové lasery v rámci vojenských programů Sovětského svazu a Spojených států amerických.



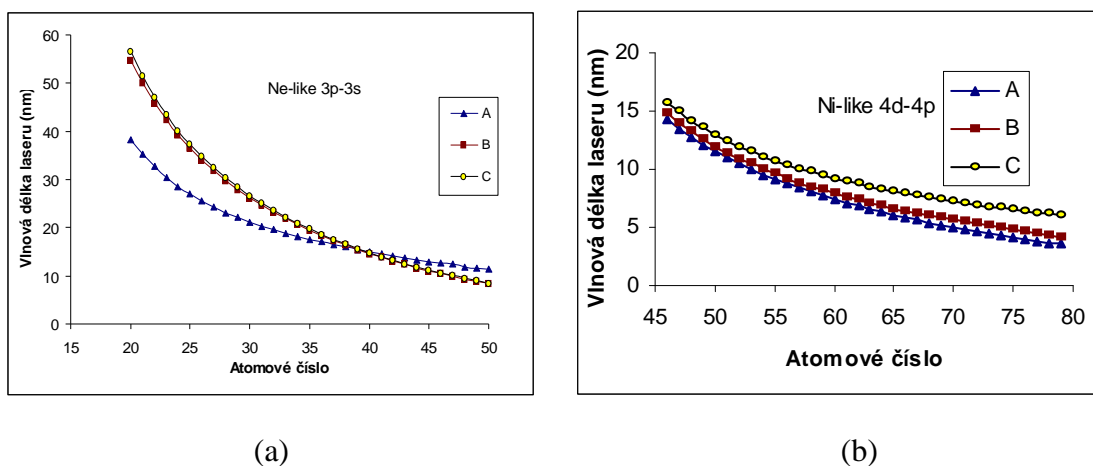
Obr. 1: Část elektromagnetického spektra od infračervené oblasti přes viditelné světlo, ultrafialovou oblast (UV), vakuovou ultrafialovou (VUV), vzdálenou ultrafialovou (EUV) až po rentgenové paprsky. Tzv. X-UV oblast se obvykle umísťuje mezi 3-60 nm, to znamená mezi vzdálenou ultrafialovou a měkké rentgenové paprsky, i když terminologie není úplně ustálená.

| Typ iontu | Uzavřená slupka | Základní elektronová struktura | Počet vázaných elektronů |
|--------------------------|-----------------|------------------------------------|--------------------------|
| He-podobné (He-like) | n=1 | $1s^2$ | 2 |
| Ne-podobné (Ne-like) | n=2 | $1s^2 2s^2 2p^6$ | 10 |
| Ni-podobné (nickel-like) | n=3 | $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 3d^{10}$ | 28 |
| ... | | | |

Tab. 1. Nejpoužívanější atomové systémy s uzavřenou slupkou



Obr. 2 (a) Neonu-podobný systém inverze populace pro rentgenový laser v horkém plazmatu mezi hladinami 3p a 3s; (b) Niklu-podobný systém, inverze populace mezi hladinami 4d a 4p.

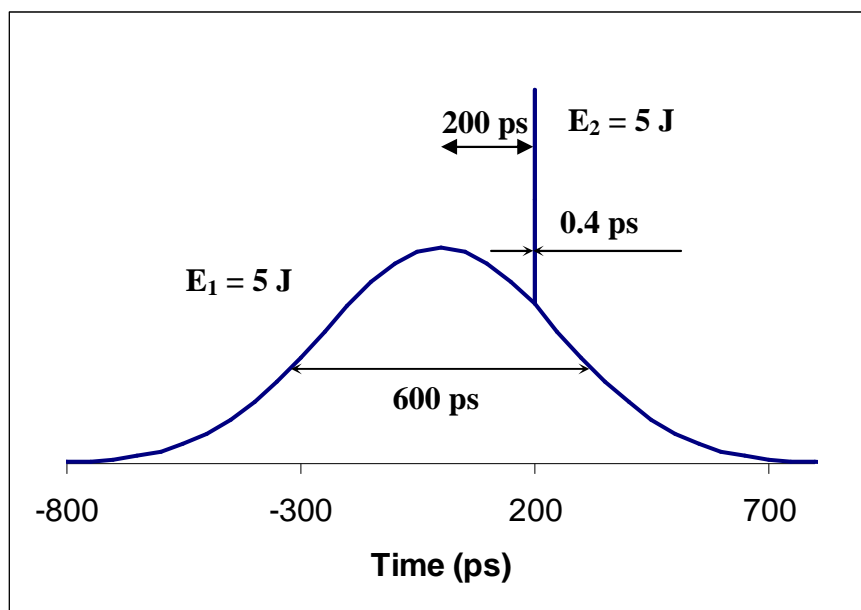


Obr. 3 Vlnové délky rentgenového laseru v závislosti na atomovém čísle materiálu terčičku (a) Ne-podobný systém, (b) Ni-podobný systém. Z grafu a navazující teorie je patrné, že se stejnou čerpací energií se můžeme pro Ni-podobný systém dostat do oblasti kratších vlnových délek než v případě Ne-podobných.

V současné době se nejčastěji používají tzv. neonu-podobné (Ne-like) nebo niklu-podobné (Ni-like) atomové systémy (obr. 2). Jedná se obvykle

o atomy těžších prvků, např. Ag (19x ionizované pro Ni-podobné) nebo Pd, které jsou ionizovány tak, aby vznikla uzavřená elektronová slupka podobná té, kterou má nikl, příp. neon (Tab. 1). Uzavřená slupka zaručuje relativní stabilitu daného iontu. Přitom jeden z elektronů je excitován z této uzavřené slupky na vyšší hladinu (3p v případě Ne-podobných systémů nebo 4d v případě Ni-podobných systémů – obr. 2). Ukazuje se, že elektronová struktura v těchto systémech umožňuje dosažení inverze populace mezi vzdálenými hladinami (3p-3s pro Ne-podobné a 4d-4p pro Ni-podobné), jejichž energetický rozdíl odpovídá vyzařované vlnové délce v měkké rentgenové oblasti (obr. 3).

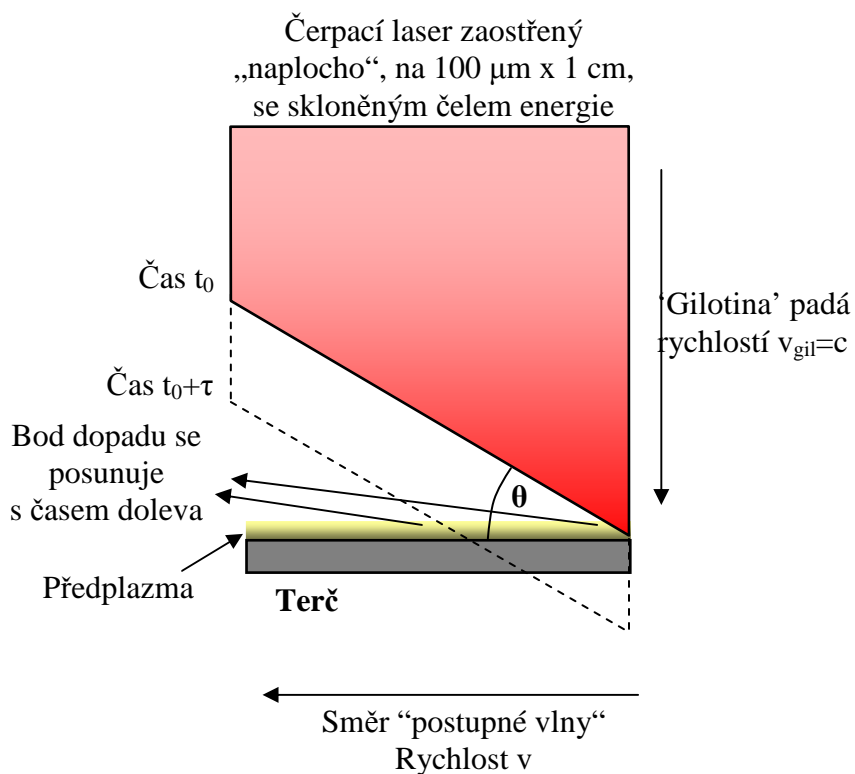
Pro experimenty s tradičním, kvazi-stabilním rentgenovým laserem (Quasi-steady state – QSS) lze použít jen velmi výkonné optické laserové systémy, které jsou dostupné jen v nemnoha laboratořích na světě. Nutná energie dosahuje řádově stovek Joulů v pulsech dlouhých okolo 0.5-1 ns. Tento typ laserů je spolehlivým nástrojem s mnoha aplikacemi (např. [4]) a dosahuje dnes největšího výkonu v rentgenovém pulsu.



Obr. 4. Transientní schéma čerpacích pulsů pro rentgenový laser: příklad 2 pulsů (příklad vhodných parametrů obou pulsů je převzat z experimentu na zařízení P102 v CEA, Francie) [3].

Jedním ze zásadních cílů výzkumu v této oblasti je snížení energetické náročnosti rentgenových laserů. Tím automaticky dojde také ke zmenšení rentgenových laserů od rozměrů několika hal v největších laserových laboratořích na rozměry vhodné pro laboratorní stůl (a

v budoucnu snad i lépe). Jednou velmi slibnou možností se jeví tzv. *transientní schéma*, které umožnilo snížení nutné energie od stovek Joulů až po asi 1 J. Právě na toto transientní schéma se zaměřuje největší část výzkumu autora v oboru rentgenových laserů.



Obr. 5: Princip gilotiny umožňuje synchronizovat zahřívání plazmatu a rychlost letu rentgenových fotonů v plazmatu. Čerpací laser, zaostřený do čarového ohniska, má skloněné čelo energie a zahřívá plazma postupně z jedné strany na druhou. Rychlost postupu je definována úhlem θ a může být precizně nastavena na rychlost fotonů $v = c$, příp. i $v > c$ nebo $v < c$.

V transientním schématu rozdělíme několik procesů (zahřátí a odpaření terče, ionizaci plynu a vznik plazmatu a konečně vytvoření inverze populace) mezi sérii dvou nebo i více následných pulsů budicího laseru, které mají vhodné parametry pro každý z těchto úkolů. Relativně dlouhý (1 ns), nízkoenergetický puls vytvoří sloupec plazmatu (obr. 4). Tvorba laserujícího prostředí v plazmatu probíhá následně ozářením takto připraveného plazmatu ultrakrátkým laserovým pulsem (stovky fs, nejvýše jednotky ps) [5], [6]. Inverze populace potom vzniká na krátký okamžik (méně než 10 ps) v době, než dojde k přeionizování systému.

Inverze populace však při takto krátkých pulsech trvá pouhých 10 ps nebo i méně. Uvědomíme-li si přitom, že každý rentgenový foton letící rychlostí světla potřebuje zhruba 33 ps k přeletu plazmatického sloupce o délce 1 cm, ukazuje se, že jde o vážnou komplikaci.

Jedním z možných řešení, které se dnes již běžně používá, je princip gilotiny [7]. Aby se amplifikovaný svazek fotonů vždy nalézal v maximu inverze populace, musí se oblast inverze populace pohybovat zároveň se skupinou rentgenových fotonů letících v plazmatu (Obr. 5). Toho můžeme docílit, pokud nakloníme čelo energie čerpacího laseru tak, aby ozařoval terč – jako gilotina – postupně od jednoho konce plazmatického sloupce k druhému, pak také plazma je zahříváno postupně.

Náklonu čela energie lze dosáhnout několika metodami. Zřejmě nejpoužívanější dnes spočívá v naklonění jedné z mřížek vakuového kompresoru pulsu (CPA kompresoru) na konci laserové instalace před interakční komorou. Dá se odvodit, že zpoždění mezi konci terčíku, $\Delta\tau$, je možno vyjádřit pomocí úhlu náklonu mřížky, ε , úhlu dopadu na mřížku, i_{10} , a úhlu odrazu od první mřížky, α_{10} , jako

$$\tan(\theta) = \frac{2\lambda_0 N}{\cos(i_{10})} \left[\frac{\cos(\alpha_{10})}{\cos(\alpha_{10} - \varepsilon)} - 1 \right] \quad \text{a} \quad \Delta\tau = \tan(\theta) \frac{\rho_b}{c},$$

kde λ_0 je střední vlnová délka laseru, c značí rychlost světla ve vakuu kompresoru, ρ_b je průměr laserového svazku a N hustota čar na mřížce, (typicky 1740 čar/mm při velikosti mřížky okolo 45 cm).

Zvolíme-li tedy vhodný úhel ε , podaří se nám synchronizovat „pohyb“ (tzv. postupnou vlnu – travelling wave) čerpané oblasti v plazmatu s letícím fotonem. Jestliže ale nastavíme úhel příliš velký, oblast se „pohybuje“ nadsvětelnou rychlostí a předběhne fotony, které chceme zesílit. Malý úhel zase znamená zpoždování za fotony a výkon laseru je také slabý, jak patrně i experimentálních prací [3]. [Myšlenka gilotiny – postupné vlny však není úplně nová, tato metoda se v minulosti již používala, např. k čerpání barvivových laserů].

2. Charakterizace rentgenového laseru

2.1 Postupná vlna

Transientní rentgenový laser byl testován a charakterizován v řadě experimentů. V této přednášce se zaměřuji na jeden z prvních experimentů s postupnou vlnou [3]. Cílem experimentu bylo ukázat a změřit účinek zesílení postupnou vlnou v kontrolovaných podmínkách (zde bylo dosaženo tehdy nejvyšší zesílení a bylo důkladně proměřeno) a dále zjistit, zda je možné zlepšit kvalitu svazku použitím tzv. dvojbarevného čerpání.

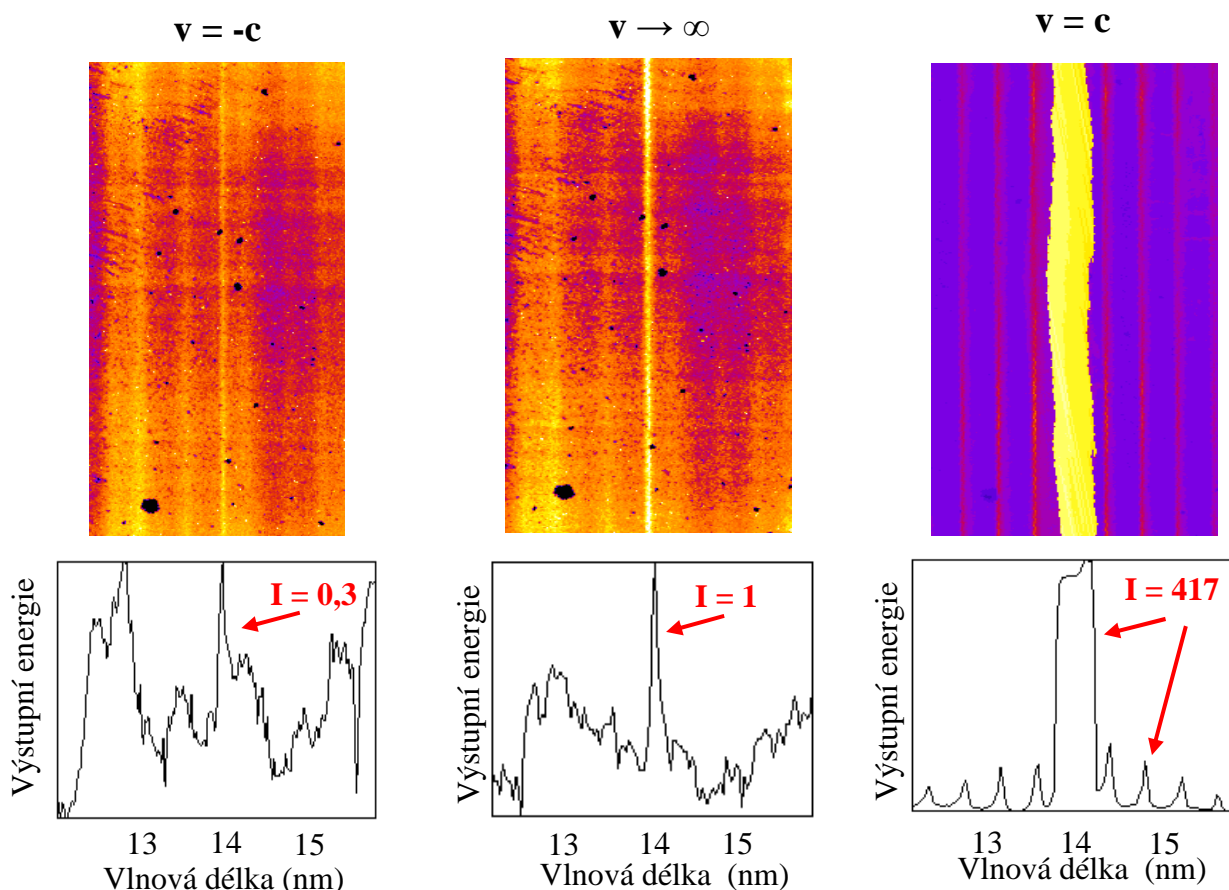
Experiment byl proveden na systému P102 v CEA Limeil. Použité parametry čerpacího laseru byly:

- 20 J energie ve 400 fs pulsu
- Frekvence prvního pulsu: 2. harmonická ($\lambda = 0,528 \mu\text{m}$)
- Energie v druhém pulsu: až 60 J, 600 ps pulsu
- Frekvence druhého pulsu: základní frekvence ($\lambda = 1,057 \mu\text{m}$)
- Rozestup pulsů byl nastaven na 200ps.
- Postupná vlna na krátkém pulsu byla testována s rychlostmi c , 0 , $-c$
- Laserující ionty: niklu podobné stříbro

Jako hlavní detektory byly použity dva mřížkové spektrometry (reflexní a transmisní s aperiodickou mřížkou) a streak kamera s časovým rozlišením ~ 5 ps.

Naměřené výsledky ukazují, že energie rentgenového laseru se zvýší až 400x, aplikujeme-li postupnou vlnu. Pro proměření účinků postupné vlny byl nastaven mřížkový spektrometr ve vzdálenosti zhruba 48,5 cm od výstupu rentgenového laseru z plazmatického sloupce. Data zachycená na CCD kameře spojené se spektrometrem poskytují spektrálně rozlišený signál z plazmatu v závislosti na vzdálenosti od terče. Zároveň byl jiným spektrometrem pozorován výstup na opačném konci plazmatického sloupce. Postupná vlna byla orientována střídavě ve směru jednoho ($v = +c$) nebo druhého ($v = -c$) spektrometru anebo nebyla použita vůbec (tj. rychlost postupné vlny $v \rightarrow \infty$). Simultánní měření na obou koncích plazmatu poskytlo spolehlivý důkaz, že použití postupné vlny dává zvýšení účinnosti rentgenového laseru faktorem 400 oproti experimentu bez postupné vlny a dále použití postupné vlny ve „špatném“ směru

snižuje účinnost 3x. Zvolené podmínky také umožnily demonstrovat novou laserovou čáru v niklu podobném stříbru na 16.05 nm, která byla identifikována jako přechod $4f \ ^1P_1 \rightarrow 4d \ ^1P_1$. V určitých specifických podmínkách byla tato čára silnější než obvyklá čára na 13.9 nm. Její fyzikální princip čerpání dosud není zcela vyjasněn, přestože byl dříve navržen princip fotočerpání [8], [9].



Obr. 6: Postupná vlna zesiluje rentgenový laser zhruba 400x. Data ze spektrometru (zachycená na CCD nahoře) ukazují výstupní signál z plazmatického sloupce v okolí vlnové délky rentgenového laseru 13,9 nm. V horizontálním směru je zobrazeno spektrum, vertikální směr ukazuje rozložení v prostoru. Grafy pod obrázky reprezentují profil CCD snímků nad nimi ve spektrálním směru. Přitom prostřední graf odpovídá případu bez postupné vlny, graf vpravo s postupnou vlnou ($v = c$) a vlevo s postupnou vlnou ale ve „špatném“ směru ($v = -c$). Naměřené výstupní energie jsou normovány na případ bez postupné vlny ($I = 1$) [3].

2.2 Časový rozvoj pulsu rentgenového laseru

První výsledky měření časové závislosti rentgenového pulsu streak kamerou naznačovaly rozdíly v časových charakteristikách, zejména v délce pulsu, v případě, kdy je nebo není použita postupná vlna. Velmi krátká doba trvání inverze populace v plazmatu dále ukazuje na velmi krátké trvání rentgenového pulsu.

Cílem experimentu proto bylo především změřeni časového průběhu rentgenového laseru v niklu podobném Ag plazmatu na 13,9 nm a optimalizace čerpacích parametrů se snahou minimalizovat délku pulsu rentgenové laseru. Závislost jsme podrobněji zkoumali během experimentu v Rutherford Appleton Laboratory v Oxfordshiru v Anglii. Experiment byl proveden na laseru Vulcan, který umožňuje pracovat s energií až 60J v CPA pulsu o délce 1ps [11].

Byla použita kamera Axis Photonique [10] s rozlišovací schopností 800fs (šlo o nejrychlejší kameru). Kamera byla spojena s reflexním mřížkovým spektrometrem s aperiodickým rozložením vrypů (při průměrné hustotě 1200 vrypů/mm). Toto nastavení však bohužel částečně omezuje rozlišovací schopnost streak kamery. Důvodem je rozdíl optických drah paprsků odražených od mřížky spektrometru v různých místech, takže štěrbina spektrometru definuje časové rozlišení. V tomto nastavení je rozlišení limitováno šířkou vstupní apertury spektrometru. Rozlišovací schopnost je potom dána jako

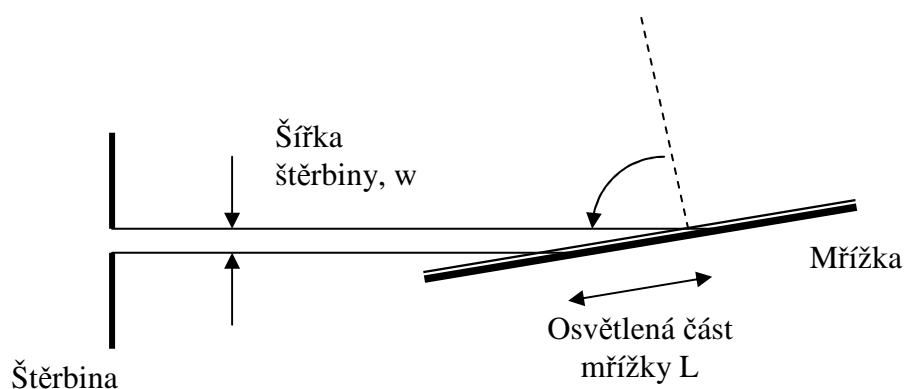
$$\tau_R = \frac{w\lambda}{c.d.\cos\alpha}$$

Zde w je šířka štěrby, λ vlnová délka, c rychlost světla a d je mřížková konstanta. Úhel α popisuje náklon mřížky vzhledem ke svazku zkoumaného záření.

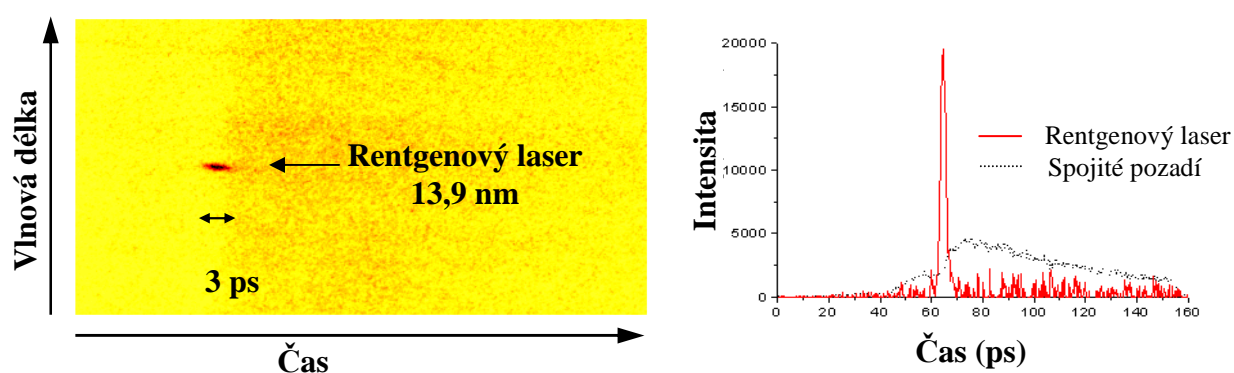
Vstupní štěrbina streak kamery byla ve vertikálním směru nastavena pod takovým úhlem, aby pozorovala první maximum intenzity laserové čáry rozlišené spektrometrem. V horizontálním směru byla nastavena na prostorové maximum intenzity laseru (rentgenový svazek vystupuje z plazmatu pod úhlem 5mrad ve směru kolmém k terči a je bez deflekce v horizontálním směru).

Při optimálním nastavení čerpacích parametrů byl demonstrován nejkratší puls opticky čerpaného rentgenového laseru a to (2 ± 1) ps.

Maximum intenzity rentgenového laseru v čase se nachází ještě před maximem kontinuálního záření pozadí, které je měřeno na spektrometru. Toto kontinuální pozadí je dané zejména brzdným zářením z plazmatu. Posun mezi maximem intenzity rentgenového laseru a maximem intenzity kontinuálního záření naznačuje, že rentgenový laser se generuje před dosažením maximální teploty v plazmatu. Tento výsledek vyvolal řadu diskusí a byl základem také další práce na modelování a simulacích.



Obr. 7: Šířka stěrbiny omezuje rozlišení streak kamery spojené se spektrometrem.



Obr. 8: Nejkratší puls rentgenového laseru. Transientní rentgenový Ni-podobný Ag laser na 13,9 nm byl optimalizován pro co nejkratší délku pulsu. Nejkratší dosud pozorovaný puls rentgenového laseru dosahuje 2 ± 1 ps [11].

Z hlediska instrumentálního je také zajímavý poměr mezi intenzitou brzdného záření a intenzitou rentgenového laseru. Ten naznačuje, že používaná streak kamera dosahuje dobrého dynamického rozsahu i při maximálním rozlišení.

2.3 Modelování a analytický popis rentgenového laseru

Dynamika transientního laseru byla dlouhodobě diskutována a existovalo více přístupů. Jedno možné vysvětlení by ukazovalo, že puls rentgenového laseru je v čase limitován přeionizováním plazmatu a tedy zničením niklu-podobného atomového systému, v němž se tvoří inverze populace. Vhodnou volbou parametrů by tedy snad mohlo být možné nejen generovat velmi krátké pulsy, ale i řídit teplotu plazmatu a tím i délku rentgenových pulsů.

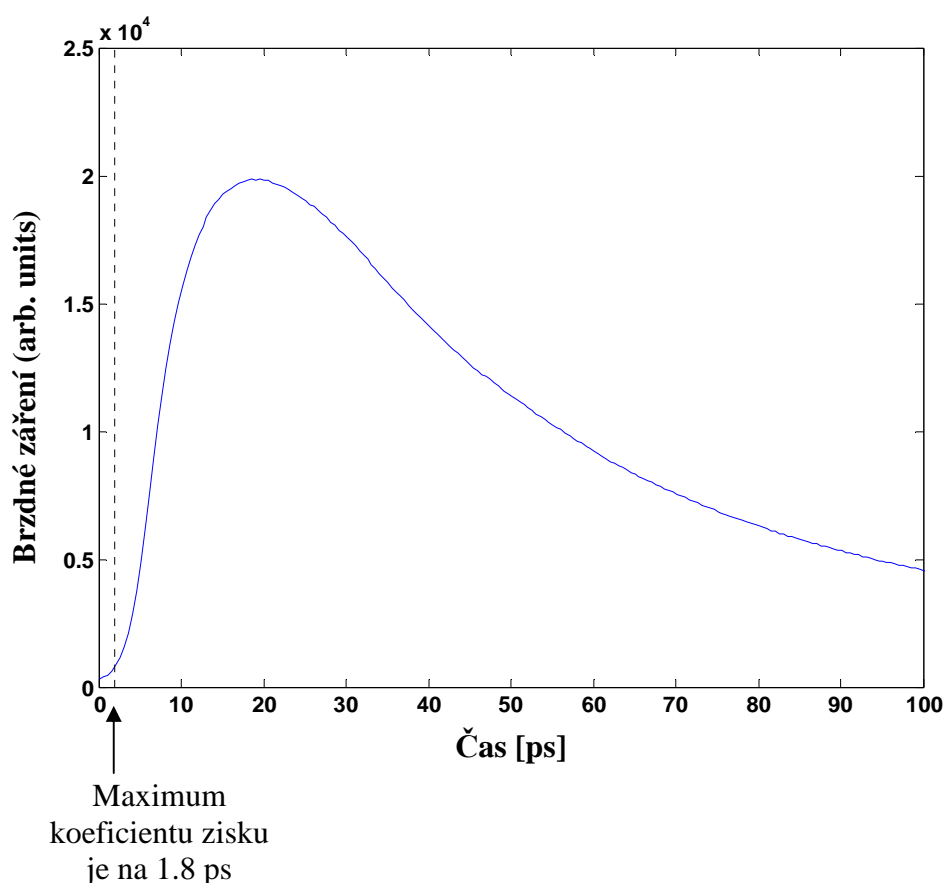
Prověření takové hypotézy však vyžadovalo sestavení několika komplikovaných numerických kódů. Existují různé přístupy, zaměřím se zde na popis přístupu popsaného v předložených člancích. Nejprve jsme modelovali vývoj plazmatu při interakci s čerpacím laserem. Pro tento úkol byl aplikován standardní kód EHYBRID vyvinutý prof. Pertem z University of York [12]. EHYBRID je hydrodynamický/atomový kód, který dovoluje počítat vývoj charakteristické veličiny laserového plazmatu, stejně jako modelovat atomové systémy v daném iontu, inverzi populace a tedy zisk zesilujícího prostředí při daných parametrech čerpacího laserového pulsu/pulsů. Dále je třeba modelovat šíření rentgenového svazku v tomto plazmatu. Toto bylo provedeno jednak relativně jednoduchou metodou ray-tracingu, jednak prostřednictvím kódu založeného na Bloch-Maxwellových rovnicích [12].

Publikované výsledky ukazují, že zóna maximálního zesílení v aktivním médiu je poměrně malá a velmi omezená v čase. Brzdné záření dosahuje maxima až výrazně později díky vysoké teplotě v hustém plazmatu v blízkosti povrchu terčíku.

Další práce se zabývají analytickým řešením pro šíření paprsku v aktivním prostředí laserového plazmatu. Dřívější práce [13] odvodily analytické vzorce pro některé speciální profily plazmatu, jako jsou lineární, $1/x$ a kvadratický. Tyto jsou však jen jistým přiblížením, jak zmiňují i autoři těchto prací. Teorie předvídá (a numerické simulace jsou s tímto tvrzením v souladu), že profil hustoty v tomto typu laserového plazmatu je exponenciálního charakteru ve směru kolmém na terč. Uchazeč proto

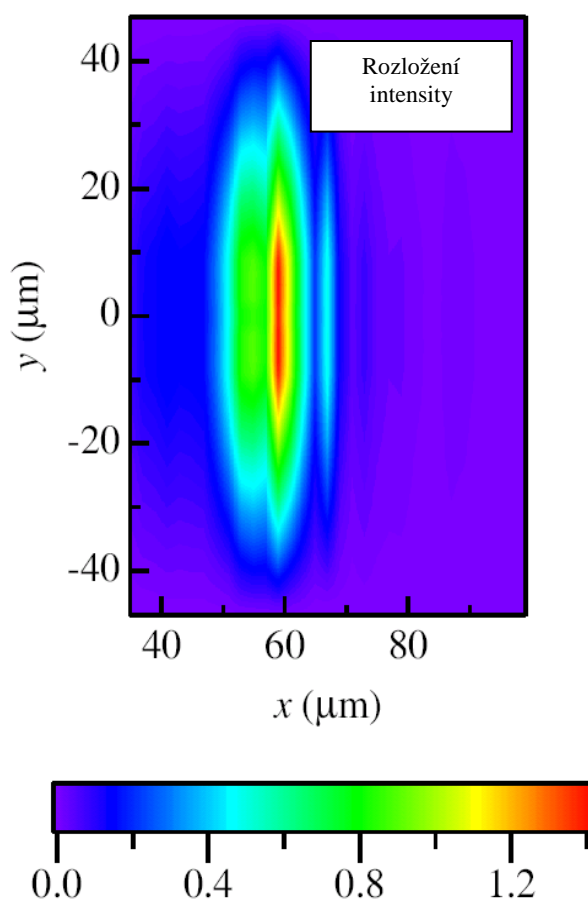
odvodil poměrně jednoduchý analytický vzorec pro takový exponenciální profil pomocí substituce funkce v řešené diferenciální rovnici [14], [15]. Výsledek byl potom dále použit dalšími autory nejen pro ray-trace rentgenových svazků, ale i pro schéma s dopadem pod velkým úhlem, kde je vzorec použit pro šíření optického svazku.

Parametry rentgenového laseru závisejí na tvaru a časovém profilu aktivního média a na vlastnostech šíření. Vzhledem k tomu, že zisky prostředí jsou řádu až desítek cm^{-1} , ukazuje se, že vliv šíření může být dominantní oproti vlastnímu tvaru profilu nebo konkrétní hodnotě zesílení. Zejména díky exponenciálnímu charakteru zesílení je puls rychle zkracován, zatímco po dosažení saturace se zase prodlužuje v čase.



Obr. 9: Časový průběh brzdného záření z laserového plazmatu pro podmínky našich experimentů v Rutherford Appleton Laboratory ukazuje, že maximum zisku zesilujícího prostředí se objevuje v náběžné hraně brzdného záření plazmatu. [15]

Pro výpočet dalších vlastností rentgenového laseru byl použit kód založený na Bloch-Maxwellových kvantově-klasických rovnicích, které byly použity v RWA aproximaci (rotating wave approximation) a paraxiální aproximaci. Tento kód umožňuje spolehlivě modelovat požadované parametry rentgenového laseru. Výsledky ukazují, že délka pulsu rentgenového laseru je řízena přeionizováním plazmatu, což je v souladu i s experimenty uchazeče v Lawrence Livermore National Laboratory. Kontinuální pozadí je důsledkem brzděného záření v plazmatu a objevuje se s časovou prodlevou v důsledku vzniku tepelné vlny v plazmatu.

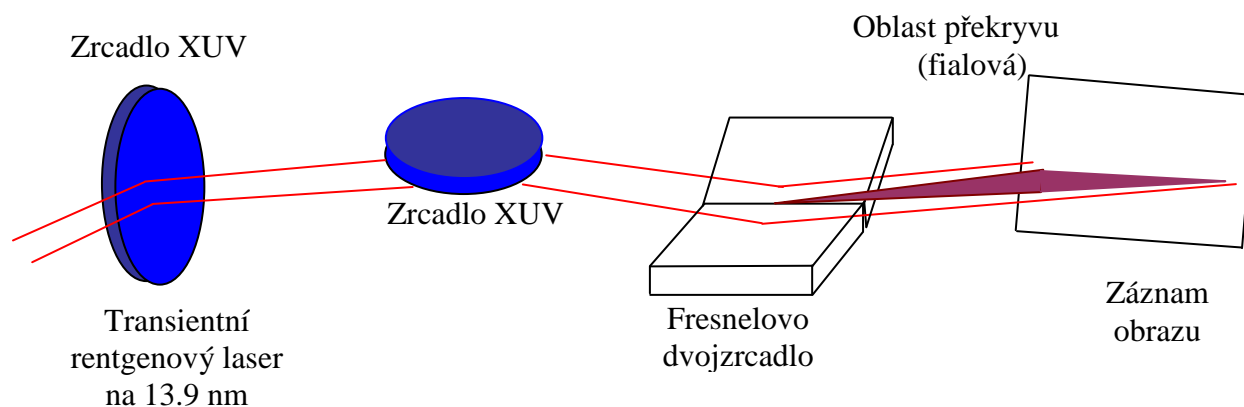


Obr. 10: Ukázka předpovídaného výstupu transientního rentgenového laseru na 13,9 nm simulovaného pomocí nové série Bloch-Maxwellových kódů vyvinutých ve spolupráci Université Paris XI a FJFI ČVUT [17].

3. Aplikace transientního rentgenového laseru:

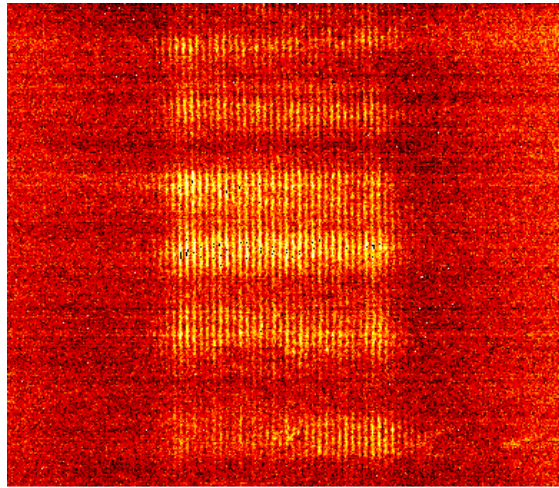
První interferogram

Z mnoha aplikací představujeme první interferogram, který byl demonstrován pomocí transientního rentgenového laseru. Důležitou aplikací laserů s možnostmi v mnoha oblastech, je uplatnění jejich koherence k tvorbě interferogramů, které se potom mohou výhodně použít k měření vlastností prostředí, jímž laser prochází. Experiment byl proveden pomocí tzv. Fresnelova dvojjzrcadla (obr. 11). To rozdělí laserový svazek – jako otevřená kniha – na dvě části, které potom spolu v místě překryvu na stínítku (v tomto případě CCD kameře) tvoří interferogram. Historicky první takový interferogram pomocí transientního laseru je zachycen v obr. 12.



Obr. 11: Schéma experimentu pro demonstraci prvního interferogramu pomocí transientního rentgenového laseru na 13,9 nm. Rentgenový laser po vyfiltrování pomocí dvou multivrstevnatých zrcadel dopadá na Fresnelova zrcadla, za nimi se obě vzniklé části svazku překryjí a na stínítku (CCD kameře) pozorujeme interferogram.

Vývoj samotného laseru samozřejmě stále také pokračuje. Na základě studií refrakce paprsků v plazmatu rentgenového laseru bylo navrženo tzv. čerpání pod vysokým úhlem (Grazing Incidence Pumping – GRIP), které využívá právě refrakce k dalšímu zhruba trojnásobnému zvýšení účinnosti rentgenových laserů. [18]



Obr. 12: První interferogram pomocí transientního rentgenového laseru. Interferogram na 13,9 nm z Fresnelova dvojjadla (zachycený na CCD). Délka terče 10 mm, postupná vlna $v = c$.

4. Závěr

Rentgenové lasery za posledních 10 let přešly z největších laboratoří na laboratorní stůl, od nutné čerpací energie mnoha stovek či tisíců Joulů po zhruba 1 J, a také od hvězdných válek k aplikacím v biologii, fyzice plazmatu i jinde. Rychlost jejich vývoje je srovnatelná snad jen s vývojem mikroprocesorů a počítačů, což lze ukázat i kvantitativně: charakterizovali vývoj mikroprocesorů tzv. Mooreův zákon exponenciálního vývoje, že počet tranzistorů na chipu se zdvojnásobí každých 18 měsíců, můžeme podobnou závislost pozorovat také u snižování energetických nároků rentgenových laserů. Jen budoucnost ale ukáže, zda a kdy se podaří uskutečnit cíle naznačené v úvodu tohoto článku a mnohé další.

Transientní systémy však nejsou jedinou variantou pro generaci měkkých rentgenových laserů. Paralelně s naším výzkumem se rozvíjela konkurenční schémata, zejména rentgenový laser pomocí kapilárního výboje. Ten byl poprvé demonstrován v r. 1995 a dnes je již nabízen na kvazi-komerční bázi. Kapilární lasery dosahují malých rozměrů (srovnatelných již téměř s optickými a UV lasery) při energii v pulsu okolo 25 mJ v subnanosekundových pulsech a kadencí 5 Hz. Nevýhodou je poměrně vysoká vlnová délka (46 nm) a technické obtíže při přechodu do oblasti vlnových délek pokrytých již např. QSS nebo transientními rtg. lasery. Neméně zajímavou větví vývoje rtg. laseru se stalo schéma

založené na ionizaci polem (OFI), které se také velmi rychle rozvíjí. Nevýhodou zde je poměrně nízká energie v jednotlivých pulsech rtg. laseru, výhodou naopak je vysoká opakovací frekvence. Nadějným schématem je také použití vyšší harmonické, která by byla zesilována v plazmatu jako amplifikačním médiu. A konečně polem se zřejmě velkou budoucností je oblast laserů na volných elektronech (Free-electron lasers – FEL), která zřejmě již brzy dosáhne vlnových délek v tvrdém rentgenovém spektru. Jen budoucnost ukáže, zda se podaří uskutečnit sny spojené s rentgenovými lasery, které jsou naznačeny i v této přednášce.

Literatura

- [1] D. L. Matthews, P. L. Hagelstein, M. D. Rosen et al., Phys. Rev. Lett. **54**, 110-113 (1985).
- [2] J. J. Rocca, V. Shlyaptsev, F. G. Tomasel, O. D. Cortázar, D. Hartshorn, J. L. A. Chilla, Phys. Rev. Lett. **73**, 2193 (1994).
- [3] J. Kuba, A. Klisnick, D. Ros, P. Fourcade, G. Jamelot, J.-L. Miquel, N. Blanchot, J.-F. Wyart: Two color transient pumping in Ni-like silver at 13.9 and 16.1 nm, Phys. Rev. A **62**, 043808 (2000).
- [4] B. Rus, T. Mocek, A. R. Präg, G. Jamelot et al., Phys. Rev. A **66**, 063806 (2002).
- [5] P. V. Nickles, V. N. Shlyaptsev, M. Kalachnikov et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 2748-2751 (1997).
- [6] M. P. Kalachnikov, P. V. Nickles, M. Schnürer et al., Phys. Rev. A **57**, 4778-4783 (1998).
- [7] A. Klisnick, P. Zeitoun, D. Ros et al., J. Opt. Soc. Am. **B 17** 1093-1097 (2000).
- [8] J. Nilsen, J. Dunn, A. L. Osterheld, Y. Li, Phys. Rev. A **60**, R2677 (1999).
- [9] J. Nilsen, Phys. Rev. A **53**, 4539 (1996).
- [10] C. Y. Côté, J. C. Kieffer, P. Gallant et al., Proc. of the SPIE Conf. **2869**, 956-961 (1997).
- [11] A. Klisnick, J. Kuba, G. Jamelot et al., Physical Review A **65**, 033810 (2002).
- [12] G. J. Pert, J. Fluid. Mech. **131**, 401-426 (1983).
- [13] O. Larroche, A. Klisnick, A. Sureau et al., Phys Rev. A **62**, 043815 (2000).
- [14] J. Kuba, D. Benredjem, C. Möller, L. Drška, J. Opt. Soc. Am. **B 20**, 609-615 (2003).
- [15] J. Kuba, D. Benredjem, C. Möller et al., J. Opt. Soc. Am. **B 20**, 208 (2003).
- [16] D. Benredjem, J. Kuba, C. Möller, O. Z. Zabaydullin, Phys. Rev. A **67**, 043816 (2003).
- [17] D. Benredjem, J. Kuba and C. Möller, Jour. Quant. Spectroscopy & Rad. Transf. **81**, 57-64 (2003).
- [18] V. N. Shlyaptsev et al., SPIE proc. **5197**, p. 221, 2003; R. Keenan et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 103901 (2005).

V této přednášce byly použity také další publikované materiály autora.

Jaroslav Kuba

Kontakt

Adresa: nám. Sítná 3105, 272 01 Kladno, Česká republika
E-mail : Jaroslav.Kuba@gmail.com
Mobil: 776 287 877

Vzdělání

2007-duben 2010 MBA Sheffield Business School, Sheffield Hallam University, England (závěrečná disertační práce odevzdána dne 2. února 2010 na téma "Motivation for Creativity at a Technical University" s podtitulem "An Analysis of the Motivation and Performance Management System at the Czech Technical University in Prague")

2002 PhD na FJFI ČVUT, navržen za ČVUT na Cenu ministra pro nejlepší studenty

2001 Dr. na Université Paris XI, Francie ("Docteur es Sciences") na základě stipendia francouzské vlády (disertační práce: „Experimental and Theoretical Study of X-ray Lasers Pumped by an Ultra-Short Laser Pulse – Transient Pumping of Ni-like Ag Ions“)

1998 *Inženýr FJFI ČVUT*

1993-98 FJFI ČVUT

zimní semestr 1996 University of Hull, England
Department of Applied Physics
(Supervisor: Dr P H Key)

1989-1993 Gymnázium v Olomouci-Hejčíně
(maturita Čj-1, M-1, F-1, Nj-1)

Jazykové znalosti

Angličtina plyně slovem i písmem (dlouhodobě žil v Kalifornii)
Francouzština plyně slovem i písmem (dlouhodobě žil v Paříži)
Němčina dobrá znalost (maturita z němčiny, opakovaně pracoval v Německu v oboru, kde jazyk byl základní kvalifikací)
Ruština částečná znalost (5 let studia ruštiny)

Zaměstnání

2006-2010 prorektor ČVUT, zodpovídá za studentské záležitosti, technologický transfer a další oblasti dle úkolu rektora

Metodicky řídil Správu účelových zařízení ČVUT, Technologické a inovační centrum ČVUT (vč. inkubátoru firem), Centrum informačních a poradenských služeb pro studenty ČVUT a polovinu Odboru pro studium a studentské záležitosti Rektorátu ČVUT. Zároveň měl na starosti stipendia na ČVUT, téměř všechna odvolání studentů proti rozhodnutím orgánů školy, spolupráci se studentskými organizacemi, časopis Pražská technika, motivační systém prestižních odborných publikací na ČVUT, který vyvinul, studentskou anketu a řadu dalších záležitostí. Koordinoval také účast ČVUT v programu VaVpl a OPPI.

duben 2006 dosud Fakulta biomedicínského inženýrství ČVUT

Akademický pracovník na Katedře přírodovědných oborů, zodpovídá za výuku 5 předmětů (výuka česky, anglicky, francouzsky). Zároveň odborně pracuje s prof. Vrbovou v laboratoři laserových rentgenových zdrojů, kterou v předešlých třech letech spolu se studenty vybudovali ze špinavého sklepa v budově FBMI v Kladně.

2005-2007 FJFI ČVUT, "vědecký pracovník v oborech fyzikálních"

Od ledna 2002- do konce 2004

Výzkumný pracovník ve vládní vojenské jaderné laboratoři Lawrence Livermore National Laboratory, Physics and Advanced Technologies, V-division; hired jointly by Alan Wootton, chief scientist in PAT, and Paul Springer, PDRP leader; Pracoval na několika rozsáhlých experimentech zahrnujících desítky lidí různých kvalifikací a různého původu (tj. Američanů i cizinců) a mnohamilionové rozpočty. Tyto experimenty byly uskutečněny jak na domácích zařízeních v LLNL v Kalifornii, tak na pronajatých zařízeních v Evropě (např. v Rutherford Appleton Laboratory v Oxfordshire v Anglii). Experimenty se týkaly aplikací velmi krátkých laserových pulsů a elektronových urychlovačů pro stadium moderních rentgenových zdrojů

Přímým nadřízeným byl Alan Wootton, hlavní fyzik Lawrence Livermore National Laboratory, a později přešel pod Mika Key, ředitele petawatového výzkumu na National Ignition Facility (budoucí největší laser světa pro zapálení termojaderné fúze jako nového zdroje energie pro lidstvo)

1998-2001

Účastnil se na různých pozicích experimentů na několika evropských laserových zařízeních (Rutherford Appleton Laboratory, U.K., LULI, Ecole Polytechnique, France, Limeil, France) v rámci doktorské práce

1996-2000

Několik veřejných funkcí v rámci studentské a vysokoškolské politiky na školní, a národní úrovni (např. místopředseda AS ČVUT, delegát ČVUT v Radě vysokých škol, člen předsednictva Studentské komory Rady vysokých škol, zodpovědný za zahraniční styky). Založil také Studentskou unii ČVUT a řadu jejích klubů.

Odborná práce

Fyzika plazmatu, rentgenové zdroje, rentgenové lasery, analytické a numerické modely, aplikace rentgenového záření v biomedicině

Dosud zhruba 100 odborných publikací, přes 400 citací evidovaných na Web of Science.

Jeho Hirschův index dle Web of Science je roven 12 (v únoru 2010).

Množství novinových a časopiseckých článků veřejného charakteru.

Ocenění

2007 Cena Jana Opletala udělovaná Studentskou komorou Rady vysokých škol na základě doporučení komise význačných osobností akademického života ČR za zásluhy o rozvoj studentského hnutí v ČR.

Práce pro odbornou komunitu

2006 - dosud Člen vědecké rady VŠCHT
2006 -2010 Prorektor ČVUT v Praze
2006 -2010 Člen Vedení ČVUT
2006 -2010 Člen grémia rektora ČVUT
2006 -2010 Člen Kolegia rektora ČVUT
2007 - 2010 Člen redakční rady časopisu Scientific American – české vydání
2006 - dosud Předseda redakční rady časopisu Pražská technika
2009 - dosud Člen hlavní hodnotící komise programu OPPI – Prosperita
2006 - 2010 Předseda grantové komise Studentské grantové soutěže ČVUT

Záliby

Vedle toho že je workoholik, také tenis, pingpong, jízda na kole, historická literatura a dlouhodobá podpora studentských organizací ČVUT.