

PERIODICKÁ ZPRÁVA

o řešení projektu LC528 - Centrum laserového plazmatu za rok 2009

4. Přílohy

4.1. ZPRÁVA O POSTUPU ŘEŠENÍ PROJEKTU - ROK 2009

4.1.1. POPIS ŘEŠENÍ PROJEKTU

Experimentální a teoretické práce Centra laserového plazmatu probíhaly v roce 2009 podle zpřesněného plánu, ve kterém bylo v souladu se třemi hlavními výzkumnými směry definováno celkem 29 aktivit.

První dvě aktivity jsou obecné, vztahují se ke všem výzkumným cílům Centra:

A09_01 - Odborná a logistická podpora mezinárodních experimentů na laserovém systému PALS

A09_02 - Odborná příprava mladých výzkumných pracovníků

Výzkumu laserového plazmatu a vývoje laserových zařízení pro jeho vytváření se týkalo celkem 11 plánovaných aktivit:

LP9_01 - Laserové generování vysoce nabitých rychlých těžkých iontů a rychlých protonů v oblasti MeV – GeV energií

LP9_02 - Výzkum laserové ablace a tvorby plazmových jetů

LP9_03 - Diagnostika laserového plazmatu

LP9_04 - Částicové modelování a teorie urychlování částic femtosekundovými laserovými pulzy

LP9_05 - Modelování generace tvrdého rentgenového záření při interakci laserového svazku s terčíkem

LP9_06 - Optická emisní spektroskopie plazmatu generovaného rentgenovými a dlouhovlnnými lasery při intenzitách 10^{16} W/cm²

LP9_07 - Identifikace chirálních produktů laserových plazmochemických reakcí

LP9_08 - Hydrodynamické simulace interakce laserových pulzů s terčí

LP9_09 - Experimentální studium interakce laserového záření se strukturovanými terčí

LP9_10 - Interakční experimenty v laboratoři femtosekundového laseru na FJFI

LP9_11 - Studium lokální atomární struktury pomocí difúzního rozptylu rentgenového záření

Dalších 5 aktivit bylo plánováno v oblasti vývoje nových laserových systémů pro výzkum laserového plazmatu:

LS9_01 - Zesílení čirpovaného fs laserového pulzu

LS9_02 - Využití SBS pro IFE

LS9_03 - Kompaktní zdroj koherentního rentgenového záření

LS9_04 - Spolupráce na projektu HiPER-PP

LS9_05 - Účast na evropském projektu ELI-PP

Tyto aktivity byly rozšířeny o 2 aktivity původně neplánované, a to:

LS9_06 - Diagnostika generace, šíření a interakce svazku jódového laseru PALS

LS9_07 - Simulace průchodu svazku laserovým systémem SOFIA určeným pro optické buzení nelineárních krystalů

Další 4 aktivity byly pro rok 2009 plánovány v oblasti vývoje a aplikací plazmových rentgenových laserů, jmenovitě:

RL9_01 - Měření 2D profilu hustoty lineárního plazmatu pro testování zesilovačů rentgenových laserů

RL9_02 - Generace „warm dense matter“ rentgenovým laserem při intenzitách 10^{13} W/cm² a studium radiačního transportu

RL9_03 - Měření rychlosti ablace fúzních terčů a spontánních MG polí při interakci laser-plazma

RL9_04 - Pilotní experiment úsporného režimu čerpání rentgenového laseru v režimu GRIP

Celkem 5 aktivit bylo zaměřeno na studium plazmatu kapilárních výbojů a magnetických pinčů jako zdroje koherentního i nekoherentního záření, nabitých částic a neutronů:

KP9_01 - Studium ionizačního stavu na konci předpulzu v dusíkem plněné kapiláře

KP9_02 - Měření EUV spekter nově vybudovaného zdroje EUV záření na FJFI

KP9_03 - Návrh nekoherentního zdroje záření v oblasti vodního okna

KP9_04 - Studium energetických částic a fúzních neutronů v magnetických pinčích

KP9_05 - Vývoj modelů a simulačních metod pro plazma s vysokou hustotou energie v magnetických polích.

Všechny tyto aktivity byly naplněny v souladu s plánem prací na rok 2009. Na všech uskutečněných aktivitách se i v roce 2009 společně podíleli pracovníci, doktorandi a studenti celkem 7 pracovišť Centra: Oddělení laserového plazmatu, Oddělení rentgenových laserů a Oddělení nelineární optiky sekce výkonových systémů FZÚ AV ČR, v.v.i., Oddělení laserového plazmatu a tým CAPEX z ÚFP AV ČR, v.v.i., a laboratoře vyčleněné pro Centrum na Katedře fyzikální elektroniky FJFI ČVUT a na Katedře fyziky FEL ČVUT.

K experimentálnímu výzkumu laserového plazmatu využívalo Centrum spolehlivě fungujícího a průběžně inovovaného terawattového subnanosekundového kilojoulového jódového laseru PALS. Aktivity v oblasti rentgenových laserů těžily z unikátních vlastností nadstavby laseru PALS – zinkového XUV laseru s vlnovou délkou 21,2 nm – a dvou vysokorepeticčních rentgenových zařízení, uvedených v roce 2009 do standardního provozu: kapilárního XUV laseru na vlnové délce 46,9 nm a zdroje ultrakrátkých koherentních rentgenových impulzů s vlnovou délkou okolo 30 nm, využívajícího pokročilé techniky generace vysokých harmonických Ti:safírového laseru. 10-GW laser SOFIA sloužil jako vývojové pracoviště pro generování a diagnostiku ultrakrátkých laserových pulzů. Vývojové a aplikační aktivity v oboru laserujících pinčovaných výbojů probíhaly na pinčových zařízeních Centra (kapilární pinče CAPEX, CAPEX-U, dusíkový pinč na FJFI, drátkové pinče SHOWEX a FEL-

200) i na spolupracujících pracovištích v zahraničí. Teoretici na pracovištích Centra paralelně pracovali na vývoji teoretických modelů a interpretaci experimentů.

Do práce Centra bylo v roce 2009 tou či onou formou zapojeno celkem 76 kmenových výzkumných a odborných pracovníků a doktorandů, z toho 37 ve FZÚ, 15 v ÚFP a 24 na ČVUT. Obzvláštní pozornost byla věnována odborné přípravě mladé vědecké generace, jež s ohledem na budoucí zapojení pracovišť Centra do velkých evropských laserových projektů HiPER a ELI z tzv. *Road Map* ESFRI nabývá stále většího významu. Centrum má, alespoň prozatím, v tomto směru značný potenciál. Svě práce řešilo v roce 2009 v rámci problematiky Centra 12 doktorandů ve FZÚ AV ČR, 2 v ÚFP a 10 dalších na ČVUT, výzkumu v Centru se zúčastnilo 15 studentů bakalářských a magisterských programů. Doktorandi a studenti Centra byli spoluautory většiny jeho publikačních výstupů a kromě toho dokončili v roce 2009 celkem 13 svých disertačních, diplomových a bakalářských prací. Podrobněji je činnost studentů v Centru popsána v kap. 2.2.1 a 4.1.5 této zprávy.

Díky podpoře mezinárodní spolupráce Centra ze strany poskytovatele dotace se do výzkumných prací na domácích pracovištích zapojil značný počet zahraničních spolupracovníků. Např. jen experimentů prováděných v rámci projektu LASERLAB-CONT a LASERLAB II v laboratoři PALS se v roce 2009 zúčastnilo 27 zahraničních badatelů, kteří zde na svých pracovních pobytech strávili celkem 371 dnů. Společně s pracovníky Centra zde realizovali 6 velkých mezinárodních projektů, spadajících jednak do přípravné fáze projektu HiPER, jednak do výzkumného programu evropského konsorcia LASERLAB. V opačném směru se pracovníci Centra zúčastnili mnoha experimentů v partnerských laboratořích v zahraničí, od evropských pracovišť ve Velké Británii, Francii, Itálii, Německu, Rusku, Maďarsku a Polsku až po Koreu a Japonsko.

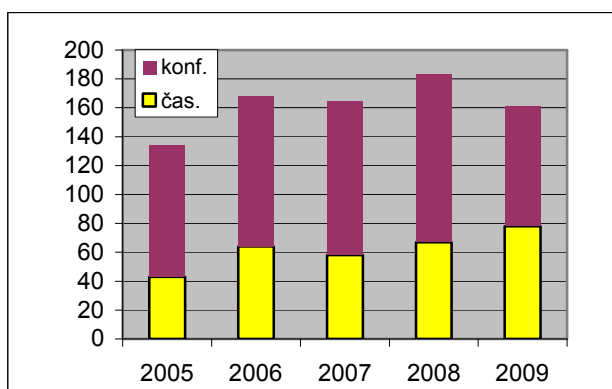
Z přehledu výzkumných aktivit a vědeckých výsledků prací Centra uvedeného v kapitolách 2.2.1 a 4.1.2 této zprávy vyplývá, že Centrum nejen splnilo všechny úkoly stanovené v upřesněném plánu pro rok 2009, ale i podstatně rozšířilo své aktivity nad tento rámec. Vedle svých vědeckých výzkumných prací koordinují klíčoví pracovníci Centra některé podstatné součásti přípravných fází projektů HiPER a ELI, ve spolupráci s MŠMT připravili projekt české účasti realizační fáze ESFRI projektu ELI - výstavbu centra ELI-Beamlines v České republice, projekt výstavby vývojového centra vysokorepeticčních krátkopulzních laserů vysokého výkonu – HiLASE v Dolních Břežanech a zúčastňují se přípravy české "Roadmap" velkých výzkumných infrastruktur. Tyto aktivity však nijak neovlivnily vědeckou činnost Centra, v jejímž rámci bylo v roce 2009 dosaženo celé řady významných a mezinárodně uznávaných výsledků:

V oblasti základního výzkumu **laserového plazmatu** to byly zejména výsledky experimentů zaměřených na aplikace laserového plazmatu generovaného sub-ns laserovými pulzy v laboratorní astrofyzice a v pokročilých schématech tzv. rychlého zapálení inerciální fúze, na vývoj laserových iontových zdrojů a na studium plazmochemických procesů v laserem generovaných jiskrových výbojích. Významného pokroku bylo dosaženo v oblasti teoretického studia a počítačového modelování interakce femtosekundových laserových pulzů s terči.

V oblasti vývoje a aplikací **plazmových rentgenových laserů** byly vyvinuty nové metody pasivní laserové rentgenové diagnostiky hustého plazmatu, vyvinuta a otestována nová rentgenová optika a získány prioritní výsledky v oblasti studia rentgenové ablace, vlastností látek při vysokých hustotách energie a tzv. horké husté hmoty.

Výzkum **kapilárních výbojů a magnetických pinčů** přinesl nové poznatky o tvrdém rentgenovém a neutronovém vyzařování rychlých magnetických pinčů. Nové argonové kapilární lasery ve FZÚ a v ÚFP byly úspěšně využity pro aplikační experimenty v oblasti rentgenové litografie a na základě numerického modelování byl navržen zdroj intenzivního nekoherentního XUV záření na bázi dusíkového kapilárního výboje.

V oboru vývoje **nových laserových systémů pro výzkum laserového plazmatu** byl uveden do standardního provozu vysokorepeticční Ti:safirový laser v laboratoři PALS s nadstavbou generátoru vysokých harmonických frekvencí, pokročila výstavba nového laboratorního prostoru pro femtosekundové interakce. Do závěrečné fáze vstupuje optimalizace femtosekundového OPCPA systému v laboratoři SOFIA.



Obr. 1 Vývoj počtů publikací pracovníků Centra v letech 2005-2009.

Výsledky výše uvedených a dalších prací byly v roce 2009 publikovány nebo připraveny k publikaci v celkem 78 článcích v recenzovaných vědeckých časopisech a prezentovány v celkem 83 konferenčních příspěvcích a zvaných referátech na mezinárodních konferencích. Všechny tyto výstupy, včetně dalších studentských, doktorandských a popularizačních prací, jsou uvedeny v odborné příloze "Seznam publikací pracovníků Centra laserového plazmatu v roce 2009" této zprávy. V této příloze jsou uvedeny i některé konferenční příspěvky nebo zvané přednášky, jež neuvádí současná metodika hodnocení RIV. Jsou totiž výsledkem stejně náročné práce a díky rychlosti zveřejnění mají pro vědeckou komunitu stejnou, ne-li větší sdělnou hodnotu. V kapitole 4.1.2 však důsledně uvádíme jen výsledky odpovídající současně nepřilíš zdařilé metodice. Z diagramu uvedeného na Obr. 1 je zřejmé, že podíl publikací v recenzovaných časopisech od roku 2005 systematicky roste.

Protože není v možnostech ani účelem tohoto textu podrobně rozebírat všechny výstupy prací Centra v uplynulém roce, omezíme se v dalším, stejně jako v minulé průběžné zprávě, jen na vybrané typické příklady z jednotlivých výzkumných směrů. Nejprve se pokusíme shrnout výsledky z oblasti, ve které se soustředily síly všech pracovišť Centra a celé řady jeho zahraničních spolupracovníků - experimentálního výzkumu laserového plazmatu generovaného sub-nanosekundovými laserovými pulzy.

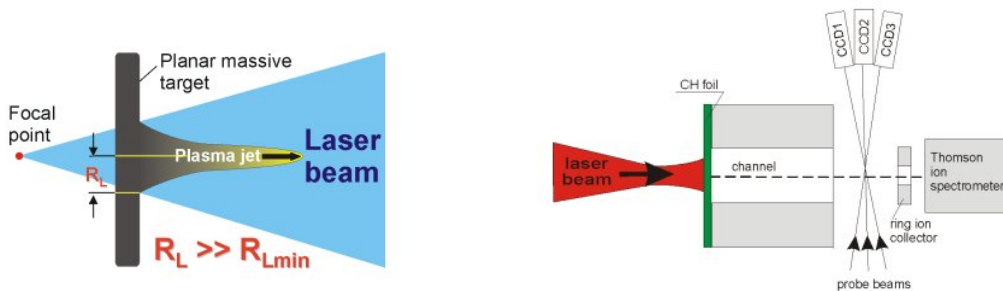
Experimentální výzkum laserového plazmatu generovaného sub-ns laserovými pulzy

Vlastnosti a využití laserového plazmatu vytvářeného na povrchu pevných terčů

Vlastnosti laserového plazmatu vytvářeného laserovým pulzem na povrchu pevných terčů závisejí na materiálu a struktuře terče, na jeho geometrickém uspořádání, na použité energii a vlnové délce laseru, na hodnotě a rozložení intenzity záření v ohnisku laserového paprsku a na poloze ohniska vůči rovině terče. Tyto závislosti byly systematicky studovány na terawattovém jódovém laseru PALS, s využitím jeho 1. a 3. harmonické (vlnové délky 1315 nm a 438 nm) a při energii laseru desítky až stovky joulů. Na experimentech se podílela experimentálním vybavením i pracovníky všechna hlavní pracoviště Centra, tj. FZÚ, ÚFP, FJFI i FEL, a několik spolupracujících zahraničních pracovišť - IPPLM Varšava, CELIA Bordeaux a FIAN Moskva. Pracovníci dvou posledně jmenovaných institucí prováděli zejména teoretickou interpretaci experimentů.

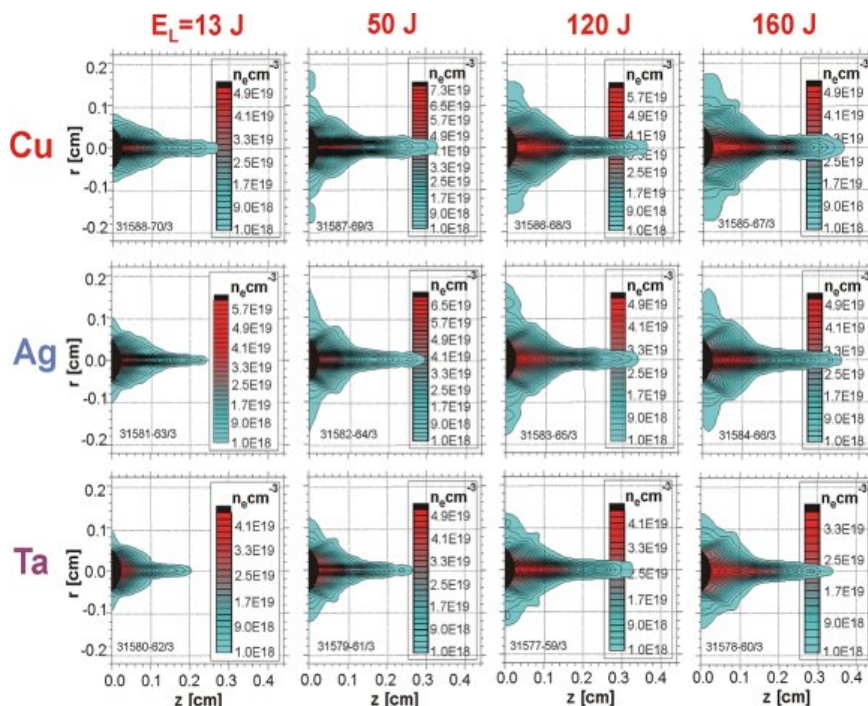
Prováděné výzkumné práce je možno rozdělit do 3 hlavních směrů:

- Výzkum tvorby plazmových jetů na povrchu pevných rovinných terčů a jejich formování v cylindrických kanálech.
- Využití optimalizovaných plazmových jetů pro astrofyzikální laboratorní experimenty.
- Využití dutých terčů k urychlování makročásteček a k přenosu a kumulaci energie laseru.



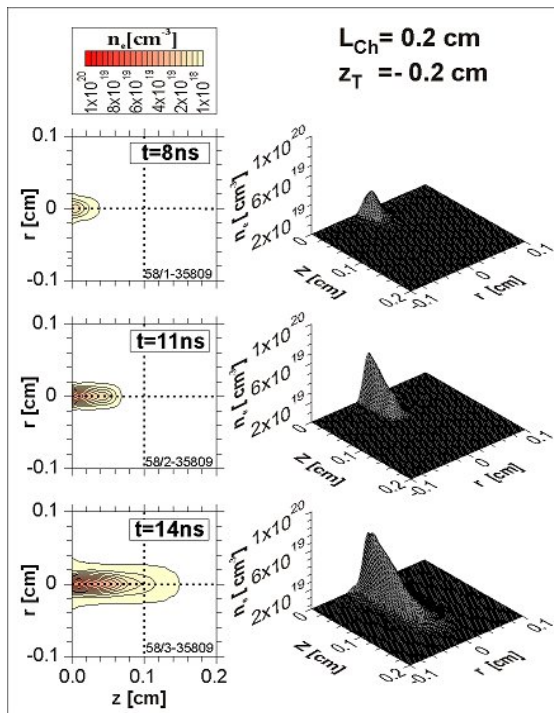
Obr. 2 Dvě schémata vytváření plazmových jetů: Přímá laserová ablace rovinného terče (vlevo) a formování plazmového jetu v cylindrickém kanálu.

Schématy tvorby plazmových jetů na povrchu rovinného terče a uvnitř cylindrického kanálu v dutém terči jsou znázorněna na Obr. 2. V prvním případě se jet vytváří ablací masivního pevného terče mírně rozfokovaným laserovým paprskem (poloměr $R_L \sim 300 \mu\text{m}$, intenzita záření na terči $I_L = 10^{14} - 2 \times 10^{15} \text{ W/cm}^2$). Ohnisko laserového paprsku je umístěno za terčem, jet se šíří proti směru laserového svazku. Dobře zformované supersonické plazmové jety lze vytvářet jen na povrchu terčů z těžkých materiálů (např. Cu, Ag, Ta). Hustota plazmových jetů převyšuje hodnotu 10^{20} cm^{-3} , jety jsou stabilní po dobu až 20 ns, kdy dosahují délky několika mm při průměru $\sim 0,2 \text{ mm}$. Vlastnosti jetů zůstávají stejné i při šikmém dopadu laserového svazku na terč. Podélné profily elektronové hustoty typických plazmových jetů, získané pomocí laserové interferometrie při různých energiích laseru, jsou znázorněny na Obr. 3.

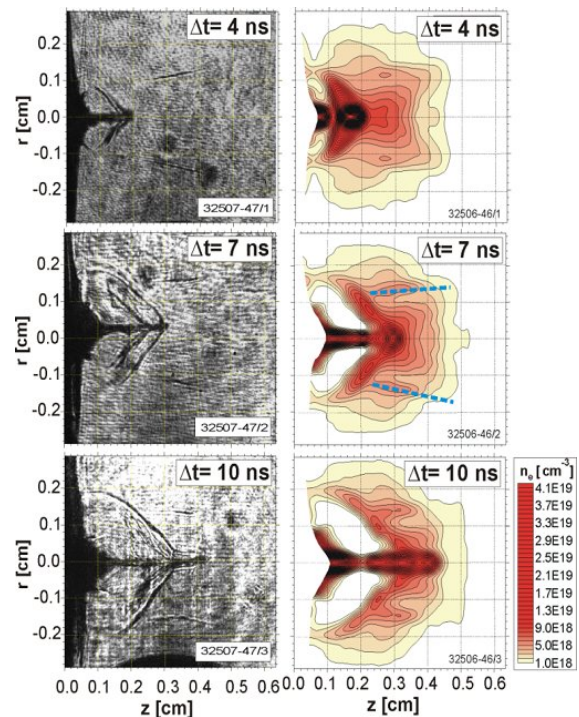


Obr. 3 Plazmové jety vytvářené přímou laserovou ablací rovinného terče z těžkých materiálů při různých energiích laserového pulzu (A. Kasperczuk, T. Pisarczyk et al., Physics of Plasmas 2007, Laser and Particle Beams 2009).

Ve druhém případě je laserové plazma vytvářeno z velmi tenké (10-30 μm) fólie z lehkého materiálu (např. polyethylen), plazmový jet ve směru šíření laserového svazku je formován v cylindrickém kanálu typické délky 2 mm o průměru 0,2 mm. Tímto způsobem lze vytvářet plazmové jety obdobných vlastností jako na rovinných terčích, ale na rozdíl od nich z lehkých prvků.



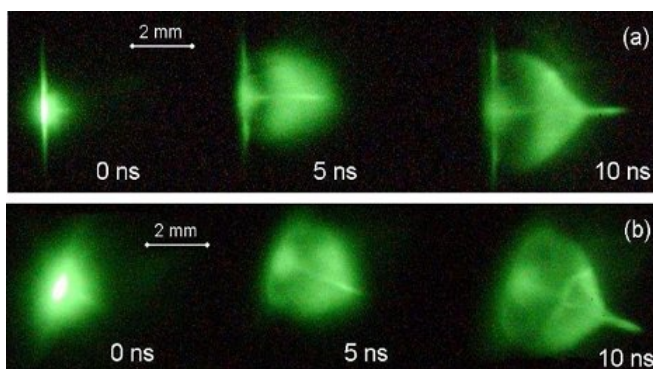
Obr. 4 Časový vývoj plazmového jetu na výstupu cylindrického kanálu (J. Badziak, T. Pisarczyk et al., Physics of Plasmas 2009).



Obr. 5 Stínogramy a elektronové isodensitogramy měděného jetu a jím vytvářených rázových vln v argonu při tlaku 5 bar (A. Kasperczuk, T. Pisarczyk et al., LPB 2009).

Časový vývoj hustoty plazmového jetu na výstupu transportního kanálu byl měřen obdobně jako v případě rovinných terčů pomocí tříkanálového laserového interferometru s využitím pomocného laserového svazku na 2. harmonické jódového laseru (658 nm). Získané podélné profily elektronové hustoty plazmového jetu v různých časech po laserovém pulzu jsou znázorněny na Obr. 4. Geometrie tohoto experimentu umožnila navíc analyzovat urychlené ionty vyletující ve směru laserového svazku iontovým Thomsonovým analyzátozem. Byl zjištěn značný počet protonů urychlených na energie řádu MeV.

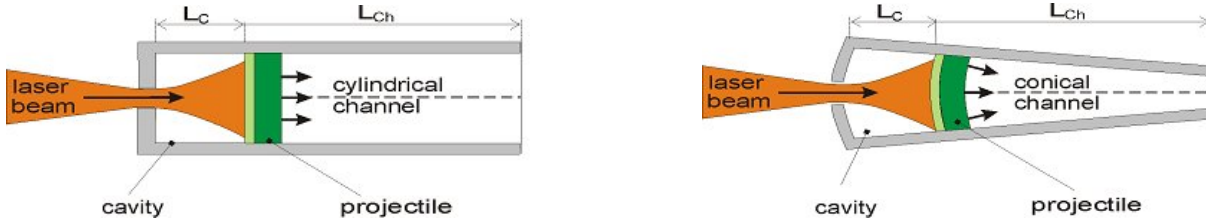
V obou typech experimentů lze supersonické plazmové jety vytvářet při relativně malých energiích laseru (10 – 100 J). Parametry jetů (Machovo číslo $M \approx 10$, $P_e > 10^2$, $R_e > 10^4$) jsou vhodné pro jejich využití v laboratorních astrofyzikálních experimentech. Řada takových experimentů s využitím plazmových jetů generovaných na rovinných terčích z těžkých materiálů se v laboratoři PALS uskutečnila v letech 2007–2009. V těchto experimentech byla zkoumána interakce plazmových jetů s oblakem plynu (Ar, Ne) napouštěného před pevný terč speciální plynovou tryskou. Byla na ně nasazena veškerá dostupná diagnostická technika ze všech pracovišť Centra i z IPPLM Varšava, tj. vedle laserového tříkanálového interferometru/stínografu, detektorů záření i částic a rentgenové rozmítací kamery Kentech s velkým časovým rozlišením též 4 snímková rentgenová CCD kamera zapůjčená z FEL ČVUT. Z experimentů zaměřených na tvorbu rázových vln plazmovým jetem pronikajícím do plynového terče byly získány unikátní série dat, jakými se nemůže pochlubit žádná jiná laboratoř v celosvětovém měřítku. Byl proměřen časový vývoj struktury rázových vln vytvářených v těžkých i lehkých plynech o různém tlaku plazmovými jety rozličných parametrů. Jako příklad uvádíme stínogramy a podélné profily elektronové hustoty, názorně ukazující strukturu rázových vln vytvářených měděným jetem v argonu (Obr. 5), a sérii snímků pořízených ve stejném experimentu rentgenovou kamerou (Obr. 6), na kterých jsou vidět horké oblasti jetu a rázových vln. Tyto výsledky vzbudily značný zájem



Obr. 6 Rentgenové snímky interakce plazmového jetu s argonem o tlaku 5 bar při kolmém (nahore) a šikmém dopadu laserového paprsku, pořízené D. Klírem, FEL ČVUT (A. Kasperczuk, T. Pisarczyk et al., LPB 2009).

astrofyzikální vědecké obce, neboť v laboratoři, v miniaturním měřítku, úspěšně simulují vzdálené tzv. Herbigovy-Haroovy astrofyzikální objekty. Astrofyzikální interpretace těchto experimentů se ujali naši spolupracovníci z francouzské laboratoře CELIA. Celkem 12 publikací z experimentů s plazmovými jety, prováděných v laboratoři PALS, bylo již počteno výběrem pro US Virtual Journals of Ultrafast Science.

Experimenty s dutými terči vedly k návrhu nového způsobu urychlování – tzv. *Laser-Induced Cavity Pressure Acceleration (LICPA)* - J. Badziak et al., *Physics of Plasmas* 2009. Jeho podstatou je využití tlaku a záření plazmatu, vytvářeného laserovým paprskem, uzavřeného uvnitř dutého terče. Tento princip lze využít jak k urychlování makročastic, tak laserem vytvářených plazmových shustků (jetů). Experimenty provedené v závěru roku 2009 ukázaly, že dutých terčů s cylindrickými nebo kónickými transportními kanály lze využít k transportu a koncentraci energie urychleného plazmatu. Schémata cylindrického a kónického LICPA urychlovače jsou znázorněna na Obr. 7. Fokusaný laserový paprsek vstupuje



Obr. 7 Schéma cylindrického (vlevo) a kónického LICPA urychlovače.

malým otvorem do cylindrického nebo kónického kanálu o počátečním průměru 0,3-0,5 mm a se stěnami z těžkého materiálu (např. Au). Laser uvnitř kanálu vytváří plazma z lehkého tenkého terče (např. polyethylenové fólie tloušťky 10 μm). Plazma je tlakem v dutině terče urychlováno a transportováno kanálem na vzdálenost několika mm. V kónickém kanálu se plazma během transportu komprimuje a hustota jeho energie se zvyšuje. Dosavadní experimenty ukazují, že účinnost urychlování a tím i transportu energie do vzdálené oblasti je až 30-krát vyšší, než při využití ablačního urychlování samotného. V případě aplikace LICPA techniky na nanosekundové lasery lze dosáhnout rychlostí plazmatu urychleného termálním tlakem až 5×10^8 cm/s, tj. hodnot dostatečných pro tzv. rychlé zapálení inerciální fúze. V případě sub-ps laserů by se mohla tato hodnota zvýšit díky tlaku záření až na více než 10^9 cm/s, což by stačilo dokonce pro protonovou iniciaci fúze.

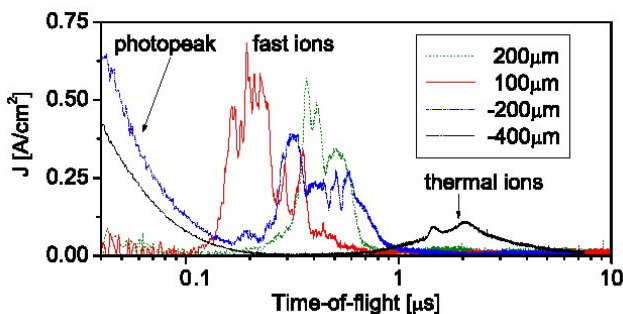
Studium urychlování iontů v laserovém plazmatu vytvářeném sub-nanosekundovým laserem

Studium mechanismů generování vícenásobných těžkých iontů v laserovém plazmatu a jejich urychlování na vysoké energie patří k tradičním výzkumným směrům Centra. Tyto práce probíhají ve společné laboratoři PALS pod vedením Leoše Lásky a Josefa Krásy (FZÚ) v těsné spolupráci s doktorandy a kolegy z italských (INFN Catania, Università di Messina) a polských (IPPLM Varšava, TU Krakow) pracovišť. Jejich výsledky vedly mj. k nalezení optimálních podmínek pro generování velmi těžkých a vysoce nabitých iontů (např. Au s nábojovým číslem až 57) s energií řádu 100 MeV. Přispěly rovněž k objasnění role nelineárních procesů, zejména oscilační samofokusace laserového svazku v počátečních fázích tvorby laserového plazmatu, jež vedou k vytváření velkého množství pozorovaných skupin iontů s různými středními energiemi a jsou příčinou nepravidelného časového průběhu měřených iontových proudů. V roce 2009 publikovali společně na téma generace a

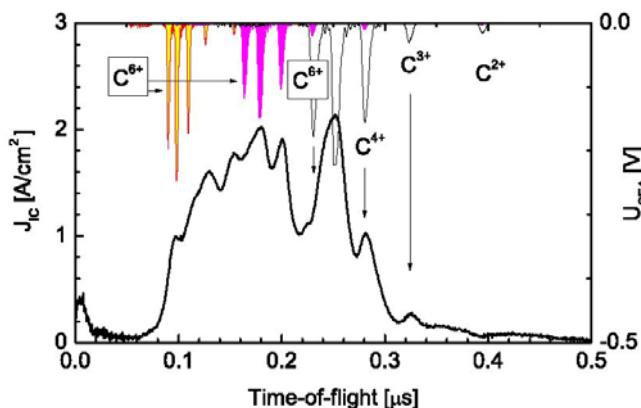
urychlování iontů řadu prací, z nichž zde pro ilustraci vyjímáme některé výsledky analýzy urychlených uhlíkových iontů, uveřejněné v časopisech *Review of Scientific Instruments* a *Laser and Particle Beams*.

Závislost iontového proudu z plazmatu, vytvářeného na grafitovém terči fokusovaným zářením jódového laseru o intenzitě 4×10^{15} W/cm², ilustruje Obr. 8a. K emisi nejrychlejších iontů s energií až 8 MeV dochází při poloze ohniska ~100 μm pod povrchem terče. Je-li ohnisko umístěno dále než 300 μm před povrchem, převládá emise pomalých tepelných iontů.

Na Obr. 8b jsou porovnány časové průběhy (time-of-flight) proudu iontového kolektoru s nábojovým spektrem uhlíkových iontů, detekovaných cylindrickým elektrostatickým TOF (time-of-flight) analyzátozem (energie laseru 513 J, ohnisko 50 μm pod povrchem terče). Časový průběh proudu iontového kolektoru má více maxim, než je nábojových stavů uhlíku. Maxima iontového proudu v časech TOF > 2 μs dobře odpovídají spektru iontů C²⁺ - C⁶⁺ s energií $Q \times 211$ keV, kde Q je nábojové číslo iontu. Tato skupina je na obrázku vyznačena černou barvou. Maximům v kratších TOF časech dobře odpovídají fialové a žluté skupiny iontů s energiemi $Q \times 450$ keV a $Q \times 1.3$ MeV, tedy s maximálními energiemi plně ionizovaných iontů uhlíku C⁶⁺ 2,7 MeV a 7,8 MeV. Z toho lze učinit závěr, že tyto skupiny iontů pocházejí z časově i prostorově oddělených oblastí, vznikajících v důsledku nelineárních oscilačních procesů v laserovém plazmatu.



Obr. 8a Závislost proudu iontů z uhlíkového plazmatu, měřeného iontovým kolektorem, na poloze ohniska laseru vůči povrchu terče.

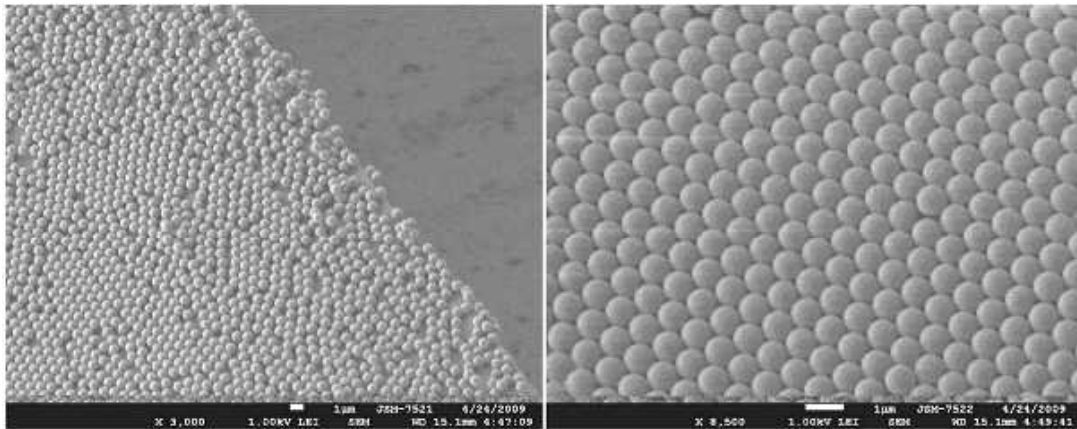


Obr. 8b Korelace signálu iontového kolektoru (dole) s nábojovým spektrem uhlíkových iontů, měřeným elektrostatickým analyzátozem (nahore).

Urychlování iontů femtosekundovými pulzy o vysoké intenzitě

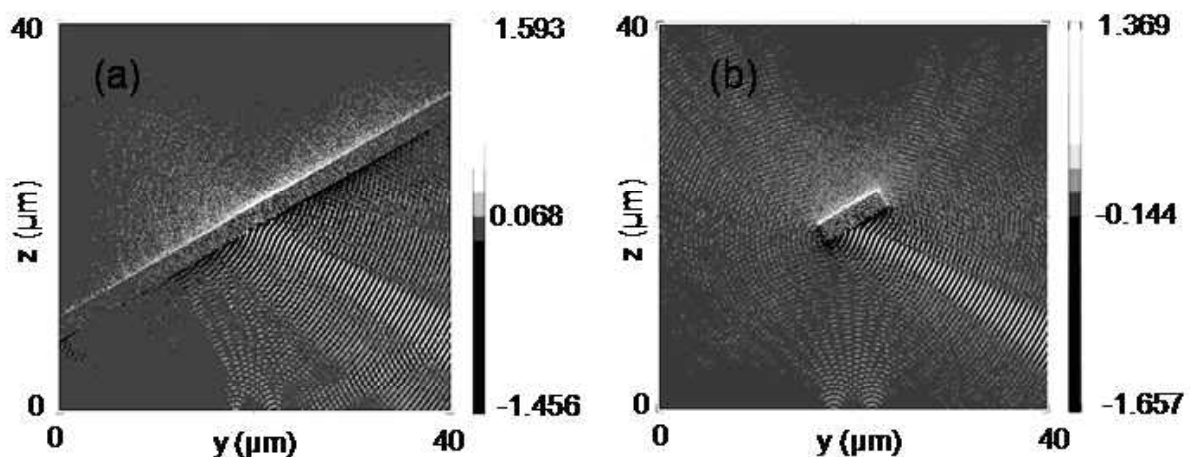
Výzkum urychlování iontů intenzivními femtosekundovými pulzy navazoval na úspěšné výsledky minulých let. Nejúspěšnější je článek autorů O. Klimo, J. Pšikal, J. Limpouch, V. T. Tikhonchuk: “Monoenergetic ion beams from ultrathin foils irradiated by ultrahigh-contrast circularly polarized laser pulses”, *Phys. Rev. ST - Accelerators and Beams* **11**, Art. No. 031301, March 2008, který byl už 45-krát citován dle databáze Web of Science, a naše idea byla nedávno experimentálně ověřena (A. Henig et al., *Phys. Rev. Letters* **103**, Art. No. 245003, December 2009).

Pokračovali jsme ve studiu možnosti zvýšení účinnosti konverze pomocí nanostruktury na přední straně fólie. Byla demonstrována možnost zvýšení konverze energie laseru do rychlých protonů z 0,88% u rovinné fólie a až na 11,3% u fólie s pilovou strukturou o periodě λ na přední straně fólie. Maximální energie protonů se přitom zvýšila z 0,85 MeV na 4,85 MeV a u fólie z CH s nanostrukturou na přední straně dochází ke vzniku kvazimonoenergetického píku. Na KFE FJFI jsme vyvinuli metodu přípravy navrženého terče pomocí nanosení monovrstvy nanokuliček na tenkou fólii. Terče byly na FJFI vyrobeny a v současné době jsou s nimi prováděny experimenty v CEA Saclay, Francie.



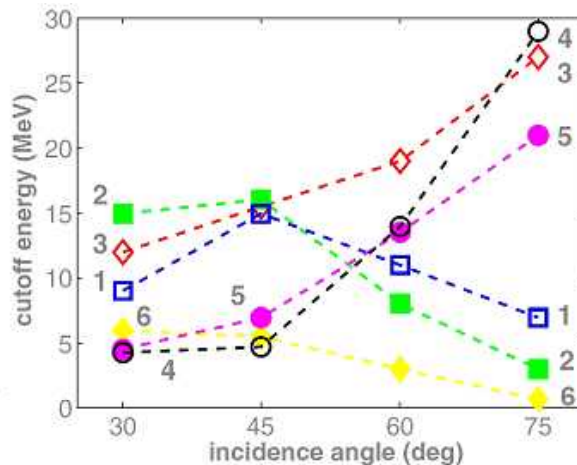
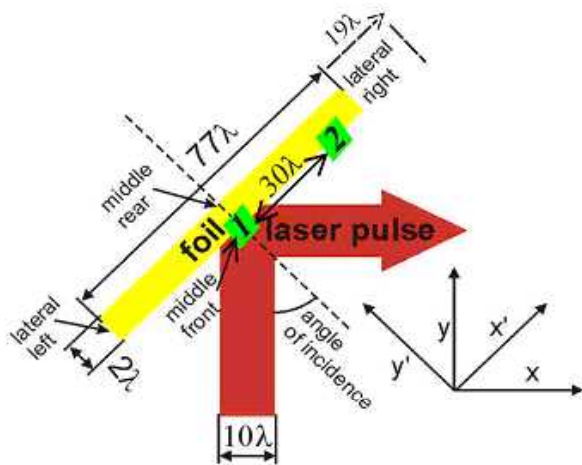
Obr. 9 Fotografie terčů rastrovacím elektronovým mikroskopem. Na mylarovou fólii o tloušťce 700 nm je nanosená monovrstva polystyrénových nanokuliček o průměru 800 nm.

Pokračovali jsme rovněž ve studiu interakce femtosekundových pulzů o relativistické intenzitě s terčí o omezené hmotě. Byl simulován úspěšný experiment v LULI, Ecole Polytechnique, Francie, kde bylo při urychlování protonů mechanismem TNSA prokázáno zvýšení energie urychlených protonů a vysoké zvýšení konverze energie laseru do urychlených protonů při zmenšení povrchu kousků tenké fólie. Na obrázku je zobrazeno rozložení elektrického pole v dvoudimenzionálních *particle-in-cell* (2D PIC) simulacích. Je vidět zvětšení a homogenita pole v dvojvrstvě na zadní straně fólie. Podařilo se vysvětlit zvýšení energie protonů, zvýšení účinnosti je v simulacích menší než v experimentu kvůli 2D geometrii (není ohraničení ve třetím směru).



Obr. 10 Elektrické pole (ve směru kolmém k povrchu fólie v jednotkách laserového pole) v čase 200 fs po dopadu laserového pulzu na terč, vypočtené v 2D PIC simulacích interakce 350 fs pulzu o vlnové délce 529 nm, intenzitě 10^{19} W/cm² a šířce ohniska 6 μ m se (a) širokým a (b) úzkým úsekem fólie. V obou případech laser dopadá na terč vzhůru podél osy z.

Nově byla studována problematika urychlování elektronů podél fólie při velkých úhlech dopadu. Na povrchu terče se při úhlech dopadu $\geq 60^\circ$ vytváří elektromagnetická struktura, ve které je část elektronů zachycena a urychlena podél povrchu terče (doprava na schématu interakce) na energii podstatně vyšší než jakou jsou elektrony urychlovány ve směru kolmém k terči. Elektrony urychlené podél povrchu terče vytvářejí na pravém okraji terče elektrostatické pole, které urychluje ionty na vysoké energie.



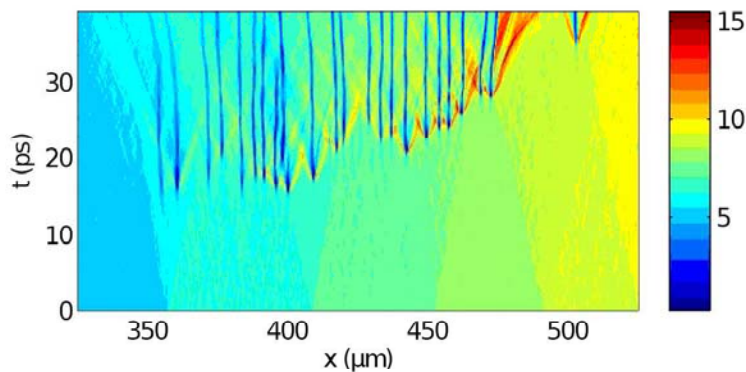
Obr. 11

Vlevo: Parametry, užívané v 2D PIC simulaci interakce laserového pulzu délky 67 fs, o intenzitě $3,4 \times 10^{19}$ W/cm², šikmo dopadajícího na terč.

Vpravo: Závislost maximální energie protonů na úhlu dopadu laseru. Křivka (4) je pro S-polarizaci, ostatní jsou pro P-polarizaci. Křivka (1) urychlování zpět kolmo k přední straně fólie, (2) dopředu kolmo k zadní straně fólie, (3) a (4) urychlování na pravé straně folie ve směru tečném k fólii, (5) urychlování na pravé straně fólie při umělém potlačení odrazu elektronů od zadní strany, (6) urychlování na levé straně fólie.

Rychlé zapálení inerciální fúze je dnes intenzivně studováno jako perspektivní možnost výroby energie, v přípravné fázi je výstavba velké evropské infrastruktury HiPER, určené pro tento výzkum. Velmi nadějnou variantou rychlého zapálení je zapálení rázovou vlnou (SI – Shock Ignition). V tomto schématu bude DT palivo stačené na vysokou hustotu 100 – 500 g/cm³ dodatečně zahřáto na zápalnou teplotu ~5 keV rázovou vlnou vygenerovanou v koróně terče asi 100 ps laserovým pulzem o intenzitě vyšší než 10¹⁹ W/cm². Toto schéma vypadá velmi nadějně, pokud se podaří vygenerovat rázovou vlnu s dostatečnou účinností. Problém je ale absence relevantních informací o interakci pulzu takové intenzity s rozsáhlým podkritickým plazmatem existujícím ve fázi stagnace terče. Hydrodynamické modely interakce používané při nižších intenzitách zde nejsou relevantní, proto je potřebné kinetické modelování. To však bylo dosud prováděno jen v daleko kratších oblastech po kratší dobu a navíc při vyšších intenzitách, kdy nejsou tak velké požadavky na potlačení numerického ohřevu, který je obvyklým artefaktem simulací PIC.

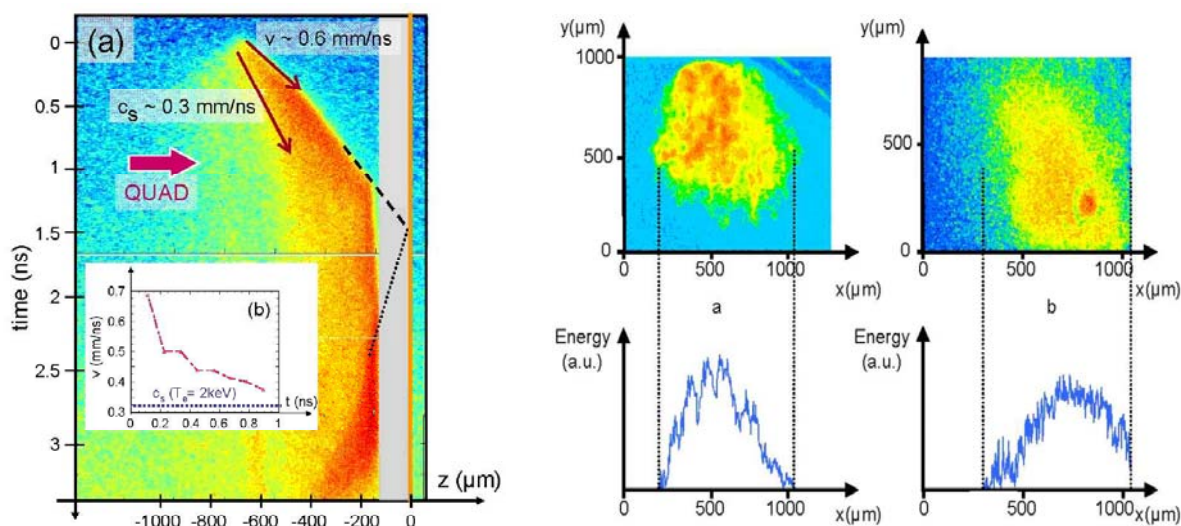
Dr. Klimo vylepšil náš 1D3V relativistický elektro-magnetický PIC kód použitím tvaru makročástic s vysokým řádem přesnosti. To mu dovolilo masivně paralelní simulace systému o délce 1200 μm po dobu 40 ps. Na obrázku je znázorněno vytváření kavit v oblasti 1/16 kritické hustoty, kde dochází k absolutní nestabilitě stimulovaného Ramanova rozptylu (SRS) pro druhotnou elektromagnetickou vlnu o frekvenci 1/2 laserové frekvence. Tato vlna se šíří z oblasti hustoty 1/4 kritické hustoty, kde dochází k absolutní nestabilitě SRS pro laserovou vlnu. Ukazuje se, že tyto nestability po asi 15 ps potlačí stimulovaný Brillouinův rozptyl, který na počátku pulzu odrazí téměř všechnu energii laseru. Navíc SRS vede k dobré absorpci laserového záření do středně horkých elektronů s teplotou < 30 keV, což je výhodné pro generaci silné rázové vlny. Vypočtená absorpce laserového záření je ve shodě s prvními relevantními experimenty v LLE Rochester, USA.



Obr. 12 Vývoj profilu hustoty plazmatu (hustota je označena s měřítkem v procentech kritické hustoty) v okolí 1/16 kritické hustoty. Je vidět vznik relativně stabilních kavit a též emise zvukových vln z okraje kavit.

Experimentální studium interakce nanosekundových laserových pulzů se strukturovanými terči

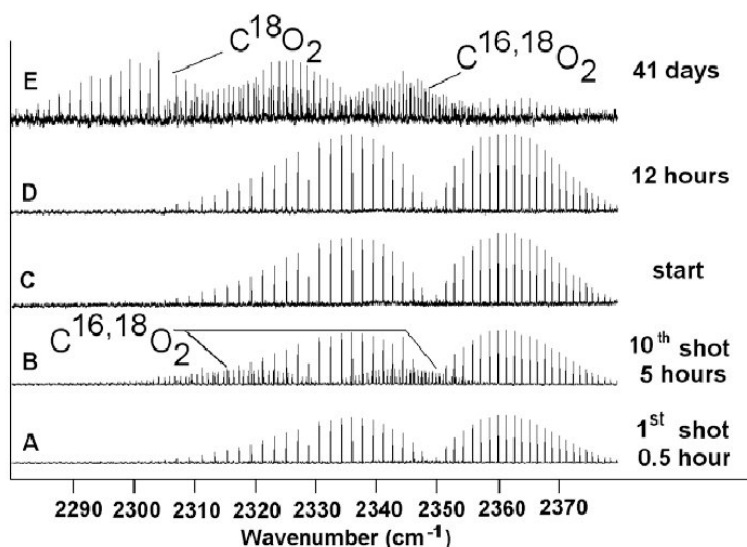
V roce 2009 dokončili pracovníci Centra na FJFI vyhodnocení experimentu na laseru PALS, ve kterém studovali vyhlazování nehomogenit laserového svazku v plynovém jetu. Byl proveden další experiment na 30 kJ laseru LIL v Le Barp ve Francii, kde bylo studováno šíření tepelné vlny v podkritické pění a vyhlazování speklů (nehomogenit) v laserovém svazku při průchodu podkritickou pění. Výhodou metody je to, že k homogenizaci laserového svazku dojde na samém začátku pulzu, kdy vzniká imprint a optické vyhlazování ještě není účinné. Zahájení těchto experimentů bylo motivováno našimi experimenty na laseru PALS. Úspěch experimentu na laseru LIL inicioval návrh provést experiment v ILE, Osaka University, Japonsko. Cílem tohoto připravovaného experimentu je přímo demonstrovat stabilitu urychlování fólie laserovým svazkem vyhlazeným v plazmatu generovaném v podkritické pění.



Obr. 13 Vlevo: (a) Šíření nadzvukové tepelné vlny a zvukové vlny zředění v podkritické pěně. (b) Časová závislost rychlosti tepelné vlny. Vpravo: Prostorové rozložení rentgenové emise z měděné fólie (integrováno přes prvních 200 ps po začátku emise) (a) při přímém ozáření fólie laserem (b) při dopadu laseru na fólii přes 500 μm tlustou vrstvu pěny o hustotě 10 mg/cm^3 .

Studium plazmochemických procesů v laserem generovaných jiskrových výbojích (LIDB)

Ke studiu plazmochemických reakcí v laserem generovaných jiskrových výbojích využívali doktorandi Centra pod vedením S. Civiše (ÚFCH-JH) a L. Juhy (FZÚ) výbojů iniciovaných infračerveným paprskem laserového systému PALS. Produkty plazmochemických reakcí analyzovali pomocí metod optické, infračervené a hmotové spektroskopie, chromatografie a izotopového značení použitých reagentů. Z jejich prací uveřejněných v roce 2009 např. v *Origins of Life and Evolution of Biosphere* a *Chemical Physics Letters* uvádíme v tomto odstavci výsledky studia reakcí ve směsích $\text{CO}-\text{N}_2-\text{H}_2\text{O}$, prováděného pomocí vody značené izotopem ^{18}O a FTIR (*Fourier Transform InfraRed*) spektroskopie s vysokým rozlišením. Fokusaný paprsek infračerveného laseru vytvářel v interakční kvetě kulový jiskrový výboj o průměru několika centimetrů. Cílem experimentů bylo napodobit v laboratoři účinky kometárních a meteorických impaktů v rané atmosféře Země. Produktem reakcí byl převážně oxid uhličitý CO_2 . Isotop ^{18}O byl použit ke studiu relativní role vzájemně si konkurujících reakcí - CO disproportionace $\text{CO} + \text{CO} \rightarrow \text{CO}_2$ a oxidace OH radikály $\text{CO} + \text{OH} \rightarrow \text{CO}_2 + \text{H}$.



Obr. 14 Spektrum izotopomerických produktů reakcí ve směsi CO , N_2 , H_2^{18}O obsahující 93 ppmv C^{16}O_2 . Produkty plazmochemických reakcí jsou zřetelně patrné již po 10 výstřelech laseru (spektra A,B). Spontánní izotopová výměna je zanedbatelná - nedochází k ní v kontrolním neozářeném vzorku ani po 12 hodinách (C, D).

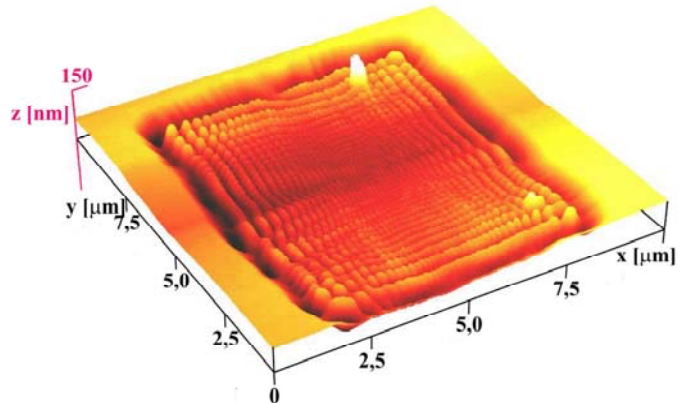
Experimenty provedené v laboratoři PALS ukázaly, že při vysokých hustotách energie se v atmosféře bohaté na oxid uhelnatý CO může účinně vytvářet oxid uhličitý CO_2 jak za přítomnosti vodní páry, tak bez ní. I když k produkci CO_2 vedou obě výše uvedené reakce, v reálných podmínkách laserové jiskry cca 1,5-krát převažuje výtěžek první z nich. Potvrdily to výsledky měření koncentrací jednotlivých izotopomerických produktů v závislosti na počtu výstřelů laseru, provedené pomocí plynové chromatografie, kombinované s FTIR spektroskopií. Spektrum produktů reakcí ve směsi CO , N_2 , H_2^{18}O obsahující 93 ppmv C^{16}O_2 ukazují diagramy na Obr. 14. Zatím co izotopově značený produkt plazmochemických reakcí $\text{C}^{16,18}\text{O}_2$ je ve směsi ozáření 10 výstřelů laseru, provedených v průběhu 5 hodin, zřetelně patrný (spektra A, B), v kontrolní neozářeném směsi nedochází k měřitelné spontánní izotopové výměně ani za 12 hodin (spektra C,D).

Práce v oboru kapilárních výbojů a magnetických pinčů

Kapilárními výboji a magnetickými pinčemi se zabývají tři úzce spolupracující pracoviště Centra: laboratoř kapilárních výbojů na JFJI, pinčová laboratoř na FEL a laboratoř kapilárního pinče CAPEX a drátkového pinče WEX v ÚFP. V této části zprávy krátce představíme některé výsledky jejich práce, publikované v roce 2009.

Ablace pevných látek argonovým kapilárním EUV laserem CAPEX

Kapilární argonový EUV laser využívá záření o vlnové délce 46,9 nm neonu-podobných iontů argonu (Ar^{8+}), vznikajících při impulzním silnoproudém kapilárním výboji. Pro ablační experiment, provedený skupinou Karla Kolářka ve druhé polovině roku 2009, bylo záření laseru nejprve separováno rychlou závěrkou od částic vyletujících z výboje v kapiláře, a pak fokusováno sférickým multivrstevným (ScSi) zrcadlem na ablovaný vzorek. Ukázalo se, že energie laseru je dostačující pro ablaci plexiskla (PMMA) jediným laserovým pulzem. Pozorování ozářeného vzorku mezi zkříženými polarizátory neindikovalo v místě ablované stopy a jejím okolí žádná zbytková napětí – ablovaná struktura je tedy výsledkem kvantové ablace s minimem tepelných účinků. Podrobná analýza stop ablovaných přes mřížku s okny $7,5 \times 7,5 \mu\text{m}$ ukázala zřetelný dvoudimenzionální kvaziperiodický reliéf s periodou klesající od $\sim 800 \text{ nm}$ u kraje stopy až na $\sim 125 \text{ nm}$ v jejím středu. Tato struktura je vytvořena difrakcí EUV záření na bočních stěnách oken mřížky. Jeden z mnoha jejích obrázků, získaných pomocí mikroskopu atomárních sil (AFM), je reprodukován na Obr. 15.



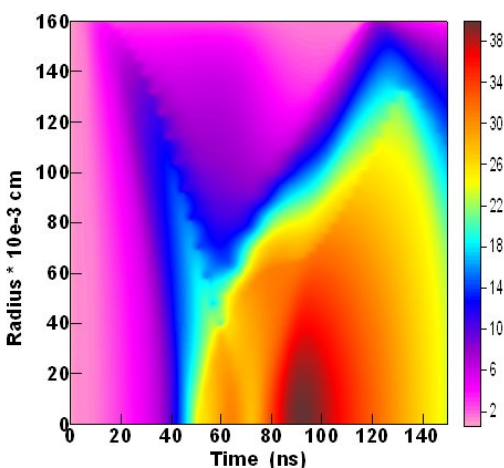
Obr. 15 Dvoudimenzionální difrakční obrazec ablovaný EUV Ar^{8+} laserem ($\lambda = 46,9 \text{ nm}$) do PMMA (plexiskla) umístěného za čtvercovou maskou s otvorem $7,5 \times 7,5 \text{ nm}$.

Podrobné zkoumání ablovaných stop, zobrazených AFM mikroskopem, v nich odhalilo jemné struktury (s periodou $\sim 2,8 \text{ nm}$ a hloubkou $\sim 5\text{-}10 \text{ nm}$) podobné strukturám LIPSS (*Laser Induced Periodic Surface Structures*), známým z ablačních experimentů s polarizovaným zářením laserů v optické oblasti a přisuzovaným procesům při tuhnutí taveniny. V případě EUV laserů však zřejmě jde o mechanismus odlišný.

Drátkový pinč WEX

Na zařízení WEX s drátkovým pinčem v kapalině byla detekcí čáry H_{α} v radiálním a axiálním směru prokázána existence vrstvy stlačené vodní páry na povrchu Ag drátku explodujícího ve vodě a proměřeny její parametry. Z profilu spektrální čáry H_{α} bylo zjištěno, že na počátku má vrstvička extrémní hustoty ($\sim 10^{21} \text{ atomů/cm}^3$). Později tato hustota asi o 1,5 řádu poklesne (na $\sim 7 \times 10^{19} \text{ atomů/cm}^3$), zato teplota vzroste až na milióny stupňů. Tyto výsledky jsou důležité zejména pro odhad energetických ztrát při explozi drátku v kapalině.

Teoretický návrh nekoherentního zdroje záření v oblasti vodního okna

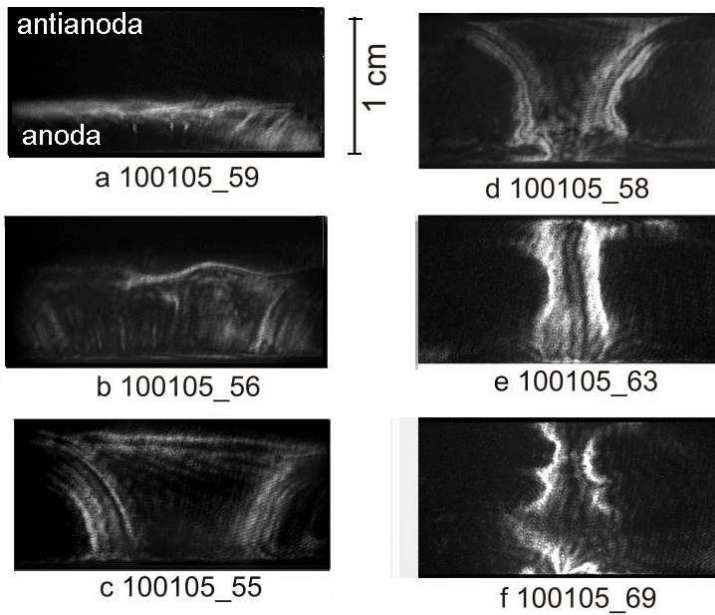


Obr. 16 Prostorovo-časová závislost elektronové teploty T_e kapilárního výboje indikuje oblast nekoherentního rtg záření v oblasti vodního okna (teplotní stupnice T_e v eV).

Nerovnovážený kapilární výboj v dusíku je předmětem výzkumného zájmu jako jeden z kandidátů na zdroj intenzivního nekoherentního záření v oblasti vlnových délek vodního okna ($2 < \lambda < 4 \text{ nm}$), vhodných pro biologické a biomedicínské aplikace. Pavel Vrba (JFJI) s doktorandem Jakubem Hübnerelem se zabývali jeho počítačovým modelováním s cílem nalézt optimální parametry pinče pro dosažení maximálního zisku záření v požadované spektrální oblasti. Simulační výpočty prováděli pomocí dvourozměrného kódu ZSTAR (Z*engine). Prostorovo-časové vlastnosti kapilárního výboje jsou diktovány rozměry kapiláry ($R_0 = 0,165 \text{ cm}$, $l = 20 \text{ cm}$), parametry proudového impulsu ($I_{\text{max}} = 15 \text{ kA}$, $T_{1/4} = 115 \text{ ns}$) a materiálem, ze kterého je kapilára zhotovena (alumina). Změnou molekulárního tlaku dusíku v oboru $10 < p_{\text{mol}} < 220 \text{ Pa}$ byl nastaven optimální stupeň ionizace $Q \sim 5$ pro výskyt heliu podobných iontů dusíku. Největší hodnoty záření v oblasti vodního okna bylo dosaženo pro hodnotu tlaku $p_{\text{mol}} \sim 650 \text{ mTorr}$. Vypočtené maximální hodnoty amplitudy záření dobře souhlasí s dostupnými experimentálními daty. Dostatečně husté ($N_e < 8 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$) a teplé ($20 < T_e < 40 \text{ eV}$) plazma se přitom udržuje po relativně dlouhou dobu $\sim 100 \text{ ns}$ prakticky v celém objemu kapiláry. Na Obr. 16, znázorňujícím

prostorovo-časovou závislost teploty dusíkového pinče, je tato oblast vyznačena přechodem od modré barvy ke žluté. Nejintenzivnější spektrální čára s vlnovou délkou $\lambda = 2,878 \text{ nm}$ (odpovídající přechodu $1s^2 - 1s2p$) je potom vyznačována v červeně zbarvené oblasti diagramu.

Studium zářivých struktur v magnetických pinčích



Obr. 17 Vývoj proudových vrstev mezi anodou a antianodou v pinčovém zařízení PFZ na FEL ČVUT.

Pinčová skupina na FEL vedená Pavlem Kubešem se v roce 2009 zabývala experimentálním výzkumem rentgenového a neutronového vyzařování magnetických pinčů a vizualizací jejich zářivých struktur. Experimenty prováděla jednak na velkých zařízeních v zahraničí – na plazmovém fokusu PF1000 ve Varšavě a na pinčovém zařízení S-300 v Moskvě, jednak na vlastním pinčovém zařízení PFZ na FEL. Získané obrázky dokládají změny ve struktuře pinčového sloupce v době emise rentgenového a neutronového záření s časovým rozlišením 10-20 ns a prostorovým rozlišením 1 mm. V některých výbojích byla po několik desítek ns registrována hustá zářivá struktura. Na zařízení S-300 bylo pozorováno vyvržení plazmatu ze dvou implodujících částí - vstřicných jetů, vznikajících nejprve u katody a později u anody. Analogický jev byl zjištěn i na pražské aparatuře PFZ, kdy jet u druhé elektrody byl vytvořen antianodou. Vývoj proudových vrstev mezi anodou a antianodou v pinčovém experimentu ukazuje série šlirových snímků na Obr. 17. Na snímcích a, b je dobře vidět vláknová struktura pinče, snímky e, f ukazují implozi proudové vrstvy v blízkosti antianody.

Práce v oboru plazmových rentgenových laserů

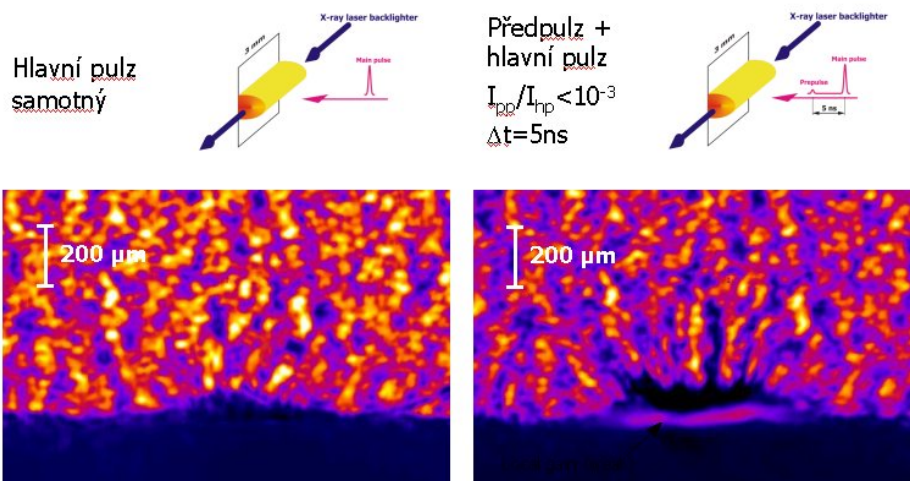
V roce 2009 probíhaly v laboratoři PALS výzkumné a vývojové práce zaměřené na vývoj plazmových rentgenových zesilovačů, na výzkum hustého plazmatu a horké husté hmoty s využitím rentgenových laserů jak pro vytváření plazmatu, tak pro jeho diagnostiku, a na studium rentgenové ablace a na její využití pro diagnostiku rentgenových svazků. Z výsledků těchto prací vybíráme, obdobně jako v předchozích odstavcích, několik ilustračních příkladů.

Využití zinkového laseru pro diagnostiku plazmatu

Technika prozařování plazmatu paprskem rentgenového laseru byla v laboratoři PALS použita v experimentech zaměřených na vývoj plazmových rentgenových zesilovačů. Využití zinkového rentgenového laseru na vlnové délce 21,2 nm umožnilo zkoumat oblasti plazmatu s hustotou až $1,2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ s časovým rozlišením $\sim 100 \text{ ps}$. Testované plazma bylo vytvářeno infračerveným pomocným svazkem laseru PALS (vlnová délka 1315 nm) o energii 80 J, soustředěným do lineárního ohniska rozměrů $0,15 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ na povrchu zinkového nebo železného terče. Intenzita záření v ohnisku dosahovala hodnoty $5 \times 10^{13} \text{ W/cm}^2$, vytvořené plazma bylo rentgenovým laserem prozařováno podélně. K zobrazení bylo využito mimoosového parabolického zrcadla s multivrstvým MoSi pokrytím a PI-MTE CCD kamery (2048×2048 13,5- μm pixelů) s osminásobným zvětšením. Vlastní emise plazmatu byla potlačena pomocí prostorové filtrace v ohniskové rovině paraboly.

Výsledky provedených měření odhalily mj. výraznou vláknovou strukturu plazmatu v oblasti hustot nižších než kritická, vznikající 0,1-0,2 ns před maximem laserového pulzu. Tato struktura se podstatně zvýrazní při aplikaci velmi slabého laserového předpulzu – viz Obr. 17.

Magnetohydrodynamické modelování filamentačních procesů v plazmatu provedené v Instituto Superior Tecnico v Lisabonu dokládá, že vlákna

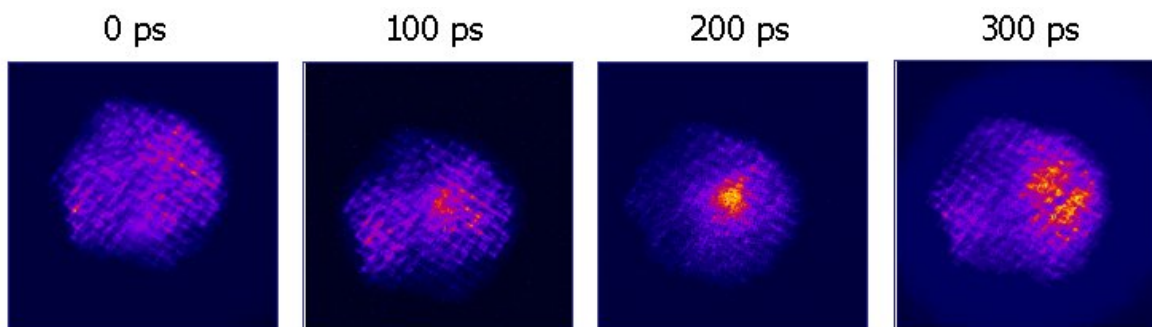


Obr. 18 Vliv slabého laserového předpulzu na vláknovou strukturu laserového plazmatu.

vznikají působením magnetického pole difundujícího z kritické plochy v plazmatu a vytvářejícího magnetický tlak srovnatelný s tlakem plazmatu v oblasti s podkritickou hustotou.

Měření opacity horkého plazmatu v rentgenové oblasti

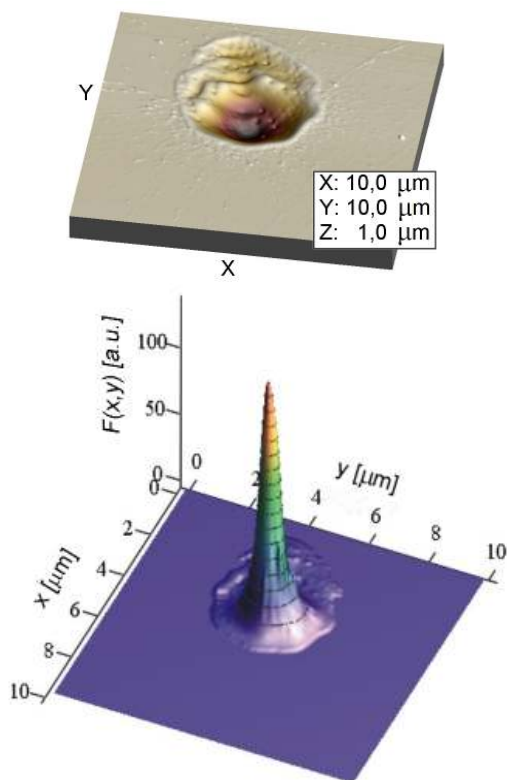
V původně astrofyzikálně motivovaných experimentech, prováděných v laboratoři PALS ve spolupráci s pracovníky University v Yorku pod vedením Prof. G. Tallentse byl zinkový XUV laser použit pro měření opacity horkého plazmatu na vlnové délce 21,2 nm. Dostatečně homogenní horké plazma bylo vytvářeno buď z tenké polyimidové fólie, nebo z tenkých kovových fólií nezávislým pomocným svazkem infračerveného jódového laseru a prozařováno paprskem rentgenového laseru. V jiné variantě tohoto experimentu byla zkoumaná horká hustá hmota vytvářena přímo paprskem samotného sondovacího rentgenového laseru. Ze změněné transmise rentgenového záření lze přímo odvodit opacitu plazmatu na dané vlnové délce. Tímto způsobem lze měřit opacitu velmi hustého plazmatu v počátečních fázích jeho expanze, při teplotách až 300 eV, tj. mnohem vyšších, než při použití jiných prozařovacích technik. Změnou zpoždění sondovacího rentgenového pulzu oproti plazma vytvářejícímu infračervenému pulzu lze sondovat plazma v různých časech, tj. při různých hustotách. Příklad průchodu záření o vlnové délce 21,2 nm vodíku-podobným hliníkovým plazmatem, vytvářeným 250 ps trvajícím pulzem infračerveného laseru z Al fólie tloušťky 0,8 μm , je uveden na Obr. 19. Časy 0 - 300 ps označují zpoždění sondovacího XUV pulzu vůči pulzu infračerveného laseru. Červené až žluté oblasti jsou místa průchodu záření XUV laseru.



Obr. 19 Průchod záření o vlnové délce 21,2 nm horkým hliníkovým plazmatem (červené a žluté oblasti).

Průzračnost hliníkové fólie vyvolaná zářením rentgenového laseru na volných elektronech

Experiment, provedený na laseru s volnými elektrony FLASH (Free-Electron LASer in Hamburg) skupinou vědců z deseti zemí za účasti týmu pracovníků Centra laserového plazmatu z FZÚ, ukázal výrazný nárůst průzračnosti hliníkové fólie pro záření při vysokých intenzitách v měkkém rentgenovém oboru spektra. Experiment spočíval v soustředění ultrakrátkých, tj.



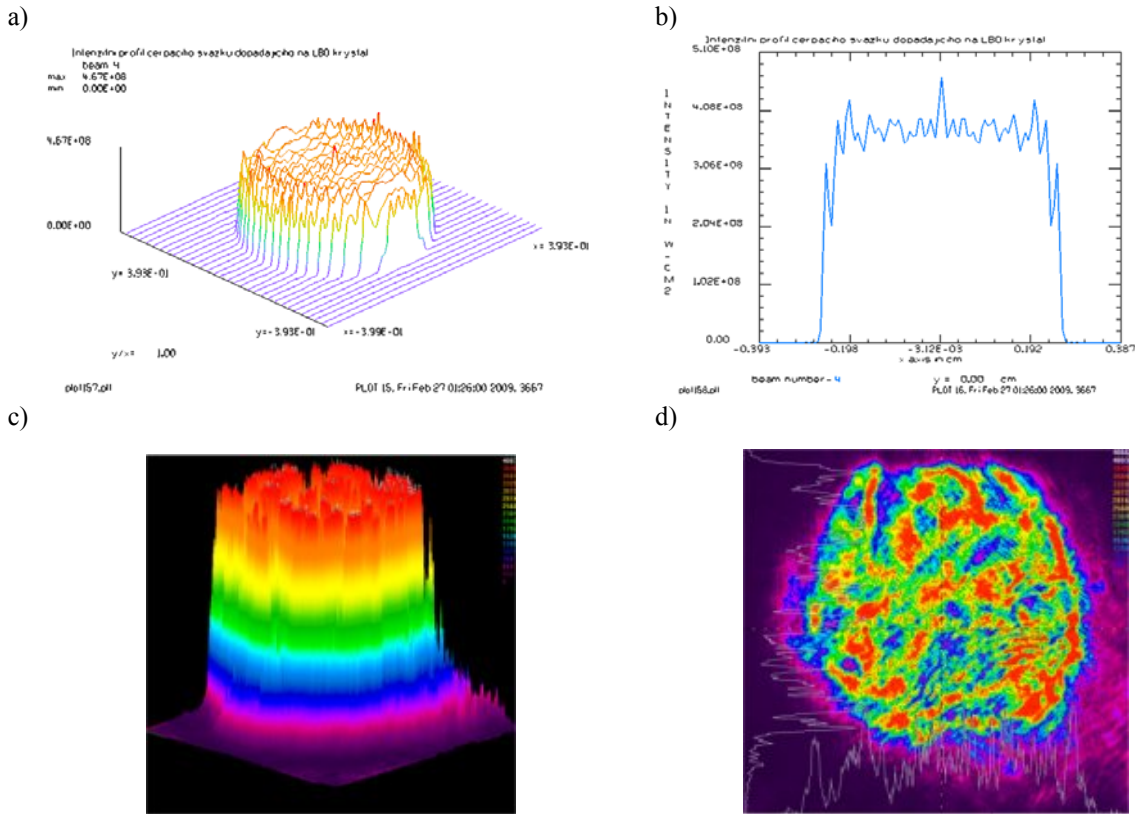
Obr. 20 Nahoře ablační otisk fokusovaného rentgenového svazku zařízení FLASH na povrchu plexiskla, dole zrekonstruovaný profil svazku.

řádově pouze 10 fs trvajících, impulzů rentgenového laseru na povrch tenké hliníkové fólie do ohniskové skvrnky o průměru jen několika set nanometrů. Laser je naladěn na vlnovou délku, při níž vyrazí elektron přednostně z L slupky hliníku. Intenzita záření je ve fokusu svazku tak vysoká ($> 10^{16} \text{ W/cm}^2$), že fotony z čela svazku stačí fotoionizovat všechny atomy na dráze svazku a zbytek fotonů pak proletí vzorkem bez další interakce. Počet fotonů prošlých fólií strmě roste s intenzitou záření a vzorek se tak stane průhledným v měkkém rentgenovém oboru. Kromě podílu na vlastní realizaci experimentu spočívá specifický přínos pracovníků Centra především v uplatnění originální metody stanovení parametrů pole záření při interakci s terčem, a to z „otisku“ svazku na povrchu ozářeného materiálu, který byl sejmut pomocí mikroskopu atomárních sil a Nomarského optickou mikroskopií. Nalezli a na několika typech rentgenových laserů vyzkoušeli postupy umožňující velmi přesně stanovit intenzitu záření v ohnisku a dále ověřit, zda je svazek ideálně fokusován. Ablační otisk fokusovaného rentgenového svazku na povrchu plexiskla a z něho zrekonstruovaný profil svazku jsou uvedeny na Obr. 20. Otisk věrně zobrazuje rozložení energie po průřezu svazku, a to přímo v jeho ohnisku. Ukazuje, že se podařilo svazek rentgenového laseru soustředit do stopy o průměru menším než 1 μm . Dosažené rekordní intenzity záření řádu 10^{17} - 10^{18} W/cm^2 umožní výzkum dosud neprobádaných procesů v pevných látkách ozařovaných vysoce intenzivním rentgenovým zářením.

Nová zařízení pro výzkum laserového plazmatu

Simulace průchodu svazku laserovým systémem SOFIA, určeným pro optické buzení nelineárních krystalů

V rámci prací na dvoustupňovém OPCPA systému s krystalovými zesilovači čerpánými svazkem na 3. harmonické jódového laseru SOFIA byl pomocí digitální CCD kamery UP-900-12B (UNIQ) a analyzátoru laserového svazku LBA-500 (Spiricon) proměřen profil intenzity čerpacího svazku před vstupem do nelineárního optického krystalu v první větvi OPA (*Optical Parametric Amplifier*) zesilovače. Ve své disertační práci Jan Dostál provedl simulaci průchodu svazku celou optickou drahou až k prvnímu nelineárnímu krystalu za použití softwaru GLAD (*General Laser Analysis and Design*). Tento programovací kód umožnil popsat intenzitu laserového svazku při jeho šíření pasivními i aktivními optickými prvky, včetně výpočtu zisku v zesilovačích a v nelineárních optických krystalech.



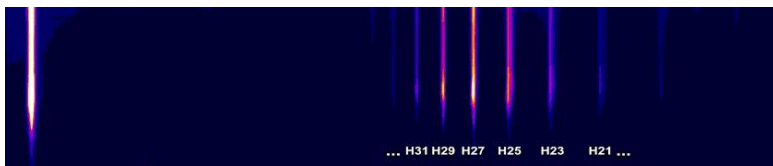
Obr. 21 Porovnání profilů intenzity budícího svazku v místě vstupní apertury krystalu LBO získaných ze simulace v GLAD (a, b) a změřených digitální CCD kamerou UP-900-12 (c,d).

Porovnání vypočteného a změřeného profilu intenzity svazku 3. harmonické ukazuje Obr. 21. Změřený profil intenzity budícího svazku není tak kvalitní, jak by měl být podle simulace. Je to způsobeno především vlivem akustické vlny, která v jódových zesilovačích vzniká v důsledku dlouhé doby jejich čerpání. Pro účely parametrického zesílení je tedy nutné profil intenzity 3. harmonické budícího svazku vylepšit. Vzhledem k tomu, že poslední zesilovač systému pracuje v saturaci, lze důvodně předpokládat, že dvojný průchod tímto zesilovačem profil intenzity budícího svazku do jisté míry vyhladí. Na těchto úpravách, jejichž cílem je dosáhnout zesílení čirpovaného femtosekundového laserového pulzu v co nejkratší době, se intenzivně pracovalo v závěru roku 2009.

Nový rentgenový zdroj na Ti:safírovém laseru v laboratoři PALS

Motivací projektu nového rentgenového zdroje byla potřeba vyvinout vysokorepeticí zdroj koherentního rentgenového záření pro praktické aplikace, který by byl komplementární k již existujícímu XUV laseru na vlnové délce 21 nm, jehož nevýhodou je velmi nízká opakovací frekvence (1 výstřel za 22 min.). K realizaci zdroje využil Tomáš Mocek a jeho spolupracovníci metody založené na nelineárním procesu generace vysokých harmonických frekvencí Ti:safírového laseru (výstupní energie v pulzu 1,2 mJ, délka pulzu 40 fs, centrální vlnová délka 810 nm, opakovací frekvence 1 kHz). Komerční Ti:safírový laser bylo nejprve nutné upravit pro potřeby projektu a vybudovat řadu nových diagnostik ke kontrole parametrů a stability Ti:Sa svazku. Bylo navrženo a implementováno 5 diagnostických kanálů výstupního laserového svazku, které umožňují během každého výstřelu sledovat energii, délku pulzu, kontrast, profil v blízké i vzdálené zóně a zesílené spektrum po kompresi. Pro vlastní experiment na generaci vysokých harmonik, stejně jako pro aplikační experimenty s rentgenovým zářením, byly navrženy a zhotoveny vakuové interakční komory potřebných parametrů. Po úspěšném dokončení experimentální infrastruktury následovalo měření parametrů rentgenového svazku a optimalizace zdroje vysokých harmonických v argonu

v okolí vlnové délky 30 nm. Ze spektra harmonického zdroje na Obr. 22 je patrné, že nejsilnější je 27. řád na vlnové délce 30,1 nm. Vlnovou délku zdroje je přitom možno jemně ladit změnou nastavení vzdálenosti mřížek v Ti:safírového kompresoru.



Obr. 22 Spektrum harmonického rentgenového zdroje realizovaného na společném pracovišti PALS.

Postavený pulzní vysokorepetiční rentgenový zdroj poskytuje vysoce symetrický a homogenní laserový svazek o vlnové délce 30,1 nm a divergenci 0,8 mrad. Energie pulzu na této vlnové délce je 0,1 nJ, což odpovídá konverzní účinnosti 5×10^{-7} . Laserový svazek je velmi kvalitní (faktor kvality $M^2 = 1,9$) a prostorově plně koherentní. Celé zařízení je v současné době ve standardním rutinním provozu.

Evropské projekty HiPER a ELI

Pracovníci Centra Bedřich Rus, Tomáš Mocek a další se v roce 2009 podíleli na přípravě projektů výstavby dvou velkých evropských laserových zařízení z ESFRI European Roadmap for Research Infrastructures: HiPER (*High Power Laser for Energy Research*) - předstupeň laserového energetického reaktoru a ELI (*Extreme Light Infrastructure*) s intenzitou paprsku o mnoho řádů převyšující doposud dosaženou hodnotu (10^{22} W/cm^2). Pro oba projekty bude nutno nejprve vyvinout vysokorepetiční výkonové laserové drivery, což je předmětem dalšího připravovaného projektu HiLASE.

Na základě rozhodnutí Mezinárodního řídicího výboru přípravné fáze projektu ELI (*Steering Committee ELI-PP*), jehož jednání se uskutečnilo 1. října 2009 v Praze, získala Česká republika oficiální mandát k tomu, aby pokračovala v implementaci ELI a společně s Maďarskem a Rumunskem vytvořila celoevropské konsorcium, které ELI vybuduje a bude provozovat.



Obr. 23 Architektonický návrh centra ELI-Beamlines v Dolních Břežanech. Menší nový objekt vlevo nahoře je laserové vývojové centrum HiLASE.

Podle nové koncepce bude ELI integrovanou evropskou infrastrukturou typu ERIC, sestávající ze tří pilířů, z nichž první s názvem ELI-Beamlines bude vybudován v České republice. Bude sloužit výzkumu ultraintenzivních sekundárních zdrojů pro mezioborové aplikace ve fyzice, medicíně, biologii a materiálovém inženýrství. Další součásti ELI budou v Maďarsku a Rumunsku. Jako vhodná lokalita pro stavbu centra ELI-Beamlines byla vybrána obec Dolní Břežany ve Středočeském kraji. Architektonický návrh nového objektu je představen na Obr. 23. Další aktuální informace o postupu projektu ELI je možno nalézt na nových českých internetových stránkách tohoto projektu www.eli-beams.eu.

Shrnutí a závěr

Úspěšně naplněných 29 aktivit Centra laserového plazmatu, rozsáhlé spektrum prováděných výzkumných prací a množství publikovaných výstupů dokládají, že pracovníci Centra vynaložili v roce 2009, stejně jako v letech minulých, veškeré své síly k tomu, aby dosáhli hodnotných vědeckých výsledků, zpřístupnili je co nejdříve vědecké komunitě a předali maximum svých

zkušeností mladé vědecké generaci. Motivací jejich činnosti je snaha přispět k rozvoji jednoho z nejdynamičtějších současných vědních oborů, jenž podstatně posouvá hranice lidského poznání, přináší převratné technologické postupy a slibuje realistickou alternativní cestu k získávání energie pomocí termojaderné fúze. Uplatnění výsledků prací Centra lze očekávat nejen ve fyzice plazmatu, ale též v materiálovém výzkumu, planetologii, astrofyzice a v dalších vědeckých a technických oborech, vyžadujících laboratorní simulaci prostředí o velmi vysoké hustotě energie.

Díky úsilí pracovníků Centra a jeho významné podpoře ze strany MŠMT dosáhl český výzkum laserového plazmatu na počátku „století fotonu“ ve světě respektovaného postavení a Česká republika se zařadila po bok tradičním velmocím v tomto oboru, jako jsou Velká Británie, Německo nebo Francie. Centrum poskytuje našim vědeckým pracovníkům a studentům jedinečnou příležitost spolupracovat v domácích podmínkách se špičkovými odborníky v oblasti laserové fyziky z mnoha předních evropských laboratoří, kteří zde realizují své výzkumné projekty. Ve svém důsledku to podstatně zvyšuje kvalitu domácí vědecké práce i kvalitu výchovy vědeckého dorostu a tím i možnost uplatnění českých pracovníků v rámci velkých evropských vědeckých projektů, jako jsou ESFRI projekty HiPER a ELI. Současná vedoucí role České republiky v evropském konsorciu, pověřeném přípravou realizace projektu ELI, je toho více než dostatečným dokladem. Úspěšná realizace jednoho z hlavních pilířů projektu ELI přinese České republice nejen prestiž, ale i nezanedbatelné finanční prostředky, jež bude moci využít i řada českých průmyslových subjektů.

Účast České republiky v projektech HiPER a ELI do budoucna ještě více zdůrazňuje úlohu klíčového pracoviště Centra – laserové laboratoře PALS, jež jako jedno z mála tuzemských pracovišť splňuje beze zbytku všechny podmínky, kladené na velké evropské výzkumné infrastruktury, neboť

- dlouhodobě produkuje významné vědecké výsledky,
- je dlouhodobě zapojena do evropské sítě laserových infrastruktur LASERLAB-EUROPE jako integrální součástí evropského výzkumného prostoru,
- poskytuje tzv. *open access* vybraným projektům evropských uživatelů,
- slouží jako školicí pracoviště pro studenty a mladé vědecké pracovníky v oboru laserové fyziky a fyziky laserového plazmatu z domova i ze zahraničí.

Laboratoř PALS proto v současné době aspiruje na zařazení do tzv. „české cestovní mapy“ státní podpory velkých výzkumných infrastruktur, jako jedné z možností jak zajistit její úspěšné fungování po skončení projektu Centra laserového plazmatu, tj. od roku 2011.

Do posledního roku projektu vstupujeme s nadějí, že v metodách hodnocení vědecké práce převládne racionální přístup nad jen vědecky se tvářícími kalkulačkovými pseudometodami a že výsledky práce Centra laserového plazmatu budou náležitě oceněny a beze zbytku zúročeny ve prospěch České republiky.