

# Nemlineáris lézerplazma-kölcsönhatásokban keltett gyors elektronok vizsgálata

## Részletes jelentés

### 1. Bevezetés

A pályázaton két kutató, a témavezető és egy fiatal kutató dolgozott annak egész időtartama alatt, míg annak első felében még egy kutató és egy doktori ösztöndíjas vett közvetlenül részt. Így az eredmények egy kis csoport eredményei, szoros együttműködésben a Szegedi Tudományegyetem (SZTE) Kísérleti Fizikai Tanszékével. Hazai kísérleteinket az ottani, a velük való együttműködésben kialakított HILL laboratóriumban végeztük, az ultrarövid, 600 fs impulzushosszú KrF lézerrel.

Emellett az állandó munkakapcsolat mellett együttműködtünk más csoportokkal is, így az MTA-SZTE Lézerfizikai Tanszéki Kutatócsoporttal a gázjet target fejlesztésben, a Debreceni Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékével a röntgenspektrométer fejlesztésében. Nemzetközi együttműködéseink során az EURATOM támogatásával közös kísérleteket végeztünk a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben, valamint a varsói Műszaki Katonai Egyetem Optoelektronikai Intézetében. A magyar és lengyel akadémiák közötti együttműködés keretében Leszek Ryc (IFPILM, Varsó) két ízben is közös kísérletet végzett velünk a HILL laboratóriumban.

A pályázat során végzett munka súlypontjai az idők során némileg eltolódtak az eredeti tervekhez képest. Mivel a KrF lézer rövid, 248 nm hullámhossza következtében a gyors elektronok hőmérséklete még az elért,  $10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> fölötti intenzitásoknál is legfeljebb 10 keV nagyságrendű, ezért nem vizsgáltuk közvetlenül ezek spektrumát. Elektronspektrumokat közvetlenül ezért a nagyobb érdeklődésre számot tartó 0.8  $\mu$ m hullámhosszú,  $10^{19}$  W/cm<sup>2</sup> intenzitású titán-zafír lézerrel mértünk a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben a velük való együttműködésben. Ezen kísérletekben a relativisztikus önfókuszálás szerepét vizsgáltuk a gyors elektronok létrehozásában, valamint az elektronok terjedését a még szilárd targetben. Hazai kísérleteinkben inkább azokat a kritikus réteg körül lejátszódó nemlineáris jelenségeket vizsgáltuk, amelyek gyors elektronok keltéséért is felelősek. Ezen belül a magas harmonikusok keltésével foglalkoztunk a meredek plazma-gradiensben, amelyek információt adtak a kritikus réteg fodrozódására, ami egyúttal módosíthatja a rezonancia abszorpció során a plazmonok által gyorsított elektronok spektrumát is. Vizsgálataink során spektroszkópiai módszerrel is bizonyítékát adtuk annak, hogy a kritikus réteg körül nagy energiára szert tett forró elektronok a szilárd anyagba behatolva azt felfűtik, így a magas hőmérsékletet nagy sűrűség mellett, gyakorlatilag izochor módon érvén elhető el.

A fenti két nagyobb lélegzetű kísérlet mellett több olyan fejlesztő munkát is végeztünk, amelyek már eddig is, vagy majd ezután majd ezután válnak újabb kísérleteink alapjává. Legfontosabb fejlesztésünk a lézernyaláb parabola-tükörrel való reflektív fókuszálása volt, amellyel a nyalábot sikerült  $\sim 2$   $\mu$ m átmérőjű foltba fókuszálnunk, ahol  $1.5 \cdot 10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> intenzitást értünk el  $10^{10}$  időbeli kontraszt mellett. Üzembe helyeztünk egy von Hamos típusú PET kristályos röntgen-spektrométert, amelynek újszerűsége a film helyett foszforral bevont CMOS detektorok használata. Átalakítottunk és karakterizáltunk egy Parker gyártmányú impulzusszeleppel működő gázjet targetet. Megmutattuk, hogy a konstrukciónknak köszönhetően  $\sim 1$  mm tartományban homogén targetet lehet létrehozni mintegy  $3 \cdot 10^{19}$  cm<sup>-3</sup> atomsűrűségig. Ez a target amind forró elektronok, mind pedig gázharmonikusok keltésére használható.

Kutatásainkhoz kapcsolódóan a pályázat ideje alatt két PhD értekezés (Gál Kinga, Rácz Ervin), és egy MTA doktori értekezés (Földes István) íródott.

## 2. Harmonikusok keltés meredek plazmagradiensen

Magas harmonikusok kelthetők nagy intenzitású lézerimpulzusokkal, ahol a plazmának nincs ideje tágulni, és karakterisztikus hossza a kölcsönhatás ideje alatt a hullámhossznál rövidebb. Ekkor az elektronok a meredek plazmagradiensen keresztül oszcillálnak, azaz anharmonikus rezgést végeznek, más szóval a lézerimpulzus a kritikus rétegnél (ahol a plazmafekvencia egyenlő a fény frekvenciájával) plazmont kelt. Az anharmonikus oszcillációk, illetve a plazmonoknak a lézerfényvel való nemlineáris kölcsönhatása a fény magas harmonikusainak forrásául szolgál. Korábbi kísérleteinkben megfigyeltünk már harmonikusokat mérsékelt,  $5 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$  lézerintenzitás mellett, amelyek meglepő tulajdonságokkal rendelkeztek. Az elvárásokkal szemben harmonikusokat figyeltünk meg mind p-, mind s-polarizált lézerfény esetén, a keltett, tükörszerű reflexió irányában haladó harmonikusok pedig megőrizték a lézer polarizációját. A jelenség megértéséhez készített modellünk az úgynevezett frusztrált totálreflexión alapuló egyelektron-modell [1]. A számítások azt mutatják, hogy az optikailag sűrű anyagban lecsengő evaneszcens térben a relativisztikus esethez hasonlóan a Lorentz erő  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  komponense már kis intenzitásoknál sem elhanyagolható. Ez az erő lehet a forrása a magas harmonikusoknak már a nemrelativisztikus esetben is. A modellt sikerrel alkalmaztuk egy másik problémára is. Egy olasz-francia kísérletben megfigyelték, hogy ha vékony targeten keltettek ultrarövid impulzussal lézerplazmát, akkor annak ellenére, hogy az impulzus rövid ideje alatt a céltárgy optikailag sűrű maradt, mégis jelentős maradhat a lézernyaláb transzmissziója. A számítások szerint a frusztrált totálreflexió, és az evaneszcens tér figyelembe vétele megmagyarázhatja ezt a jelenséget is [2].

A jelen pályázat keretében folytatott vizsgálatainkban harmonikus-kísérleteket végeztünk a korábbinál majdnem két nagyságrenddel nagyobb intenzitásokkal. Munkánkat két dolog motiválta. Korábban mindössze egy ismert kísérlet volt nagy intenzitású KrF lézerrel. A Rutherford Laboratórium azóta leállított Titania lézerével, egy gyenge kontrasztú impulzussal a 4. rendig sikerült harmonikusokat gerjeszteni  $10^{19} \text{ W/cm}^2$  intenzitás esetén. Megfigyelték azt is, hogy  $10^{16} \text{ W/cm}^2$  intenzitás fölött a harmonikusok diffúzan terjednek. Célunk az volt, hogy megállapítsuk azt, hogy a viszonylag alacsony harmonikusrendet és a diffúz terjedést a gyenge kontrasztú nyaláb előimpulzusa által keltett előplazmában való kölcsönhatás okozta-e.

Ehhez először lézerintenzitásunkat növeltük meg azzal, hogy a nyalábot az eddigi lencsével történő fókuszálás helyett egy ferdetengelyű parabolatükörrel, meredekebben fókuszáltuk le mintegy  $2 \mu\text{m}$  átmérőre. A központi foltba (amelyet a maximum félértékszélességével határoztunk meg) a teljes energia harmada esett be, ami a szilárd targetre való beeséskor  $1.5 \cdot 10^{17} \text{ W/cm}^2$  fókuszált intenzitásnak felel meg. Eközben az előimpulzusok egyedüli forrása, az erősített spontán emisszió a fókusz síkban továbbra is fókuszálatlan, azaz intenzitása  $10^7 \text{ W/cm}^2$  alatt tartható, ami több, mint tíz nagyságrend kontrasztnak felel meg [3,4]. Kísérleteinket így gyakorlatilag előimpulzus-mentes, tiszta nyalábbal végezhetjük.

Hasonlóképpen a fent említett Titania kísérlettel harmonikusokat figyeltünk meg a 4. rendig, azaz 62 nm hullámhosszig különböző targetek esetén [5]. Megvizsgáltuk a keltett harmonikusok irányeloszlását, a harmonikusok intenzitásának függését a lézer polarizációjától, valamint a harmonikusok polarizációját. A korábbi kísérleteinkhez hasonlóan harmonikusok keltését figyeltünk meg mind p-, mind s-polarizált lézerfény esetén, a keltett harmonikusok intenzitásában nem tapasztaltunk szignifikáns eltérést, azaz a különbség a két polarizáció használhatóságában az intenzitás növekedésével tovább csökkent ( $5 \cdot 10^{15} \text{ W/cm}^2$  esetén a p-polarizált fény még egy 4-es faktoralábbal effektívebb volt). Megmutattuk, hogy a

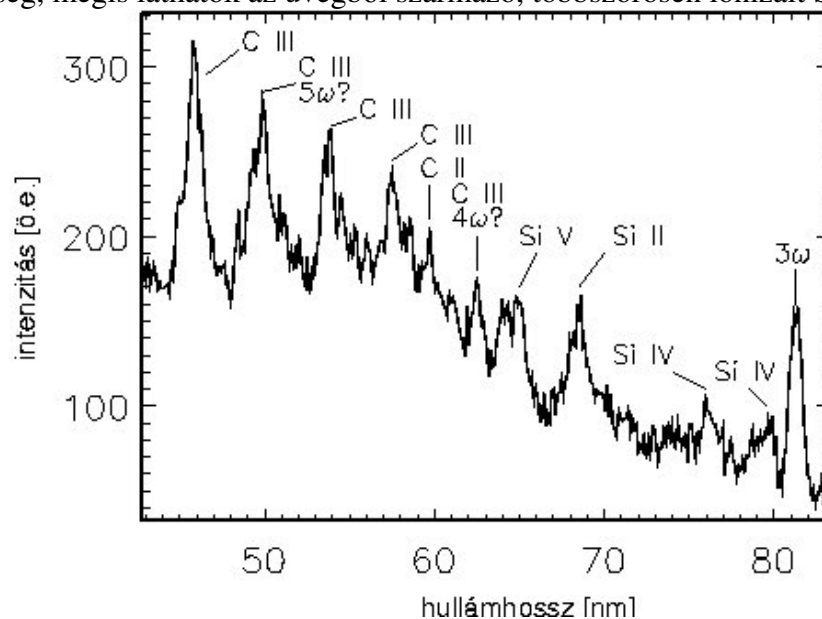
keltett harmonikusok egy jelentős része nem tükörszerűen, hanem diffúzan reflektálódik. A keltett harmonikusok polarizációja az intenzitás változásával jelentősen változik. Míg az alacsonyabb intenzitás esetén megőrizték a keltő lézer polarizációját,  $10^{16}$  W/cm<sup>2</sup> fölött a polarizáció egyre jobban keveredik, a harmonikusok az intenzitás növelésekor gyakorlatilag ugyanannyi p- mint s-polarizált komponens mutatnak függetlenül a beeső lézer polarizációjától. Mindezek a jelenségek meggyőzően bizonyítják, hogy a harmonikusok nem egy sík felületen, hanem egy modulált, fodrozódó felületen keletkeznek, azaz a kritikus felület fodrozódik.

A numerikus szimulációk azt mutatják, hogy a lézervény által lepárolgatott plazma nyomása és a fénynyomás közel azonos nagyságrendű, amelyek egymással egyensúlyban vannak, ennek köszönhetően a plazma skálahossza az impulzus 700 fs időtartama alatt a kezdeti tágulást követően közel állandó marad, skálahossza a hullámhossz néhány tizede, ami optimális a rezonancia-abszorpcióhoz, és a harmonikusok keltéséhez. Ez az egyensúly azonban szükségszerűen instabil, néhány 100 fs alatt kifejlődhet a Rayleigh-Taylor instabilitás[5]. Ez az instabilitás az, ami a kritikus felület fodrozódását, és a harmonikusok diffúz terjedését okozza. Bebizonyítottuk tehát, hogy a kritikus felület fodrozódása nem csupán egy előplazmában fellépő folyamat, hanem mindazon esetekben felléphet, ahol a fénynyomás megközelíti a plazma nyomását, továbbá a kölcsönhatás ideje elég hosszú a Rayleigh-Taylor instabilitás kifejlődéséhez. Következésképpen leszögezhetjük, hogy nyalábszerűen, jól kollimáltan terjedő harmonikusok keltéséhez rövidebb impulzusokat kell használni.

A jelen pályázat keretében folytatott vizsgálataink közül ezeket az eredményeket tekintjük a legjelentősebbnek, legmegalapozottabbaknak. Az erről szóló összefoglalót azért vettük rövidre, mert ezek voltak a legrészletesebben publikálva is a hivatkozott cikkekben.

### 3. Lézerplazma spektroszkópia

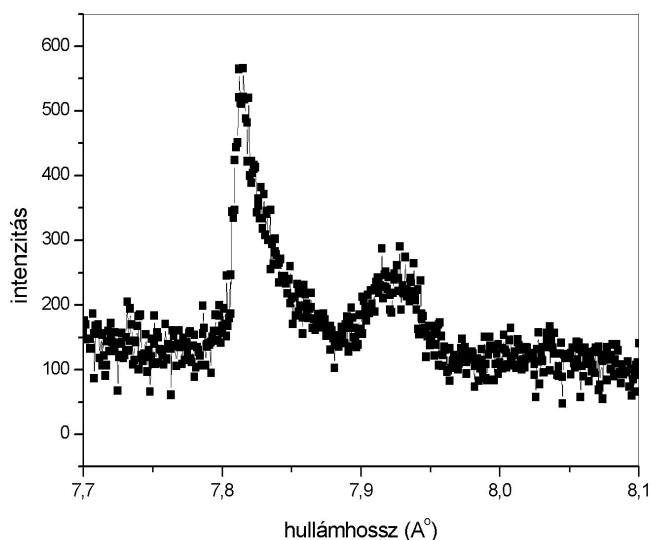
Ugyanaz a spektrométer-elrendezés, amelyet a vákuum-ultraibolyában fellépő harmonikusok vizsgálatára használtunk, alkalmazható közvetlenül spektroszkópiai célokra is. Egy ilyen eredményt mutatunk be az 1. ábrán. Itt üvegre párolgatott 0.5 $\mu$ m vastag szénréteg spektrumát láthatjuk 45 és 80 nm között. A gyenge 4. harmonikus mellett C és Si vonalak figyelhetők meg. Bár az említett szénréteg vastagsága nagyobb, mint esetünkben a számított ablációs mélység, mégis láthatók az üvegből származó, többszörösen ionizált Si vonalai.



1. ábra: Üvegre párolt szénréteg vákuum-ultraibolya spektruma

Mivel a szilíciumot már nem a lézer fűti, azt csak a (termikus) elektron-hővezetés, vagy a kölcsönhatásban keletkező forró elektronok fűthetik fel. A látható SiV vonal magas ionizációs állapotra, forró elektronok által történő fűtésre utal. A forró elektronok fűtése azért érdekes, mert a rövid idő miatt nincs idő tágulásra, a spektrum egy izochor módon fűtött sűrű, forró anyag sugárzása. Ez történik a lézerfúzió ún. gyors begyújtása esetén, és a csillagok belsejében is. A számítások azt mutatják, hogy az excimer lézer ultraibolya sugárzása jól alkalmazható izochor fűtésre. Bár a fenti spektrum jó utalás erre, perdöntő bizonyítékot egy nagyobb felbontású spektrum adhat, ahol meghatározható a vonal sűrűségfüggő kiszélesedése is.

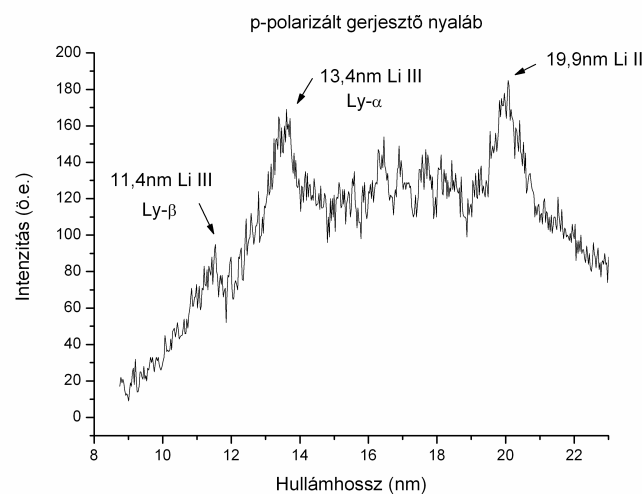
Ezen folyamatok további vizsgálatához elkészítettünk egy röntgen-spektrométert. A von Hamos spektrométer diszperzív eleme egy hengeresen hajlított PET kristály, ami a forrást a detektorra leképezi. A spektrométer az 1.45-2keV spektrális tartományban működik. A mindmáig szokványos film-detektor helyett mi foszfor réteggel bevont CMOS detektort használtunk, amelyet számunkra a Naval Research Laboratoryban készítettek. A foszfor-réteg nem rontotta el a CMOS detektorok 50 $\mu$ m pixelmérete által meghatározott felbontást, így sikerült  $\lambda/\Delta\lambda=500$ -as felbontást elérnünk, ami már alkalmas lesz vonalszélesség méréséhez, így az izochor fűtés tanulmányozásához is (2. ábra). A spektrum teljes hossza két detektor egymás mellé helyezésével 10 cm, azaz igen széles spektrális tartomány lesz, a spektrométer jelenleg egy detektorral működik. Javítani kívánunk még a kontraszton a detektor érzékenységének a növelésével (vékonyabb foszfor réteggel), illetve a lézereenergia növelésével. Itt jegyezzük meg, hogy jelenleg az SZTE Kísérleti Fizikai Tanszéke által készített új lézereerősítőnk már félkész állapotban van, a 2006. évben történő beállításával az energia mintegy 4-szeres növekedése várható.



**2.ábra:** Az Al spektrumon jól láthatók a héliumszerű  $Al^{11+}$  vonalai, valamint a legalább  $0.02 \text{ \AA}$  felbontás

Érdekes spektroszkópiai kísérleteket végeztünk alacsony intenzitások esetén a vákuum-ultraibolya tartományban LiF targettel a főleg a litográfiában számításba jövő lítium spektrumának vizsgálatával. A lítium atom héján mindössze 3 db elektron található, amelyek már viszonylag alacsonyabb hőmérséklet esetén is könnyen leszakadnak, következésképpen viszonylag kis lézerteljesítmény esetén is megfigyelhető a lítium K-héjának spektruma, amelyet a 3. ábra szemléltet 10 és 22 nm között, a hélium- és hidrogénszerű lítium vonalait

mutatva. A vonalak mellett erős, a szabad-kötött és szabad-szabad átmenetekből származó kontinuum figyelhető meg. Látható, hogy a hidrogénszerű lítium vonalai a Lyman- $\alpha$  és Lyman- $\beta$  után a kontinuumba süllyednek. Ezt az ún. „continuum lowering” okozhatja, ami azt jelenti, hogy a szabad ion magasabb főkvantumszámú pályáin lévő elektronok a sűrűség növelésekor egymást átfedik, így a magas Rydberg állapotokat elnyomja a kontinuum, átfednek a szomszéd ionokkal. A kontinuumhatár csökkenéséből meghatároztuk az ionsűrűséget, ami  $6.7 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ -nak adódott. Feltételezve a lítium atomok többségének teljes ionizációját az elektronsűrűség megfelel a kritikus sűrűségnek KrF lézer esetén, azaz a sugárzás a kritikus réteg körüli tartományból származik. A kísérletet csoportunkban az OTKÁ-ban nem szereplő Gajdásy Gábor, diákkörös hallgató végezte, aki munkájával az OTDK-n első díjat kapott. Látható, hogy a módszer egyúttal jó lehetőséget ad a plazma ionsűrűségének meghatározására.



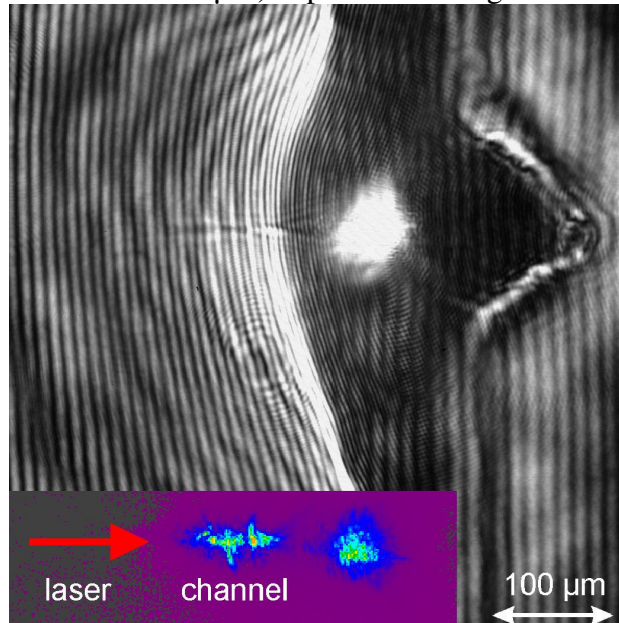
**3. ábra:** *Lítium K-héj spektruma*

A spektroszkópiai vizsgálatok közé sorolhatjuk be azt az új eredményt, amit Leszek Ryc röntgendiódáival kaptunk, a vele való együttműködésben. Megvizsgáltuk a röntgenemisszió térbeli eloszlását  $1.5 \cdot 10^{17} \text{ W/cm}^2$  fókuszált KrF lézer-intenzitás esetén. Míg a legtöbb anyag esetében az emisszió egy közel cosinusos eloszlást mutatott, Cu target esetén éles maximum volt megfigyelhető a targetre merőleges irányban[6]. A lézer  $45^\circ$ -os szögben esett be. Ezt az érdekes anomális viselkedést a közeli jövőben részletesebben meg kívánjuk vizsgálni.

#### **4. Relativisztikus önfokuszálás és a több MeV hőmérsékletű elektronnyaláb vizsgálata**

A garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézet lézerplazma csoportja már jelentős tapasztalatokat gyűjtött forró elektronok vizsgálatában. A rendelkezésre álló 150 fs impulzushosszú, a 790 nm-en működő Ti-zafír lézerükkel 3MeV hőmérsékletű elektronnyalábot hoztak létre  $10^{19} \text{ W/cm}^2$  fókuszált intenzitás esetén gázjet targeten. Kísérleteik során az elektronspektrumot egy mágneses spektrométerrel közvetlenül mérték. Mi azon kísérletekbe kapcsolódtunk be, amikor szilárdtest felületén (egy másik lézerrel) létrehozott előplazmában keltettek több MeV energiájú elektronnyalábot. Vizsgálatainknak két célja volt. Először is tisztázni kívántuk, hogy milyen szerepet játszik az önfokuszálás az elektrongyorsításban. Az ún. relativisztikus önfokuszálás akkor lép fel, ha a lézer térerőssége következtében a térben rezgő elektronok már relativisztikus sebességre tesznek szert. Ekkor tömegük (relativisztikusan) megnő, következésképpen a törésmutató is megnő a nagy

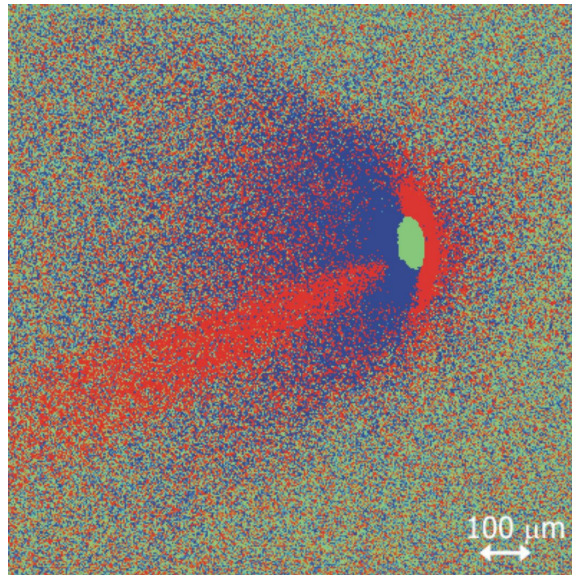
intenzitású helyeken, ami a nyaláb további fókuszálását, további intenzitásnövekedést okoz. A nagyobb intenzitás természetesen a nemlineáris kölcsönhatások növekedését, még nagyobb forró elektron-hőmérsékletet okoz. Az előplazmát több módszerrel vizsgáltuk. Egy szinkronizált 150 fs impulzushosszúságú, 395 nm hullámhosszú próbanyalábbal készítettünk interferometrikus képet a plazmáról egy CCD kamera segítségével, miközben a két impulzus közti késleltetés 1 és 2.5 ns között változott. A plazmáról oldalra kiszóródó  $2\omega$  sugárzást CCD kamerára leképezve vizsgáltuk. A plazma röntgensugárzását pedig egy Al ill. Be szűrővel ellátott lyukkamera (pinhole átmérő  $50\mu\text{m}$ ) képezte le a röntgen CCD kamerára[7].



**5. ábra:** Interferogram az előplazmáról. A próbanyaláb a targetfelületével párhuzamosan halad. Az inzert a plazmáról kiszóródó  $2\omega$  fényt mutatja. A lézer balról jobbra halad.

Az 5. ábra egy interferometrikus pillanatfelvételt mutat a 3 ns impulzushosszú lézerrel keltett előplazmáról 1.9 ns-mal az impulzus kezdete után, körülbelül egyidőben az ultrarövid impulzus érkezésével. Az elektronsűrűség  $8 \cdot 10^{19}$  és  $8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$  között változik, a plazmahossz mintegy  $110\mu\text{m}$ . Mind a kiszórt fényen, mind az interferogramon jól látszik a több, mint  $100\mu\text{m}$  hosszúságú önfókuszált filamentum. A fenti sűrűség tartományban a relativisztikus önfókuszálás küszöbértéke 1 TW körül van, alacsonyabb a használt ATLAS lézer teljesítményénél, így a megfigyelt önfókuszálás összhangban van az elvárásokkal.

A látható diagnosztika mellett általunk készített röntgen lyukkamera felvételek (6. ábra) azt a vékony filamentumot nem mutatják, ezzel szemben az ultrarövid impulzus fókuszált kúpja az előplazmaában intenzívebben sugárzik többszáz  $\mu\text{m}$  hosszúságban, amit az okoz, hogy a lézernyaláb intenzíven fűti az előplazma kisebb sűrűségű részeit. Azt, hogy egy korábbi japán kísérlettel szemben vizsgálatainkban nem láttunk a röntgentartományban is vékony filamentumot, az okozhatta, hogy kísérleteinkben a sűrűség kisebb volt, optikailag ritka, így a röntgen-filamentum nem látszik benne. Az alacsonyabb sűrűségű előplazmában viszont az önfókuszálás segítségével az elektrongyorsítás igen effektív volt, a vékony targetek hátoldalán kilépő elektronok hőmérsékletére 2MeV adódott, a gyors elektronok egész 10MeV-ig voltak megfigyelhetők[7].

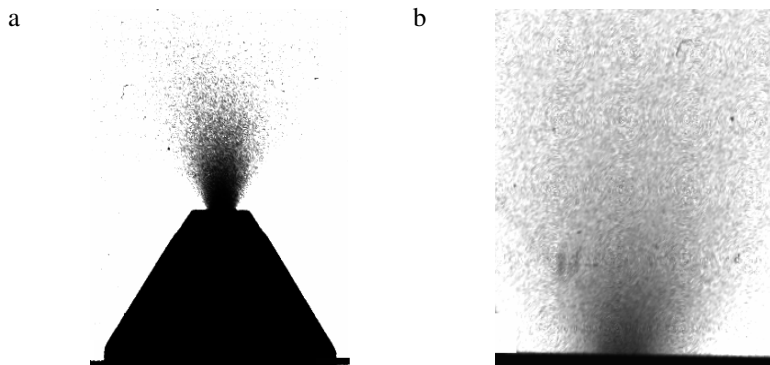


**6. ábra:** Röntgen lyukkamera-felvétel az előplazmában haladó ultrarövid impulzusról.

A röntgen lyukkamerát a target háta mögé helyezve megvizsgáltuk azt is, hogy a szilárd target belsejében haladva mennyire maradnak kollimáltak az elektronok. Ezeket a méréseket  $8\mu\text{m}$  targetvastagságig sikerült elvégezni, és kísérleteinkben megállapítottuk, hogy az elektronnyaláb divergenciája ezen hosszon  $12^\circ$ -nál kevesebb volt, azaz jól kollimáltan haladt. Ez jó hír, mivel nyitva tartja azt a lehetőséget, hogy az optikailag ritka plazmában keltett gyors elektronnyaláb eljuttatható a fúziós target nagysűrűségű részébe, és beindíthatja ott a DT reakciókat az úgynevezett gyors begyújtás módszerével.

## 5. Gázjet target vizsgálata

A szilárdtest targetek vizsgálata mellett az előzetes tervek szerint gáztargetet is létrehoztunk és karakterizáltunk[8]. A targeteket egyrészt röntgensugárzás keltésére, valamint nemesgázban való magas harmonikuseltésre kívánjuk alkalmazni a korábban tervezett elektron-spektroszkópia helyett. Kísérleteinkhez átalakítottunk egy kommerciális, Parker típusú impulzusszelepet, arra egy olyan csúcsot helyezve, amelynek  $0.65\text{ mm}$  lyukátmérője sűrűbb gáz kibocsájtását teszi lehetővé. A gázjetet röntgen árnyképfelvételekkel karakterizáltuk a varsói Institute of Optoelectronics, Military University of Technology diagnosztikai lehetőségeit kihasználva. A röntgenforrást egy másik Kr/He gázjetbe befókuszált lézerrel keltett plazma szolgáltatta. A forrás a vizsgálandó targethez képest pontszerűnek volt tekinthető. A  $0.75\text{ nm}$ -es sugárzást Be és Si szűrők választották ki, a detektor pedig egy röntgen-érzékeny CCD kamera volt.



**7. ábra:** Az átalakított (a) és az eredeti (b) gáztarget árnyképe

A 7. ábra illusztrálja a röntgen árnyképfelvételeket. Röntgön látható, hogy a kúppal átalakított gáztarget esetében a kiáramló gázfelhő egyfelől sötétebb, ami nagyobb sűrűségnek felel meg, másfelől pedig koncentráltabb. A felvételekből Abel-inverzióval határoztuk meg a tengely mentén hengeresen szimmetrikus sűrűség-eloszlást. A sűrűségértékek a háttérnyomás és az impulzusszelep nyitásától számított késleltetés függvényében néhányszor  $10^{18}$  és  $4 \cdot 10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  között volt változtatható[8]. Az alkalmazott feltétellel az atomsűrűség mintegy négyszeresére nőtt. A kísérletek megmutatták, hogy az átalakított target mintegy mm nagyságrendű közel homogén gázeloszlásnak felel meg, ami kiváló target lesz jövőbeli kísérleteinkhez.

## Referenciák

- [1] K. Gál, S. Varró, Opt. Commun. **198**, 419 (2001)
- [2] S. Varró, K. Gál and I.B. Földes, Laser Phys. Lett., **1**, 111-114 (2004)
- [3] I.B. Földes, K. Gál, G. Kocsis, E. Rácz, S. Szatmári, G. Veres, Proc. SPIE, 5228, 473-476, 2003 (Editors: Oleg N. Krokhin, Sergey Y. Gus'kov, Yury A. Merkul'ev)
- [4] I.B. Földes, G. Kocsis, E. Rácz, S. Szatmári, G. Veres, Laser and Particle Beams **21**, 517-521 (2003)
- [5] E. Rácz, I.B. Földes, G. Kocsis, G. Veres, K. Eidmann, S. Szatmári, Appl. Phys. B **82**, 13-18 (2006)
- [6] E. Rácz, I.B. Földes, L. Ryć, AIP Conference Proceedings **Vol. 812** (Editors: Marek J. Sadowski, Michel Dudeck, Hans-Jürgen Hartfuss, Ewa Pawelec), pp. 287-290. (2006)
- [7] M. Kaluza, I.B. Földes, E. Rácz, M.I.K. Santala, G.D. Tsakiris and K.-J. Witte, IEEE Transactions on Plasma Science, **33**, 480-481 (2005)
- [8] R. Rakowski, A. Bartnik, H. Fiedorowicz, R. Jarocki, J. Kostecki, J. Mikolajczyk, A. Szczurek, M. Szczurek, I.B. Földes, Zs. Tóth, Nucl. Inst. Methods in Physics Research A **551**, 139-144 (2005)