

RÁCZ ERVIN

NEMLINEÁRIS JELENSÉGEK VIZSGÁLATA
LÉZERPLAZMÁKBAN NAGY LÉZERINTENZITÁSOKON

Ph.D. értekezés tézisei

Témavezető: **Dr. Földes István**, az MTA doktora

Szegedi Tudományegyetem - Kísérleti Fizikai Tanszék
MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet

Budapest

2005

1. Bevezetés

„A plazma a negyedik halmazállapot” – egyre többször halljuk napjainkban. A plazmafizika területén az első vizsgálatok az alacsony nyomású ionizált gázok tulajdonságainak megismerésére irányultak, majd egyre többen kezdtek kutatni a kisülési plazmákat. 1923-ig kellett várni, míg elsőként LANGMUIR próbálta meghatározni a plazma fogalmát. Ő a plazmát ionizált gázként határozta meg, de a tudomány fejlődésével a definíció pontosabb lett. Ma plazmának nevezük az ionok és elektronok – vagyis töltött részecskék – alkotta olyan kvázi-neutrális gázt, amely kifelé jellemzően kollektív viselkedést mutat. Már az 1960-as években, a lézer megszületésével szinte egyidőben napvilágot látott az az ötlet miszerint, ha a lézerek fényében nagy intenzitás lenne elérhető, akkor a lézerek alkalmasak lennének plazma keltésére. Ma már tudjuk, hogy a lézerek rohamléptékű fejlődésével ez a jóslat valóra vált. Kialakult a plazmafizika új ága a lézerplazmák fizikája. Napjainkban már ott tartunk, hogy a plazmafizika és esetleg a lézerplazma-fizika lehet az a tudományterület, amelynek segítségével néhány évtized múlva megszülethet az emberiség jövőbeli várható energiagondjait megoldó, a civilizáció számára nagymennyiségű energiát biztosító energiaforrás, a fúziós erőmű.

Ma már a lézerek fókuszálásával rendkívül nagy intenzitásokat érnek el. (Előfordul a $10^{21} \frac{W}{cm^2}$ intenzitás is.) Amikor nagyintenzitású lézer nyalábja, valamely szilárdtest felületével lép kölcsönhatásba, akkor a szilárdtest felületén plazma, lézerplazma keletkezik. A lézerplazma-fizika egy olyan tudományterület, ahol a nemlineáris folyamatok fontos szerephez jutnak. Azok a nemlineáris folyamatok, amelyekre eddig fény derült, más tudományterületeken, más kutatások irányába is utat nyitottak.

A röviden leírtakból kiindulva *munkám célja volt különböző intenzitású szubpikuszekundumos lézerimpulzusokkal szilárdtestek felületén keltett lézerplazmákban előforduló néhány nemlineáris jelenség kísérleti úton történő tanulmányozása.*

Eredményeim nagy része a Szegedi Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén lévő Nagyintenzitású Lézerlaboratóriumban a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutató Intézet Plazmafizikai Főosztályával való együttműködésben, további része a németországbeli garchingi Max-Planck Kvantumoptikai Intézetben született.

2. Előzmények és célkitűzések

1. A lézerfény-anyag kölcsönhatás során az anyag nemlineáris viselkedésének egyik megnyilvánulása a magas rendű felharmonikusok keletkezése. A nagyintenzitású lézerek hatására keletkező plazma nemlineáris optikai tulajdonságokkal rendelkezik és ebben a közegben a rezgő elektronok mozgása szintén nemlineáris. A plazma egyes elektronjai az igen meredek vákuum-plazma határfelületen keresztül rezegnek. Ez a rezgés anharmonikus, mivel az elektron a rezgése során hol a plazmában hol a vákuumban van. Az anharmonikusan rezgő elektronrendszer által kibocsátott sugárzási térben megjelennek a gerjesztő hullám felharmonikusai is, más szóval az így rezgő elektronok által kibocsátott sugárzás a gerjesztő alaphérfrekvencia többszöröseivel rendelkező elektromágneses hullám-komponenseket is tartalmazhat.

Az 1970-es évek elején sikerült először szilárdtest lézerplazmában a gerjesztő lézerfény második felharmonikusát detektálni, majd egyre többen kezdtek el foglalkozni harmonikus-keltéssel és a harmonikusok tulajdonságainak (terjedés, polarizáció) vizsgálatával. Carman és munkatársai által 1981-ben, széndioxid-lézerrel végzett kísérleteiben már a gerjesztő impulzus huszadik felharmonikusát is detektálták. Megállapították, hogy a gerjesztő lézerek impulzushosszának rövidülése a szilárdtest felszínén keltett plazma méretének, skálahosszának csökkenésével is jár. A vákuum-plazma határa – a plazma profilja – ezzel együtt lépcsőszerűvé válik. Az 1990-es években újabb eredmények születtek: sikerült olyan lézerplazmákat létrehozni, amelyek skálahossza összemérhetővé vált a gerjesztő lézer hullámhosszával.

A felhasznált impulzusüzemű lézerek impulzushossza és intenzitása mértékének függvényében az elvégzett kísérletek két csoportra oszthatók és a két csoportba tartozó kísérletek során általában eltérő eredmények születtek. Abban az esetben, ha a gerjesztő lézer impulzusa rövid, azaz kb. 100 fs vagy ennél is rövidebb, az eredmények szerint csak a p-polarizált lézerimpulzus keltett harmonikusokat és a harmonikusok csak a tükörszerű reflexiós iránynak megfelelő irányban terjedtek. Kohlweyer és munkatársai fontos eredménye volt, hogy rövidebb hullámhosszú lézernyalábbal a harmonikus-keltés határfoka jobb lett, továbbá, hogy a jobb lézer intenzitás-kontraszt is nagyobb határfokú harmonikus-keltést eredményez. A kísérletek másik csoportjában pl. néhány száz fs impulzushossz és $10^{16} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ intenzitásnál kisebb intenzitás mellett Földes István és csoportja végzett kísérleteket a fentebb említett céllal. Eredményeik szerint a keltő 248 nm hullámhosszú sugárzás második és harmadik harmonikusa volt megfigyelhető p- és s-polarizált beeső lézerfény esetén is. A harmonikusok tükörszerű irányban terjedtek és megtartották a keltő lézer polarizációját. Norreys és munkatársai az Angliában lévő VULCAN nevű nagyintenzitású lézerrel keltettek felharmonikusokat. A 2.5 ps impulzushosszú, 1053 nm hullámhosszú és $10^{19} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ intenzitású nyalábbal gerjesztett felharmonikusok esetében azt tapasztalták, hogy a felharmonikusok teljes 2π térszögben szóródtak. A kísérleti tapasztalatok alapján az s- és p-polarizált harmonikusok tulajdonságai (intenzitás és szögeloszlás) között nem találtak különbséget. Ennek okát a plazma kritikus felületének egyenetlenségeiben keresték. Erős lézer-előimpulzus, 1 ps impulzushossz mellett és $10^{16} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ -nél nagyobb intenzitással Chambers és munkatársai is végeztek vizsgálatokat. Ők a keltő 248 nm hullámhosszú impulzus második, harmadik és negyedik felharmonikusát figyelték meg, de esetükben a harmonikusok diffúz terjedést mutattak, azaz szóródtak a minta előtti féltérben. Okként a plazma kritikus felületének fodrossá válását jelölték meg, de a fodrossá válás okát nem fogalmazták meg.

Fő célom volt tiszta, előimpulzus-mentes, nagy intenzitás-kontrasztú fókuszált lézerimpulzus segítségével felharmonikusok keltése szilárdtest minták felületén, majd a harmonikusok terjedési és polarizációs tulajdonságainak vizsgálata a gerjesztő lézerimpulzus intenzitásának és polarizációjának függvényében.

2. A lézer-plazma kölcsönhatás egy másik fontos folyamata a lézerfény plazmában való elnyelődése, vagyis az abszorpciós mechanizmus. 1990-ig viszonylag kevés számú kísérlet számolt be a nagyintenzitású szubpikuszekundumos lézerimpulzus plazmákon való abszorpciójának méréséről. Murnane és munkatársai 160 fs -os, 616 nm hullámhosszú lézerimpulzus reflexióját mérték a céltárgyakra való merőleges lézer beesés mellett, és úgy találták, hogy a reflexió kb. 75%-os volt. Milchberg és munkatársai méréseiben p-polarizált 400 fs impulzusidejű, 308 nm -

es lézerimpulzus esett alumínium minta felületére immár 45° -os beesési szög alatt és ők a keltett plazmán kb. 35%-os visszaverő-képességet mértek, tehát a plazmában bekövetkezett abszorpció növekedett a lézer beesési szögének emelésével. Az elméletek szerint az abszorpció függ a beesési szögtől és merőleges beesésnél nincs, vagy csak kevés abszorpció következik be. A $10^{15} \frac{W}{cm^2}$ intenzitás alatti tartományban az abszorpció főleg ütközéses. Fedosejevs és csoportja $250 fs$ -os KrF lézerimpulzus alumínium, arany és réz céltárgyakon keltett nagy sűrűségű plazmában való abszorpcióját vizsgálta a céltárgyakra való merőleges lézernyaláb-beesés mellett a $10^{12} - 10^{14} \frac{W}{cm^2}$ intenzitás-tartományban, továbbá egy másik mérésorozatukban a lézerfény polarizációja és beesési szöge függvényében vizsgálták meg a lézerimpulzusok abszorpcióját a gerjesztő lézer céltárgyra eső $10^{14} - 2.5 \cdot 10^{15} \frac{W}{cm^2}$ intenzitás-tartományán belül. Azt találták, hogy a gerjesztő lézerimpulzus intenzitásának növekedésével a plazma reflexió-képessége is növekedett. Az abszorpció a minták anyagai atomszámának növekedésével nőtt. Nagyobb intenzitásokon már egyre inkább a rezonancia-abszorpció dominál a plazmában. Később a József Attila Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékének femtoszekundumos KrF lézerrendszerével 45° -os céltárgyra való beesési szög mellett is végeztek kísérleteket a fentieknél nagyobb intenzitásokkal. Eredményük szerint az abszorpció a harmonikus-keltés során is releváns szerepet játszik.

Az inhomogén sűrűségeloszlású plazmában a fény annál a sűrűségnél verődik vissza, ahol az elektronok már megakadályozzák az elektromágneses sugárzás további terjedését. A plazma gyors tágulása miatt ez a visszaverő réteg is igen gyorsan mozog, ezért erről a rétegről visszavert fény frekvenciája a Doppler-effektusnak megfelelően megváltozik, így ezt figyelembe véve következtetni lehet a plazma tágulásának sebességére. Azonban a lézer intenzitása és az abszorpció mértéke meghatározza, hogy a plazma mennyire hevül fel, a plazma hőmérséklete pedig a tágulás mértékére lesz befolyással. Ezekre alapozva a József Attila Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén Juhász Zoltán végzett kísérleteket a plazmáról visszavert lézerfény Doppler-eltolódásának vizsgálatára. Eredményeiből a plazma tágulási sebességét és a plazma hőmérsékletét is meghatározta. Én a korábbi kísérletét pontosítva és fejlesztve próbáltam tanulmányozni a plazmabeli abszorpciós folyamatokat is.

Célomnak tekintetem, hogy megvizsgáljam polisztirol, alumínium és arany céltárgyakon $5 \cdot 10^{14} - 5 \cdot 10^{15} \frac{W}{cm^2}$ lézerintenzitással keltett plazmáról visszaverődött fény spektrumának Doppler-eltolódását, majd a kísérletek eredményei és egy általunk kidolgozott – a plazma ütközéses abszorpciójára és lokális termodinamikai egyensúlyára épülő – modell segítségével meghatározom a vizsgált anyagok plazmáinak abszorpciós együtthatóit a plazma elektronjai hőmérsékletének függvényében.

3. Nagy fókuszált lézerintenzitásokon ($10^{19} \frac{W}{cm^2}$) a lézertér erős rezgése miatt, a plazma elektronjai nagy energiára tesznek szert. Ezek az elektronok, – mivel már igen nagy, ún. relativisztikus lézerimpulzussal ($\mu = 10^{-9} \lambda [\mu m] \sqrt{I [\frac{W}{cm^2}]} > 1$, λ a lézer hullámhossza, μ az intenzitás-paraméter) való kölcsönhatásban vettek részt, – az energianövekedés miatt „nehézbecik lettek”. Esetükben relativisztikus tömegnövekedés következett be. A közeg törésmutatója a lézer tengelye mentén nő. E tényezők eredményeképpen a lézerfény optikai tengelyén (a nagy intenzitású helyen) egyfajta gyűjtőlencse-hatás alakul ki, amely önmagát fokozva erősödik. A jelenség okán ezen a helyen a lézernyaláb átmérője tovább csökken, intenzitása tovább nő. Ezt az effektust relativisztikus önfokuszálásnak nevezik.

Abban az esetben, amikor relativisztikus lézerimpulzust szilárdtest minták felületén keltett előplazmába fókuszálunk, akkor a relativisztikus önfókuszálás hatására a lézer tengelye körül plazmacsatornák, plazmafilamentumok jöhetnek létre. Ezeket a csatornákat sok csoport vizsgálta és vizsgálja, hiszen e plazmacsatornáknak központi szerep jut pl. a mikrorobantásos lézeres fúzió, gyors begyújtásos módozatában. Ezekben a stabil képződményekben a plazmabeli töltött részecskék a lézerfény hatására gyorsulhatnak a lézer beesésének irányában. Sok csoport tanulmányozza a plazmacsatornáknak kelthető gyors töltött részecskék mozgását. Emellett kiemelkedő jelentőségű feladat minél nagyobb mozgási energiájú töltött részecskéket keltetni e csatornák segítségével. Ma már nem ritka az ilyen módon keltett MeV-os elektronnyaláb sem. Nagyintenzitású lézerek használatával, azaz kísérletekkel párhuzamosan 1996 körül Pukhov és Meyer-ter-Vehn által fejlesztett PIC (Particle In Cell) kód segítségével sikerült szimulálni a plazmacsatornákat és keltésük körülményeit. A számítógépes szimulációk jelentős mértékben segítették a később induló kísérletek megtervezését majd elvégzését. A 1990-es évek végén Tanaka és munkatársai kísérleteiben a lézerfúzió gyors begyújtásos módszeréhez kötődően a nagyintenzitású lézernyaláb és a plazma kölcsönhatását tanulmányozta. A munkájuk során 1053nm -es, $0.5 - 1\text{ps}$ -os lézerimpulzus $10^{19} \frac{\text{W}}{\text{cm}^2}$ intenzitású nyalábját fókuszálták előplazmába, és 1MeV -os elektronokat figyeltek meg és vizsgálták a gyors elektronok transzportját is. A csatornák megfigyeléséhez detektorként röntgen lyukkamerát is használtak és ebben a hullámhossz-tartományban szép plazmacsatornákat detektáltak. Később Németországban, Garchingban a Max-Planck Kvantumoptikai Intézetben is elkezdődtek az ezirányú kísérletsorozatok, amibe én is bekapcsolódtam.

A gyors töltött részecskék keltése mellett nagyon fontos ezen részecskék ill. részecske-nyalábok szilárd anyagokban való terjedésének vizsgálata is. Fő okként ugyancsak a lézerfúzió gyors begyújtás módszere említhető, hisz ebben az esetben a kapszula belsejében terjedő gyors elektron nyaláb terjedési tulajdonságainak és energia-transzportjának ismerete meghatározó jelentőségű a fúzió szempontjából.

A fentiek által motiválva célomnak fogalmaztam meg a relativisztikus lézerimpulzus plazmát fűtő folyamatának tanulmányozását röntgen lyukkamerával. Pontosítva, egyik célo-m a fenti folyamatok során keletkezett plazmacsatornák és a csatorna-keltést kísérő röntgen emisszió megfigyelése, másik célo-m a szilárd anyagokban (fóliákban) terjedő gyors elektron nyaláb terjedési tulajdonságainak vizsgálata volt.

3. Vizsgálati módszerek

1. A szilárdtestek felületén keletkező harmonikusok vizsgálatához elsőként a minta felületén keltettem nagy lézerintenzitást. Ehhez a lézernyalábot parabolatükörrel fókuszáltam. A keltett harmonikusokat egy Rowland-szerű elrendezésben általam megépített vákuum-ultraibolya spektrométerrel tanulmányoztam. A spektrométer a plazmát 1:1 módon képezte le a spektrométer detektorára, amely egy hátulján foszforréteggel bevont dupla mikrocsatornás lapka (MCP) volt. A spektrométer bontóelemének egy holografikus, toroidális, reflexiós rácsot (550l/mm) használtam. A plazmáról a spektrométer segítségével minden alkalommal egylövéses spektrumokat rögzítettem, majd dolgoztam fel.

2. A szilárdtest felületén, közepes lézerintenzitással keltett lézerplazmáról visszaverődött lézerfény Doppler-eltolódásának vizsgálatához két SPEX-típusú monokromátort használtam. Az egyik monokromátorral a vákuumkamrába bejutó lézernyalábból egy kis energiájú részt kicsatolva lövésről-lövésre monitoroztam a gerjesztő lézer spektrumát. Ez volt az ún. referencia-mérés. Emellett a plazmáról való reflexió spektrumát egy másik monokromátor és számítógép segítségével rögzítettem. Ilyen módon a ténylegesen vizsgálandó spektrum elemzése, a referencia-spektrum segítségével könnyebbé vált. Egy a lokális termodinamikai egyensúlyra épülő modellt dolgoztunk ki, amelynek segítségével a plazmán visszaverődött lézerimpulzus Doppler-eltolódásának értékéből meghatározhatóvá vált a plazma abszorpciós együtthatója is a plazma elektronjai hőmérsékletének függvényében.
3. Szilárdtest fóliákon, fókuszált relativisztikus lézerimpulzus önfokuszálódása által előplazmában keltett plazmacsatornák vizsgálatát a mintafóliák előtti és mögötti feltérben röntgen lyukkamerával végeztem el. Ugyancsak röntgen lyukkamera segítségével tanulmányoztam, a nagyintenzitású lézerimpulzus által a plazmában keltett gyors elektronok szilárdtestekben való terjedését. A lyukkamera belépő lyukai (pinhole-jai) változtathatók, egyszerűen cserélhetőek voltak. A lyukkamera detektora egy röntgen hullámhossztartományra érzékeny, hűtött CCD kamera volt. A lyukkamerához szűrőként használandó fóliák vastagságait (alumínium, berillium) minden alkalommal a mérés körülményeihez terveztem meg. A plazma fűtési mechanizmusaira és a gyors elektronok anyagban való terjedésére a CCD kamera képeinek elemzése után következtethettem. A plazmáról a röntgen lyukkamerán kívül a látható hullámhossz-tartományban interferogramok is készültek. A röntgen lyukkamera felvételeit az interferogramokkal összehasonlítva fontos, lényeges megállapításokat tehettünk a plazma egyes paramétereit (pl. sűrűség) illetően.

4. Új tudományos eredmények

1. *Előimpulzus-mentes p- és s-polarizált lézerfény $1.5 \cdot 10^{17} \frac{W}{cm^2}$ intenzitása mellett 45° -os beesésnél, szilárdtest céltárgyak felületén a keltő 248nm-es impulzus második, harmadik és a 62nm-en megjelenő negyedik felharmonikusát detektáltam.*

Méréseimhez a szubpikoszekundumos KrF hibrid excimer-festéklézer rendszer nyalábját F/2-es ferde tengelyű parabolatükörrel $2.3\mu m \times 2\mu m$ átmérőjű foltba fókuszáltam. A fókusz elemzése során kimutattam, hogy a fókuszfolt főmaximumának félértékszélességén belül a teljes lézereenergia $36 \pm 1\%$ -a, míg az Airy-eloszlás teljes főmaximumába az összes energia kb. 77%-a esett. Ez utóbbi érték majdnem eléri az elméleti 86%-os értéket. Az eredményekből megállapítottam, hogy a lézerfény közel diffrakció-limitált volt. Vákuumban $2.2 \cdot 10^{17} \frac{W}{cm^2}$, céltárgyak felületén $1.5 \cdot 10^{17} \frac{W}{cm^2}$ intenzitást értem el. Megmutattam, hogy a KrF erősítő erősített spontán emisszióját fókuszálva, a fókusz síkban az intenzitás $10^7 \frac{W}{cm^2}$ körüli értéken tartható. Ez 10^{10} -es intenzitás-kontrasztot jelent, azaz tiszta, előplazma-mentes körülményeknek felel meg. Kísérleteim során igen erős második és harmadik felharmonikust detektáltam. A 62nm-en megjelenő negyedik harmonikus küszöbszerű viselkedést mutatott [P1,P2,P6].

2. *A p- és s-polarizált keltő lézerimpulzus intenzitását a $10^{16} \frac{W}{cm^2} - 1.5 \cdot 10^{17} \frac{W}{cm^2}$ tartományban változtatva a második és harmadik harmonikus szögeloszlásának vizsgálatával megmutattam, hogy a keltett harmonikusok diffúz módon szóródtak a minta előtti féltérben. Kísérleti úton mutattam ki azt, hogy maximális lézerintenzitás mellett, p- és s-polarizált lézerimpulzus szinte azonos hatásfokkal keltett második és harmadik harmonikusot, és ezek a harmonikusok nem tartották meg a keltő lézer polarizációját, hanem a polarizációk keveredése következett be.*

Csoportunk korábbi, p- és s-polarizált lézerrel, $5 \cdot 10^{15} \frac{W}{cm^2}$ intenzitással végzett kísérletei során a keltő 248nm hullámhosszúságú lézerimpulzus második és harmadik felharmonikusát detektálta. A keltett harmonikusok a tükörszerű visszaverődés irányában terjedtek és megtartották a keltő lézer polarizációját. Új eredményeim alapján kijelenthető, hogy ezek a tulajdonságok $10^{16} \frac{W}{cm^2}$ intenzitás-határ felett jelentős mértékben megváltoztak. Az egyes harmonikus-rendek már nem csak a tükörszerű visszaverődés irányában terjedtek, hanem azok diffúz szóródása volt megfigyelhető a céltárgyak előtti féltérben. A harmonikusok polarizációi pedig nem tartották meg a keltő lézerimpulzus p- vagy s-polarizációját, hanem összekeveredtek. A fent említett kísérleti eredmények oka a lézerplazma kritikus felületének modulációja lehet [P6].

3. *Kísérleteim eredményeinek segítségével rámutattam arra, hogy az előimpulzus-mentes excimer lézerrendszer $10^{16} \frac{W}{cm^2} - 1.5 \cdot 10^{17} \frac{W}{cm^2}$ intenzitású nyalábja által szilárdtest felületén keltett lézerplazma kritikus felülete nem maradt sík, hanem hullámossá, fodrossá vált.*

Mind a harmonikusok diffúz terjedése, mind a polarizációk keveredése arra utal, hogy a lézerplazma kritikus felülete ezen az intenzitáson nem sík, hanem hullámos. Mivel a fókuszált lézerimpulzus gyakorlatilag előimpulzus-mentes volt, ezért bebizonyosodott, hogy a plazma kritikus felületének hullámossá válása nem előplazmában történt, hanem egy a plazmában lejátszódó belső hatás következménye volt. Az egydimenziós PIC és fs-hidroddal végzett szimulációk ezt a megfigyelést alátámasztották és megmutatták, hogy ezen nagy intenzitás mellett a plazma kritikus felületén a plazma nyomása és a lézer fénynyomása nagyságrendileg azonos értékű. A fénynyomás és a vele ellentétes irányban táguló plazmafront nyomásának kölcsönhatása, instabil egyensúlya következtében a lézerimpulzus ($\tau > 100fs$) időtartama alatt Rayleigh-Taylor instabilitás fejlődhet ki a plazma kritikus felületén vagy annak közelében a plazma kritikus felületének fodrozódását okozva [P6].

4. *Kísérletileg és egy egyszerű lokális termodinamikai egyensúlyra épülő modellre támaszkodva kimutattam, hogy ultraibolya lézerimpulzus szilárdtest lézerplazmákon való Doppler-eltolódása segítségével meghatározható a mintákra vonatkozó plazma abszorpciók együtthatója a plazmabeli elektronhőmérséklet függvényében. A Doppler-eltolódások modellből számított értékeinek elemzésével igazoltam, hogy ebben az intenzitás-tartományban az abszorpció főleg ütközéses.*

Kísérletileg igazoltam, hogy a gerjesztő lézerimpulzus intenzitásának növekedésével a plazmáról visszavert sugárzás Doppler-eltolódása is növekszik. A Doppler-eltolódások számított és mért értékeit összehasonlítva megmutattam, hogy polisztírol céltárgy esetén a plazma lokális termodinamikai egyensúlyára épülő modellből számított Doppler-eltolódások felülbecsülték, míg arany esetén alulbecsülték a mért értékeket. Az eredmények alátámasztották azt a korábbi eredményt, mely szerint néhányszor $10^{15} \frac{W}{cm^2}$ lézerintenzitásokig az abszorpció főleg ütközéses [P3].

5. *Kísérleti úton, röntgen hullámhossz-tartományra érzékeny lyukkamera segítségével megmutattam, hogy a $10^{19} \frac{W}{cm^2}$ fókuszált intenzitású titán-zafír lézerimpulzus relativisztikus önfokuszálódását igen erős röntgen emisszió kíséri. Relativisztikus önfokuszálás következtében létrejött plazmacsatornákat interferogram felvételeken figyeltünk meg. Kísérletileg igazoltam, hogy ezekben a csatornában gyorsuló MeV-os, nagyenergiájú elektronok a minta belsejében jól kollimáltan terjednek.*

Kísérleti úton vizsgáltam a relativisztikusan nagy intenzitású lézerimpulzus fűtési és ionizációs hatását szilárdtestek felületén keltett plazmákban, Nd:üveg lézer által keltett előplazmában és előplazma-mentes közegben a minta elő- és hátoldalán is. A látható hullámhossz-tartományban, a lyukkamera felvételeivel párhuzamosan készített interferogram képek szép plazmacsatornákat, filamentumokat mutattak, amelyek a lézerfény relativisztikus önfokuszálódásának következményei. A vizsgálatok szerint a nagyintenzitású lézerfény anyaggal való kölcsönhatását igen erős, a keltő lézer beesési irányának megfelelő röntgen emisszió kíséri. A lyukkamerával megfigyelt erős emisszió egyenes következménye a plazma lézer általi fűtési és ionizációs hatásának. Kísérleteim során a röntgen hullámhossz-tartományban filamentum nem volt megfigyelhető, ellentétben Tanaka és munkatársai eredményével. Az eredményekbeli különbség valószínűsíthető oka az általunk elért kisebb plazmasűrűség lehetett. A minta elő- majd hátoldalán felállított röntgen lyukkamera segítségével meghatároztam a mintában terjedő elektronnyaláb által hagyott foltok méretét a céltárgyfólia elő- és hátoldalán. Kimutattam, hogy a szilárdtest minták belsejében haladó nagyenergiájú gyors elektron nyaláb az anyagban közel kollimáltan terjed [P4].

5. Publikációk

Referált saját publikációk

- [P1] I.B. Földes, G. Kocsis, **E. Rácz**, S. Szatmári, G. Veres:
Generation of High Harmonics in Laser Plasmas,
Laser and Particle Beams, **21**, pp. 517-521, October 2003.
- [P2] I.B. Földes, K. Gál, G. Kocsis, **E. Rácz**, S. Szatmári, G. Veres:
High-harmonics from a UV Laser Plasma,
Proceedings of SPIE, **5228**, pp. 473-479, December, 2003.
Editor(s): Oleg N. Krokhin, Sergey Y.Gus'kov, Yury A. Merkul'ev)

- [P3] G. Veres, G. Kocsis, **E. Rácz**, S. Szatmári:
Doppler shift of femtosecond laser pulses from solid density plasmas,
 Applied Physics B, **78**, pp. 635-638, 2004.
- [P4] M. Kaluza, I.B. Földes, **E. Rácz**, M.I.K. Santala, G.D. Tsakiris and K.-J. Witte:
Relativistic self-focusing of fs-laser pulses and their heating effect on the preformed plasma,
 IEEE Transactions on Plasma Science, Vol. **33**, No. **2**, pp. 480-481., April 2005.
- [P5] I.B. Földes, J. Bohus, K. Gál, B. Hopp, G. Kocsis, N.R. Kresz, **E. Rácz**, T. Suta, T. Smausz, S. Szatmári, Zs. Tóth, G. Veres:
Fast electrons for the fast ignitor scheme of inertial confinement fusion,
 IAEA-TECDOC-1460, Elements of Power Plant Design for Inertial Fusion Energy, pp. 97-105, June 2005.
- [P6] **E. Rácz**, I.B. Földes, G. Kocsis, G. Veres, K. Eidmann, and S. Szatmári:
On the effect of surface rippling on the generation of harmonics in laser plasmas,
 megjelenés alatt az Applied Physics B. folyóiratnál, (kézirát száma: 2039 B), 2005.

Konferencia-kiadványokban megjelent publikációk

1. I.B. Földes, J.S. Bakos, K.Gál, G. Kocsis, **E. Rácz**, S. Szatmári, S. Varró and G. Veres:
On Polarization Properties of Harmonic Generated in Laser Plasmas on Solid Surfaces,
 15th Europhysics Conference on Atomic and Molecular Physics of Ionized Gases, Abstracts (2000) **Vol. 24F**, pp. 380-381, (Eds.: Z. Donkó, L. Jenik, J. Szigeti), Miskolc-Lillafüred, Hungary, 26-30 August 2000.
2. Veres Gábor, Bakos József, Földes István, Gál Kinga, **Rácz Ervin**, Szatmári Sándor, Varró Sándor:
Szilárdtest lézerplazmában keltett felharmonikusok polarizációs tulajdonságai,
 IV. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, Kvantum-elektronika 2000., pp. P-20, Budapest, 2000.11.03.
3. **Rácz Ervin**, Földes István, Kocsis Gábor, Veres Gábor, Szatmári Sándor:
Felharmonikusok keltése szilárdtest lézerplazmákban nagy lézerintenzitásokon,
 V. Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások eredményeiről, Kvantum-elektronika 2003., ISBN 963 372 6298, pp. P17., Budapest, 2003.10.21.
4. **E. Rácz**, K. Eidmann, I.B. Földes, G. Kocsis, S. Szatmári, G. Veres:
Polarization- and Propagation Properties of High Harmonics for $10^{17} \frac{W}{cm^2}$ Intensities,
 31st EPS Conference on Plasma Physics, London, 28th June-2nd July 2004., ECA **Vol. 28G**, P-5.008, 2004.

5. **E. Rácz**, I.B. Földes, and S. Szatmári:
Investigation of plasma critical surface rippling by harmonics generation in laser plasmas,
International Conference PLASMA-2005 on Research and Applications of Plasmas, Opole, Poland, September 6-9, 2005. (AIP kiadványban megjelenés alatt)
6. **E. Rácz**, I.B. Földes, L. Ryč:
X-ray radiation measurements with photodiodes in plasmas generated by $10^{17} \frac{W}{cm^2}$ intensity KrF excimer laser pulses,
International Conference PLASMA-2005 on Research and Applications of Plasmas, Opole, Poland, September 6-9, 2005. (AIP kiadványban megjelenés alatt)

Konferencián elhangzott szóbeli előadások és egyéb konferenciaanyagok

1. **Ervin Rácz**:
Investigation of generation of high harmonics in laser plasmas at $10^{17} \frac{W}{cm^2}$ intensities,
2nd Hungarian Plasma Physics Workshop, KFKI RMKI, 22-24 April 2004. (előadás)
2. Földes István, **Rácz Ervin**:
Harmonikuseltés és lézerplazma spektroszkópia,
Lézertea 2004, MTA KFKI RMKI - MFA, Budapest, 2004. november 19. (előadás)
3. M. Kaluza, H. Habara, G.D. Tsakiris, K. Eidmann, K.J. Witte, I. Földes, **E. Rácz**:
Relativistic Electron Transport in Preformed Overdense Plasma,
28th EPS Conference on Controlled Fusion and Plasma Physics, Madeira, 18 - 22 June 2001.
4. K. Witte, U. Andiel, F. Brandl, K. Eidmann, E. Fill, I. Földes, H. Habara, D. Habs, M. Hegelich, R. Mancini, J. Meyer-ter-Vehn, M. Kaluza, S.Karsch, G. Pretzler, **E. Rácz**, T. Schlegel, G. Tsakiris:
Isochoric Heating of Matter, Relativistic Electron Transport in Preformed Overdense Plasma, and Characterization of Electrons Generated at Intensely Irradiated Surfaces,
Second International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA 2001), **IFSA0946**: Kyoto Japan, September 9-14, 2001.
5. G. Veres, G. Kocsis, **E. Rácz**, S. Szatmári:
Doppler shift of femtosecond laser pulses from solid density plasmas,
Ultrashort High-energy radiation and Matter, Conference, Varenna, Italy, October 7-10, 2003, (poszter)
6. I.B. Földes and **E. Rácz**:
Harmonics generation and critical surface rippling in laser plasmas,
Third International Conference on Superstrong Fields in Plasmas 19 - 24 September 2005, Villa Monastero, Varenna (Lc), Italy (poszter)