

felületén való termikus fluktuációkon keresztül történő megjelenése) dominál-e a dendrit növekedése során. A céltáblamintázat esetén a válasz egyértelmű: itt az egyes szilárd fázisok alternáló, fázisonként nem-összefüggő, kúpos tartományokból épülnek fel, ami csak a dendritcsúcson csíráképződéssel alternálva megjelenő fázisok felületre merőleges növekedésével jöhet létre. Minthogy a csíráképződéshez általában nagyobb termikus hajtóerő szükséges, ez a mechanizmus csak nagyobb túlhűtések esetén várható. Helikális szerkezeteknél a helyzet már nem ilyen egyértelmű: a mintázat sokkal bonyolultabb, emiatt a szerkezet összefüggőségének kérdése nehezebben dönthető el. Ahhoz, hogy ezt megválaszolhassuk, a tengelyre merőleges vékony szeletekre osztottuk fel a „mintát”, hogy jobban láthatóvá váljon az egyes fázisok térbeli eloszlása. Az egyágú spirális szerkezet esetén a szilárd fázisok egyenként egyszeresen összefüggőek. Úgy tűnik tehát, hogy ebben az esetben a dendrit növekedésében a kristálycsíra-képződésnek nincs szerepe. Több spirálkar esetén az eutektikus növekedés a csíráképződés és a folyamatos növekedés egy sajátos kombinációja, ami előzetes vizsgálataink szerint mindkét szilárd fázis esetén többszörösen összefüggő tartományra vezethet. A fluktuációk további hatásának tekinthető, hogy különösen nagyobb számú spirális ág esetén a dendrit csúcán gyakran támadnak zavarok, amelyek a dendrit palástján levonuló pont- és vonalhibákra vezetnek az eutektikus mintázatban.

## Összefoglalás

Sikeresen modelleztük a három komponensű eutektikus olvadékból kialakuló kétfázisú spirális dendritek képződését. Megmutattuk, hogy a kétfázisú dendrit

alakja hasonló az egyfázisú dendritekéhez. Megfigyeléseink szerint azonos körülmények között azonos dendrit alak, de sztochasztikus előzmények miatt többféle eutektikus mintázat jöhet létre: a céltáblaszerű, illetve egyszeres vagy többszörös spirális motívumok. Az eltérő mintázatok feltehetően egymáshoz közel eső szabadenergiájú metastabil állapotoknak tekinthetők, amelyek közül a hőmérsékleti fluktuációk választják ki a megvalósuló mintázatot. A felületi szabadenergia növelése, illetve a kinetikus anizotropia csökkentése növeli a dendrit csúcs sugarát, amivel növekszik a dendrit felületén megjelenő spirálkarok várható száma.

## Köszönetnyilvánítás

A fenti kutatások az „ENSEMBLE” (NMP4-SL-2008-213669) és az „EXOMET” (NMP-LA-2012-280421) EU FP7 projektek, valamint az ESA társ-finanszírozásával készültek. Köszönjük Rácz Zoltánnak a hasznos konzultációkat és észrevételeket.

## Irodalom

1. F. Siegert, C. J. Weijer: Spiral and concentric waves organize multicellular Dictyostelium mounds. *Curr. Biol.* 5(1995) 937.
2. S. Thomas, I. Lagzi, F. Molnár, Z. Rácz: Probability of the emergence of helical precipitation patterns in the wake of reaction-diffusion fronts. *Phys. Rev. Lett.* 110(2013) 078303.
3. S. Akamatsu, M. Perrut, S. Bottin-Rousseau, G. Faivre: Spiral Two-Phase Dendrites. *Phys. Rev. Lett.* 104(2010) 056101.
4. J. B. Pendry: A Chiral Route to Negative Refraction. *Science* 306(2004) 1353.
5. A. Parisi, M. Plapp: Defects and multistability in eutectic solidification patterns. *Europhysics Letters* 90(2010) 26010.
6. W. Kurz, D. J. Fisher: *Fundamentals of Solidification*. Trans Tech Publications, 1986
7. L. Gránásy, T. Pusztai, T. Börzsöny: A polikristályos megszilárdulás térelméleti modellezése. *Fizikai Szemle* 55(2005) 203.
8. T. Pusztai, G. Bortel, G. Tóth, L. Gránásy: Komplex kristálymorfológiák modellezése három dimenzióban. *Fizikai Szemle* 56(2006) 412.
9. T. Pusztai, L. Rátkai, A. Szállás, L. Gránásy: Spiraling eutectic dendrites. *Phys. Rev. E* 87(2013) 032401.

# MAGAS HARMONIKUSOK ÉS ATTOSZEKUNDUMOS IMPULZUSOK

Földes B István  
MTA Wigner FK, RMI

Az elmúlt években több cikk is megjelent az ultrarövid, attoszekundumos időtartamú fényimpulzusokról avatott szerzők, Krausz Ferenc [1], Farkas Győző [2] és Varjú Katalin [3] tollából. Az elmúlt néhány év hazai eseményei, a Magyarországon épülő ELI-ALPS lézer, és az ehhez kapcsolódóan az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontban megnyílt ELI-laboratórium új eredményei indokolják, hogy mind az új eredmények, mind pedig az épülő berendezés céljai a magyar fizikus közélet számára ismertté váljanak. Ezért megkísérlem az új fejleményeket hangsúlyozni oly módon, hogy az említett cikkek részleteit ne ismétellem, de egyúttal az írás az azokat nem olvasók számára is érthető legyen.

Miért is akarunk egyre rövidebb fényimpulzusokat létrehozni? A legegyszerűbb példa erre a fényképezés. A hagyományos fényképezőgép vakuja 1/30 másodpercig villan fel, ez alatt az idő alatt kimerévített, átlagolt képet kapunk az illető tárgyról. Minél rövidebb villanást használunk, annál gyorsabb folyamatokról tudunk nem elkent pillanatfelvételt vagy filmet készíteni. Hasonlóképpen: minél rövidebb impulzusokat használunk, annál gyorsabb folyamatokba tudunk beavatkozni, annál gyorsabb változásokat tudunk létrehozni. A 70-es, 80-as években a pikoszekundumos lézerekkel a szilárdtest rácsának rezgései voltak vizsgálhatók, és a 80-as évek közepe után elterjedt femtoszekundumos ( $10^{-15}$  s) lézerekkel már

kémiai folyamatok váltak vizsgálhatóvá, példa rá *Zewail* femtokémiáért odaítélt Nobel-díja. A látható tartományban működő lézerek impulzushosszát azonban nem lehet jelentősen tovább rövidíteni, a jelenlegi 5 fs, illetve annál rövidebb impulzusok már a fény rezgésének csupán másfél periódusát tartalmazzák, a sáv szélesség ekkor pedig már többszáz nanométer, fényforrásunk egyre kevésbé lesz koherens. Ha a femtoszekundumnál rövidebb, az attoszekundum ( $10^{-18}$  s) tartományban működő koherens fényforrást akarunk létrehozni, akkor az ultraibolya, vákuum-ultraibolya vagy a röntgen-tartományban kell azt véghezvinni. Röntgenlézereket igen nehéz létrehozni, nagyon nagy energiabefektetéssel igen kis lézerteljesítményt kaphatunk, ráadásul eléggé gyenge spektrális, illetve koherenciatulajdonságokkal. A lézerimpulzusok koncentrálásával viszont nemlineáris folyamatokban a lézerefény frekvenciájának magas rendű felharmonikusait kaphatjuk meg, amit a továbbiakban magas harmonikusoknak nevezek.

Magas harmonikusok kelthetők atomokban oly módon, hogy a nagyintenzitású lézerefény hatására az elektronok kiszabadulnak, majd újra befogódnak [3], vagy szilárdtesteken keltett plazmákban az ott létrejövő meredek plazmagradiensen. Mindkét esetben a harmonikusok fázisszinkronizált impulzussorozatot alkotnak, ami azt jelenti, hogy attoszekundumos időtartamú impulzusok sorozata keletkezik [2]. Az impulzussorozat periodicitása gázokban többnyire a lézerimpulzus félperiódusa, míg plazmagradiens esetén a teljes periódusa. Az alábbiakban felvázolom a főbb harmonikusok keletkezésmechanizmusokat. Ezek alapján – a teljesség igénye nélkül – bemutatok az elmúlt két évtizedben főképp a Wigner FK, illetve korábban a KFKI RMKI-hoz kapcsolódó néhány eredményt, különös tekintettel az új Wigner-ELI laboratóriumban létrehozott harmonikusokra. Végezetül ismertetek néhány tervezett paramétert, illetve majdani alkalmazást a hazánkban épülő ELI-ALPS európai nagyberendezéshez kapcsolódva.

## Harmonikusok keletkezése gázokban

Az intenzív lézerefény kölcsönhatását a gázokban szabadon mozgó atomok külső, lazán kötött elektronjaival legegyszerűsebben az úgynevezett háromlépcsős modell [3, 4] írja le. Ha a lézersugárzás elektromágneses terének erőssége összemérhetővé válik az atomi potenciállal, akkor az elektromágneses tér hatása nemperturbatívává válik. Ekkor a lézerefény hatása az atom terére már nem tekinthető kis zavarnak, az elektronok nemcsak az atomi térrel, hanem a lézer

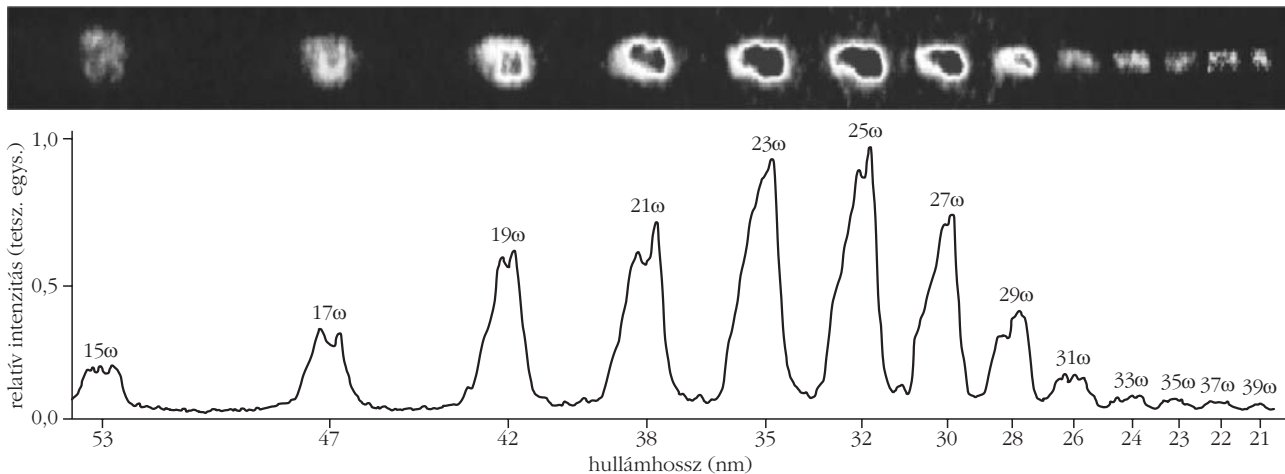


1. ábra. A 4 mJ / 35 fs Ti-zafír lézerezősítő.

terével is erősen kölcsönhatnak, a fény hatása nem vehető figyelembe kis korrekcióként. Ez infravörös lézerek ( $0,8\text{--}1\ \mu\text{m}$  hullámhossz) esetén mintegy  $10^{15}\ \text{W}/\text{cm}^2$  elérésekor következik be, ami ultrarövid, pikoszekundumnál ( $10^{-12}$  s) is rövidebb lézerimpulzusok esetében könnyen teljesíthető. Ez a nagy térerősség a lézerefény változó elektromágneses térében minden félperiódusban bekövetkezik, azaz elektronok szabadulhatnak ki minden félperiódusban. Ahogy az elektromos térerősség a ciklus maximuma után csökkenni kezd, majd ellenkező irányba fordul, a térben energiát felvevő elektron rezgőmozgásának iránya is megváltozik, és sok esetben visszatérhet a szülő ionhoz. Amennyiben a visszatérő elektron rekombinálódik, az elektromágneses térben felvett energiát sugárzás formájában, mégpedig a lézerefény magas felharmonikusaiként bocsátja ki. A jelenség nem érzékeny a térerősség irányára, így minden ionizáció-gyorsulás-rekombináció a lézerefény félperiódusával megismétlődik. Ez a félciklusos periodicitás a Fourier-transzformáció tulajdonságainak következtében azzal ekvivalens, hogy a harmonikusok egymástól a lézer frekvenciájának kétszeresével vannak elválasztva. Így a lézer frekvenciájának páratlan többszöröse jelennek meg a frekvenciatérben, amit  $1\omega$ ,  $3\omega$ ,  $5\omega$  ... stb. jelölhetünk.

Mivel ez egy koherens folyamat, és a rekombináció a fényimpulzus periódusának tört része alatt megy végbe, a magas harmonikusok egy olyan impulzussorozatot alkotnak, amelynek egyes impulzusai a femtoszekundumnál is rövidebb élettartamúak, azaz attoszekundumos impulzusok sorozata keletkezik [2, 3, 5]. Azt, hogy miképpen lehet az attoszekundumos impulzussorozatból egyetlen elkülönített, izolált impulzust előállítani, a *Fizikai Szemle*ben a korábbi cikkek részletesen leírták [2, 3], és az alkalmazásokat is tárgyalták [1].

Jelen cikkben a nemesgázokban keltett magas harmonikusok hazai kísérleti demonstrációját mutatom be. Bár a téma már több mint két évtizedre tekint vissza, és a legrövidebb izolált attoszekundumos impulzusok hossza 100 attoszekundum alatt van (a rekordot jelenleg egy floridai csoport tartja 67 attoszekundummal [6]),



2. ábra. Harmonikusok spektruma a 39. rendig.

Magyarországon tudomásunk szerint először 2012-ben sikerült előállítani attoszekundumos impulzussorozatot. Az ELI projektet támogató hELIOS program keretében az MTA Wigner FK-ban sikerült egy új lézertudományot létrehozni, és azt egy titán-zafír lézer vásárlásával ütőképessé tenni. A lézer 35 fs impulzushosszú, 4 mJ energiájú lézerimpulzusokat bocsát ki 1 kHz ismétlődési frekvenciával (1. ábra). Az optikai elemek roncsolódásának elkerüléséhez a lézer tiszta laboratóriumban működik, némi túlnyomás mellett (ami a porrészecskéket mintegy kifújja a lézertől).

A lézernyalábot vékony lencsével vákuumkamrába fókuszáltuk, amelyben egy impulzusszelepet helyeztünk el. Az impulzusszelep egy 0,8 mm-es lyukon keresztül a háttérgáz nyomásának megfelelően ~1 ms időtartamon keresztül gázt ereszt be, amelyben a nyomás és a késleltetés függvényében az atomi sűrűség  $10^{18}$ - $10^{19}$   $\text{cm}^{-3}$  körül van. Ebbe a gázba fókuszáltuk a lézerimpulzust, és az ott keltett sugárzást egy vákuum-ultraibolya spektrométerrel vizsgáltuk. A spektrométer egy holografikus, toroidális alakú rácson alapul, ami a forrást (jelen esetben a gázjet) a detektorra képezi le, amely egy úgynevezett microchannel plate (MCP) detektor volt. Az MCP-detektor valójában sokmillió, mintegy 10  $\mu\text{m}$  átmérőjű fotoelektron-sokszorozó, amelynek az anódjára érkező elektronokat 5 kV nagyfeszültséggel húzzuk ki, és így azok a mögötte elhelyezett foszforernyőn fényt keltenek. Így az MCP az extrém ultraibolya sugárzást látható fénné alakítja át, és a spektrum egy normál CCD-kamerával megkapható. A lézer minden lövése külön-külön detektálható.

A 2. ábrán látható egy tipikus magas harmonikus spektrum. A felső ábrán a kapott spektrum szürkeárnyalatú ábrázolása látható, a világos tartományokban megjelenő sötétebb foltok jelzik az intenzitásmaximumot. Az alsó ábra pedig annak egy metszetét. Megjegyezhető, hogy a legmagasabb, a 39. harmonikus környékén már a rács reflexióképessége is csökken, a 20 nm-nél rövidebb hullámhosszú sugárzás vizsgálatához egy másik rácsot tervezünk majd használni. Ez a megfigyelt harmonikus-spektrum közvetett bizonyítékát adja az attoszekundumos impulzussorozat létrejöttének, amelyek impulzushosszábanak direkt megméri-

ése korrelációs technikával lehetséges, vagy önmagával, vagy pedig az infravörös lézerimpulzussal [1–3].

Közvetlen terveink azonban nem az impulzushossz mérése és az izolált attoszekundumos impulzus létrehozása, hanem a harmonikusokba történő konverziós hatásfok növelése. Erre a gáztargetek akkor nyújtanak lehetőségek, ha például az itt használt argon-gáz helyett xenont használunk, amely a gyors táduláskor klasztereket alkot. A klaszterek nagyobb mérete miatt a kiszabaduló elektronok rekombinációjának valószínűsége megnő, így a konverziós hatásfok növelhető. Mivel a harmonikusok jól reprodukálhatóak, ezért magukat a harmonikusokat is alkalmazni kívánjuk aktív spektroszkópia céljára a vákuum-ultraibolya tartományban.

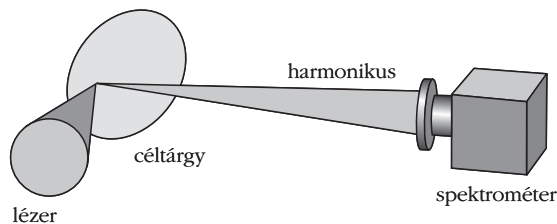
A gázokban keltett harmonikusok rendjét, azaz a fotonenergiát annak ellenére nem lehet a végtelenségig növelni, hogy már több száz elektronvoltot is elértek, mert az intenzitást egyre növelve az elektronok egyszerűen nem térnek vissza az anyaatomhoz, a közege ionizálódik. Következésképpen az elérhető legrövidebb impulzusok hossza sem csökkenthető korlátlanul. Más lehetőséget, más közeget is kell tehát keresni magas harmonikusok és attoszekundumos impulzusok előállítására. Ilyen közege a plazma.

## Harmonikusok plazmagradiensen

A szilárdtest céltárgyon (target) való harmonikuskelést a 3. ábra illusztrálja.

Ha ultrarövid, pikoszekundumnál ( $10^{-12}$  s) is rövidebb lézerimpulzusokat fókuszálunk szilárdtestek felületére, plazma keletkezik. Az impulzus ideje alatt a plazmának nincs ideje jelentősen kitérni, a plazma-

3. ábra. Harmonikuskelés plazmagradiensen.



gradiens tipikus skálahossza a lézer hullámhosszának tört része marad. Egyszerű megfontolással is szemléltethető, hogyan történhet a harmonikusok keltés. Ha a lézerfény elektromos térerősségének van a felületre merőleges komponense és a térerősség elég nagy, akkor az elektronok rezgési amplitúdója elég nagy lesz ahhoz, hogy ebben a változó elektromos térben rezegve az elektronok a rezgési periódus egy részét a plazmában, egy részét azon kívül, a vákuumban töltik. Ez a rezgés így anharmonikus lesz, ami a lézerfény magas felharmonikusainak lesz a forrása. A pontosabb megfogalmazás a harmonikusok keltését plazmarezgések, azaz plazmonok keltésével írja le. Ez az úgynevezett koherens ébredő tér modell, az angol szakszövegben „coherent wake field”, azaz CWE modell, amelyre szintén létezik egy, a semleges atomokon keltett harmonikusok modelljéhez hasonló 3-lépéses leírás. Minden periódusban, amikor az elektromos térerősség-komponens a felületről kifelé mutat, elektronok lépnek ki a felületről alagúteffekttussal vagy téremisszióval (hasonlóan az atomi esethez). A lézerfény elektromágneses terének változásakor, azaz amikor ellenkező irányúvá válik a térerősség, az elektronok – miután energiát vettek fel a lézertérből – visszatérhetnek a szilárdtestbe. Miközben a szilárdtest, illetve a plazma belsejében rekombinálódnak, ott plazmarezgéseket, plazmonokat kelhetnek. A plazmonok ezután az úgynevezett lineáris móduskonverzióval (ez a rezonanciaabszorpció inverz folyamata) fotonná konvertálódnak. Mivel a plazmarezgések frekvenciáját kizárólag a sűrűség határozza meg ( $\omega_p^2 = 4\pi n_e^2/m_e$ , ahol  $n_e$  az elektronsűrűség,  $m_e$  az elektrontömeg), a maximálisan elérhető fotonfrekvencia a szilárdtestbeli elektronsűrűségnek felel meg. Mivel a lézertérből egész fotonokat abszorbeálnak az elektronok, a plazmonok, majd a keltett fotonok is a lézerfény magas harmonikusai lesznek. A folyamat a változó elektromágneses tér egész periódusaiban ismétlődik, így a gázharmonikusokkal ellentétben nemcsak páratlan, hanem páros felharmonikusok is keletkeznek.

A legtöbb nemlineáris fény-elektron kölcsönhatási jelenséghez hasonlóan (lásd *Függelék*) a harmonikusok keltés is az intenzitás és a hullámhossz négyzetének szorzatával skálázódik, következésképpen a hosszú hullámhosszú lézerek előnyösek, ha magas rendű harmonikusokat kívánunk előállítani. A 90-es évek közepe óta számos kísérletet végeztek az infravörös titán-zafír és neodímium alapú lézerekkel. Magyarországon alternatív módon ultraibolya lézerrel, mégpedig a Szegedi Tudományegyetem HILL laboratóriumának ultrarövid, 600 fs impulzushosszú kripton-fluorid lézerével keltettünk harmonikusokat [7] a 90-es évek közepe óta. Az azóta eltelt időben harmonikusok keltését többek között a plazmagradiens változtatásával sikerült optimalizálni, és azt a plazmafodrozódás kísérleti megfigyelésére is alkalmaztuk. A rövid hullámhosszú KrF lézerrel előállítható harmonikusok rendje viszonylag alacsony, de a kiinduló hullámhossz rövidsége miatt a konverzió viszonylag magas lehet, és a megfigyelt 4. harmonikus is már az extrém ultraibolya tartományban van a 62 nm hullámhosszon.

A garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetrel együttműködve részt vehettünk olyan kísérletben, amelyben az ottani kevés ciklusú, 8 fs impulzushosszú titán-zafír lézerrel keltettünk magas harmonikusokat. Megmutattuk, hogy a harmonikusok spektruma erősen függ a keltő impulzus vivőfrekvenciájának és burkolójának fázisától. Megmutattuk annak lehetőségét is, hogy miként lehetne az impulzus polarizációjának modulálásával izolált attoszekundumos impulzust előállítani szilárdtestplazmán a CWE mechanizmussal keltett harmonikusok esetében [8].

A CWE mechanizmussal előállítható harmonikusok hullámhosszának határt szabó elektronsűrűség a legközelebb elérhető harmonikus-hullámhossz 40 nm környékén minimalizálja. Egy további probléma lehet az, hogy bár lehetséges az izolált attoszekundumos impulzus előállítása ezzel a módszerrel, de a folyamat kvázilinearitása, azaz a plazmonok fényhullámmá való konverziójának lineáris volta miatt ez nem könnyű, és a minimális hullámhossz az elérhető impulzushossz is korlátozza. Ezért célszerű olyan nagy lézerintenzitások használata, ahol az elektronok, sőt az egész plazma mozgása relativisztikus lesz, amikor a reflexió nem a plazma belsejéből, hanem egy relativisztikus sebességgel oszcilláló tükrőről történik. Ez a ROM (relativistically oscillating mirror) modell.

## Relativisztikus harmonikusok és az ELI

A lézer intenzitását növelve az elektromágneses térben rezgő elektron mozgása relativisztikussá válik, azaz sebessége megközelíti a fénysebességet. Ebben az esetben a Lorentz-erő  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  tagja már nem lesz elhanyagolható, ellentétben a *Függelék*ben tárgyalt esettel. Az ehhez szükséges térerősség megbecsülhető, és egy normalizált, dimenziómentes vektorpotenciállal fejezhető ki, amit az

$$a_0 = \frac{eE}{m\omega c} = \sqrt{\frac{I\lambda^2}{1,37 \cdot 10^{18}}}$$

összefüggés ír le. Itt  $\omega$  és  $\lambda$  a lézer frekvenciája, illetve mikronban mért hullámhossza,  $E$  a térerősség,  $I$  a  $\text{W}/\text{cm}^2$ -ben mért fényintenzitás. A *Függelék* alapján könnyen megbecsülhető, hogy a relativisztikussá válás  $a_0 \approx 1$  esetén történik meg, ami az  $1 \mu\text{m}$  hullámhossz esetén  $10^{18} \text{ W}/\text{cm}^2$  fényintenzitást jelent. Mi történik, ha ez a térerősség szilárdtesten keltett, meredek plazmagradienssel hat kölcsön? A fény ebben az esetben is a vákuumoldalról csak a kritikus rétegig tud behatolni, ahol a lézer frekvenciája megegyezik a plazmafrequenciával. Ám ebben az esetben ez a kritikus felület a  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  erő hatására kollektív mozgást végez, rezegni fog. A beeső lézerfény ezen a rezgő kritikus felületen visszaverődik. A kritikus felület rezgésének periodicitása itt is megegyezik a lézerfény elektromágneses terének periódusával. A visszavert fény pedig visszaverődéskor Doppler-eltolódást szenved, a fentiek következtében ez szintén a lézerfény magas

harmonikusaiból áll. Pontosabb számítások azt mutatják, hogy maga a visszaverődés legnagyobb mértékben a fordulópontnál történik egy egészen rövid idő alatt, azaz amikor a térerősség előjelet vált. Ennek következtében ismét attoszekundumos impulzussorozat keletkezik, amely egyes impulzusainak időtartama még ebben a tartományban is nagyon rövid lehet.

Ennek a ROM harmonikusok keltésnek számos előnye van. Mivel kritikus réteg mindig létrejön, ezért a keltett harmonikusok rendjének nincs közvetlen határa, sem ionizáció, sem sűrűség nem limitálja. Már 2006-ban sikerült több keV fotonenergiáig harmonikusokat keltetni [9]. A magas harmonikusok koherenciája következtében ezek attoszekundumos impulzusokból állnak, amelyek hossza a becslések szerint akár az attoszekundumnál is rövidebb lehet, a zeptoszekundum tartományba eshet. Ez azt jelenti, hogy amennyiben 1,5-2 ciklusú, azaz 5 fs vagy rövidebb impulzusú lézerrel hozunk létre ROM harmonikusokat, akkor például az egyszerű, felül áteresztő szűrő használatával kiválaszthatjuk a legmagasabb harmonikusrendeket (amelyeket csak a legnagyobb csúcs állít elő), és izolált, néhány attoszekundumos impulzusokat kelthetünk.

Az ily módon előállított nagy fotonenergiájú harmonikusoknak van egy további előnyük. A fény fókuszálhatóságát, azaz az elérhető minimális fókuszátmérőt, következőképpen a maximális intenzitást a fény hullámhossza határozza meg, azaz a látható lézerefény esetében a fókuszfolt legalább mikrométer nagyságrendű. A magas harmonikusok rövid hullámhossza kisebb fókuszátmérőt tesz lehetővé. Mivel az intenzitás a fókuszfolt sugarának négyzetével fordított arányban nő, ha sikerül viszonylag magas konverziót elérni, azaz a harmonikusokba történő konverzió a harmonikus rendjével a négyzetesnél kisebb mértékben csökken, akkor a fókuszáltharmonikus-intenzitás nagyobb lehet a lézerefény eredeti intenzitásánál, ami újabb térerősség-tartományok meghódítását tenné lehetővé. A mai legnagyobb teljesítményű lézerekkel  $\sim 10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> fölötti intenzitás érhető el. Ha például az ELI-ALPS-ban sikerül nagy konverzióval létrehozott magas harmonikusokat effektíven fókuszálni, akkor az intenzitás elérheti a  $10^{23}$  W/cm<sup>2</sup> tartományt, ahol a térerősség oly magas, hogy benne az ionok is relativisztikus sebességgel rezegnek. Ez az ultrarelativisztikus eset. Erre van is remény. A megfigyelt ROM harmonikusoknak van egy örömdetes tulajdonsága, amelyet az angol irodalom beamingnek nevez, magyarul talán nyalábosodásnak hívhatjuk. Ez azt jelenti, hogy a reflektált harmonikusok a fókuszált lézernyaláb divergenciájánál jóval kisebb térszögben terjednek, amelyet valószínűleg az okoz, hogy a nyaláb fókuszbeli eloszlása következtében a kritikus réteg sem lesz egészen sík, hanem görbült, ami kollimálja a rajta visszaverődő harmonikusnyalábot. A legutóbbi kísérletek, amelyben hazai kutatók is részt vettek [10], azt mutatják, hogy a konverzió ebben a nyalábosodott harmonikusnyalábban igen magas lehet, mintegy 6  $\mu$ J az egyes attoszekundumos impulzusokban, és a szimulációk azt mutatják, hogy az intenzitás kis mértékű növelésével akár az 1% konverziós határfok is elérhető.

Természetesen az ELI-ALPS, azaz az ELI attoszekundumos fényforrása a fentieket alkalmazni kívánja ahhoz, hogy a felhasználók számára különböző paraméterű attoszekundumos fényimpulzusokat biztosítson. Elsősorban a gázharmonikusokat és a relativisztikus ROM harmonikusokat fogják ehhez felhasználni. A gázharmonikusok, illetve a belőlük származó attoszekundumos impulzusok ma már rutinszerűen keltethetők. Az ELI-ALPS újdonsága a nagy ismétlési frekvencia lesz. A tervek szerint beszereznek egy 100 kHz ismétlési frekvenciával működő fényforrást, valamint egy 1 kHz ismétlési frekvenciájú. Az 1 kHz ismétlési frekvenciájú rendszernél nagyobb lesz az egyes lézerimpulzusok energiája. Ahhoz, hogy ezt a nagyobb bemenő energiát felhasználjuk és a gáz ionizációját elkerüljük, hosszú fókusz távolságú bemenetre lesz szükség, és esetleg nemlineáris effektusok felhasználására, ami elősegíti a fázisillesztést a nagyobb kölcsönhatási hossz esetében.

Mivel mindezidáig (2013. július) a plazmaalapú módszerekkel nem demonstráltak izolált attoszekundumos impulzusokat egyértelműen, következőképpen hosszukat sem mérték, ezért igen nehéz pontosan definiálni a majdani paramétereiket. Az effektív ROM harmonikusok keltéséhez legalább  $10^{21}$  W/cm<sup>2</sup> fókuszált lézerintenzitásra van szükség néhány ciklusú lézerimpulzusok használatakor. Alapvető fontosságú az, hogy az ultrarövid lézerimpulzust megelőző előimpulzusokat olyan alacsonyán kell tartani, hogy az ne hozzon létre a céltárgyon főimpulzus megérkezése előtt úgynevezett előplazmát, illetve azt megfelelő kicsinek kell tartani az optimális plazma-skálahossz eléréséhez, ami fontos ahhoz, hogy reprodukálható módon keltsünk harmonikusokat. Ezzel a módszerrel ma elérhetőnek tűnik attoszekundumos impulzusok létrehozása 1 kHz ismétlődési frekvenciával. A szimulációk szerint a 20–70 eV tartományban több százalékos konverzió érhető el, de az a 80–200 eV közötti tartományban is megközelíthető. A nagyenergiájú fotonok esetében, 400 és 1000 eV között a konverzió az 1 ezreléket közelítheti meg. A következő években ezen a területen további gyors fejlődés várható, amiben remélhetőleg hazai kutatóink is szerepet kapnak.

## Köszönetnyilvánítás

Ezen írás létrejöttében oly sokan játszottak szerepet, hogy teljes felsorolásuk nemhogy a címlistában, hanem a köszönetnyilvánításban is nehézségekbe ütközik. Abc sorrendben felsorolom a főbb hazai közreműködőket: *Aladai Márk, Barna Angéla, Czitrovsky Aladár, Dombi Péter, Rácz Péter, Szatmári Sándor, Varjú Katalin*. Mellettük még a külföldiek közül *Veisz Lászlót, George Tsakirist és Patrick Heisslert* emelném ki. A kapcsolódó munkát a Nr. ELI 09-1-2010-0010 számú hELIOS-ELI program támogatta.

## Irodalom

1. Krausz Ferenc: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* 52 (2002) 12.
2. Farkas Győző: Attoszekundum időtartamú fényimpulzusok. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 408.
3. Varjú Katalin: Attoszekundumos impulzusok. *Fizikai Szemle* 58 (2008) 87.
4. P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993) 1994.

5. Gy. Farkas, Cs. Tóth, *Phys. Lett.* 168 (1992) 447.
6. Kun Zhao, Qi Zhang, Michael Chini, Yi Wu, Xiaowei Wang, Zenghu Chang, *Opt. Lett.* 37 (2012) 3891.
7. I. B. Földes, J. S. Bakos, G. Veres, Z. Bakonyi, T. Nagy, S. Szatmári, *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics* 2 (1996) 776–781.
8. P. Heissler, R. Hörlein, M. Stafe, J. M. Mikhailova, Y. Nomura, D. Herrmann, R. Tautz, S. G. Rykovanov, I. B. Földes, K. Varjú, F. Tavella, A. Marcinkevicius, F. Krausz, L. Veisz, G. D. Tsakiris, *Appl. Phys. B* 101 (2010) 511–521.
9. B. Dromey, M. Zepf, A. Gopal, K. Lancaster, M. S. Wei, K. Krushelnick, M. Tatarakis, N. Vakakis, S. Moustazis, R. Kodama et al., *Nat. Phys.* 2/7 (2006) 456–459.
10. P. Heissler, A. Barna, J. M. Mikhailova, Guangjin Ma, K. Khrennikov, S. Karsch, L. Veisz, I. B. Földes, G. D. Tsakiris, közlés alatt.

$$m \frac{d}{dt} \mathbf{v} \approx e \mathbf{E}.$$

Ha az oszcilláció amplitúdója kisebb a lézer hullámhosszánál:

$$\mathbf{v} = \frac{e}{m} \frac{\mathbf{E}}{i\omega} \cos \omega t.$$

A rezgés átlagos kinetikus energiája a ponderomotoros energia:

$$U_p = \frac{e^2 \mathbf{E}^2}{4 m \omega^2} = \frac{e^2 \mathbf{E}^2 \lambda^2}{16 \pi^2 m c}.$$

Látható, hogy a rezgés közben felvett energia a térerősség négyzetével, azaz a teljesítménnyel arányos, és a hullámhossznak ugyancsak a négyzetével nő. Ennek a következménye az, hogy a nemlineáris kölcsönhatások szerepe is az intenzitás és a hullámhossz négyzete szorzatával arányos, amelyet az  $I\lambda^2$  skálatörvénynek neveznek. Mivel a lézertény elsősorban az elektronokkal hat kölcsön, ezért van az, hogy a közeg választát ez a skálatörvény határozza meg. Amikor az intenzitás növelésekor az oszcilláció amplitúdója megközelíti a lézer hullámhosszát, illetve a sebesség a fénysebességet, a  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  erő már nem hanyagolható el, a kölcsönhatások relativisztikussá válnak.

## Függelék

A monokromatikus síkhullám terében rezgő elektron mozgásegyenlete nemrelativisztikus esetben, azaz a Lorentz-erő  $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$  tagjának elhanyagolása esetén:

# MEGEMLEKEZÉS KÁRMÁN TÓDORRÓL HALÁLÁNAK ÖTVENEDIK ÉVFORDULÓJÁN

Abonyi Iván  
ELTE TTK

## A pályakezdés éve

*Kármán Tódor* (1881. május 11. Budapest – 1963. május 7. Aachen) a magyarországi mérnökgenerációk egyik legkiválóbb képviselője, sokoldalú fizikus és gépészmérnök, zseniális szervező-egyéniség, *Neumann János* szerint a tudományos tanácsadó (scientific consultant) szerepkörének egyik kimagasló személyisége volt.

Középkolai tanulmányait a Trefort-féle Mintagimnáziumban végezte. Ezt az iskolatípust édesapja, *Kármán Mór* tervezte meg, hogy a leendő középkolai tanárok itt gyakorolva szerezhessék meg a pályájuk során szükséges pedagógiai ismereteket az egyetemi tanulmányaik mellett. Az iskolatípust *Trefort Ágoston* (1817–1888) közoktatási minisztersége alatt valósították meg. Ez lett – röviden szólva – a „Minta” gimnázium.

A Kármán-család a Minta közelében, attól alig két háztömbnyire, a Szentkirályi utcában lakott. Tódor utolsó gimnáziumi éve során az *Eötvös Loránd* indította tanulmányi versenyeken számos jó helyezést ért el. Itt érettségizett, majd a budapesti Műegyetemre ment, amit akkor még Királyi József Műegyetemnek neveztek. Gépészmérnöknek készült.

Tanulmányait sikeresen végezte, oklevelét 1902-ben szerezte meg. Nagy hatással volt rá *Bánki Donát* (1859–1922), aki végzése után tanársegédként alkalmazta, de ugyanakkor *Ganz Ábrahám* vagongyárába is elküldte.

Munkahelyén a nyomott rudak kihajlásának problémáival foglalkozott. Ez a problémakör nagy részben elkísérte későbbi pályáján, hiszen ezek a szerkezeti anyagok a legkülönfélébb műszaki konstrukciókban fontos

szerepet játszanak. Például hidak és más építmények esetében, de döntő mértékben az éppen akkortájt induló repülőgépipar területén tűntek ki fontosságukkal.

1906-ban Kármán a Magyar Tudományos Akadémia ösztöndíjat elnyerve Göttingenbe jutott, *Ludwig Prandtl* (1875–1953) tanzékére. Ez a körülmény döntő hatással volt tudományos pályájára – ekkor jegyezkedett el a repülés, a különböző repülő szerkezetek problémáival és szépségével. Ez volt az az időszak Prandtl életében is, amikor nyilvánvalóvá vált, hogy a repülés nem egyszerűen úszás a levegőben (mint egy arkhimédészi probléma), mert az igazi feladat az lenne, hogy a levegőnél nehezebb testek is repülhessenek. Világossá vált, hogy nem elég az Arkhimédész-féle sztatikus felhajtóerő a repüléshez, hanem egy dinamikai erőhatás is szükséges. Ennek szoros kapcsolata van mind a repülő szerkezet szárnyának alakjával, mind a már mozgó szerkezet körül kialakuló áramlással. Az is kiderült már akkor, hogy a repülő test elemei által keltett hatások is befolyásolják a dinamikai felhajtóerőt. Akármilyen kényelmes a levegőt ideális közegnek tekinteni, mégsem lehet elhanyagolni a test és a közvetlenül hozzáérő levegő kölcsönhatását, a dinamikus határteget. Ez az éppen születő problémakör természetesen megragadta a fiatal Kármán Tódor fantáziáját.

De előbb a megkezdett feladat megoldása volt soron. 1909-ben a nyomott rudak kihajlásáról készített tanulmánya alapján a Göttingeni Egyetem doktorrá fogadta és magántanárrá habilitálta.

Ezután már sor kerülhetett az örvénysorok és a közegeellenállás kapcsolatának vizsgálatára.