

# fizikai szemle



2017/10



Osvay Károly 1990-ben szerzett fizikus diplomát a József Attila Tudományegyetem fizikus szakán, Szegeden. Lézerfizikai kutatási eredményeiért 1995-ben megkapta a fizikai tudományok kandidátusa MTA fokozatot. 2011-ben habilitált a Szegedi Tudományegyetemen. 2011–13. az SZTE TTK Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék megbízott vezetője. 8 évet töltött vezető európai kutatóintézetekben. 1998-ban alapította és azóta is vezeti a TeWaTi lézertudományi laboratóriumot és kutatócsoportot. Több tucat hazai és nemzetközi pályázat témavezetője. Fő kutatási területe az ultrarövid lézerimpulzusok előállítása és alkalmazása. Referált folyóiratokban 88 publikációja jelent meg, ezekre közel 1000 hivatkozást kapott, h-indexe 20. Nyolc szabadalma van. 2007 óta vesz részt az ELI program létrehozásában. Jelenleg az ELI-HU Nkft. kutatási-technológiai igazgatója.

## KEDVES OLVASÓ!

Bizonyára ismeri a mondást, „ha a hegy nem megy Mohamedhez, akkor Mohamed megy a hegyhez”. A mi esetünkben éppen fordítva történt: Szeged nem ment az Alpokba, így az ALPS-ot (sic!) hoztuk Szegedre.

Az Extreme Light Infrastructure projektet Gerard Mourou és társai még 2005-ben kezdeményezték, hogy létrehozzák a világ első ultrarövid és nagy csúcshintenzitású lézereken alapuló kutatóintézetét. Az ESFRI Roadmap-re felkerült javaslatot 2007–11 között egy nemzetközi előkészítő konzorcium vitte közelebb a megvalósításhoz, amelyben a magyar részvételt Czitrovszky Aladár (Wigner FK) és ezen sorok írója (akkor még SZTE) koordinálta. Az előkészítők 2009. októberi döntése alapján a kutatóintézetet nem egyetlen, hanem három – az EU Strukturális Felzárkóztatási Alapjaiból 85%-ban finanszírozott – helyszínen hozzák létre, egymást kiegészítő kutatási profilokkal. A Prága melletti Dolni Brezanyban megvalósuló intézet (ELI-Beamlines), valamint a Bukaresttel határos Măgureleében megépülő intézmény (ELI-Nuclear Photonics) mellett az Attosecond Light Pulse Source (Attoszekundumos Fényimpulzus Forrás – ELI-ALPS) Szegedre került. Az ELI-ALPS megvalósítását az ELI-Hu Nonprofit Kft.-ra bízták, amely az NKFIH minősítése alapján akkreditált kutatóintézetként működik.

Az ELI-ALPS fő kutatási berendezései olyan lézerrendszereken alapulnak, amelyek új minőségi szintet képviselve nem csak különleges paraméterkombinációval (nagy fluxus, extrém sávszélesség) rendelkező impulzusokat állítanak elő, hanem 2%-on belüli stabilitással, megbízhatóan működnek, akár a nap 24 óráján át. A 650–1300 nm, illetve a 3  $\mu$ m hullámhosszú lézerimpulzusok időbeli hossza mindössze néhány ciklusnyi (6–17 fs, illetve < 40 fs), így az elektromágneses csúcsteljesítmény a PW tartományt is eléri. A lézerek ismétlési frekvenciája 10 Hz – 100 kHz közé, míg átlagos teljesítményük a 10–500 W-os tartományba esik. Ezen lézerek teszik lehetővé a kivételes jellemzőjű másodlagos források – a THz-es sugárzástól a röntgensugárzásig terjedő fényforrások és a részecskeforrások – működését.

Az ELI-ALPS elsődleges küldetése az impulzusenergia, az ismétlési frekvencia és a fotonenergia tekintetében a lehető legjobb, az extrém ultravioleta (XUV) tartományba eső attoszekundumos impulzusok előállítása, amelyekkel a hazai és nemzetközi tudományos közösség világszínvonalú alap- és alkalmazott kutatásokat végezhet majd.

A 2017. május 23-án ünnepélyesen megnyitott épületben jelenleg az első két berendezés – a középinfraörös (MIR) lézerrendszer és a THz forrás – telepítése zajlik (lásd címlap). Októberben érkezik a harmadik, a nagy ismétlési frekvenciájú lézerrendszer (HR). Mindhárom berendezésen a hazai és külföldi kutatók 2018 februárjától már méréseket végezhetnek. Az attoszekundumos impulzusokat előállító nyalábvonal várhatóan 2018 második felétől üzemel majd. További lézerek és másodlagos források, mérőállomások telepítése a következő három év feladata, és fokozatosan válnak elérhetővé.

Külön örülünk, hogy a hazai kutatók, kutatói közösségek előtt a korábbi műhelymegbeszélések és konferenciák után ezzel a tematikus számmal is bemutatkozhatunk. Remélem, hogy a nemzetközi fenntartású ELI-ALPS Kutatóintézetben a hazai kollégák is évről-évre nagyobb számban végeznek majd kísérleteket.

  
Osvay Károly  
kutatói-technológiai igazgató



### Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:  
Lendvai János

Szerkesztőbizottság:

Bencze Gyula, Czitrovszky Aladár, Faigel Gyula, Füstöss László, Gyulai József, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Németh Judit, Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Szatmáry Zoltán, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:  
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:  
szerkesztok@fizikaiszemle.hu

A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

A folyóirat honlapja:  
<http://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

A közép-infravörös (MIR) lézert Kiss Bálint és munkatársai telepítik az ELI-ALPS Kutatóközpontban.

Köszöntő (Osvay Károly)	329
Major Balázs, Kőrös Pál Csaba, Varjú Katalin: Attosekundumos impulzuskeltés makroszkopikus optimalizációja <i>A fázisillesztési probléma rövid ismertetése mellett a cikk az ELI-ALPS két készülő nyalábvonalát is bemutatja</i>	331
Csebi András, Halász Gábor, Vibók Ágnes: Kvantumkontroll fázismodulált lézerimpulzusokkal <i>A lézerimpulzus frekvenciájának időbeli változtatása új lehetőség a kémiai dinamikai folyamatok tanulmányozásában</i>	335
Tőkési Károly: Kollektív gerjesztések valós idejű megfigyelése fotoemisszió során <i>Egy új pumpaszonda-kísérlet, az időfelbontásos fotoemisszió alkalmas a fémek plazmongerjesztéseinek valós idejű megfigyelésére</i>	341
Földi Péter: A magas felharmonikusok keltésének kvantumoptikai leírása <i>Az intenzív lézerekben megfigyelhető magasfelharmonikus-keltés leírása a módusok terének kvantált kezelésével</i>	345
Groma Géza: Útban az ELI felé: femtoszekundum időfelbontású fluoreszcenciaspektroszkópia egy koenzim-molekulán <i>Az időfelbontásos fluoreszcenciaspektroszkópia alkalmas finom molekulaszervezeti változások nyomonkövetésére</i>	349
Horváth Zoltán György: A magyar kézműves holográfia hőskora – 2. rész: látványholográfia <i>Az 50 éves múltira visszatekintő magyarországi holográfia kezdeti lépéseinek bemutatása</i>	355

### A FIZIKA TANÍTÁSA

Tichy Géza, Vankó Péter, Vigh Máté: Gondolatok az Eötvös-verseny 1. példájáról – 1. rész: stacionárius eset	360
---	-----

### HÍREK – ESEMÉNYEK

Fizikai kísérletek – nem csak tudósoknak (Jarosievitz Beáta, Sükösd Csaba)	329
Az ELI-ALPS első tanártovábbképzése	354
Zawadowski Alfréd, 1936–2017 (Mibály György, Kertész János, Zaránd Gergely)	363

K. Osvay: Welcome

B. Major, P. Cs. Kőrös, K. Varjú: Macroscopic optimization of the generation of attosecond pulses

A. Csebi, G. Halász, Á. Vibók: Quantum control with phase modulated laser pulses

K. Tőkési: Real time observation of collective excitations during photoemission

P. Földi: Quantum optical description of high harmonics generation

G. Groma: Underway to ELI: femtosecond fluorescence spectroscopy on a coenzyme molecule

Z. G. Horváth: Heroic age of Hungarian handicraft holography – Part II.: Spectacle holography

### TEACHING PHYSICS

G. Tichy, P. Vankó, M. Vigh: Further considerations on the first problem of the Eötvös Physics Competition – Part I.: Stationary case

### EVENTS

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682

A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacíme: elft@elft.hu

Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtákar, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.

Kéziratokat nem örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.

Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulathoz vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyzámlán.

Megjelenik havonta (nyáron duplaszámmal), egyes szám ára: 900.- Ft (duplaszámé 1800.- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015–3257 (nyomtatott) és HU ISSN 1588–0540 (online)



# KOLLEKTÍV GERJESZTÉSEK VALÓS IDEJŰ MEGFIGYELÉSE FOTOEMISSZIÓ SORÁN

Tőkési Károly  
MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen  
ELI-ALPS, ELI-HU Non-profit Kft., Szeged

Atomok, molekulák és szilárd testek részecskenyalábbal történő besugárzása az egyik leghatékonyabb módszer az anyag szerkezetének tanulmányozására. Attoszekundumos, ultrarövid lézerimpulzusokkal történő besugárzás, amelyeket magasrendű felharmonikusok előállításával (High Harmonic Generation, HHG) segítségével hoznak létre új perspektívát nyit a rendszerek szerkezetének megismerésében. A vizsgálatok újszerűsége abban rejlik, hogy az elektronok mozgása azok természetes, attomásodperces időskáláján figyelhető meg. A hihetetlenül rövid időintervallumokkal dolgozó attomásodperces fizika új tudományterület. Az attomásodperc a másodperc egymilliódród részének az egymilliódród része. Ez a kvantumfizika és az elektronok anyagbeli mozgásának természetes időskálája. Ez az az idő, amelyen belül a kémiai kötések kialakulnak, vagy amely alatt egy fotocella reagál a fényre. Csak az új, ultrarövid impulzusú lézerek által vált lehetővé, hogy mint egy filmen, valós időben figyelhessük meg az elektronok mozgását az atomokban vagy akár a szilárd testekben. A Szegeden épülő, lézerberendezés (ELI – „Extrém Lézerfény Infrastruktúra”, Extreme Light Infrastructure) egyedülálló beruházás a fény és az anyag kölcsönhatásának ezen újszerű tanulmányozására. A magyarországi létesítmény az attomásodperces tudományok egyik központja lesz. A rendszerek ilyen extrém intenzitások mellett és időskálán történő tanulmányozásához továbbfejlesztett vagy új elméleti modellek szükségesek, amelyek útmutatásként szolgálnak a kísérletekhez.

Az utóbbi évtizedben ultrarövid lézerimpulzusok segítségével az időfelbontásos fotoionizációs vizsgálata vált lehetségessé az úgynevezett pumpaszondamódszerek segítségével. A pumpaszondamódszerek egyike az attomásodperces csíkozódási technika, ami két lézernyaláb, egy fáziskontrolált néhány ciklusú infravörös (IR) és egy attomásodperces extrém ultravioleta (XUV) lézer egyidejű alkalmazását jelenti a

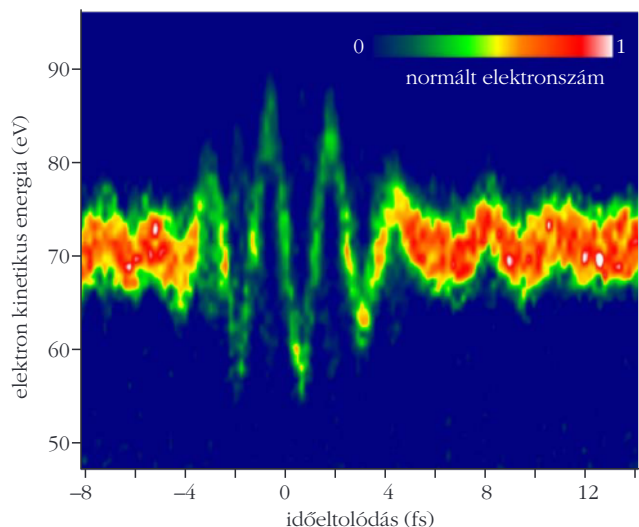
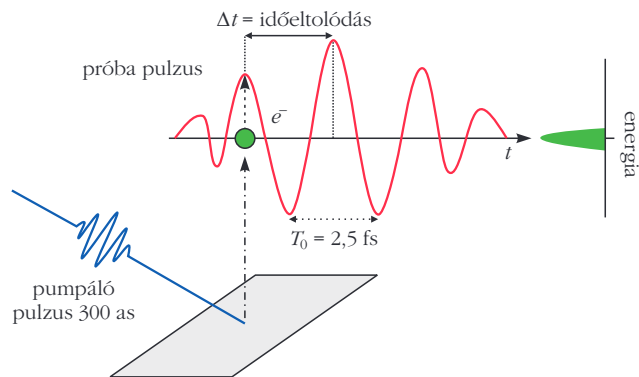
A munkát az ELI-ALPS GOP-1.1.1-12/B-2012-000, GINOP-2.3.6-15-2015-00001, valamint a COST CM1204 (XLIC) és CM1405 (MOLIM) pályázatok támogatták.



Tőkési Károly fizikus, az MTA doktora, tudományos tanácsadó. 1986-tól dolgozik az MTA Atomkiban. 2015-től kapcsolódott be az ELI-ALPS kutatásaiba, a Tudományos Alkalmazások Osztályának munkatársa. Érdeklődése a kísérleti munkáktól az elméleti leírásig terjed. Kutatási területei: atomi ütközések; felületfizika; elektrontranszport-folyamatok szimulációja Monte-Carlo-módszerrel; rövid, intenzív lézerterek kölcsönhatásai atomokkal, egyszerű és összetett rendszerekkel; orvosi biológiai alkalmazások.

fotoelektronok szabaddá válásának tanulmányozására. Fotoemisszió szilárdtest-felületekről, amit az ultravioleta energiától a röntgenfoton-energiák alkalmazásáig gerjesztünk egy jól megalapozott diagnosztikai eszköz az elektronikus sáv szerkezet, a kristályszerkezet és a kémiai összetétel megismerésére. A standard fotoelektron-spektroszkópiai mérésekben a fotongerjesztés után a mintából kilépő elektronok energiaspektrumát vagyunk képesek megmérni. Arról, hogy az elektron mikor keletkezett, az hogyan mozgott a szilárd mintán belül, nem ad információt, azaz az időinformációt nem hordozza magában. Ezzel szemben, szilárd minták felületéről időfelbontásos fotoemisszió során kilépő elektronok attomásodperces csíkozódási spektrumai [1] – amit először *Cavalieri* és munkatársai [2] honosítottak meg – nem csak a felület közelében lejátszódó elektrondinamika valós idejű megfigyelését teszik lehetővé, ami tipikusan körülbelül 100 as-nak felel meg, hanem igen nagy felületi érzékenységet is

1. ábra. Pumpaszonda attomásodperces csíkozódási spektroszkópia elvi vázlatja.



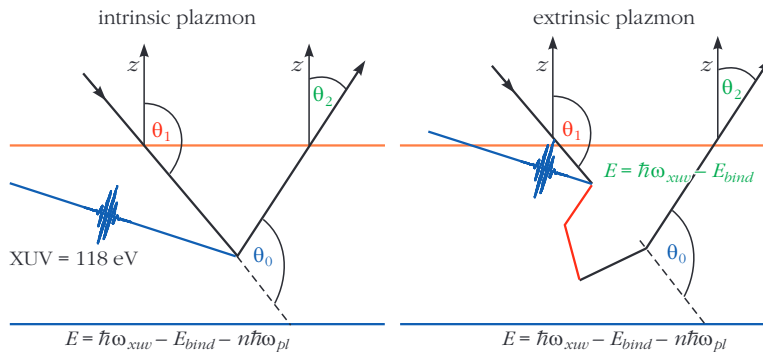
mutatnak, akár néhány Å feloldásban. Ez a példa nélküli tér- és időfelbontás új betekintést ígér a soktest- és korrelációs hatások vizsgálatába.

Az 1. ábra a pumpaszonda attomásodperces csíkozódási spektroszkópia elvi vázlatát mutatja. A pumpáló impulzus igen rövid, tipikusan néhány 100 attomásodperces XUV pulzus, amely a minta pillanatszerű gerjesztését okozza. A szonda-impulzus bizonyos késleltetéssel követi a pumpaimpulzust, ami tipikusan femtomásodperces infravörös impulzus. A fotoelektronok energiaspektrumát, tipikusan néhány száz darab spektrumot mérésenként, a pumpáló és szondaimpulzus közötti időeltolódás (késleltetés) függvényében veszik fel, amelynek eredményeként az 1. ábra alján látható tipikus csíkozódási spektrumot kapjuk.

A lézer-felület kölcsönhatásokban a fotoelektronok különböző (látszólagos) keletkezési idejével kapcsolatos első megfigyelések óta [2] számos tudományos munka jelent meg fotonok által gerjesztett elektronok mintában lejátszódó transzporttulajdonságainak szimulációjára. Amint az elektronemisszió megtörténik, az elektron kölcsönhat az erős, közel infravörös mezővel, amely az elektron külső lézertérben való születésétől függően, azaz a kibocsátási időtől függően a lézer polarizációs irányába változtatja meg annak impulzusmomentumát. A jelenlegi „csíkozódási kísérletek” azt mutatják, hogy a fotoionizáció során kibocsátott elektron kibocsátási ideje függ annak kötési energiájától és kezdeti állapotától. Ez az eredmény a folyamat tiszta klasszikus értelmezése alapján született, elhanyagolva az ionizált célatom hatását. Egy kombinált kvantummechanikai és klasszikus szimulációval megmutatható, hogy a késedelmes fotoemisszió jelentős része közvetlenül kapcsolódik az elektron klasszikus pályájának tulajdonságához, amikor azt egy kombinált Coulomb- és lézertérben határozzuk meg. Ráadásul ezen klasszikus hatáshoz kimutatható a degenerált állapotok kezdeti kvantumos állapotfüggése, amelyet – természetesen – nem lehet klasszikusan reprodukálni. Ez akár az alapállapot-generálás egy művi terméke lehet ( $l$ -,  $m$ -függő mikrokanonikus eloszlás), de akár a kvantummechanika belső tulajdonsága is lehet.

E munkában egy új pumpaszonda-kísérletet és annak klasszikus alapokon nyugvó leírását mutatom be [3]. A felületekből kilépő fotoelektronok időfelbontásos vizsgálata lehetővé teszi, hogy fémekben a plazmongerjesztéseket is azok valós idejében figyeljük meg. Időfelbontásos fotoemisszió segítségével megkülönböztethetjük a „belső” (intrinsic) és „külső” (extrinsic) plazmonkeltéseket, még akkor is, amikor kezdeti energiaállapotaik degeneráltak. A 2. ábra az intrinsic és extrinsic plazmongerjesztések keletkezésének elvi vázlatát mutatja.

A felületen elnyelt foton energiája vagy teljes egészében átadódhat a szabadabbá váló fotoelektronnak, növelve a spektrum intenzitását a fővonal



2. ábra. Az intrinsic és extrinsic plazmongerjesztések sematikus ábrázolása.

$$E = \hbar \omega_{XUV} - E_{bind}$$

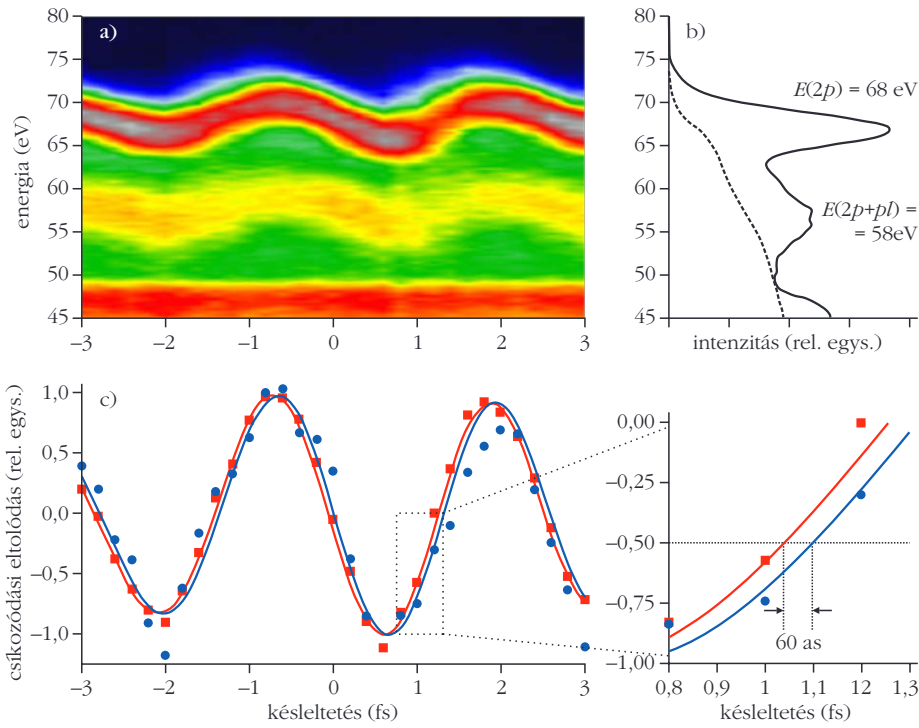
energiájánál, vagy egyidejűleg gerjeszthet  $n$  számú „belső”, intrinsic plazmont, amelyek a spektrumban az

$$E = \hbar \omega_{XUV} - E_{bind} - n \hbar \omega_{pl}$$

energiáknál jelennek meg. Ezt a folyamatot – amit atomi fotoionizációban figyeltek meg először – eredetileg *Lundquist* [4] és a *Penn* [5] javasolták, mint egy kondenzált anyagban lejátszódó shake-up szatellit folyamatot [6]. A plazmongerjesztés másik lehetséges útja, ha az nem közvetlenül keletkezik, hanem a fővonal gerjesztése után ezen fotoelektron mintabeli véletlen mozgása során fellépő rugalmatlan ütközés terméke. Ezt a keletkezési utat nevezzük „külső” vagy extrinsic plazmongerjesztésnek. Mivel a két folyamatban keletkező elektronok energiája degenerált, ezek megkülönböztetése a standard fotoelektron-spektroszkópiában igen nehéz vagy lehetetlen.

A továbbiakban olyan céltárgyat válasszunk, amelynek veszteségi spektruma igen jellegzetes, azaz gyakorlatilag egy jól definiálható erős plazmongerjesztés legyen. Ilyen gerjesztésű spektrummal például a magnézium rendelkezik. Az intrinsic és extrinsic folyamatok karakterisztikus távolságkülönbsége azt sugallja, hogy attomásodperces technikával az intrinsic és extrinsic folyamatokat meg tudjuk különböztetni. Az intrinsic gerjesztés esetében a karakterisztikus hossz a belső lyuk árnyékolt hossza, ami magnéziumban közel 1,5 Å. Extrinsic gerjesztés esetében a karakterisztikus hossz a rugalmatlan ütközés szabad úthossza adja, ami magnézium és néhányszor 10 eV energiánál közel 5 Å.

A pumpaszonda-kísérletet magnézium minta esetében *Neppel* és munkatársai végezték el [7], amelynek során a Mg(0001) felületen a Mg(2p) vonalának gerjesztését (pumpapulzus) 118 eV központi energiájú, lineárisan poláros XUV foton szolgáltatta. A kísérleti eredmények összegzése a 3. ábrán látható. A 4,5 fs hosszú, közel infravörös próba lézertimpulzus kollinearisan volt a pumpáló impulzussal. Megmérték a Mg(2p) belső héjáról gerjesztett fotoelektronok csíkozódási spektrumait, valamint a vonal szatellit vonalát, ami egy plazmont gerjesztett. A magnézium 2p héjá-



3. ábra. a) A Mg 2p fotoelektron csúcs- és plazmonvesztéséget szenvedett szatellitvonal kísérletileg megfigyelt csíkozódási spektrumai. b) Fotoelektron-spektrum. c) A csíkozódási nyomok relatív eltolódása. A pontok és négyzetek a kísérleti adatok jelzik, míg a folytonos vonalak a legjobb illesztések eredményei. A két vonal közötti eltérés – amit a kinagyított rész mutat –  $60 \pm 10$  as [3].

nak kötési energiája közel 50 eV, míg az egyszeres plazmongerjesztés energiája közel 10 eV. Így a két mérendő csúcs nominális energiaértéke 68 eV és 58 eV. A kirepülő elektronok spektrumát a szondalézerimpulzus modulálja. A moduláció nagyságát a pum-páló és a szondaimpulzus közötti időeltolódás határozza meg, ami impulzuseltolódásban nyilvánul meg. Az impulzuseltolódás nagyságát a

$$\Delta p(\tau) = A(\tau)$$

összefüggés adja.  $A(\tau)$  jelöli a lézerpulzus vektorpotenciálját, és  $\tau$  azt az időpillanatot, amikor a fotoelektron keletkezett és a szondalézer hatással van rá.

A mért spektrumok első momentumát, mint az XUV-NIR késleltetés függvényét elemezve (3.c ábra), a Mg(2p) fő fotoelektron és a plazmonvesztéséget szenvedett fővonal között a relatív csíkozódási eltolódásra

$$\Delta \tau_s = \tau[2p + pl] - \tau[2p] = 60 \pm 10 \text{ as}$$

értéket kapunk.

Az intrinsic és extrinsic plazmongerjesztés keletkezési arányának jellemzésére vezessük be az

$$\alpha = \frac{I_0[2p + ipl]}{I_0[2p] + I_0[2p + ipl]} \quad (1)$$

mennyiséget, ahol  $I_0[2p + ipl]$  és  $I_0[2p]$  a kezdeti foto-gerjesztés intenzitását jelöli intrinsic plazmongerjesztéssel és anélkül. Az  $\alpha$  értékének meghatározását célzó korábbi kísérleti és elméleti becslések nagyon széles, 0% és 40% közötti szórást mutatnak.

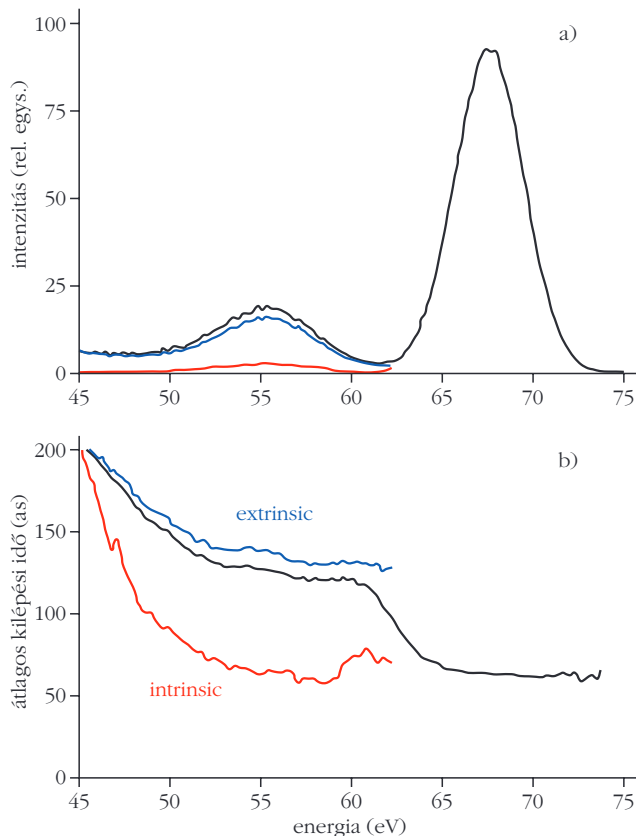
A csíkozódási spektroszkópiában – szilárd minták esetén – az időinformáció kinyerésének kulcsa a behatolási mélység és a NIR felület közelében mutatott dielektromos árnyékolás angström pontosságú ismerete. Időfüggő sűrűségfüggvény-elmélet segítségével meghatároztuk a polarizációtöltés-réteg keletkezési helyét. Azt kaptuk, hogy az árnyékolt töltés a legfelső atomi rétegtől 3,5 au távolságra helyezkedik el. A NIR árnyékolt távolsága pedig 2,5 au. Így a fotonelnyelés teljesen árnyékolt a szondaimpulzustól. A NIR térnek csak akkor van hatása a fotoelektronra, amikor az kilép a felületből.

A fotoelektron-kilépést a háromlépéses modell segítségével szimuláltuk. A szimulációs lépések a következők: 1) elsődleges fotonelnyelődés, ami a célatom elektronjának

szabaddá válását eredményezi, 2) a szabaddá vált elektron sztochasztikus mozgása a szilárd mintán belül, amikor a rugalmas és rugalmatlan ütközési folyamatokat is figyelembe vesszük, 3) az elektron kilépése a felületből, ami egy diffrakció jellegű szórást jelent a felületi potenciálon. Az elsődleges fotoabszorpciós esemény helyét a legfelső 15 rétegből véletlenszerűen választottuk. A keletkezett elektron mintán belüli véletlen mozgása során egy extrinsic plazmon (epl) gerjeszthet. Ezen elektron véletlen mozgása során kiléphet a felületből és ugyanolyan energiaállapotban találjuk, mint azt az elektront, ami a fotonelnyelődéssel egy időben egy intrinsic plazmon is gerjesztett. Bár a spektrális információból igen nehéz megkülönböztetni a két folyamatból keletkezett elektronokat (4.a ábra), a két keletkezési csatorna különböző átlagos transzport hosszakkal rendelkezik és így különböző időkésleltetéssel is az XUV pulzushoz képest.

Tegyünk egy gyors becslést a csíkozódási időeltolódásra! Ennek érdekében tekintsünk el a rugalmatlan szabad úthossz energiafüggésétől és tegyük fel, hogy a rugalmatlan ütközés következtében mindig egy plazmon keletkezik, azaz hanyagoljuk el minden más rugalmatlan csatorna járulékat. Sztochasztikus ütközésekben az átlagos ütközési hossz – amin belül még nem következik be rugalmatlan ütközés – pontosan a  $\lambda_{inel}$  rugalmatlan szabad úthossz. Ennek értelmében az átlagos elektronrepülési távolság a mintán belül, amikor az elektron egyetlen rugalmatlan ütközést szenved, éppen  $2\lambda_{inel}$ . Következésképpen – feltételezve, hogy csak extrinsic plazmon keletkezett ( $\alpha = 0$ ) – a





4. ábra. a) Energiaspektrum  $\alpha = 0,05$  esetében. b) Az átlagos kiszökési idő eloszlása az intrinsic (piros vonal) és az extrinsic (kék vonal) plazmonkeltési folyamatra [3].

fővonal és az extrinsic plazmon-keltéssel egybekötött vonal közötti várható időeltolódást a

$$\Delta\tau = \frac{\lambda_{inel}}{v} \approx 65 \text{ as}$$

összefüggés segítségével közelíthetjük.

A másik határesetben, amikor  $\alpha$  közel 1, az elektronbolyongásból származtatható időkésleltetés eltűnik, és a megmaradó időkésleltetés az Eisenbud–Wigner–Smith (EWS) időkésleltetéssel lesz egyenlő [8]. Ab-initio számításokkal megmutatható, hogy ez az időkésleltetés csak néhány as. Ez az egyszerű becslés igen jó egyezésben van a kísérleti megfigyeléssel (3. ábra).

A szimulált átlagos kiszökési idő eloszlása (4.b ábra) megerősíti ezt az egyszerű analitikai becslést, nevezetesen azok az elektronok, amelyek pályájuk során egy extrinsic plazmont gerjesztenek,  $\Delta\tau$  késleltetéssel lépnek ki a felületből azokhoz az elektronokhoz képest, amelyek a keletkezésükkel egy időben vesztenek el egy plazmonnyi energiát (intrinsic plazmon) és a pályájuk során további rugalmatlan ütközést nem szenvednek. A  $\Delta\tau_s = \tau[2p+pl] - \tau[2p]$  csikozódási késleltetés – mint az  $E[2p+pl]$  elektronok átlagos késleltetése – a következő összefüggés segítségével fejezhető ki:

$$\tau[2p+pl] = \frac{\tau_{ipl} I[2p+ipl] + \tau_{epl} I[2p+epl]}{I[2p+pl]}, \quad (2)$$

ahol  $I[2p+ipl]$  és  $I[2p+epl]$  a 3.a ábra szerinti parciális energiavesztések intenzitásai. A parciális intenzitásokat direkt is származtathatjuk a plazmonvesztéget szenvedett elektronspektrumból:

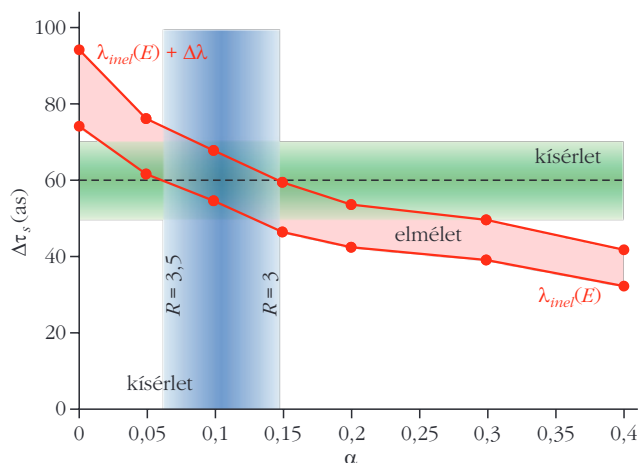
$$R = \frac{I[2p]}{I[2p+pl]} = \frac{I[2p]}{I[2p+epl] + I[2p+ipl]}. \quad (3)$$

A kísérletekből meghatározott  $R$  és  $\tau_s$  értékek segítségével meghatározható az  $\alpha$  és az effektív inelasztikus szabad úthossz.  $R$  értékének meghatározását igen érzékenyen befolyásolja, hogy a háttérét miként vonjuk le a spektrumból. Ha a Shirley-típusú háttérét alkalmazzuk [9], akkor  $R \approx 3$  kapunk. Ha azt feltételezzük, hogy a fővonal háttérmentes és csak a plazmonvesztéget szenvedett csúcsot torzítják a keletkező másodlagos elektronok, akkor  $R$  értéke 3,5-re nő.  $R$  megengedett értékeinek ezen korlátozása az  $\alpha$  megengedett értékeire  $0,05 \leq \alpha \leq 0,15$  korlátot szab, ami szintén összhangban van a csikozódási  $\Delta\tau_s = 60 \pm 10$  attomásodperccel (5. ábra). Az elméleti  $\tau_s$  érték, mint az  $\alpha$  paraméter függvénye jó egyezést mutat a kísérleti  $\tau_s = 60$  as-mal, amikor  $\alpha = 0,05$  és a szimuláció során tömbi rugalmatlan szabad úthosszat használunk (5. ábra alsó piros vonala). Azonban a felület közelében a tömbi rugalmatlan úthosszhoz képest – valószínűleg – nagyobb úthosszak szerepelhetnek. A felső piros görbe esetében 1 Å-mel megnöveltük a rugalmatlan szabad úthosszat, ami a tömbi értékhez képest körülbelül 20%-os növekedést jelent. A kísérleti és elméleti eredmények ( $\Delta\tau_s$ ,  $\alpha$ ) síkon történő összehasonlítása lehetőséget biztosít arra, hogy igen pontosan és egyidejűleg meghatározzuk az intrinsic plazmongerjesztés arányát ( $\alpha = 0,1 \pm 0,05$ ) és a rugalmatlan szabad úthosszat ( $\lambda_{inel} = 5,5 \pm 0,5$  Å).

## Összefoglalás

Jelen munkában egy új pumpaszonda-kísérletet és annak klasszikus alapokon nyugvó leírását mutattam be. Az időfelbontásos fotoemisszió lehetővé teszi,

5. ábra. A Mg 2p héja fotoemissziós vonalának kísérleti és elméleti összehasonlítása, amikor az – a felületből történő kilépése előtt – vagy intrinsic, vagy extrinsic plazmont is gerjesztett [3].



hogy megkülönböztessük a külső és belső plazmonkeltéseket még akkor is, amikor az energiaállapotok degeneráltak. Egyszerű szabadelektronfém esetében megadtam a külső és belső plazmongerjesztések arányát. Megmutattam, hogy a módszer hatékonyan alkalmazható karakterisztikus transzportúthosszak pontos meghatározására is. A bemutatott módszer azzal kecsegtet, hogy sokkal bonyolultabb és erősen korrelált rendszerek sokelektronos válaszfüggvényét teszteljük fotoemisszióban.

Ezen kutatások nem csak a fizikai alaptudomány bővítéséhez járulnak hozzá, de beláthatatlan távlatokat nyithatnak az alkalmazás területén is. A szegedi ELI az anyagtudomány, az orvostudomány/radiobiológia és számos alkalmazott kutatási területre jelentős hatással lesz. Az attotudomány új technológiák kifejlesztését is ígéri a közeli jövőben, hiszen a végső cél az, hogy ne csak megfigyeljük, hanem ellenőrizzük és befolyásoljuk is az ultragyors mozgásokat. Az attomásodperc és a nanométeres lépték ötvözése új felfedezéseket ígér.

## Irodalom

1. R. Kienberger, E. Goulielmakis, M. Uiberacker, A. Baltuska, V. Yakovlev, F. Bammer, A. Scrinzi, T. Westerwalbesloh, U. Kleineberg, U. Heinzmann, M. Drescher, F. Krausz: Atomic transient recorder. *Nature* 427(2004) 817.
2. A. L. Cavalieri, N. Müller, Th. Uphues, V. S. Yakovlev, A. Baltuska, B. Horvath, B. Schmidt, L. Blümel, R. Holzwarth, S. Hendel, M. Drescher, U. Kleineberg, P. M. Echenique, R. Kienberger, F. Krausz, U. Heinzmann: Attosecond spectroscopy in condensed matter. *Nature* 449(2007) 1029.
3. C. Lemell, S. Neppl, G. Wachter, K. Tőkési, R. Ernstorfer, P. Feulner, R. Kienberger, J. Burgdörfer: Real-time observation of collective excitations in photoemission. *Phys. Rev. B* 91(2015) 241101(R).
4. B. I. Lundqvist: Characteristic structure in core electron spectra of metals due to electron-plasmon coupling. *Phys. Kondens. Mater.* 9(1969) 236.
5. D. R. Penn, *Phys. Rev. Lett.* 38(1977) 1429.
6. F. W. Byron, Jr., C. J. Joachain, *Phys. Rev.* 164(1967) 1.
7. S. Neppl, R. Ernstorfer, A. L. Cavalieri, C. Lemell, G. Wachter, E. Magerl, E. M. Bothschafter, M. Jobst, M. Hofstetter, U. Kleineberg, J. V. Barth, D. Menzel, J. Burgdörfer, P. Feulner, F. Krausz, R. Kienberger: Direct observation of electron propagation and dielectric screening on the atomic length scale. *Nature* 517(2015) 342.
8. E. P. Wigner, *Phys. Rev.* 98/1(1955) 145.
9. D. A. Shirley, *Phys. Rev. B* 5(1972) 4709.

# A MAGAS FELHARMONIKUSOK KELTÉSÉNEK KVANTUMOPTIKAI LEÍRÁSA

Földi Péter

Szegedi Tudományegyetem Elméleti Fizikai Tanszék  
ELI-ALPS Nonprofit Kft., Szeged

A nemlineáris rendszerek közös tulajdonsága, hogy erős, periodikus gerjesztés hatására a dinamika jóval összetettebb az egyszerű harmonikus oszcillációnál. Ez frekvenciaképbén azt jelenti, hogy a rendszert jellemző fizikai mennyiségek spektrumában a  $\nu$  gerjesztő frekvencia mellett más komponensek is hangsúlyosak. Jellemzően  $\nu$  egész számú többszöröse, a felharmonikusok jelennek meg. Optikai gerjesztés esetén a másodharmonikus-keltés már évtizedek óta a lézeres technológia egyik jól kidolgozott, alapvető módszere. A magasabb rendű harmonikusok megjelenése azonban nagyon alacsony hatásfokú folyamat, így kísérleti megfigyelésüket [1–3] a

gerjesztő lézerforrások paramétereinek (elsősorban intenzitásának) fejlődése kellett, hogy megelőzze.

Az optikai magasfelharmonikus-keltés (high-order harmonic generation, HHG) folyamata a fény-anyag kölcsönhatás nagy intenzitású tartományának elvi jelentőségű vizsgálata mellett azért is fontos, mert a gerjesztés hatására az anyagból kilépő másodlagos sugárzás (ami tulajdonképpen a felharmonikusok szuperpozíciója) különleges tulajdonságokkal rendelkezik. Ha az egyes frekvenciákhoz tartozó oszcillációk fázisa nem véletlenszerű, akkor a másodlagos sugárzás a gerjesztés rezgésidejénél lényegesen rövidebb impulzusokat is tartalmaz [4,5]. Közeli infravörös bejövő lézernyaláb esetén ez az attoszekundum nagyságrendjébe eső másodlagos impulzust vagy impulzussorozatot jelent. Ilyen rövid elektromágneses impulzusok például atomi rendszerek dinamikájának korábban elérhetetlen pontosságú feltérképezésére alkalmasak. A szegedi ELI-ALPS elsődleges lézernyalábjai a HHG-n alapuló technológia segítségével attoszekundumos impulzusokat is létre fognak hozni.

A magas felharmonikusokat keltő intenzív lézerterek tipikus térerőssége a GV/m nagyságrendű. Ezen tartományon – a szokásos ökölszabály értelmében – a gerjesztő impulzust elegendő klasszikusan leírunk, azaz kvantálás nélkül, pusztán időfüggő külső mezőként kezelünk.

Az ELI-ALPS projekt (GINOP-2.3.6-15-2015-00001) az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.



Földi Péter Salgótarjában született, a József Attila Tudományegyetemen szerzett fizikus és fizikatanár diplomát, majd PhD fokozatot. 2004 óta az SZTE Elméleti Fizikai Tanszékén dolgozik, habilitációja (2011) óta docensként. Vendégkutatóként hosszabb időt töltött az Antwerpeni Egyetemen és a Garching melletti Kvantumoptikai Max Planck Intézetben. 2015 óta az ELI-ALPS részmunkaidős munkatársa. Kutatási területe a fény-anyag kölcsönhatás és a transzportfolyamatok kvantumoptikai leírása.