

KVANTUMELEKTRONIKA 2025

**SZIMPÓZIUM A HAZAI
KVANTUMELEKTRONIKAI
KUTATÁSOK EREDMÉNYEIBŐL**

Konferenciakiadvány



KVANTUMELEKTRONIKA 2025

**Szimpózium a hazai kvantumelektronikai kutatások
eredményeiből**

**Szeged
2025. szeptember 1.**

**Szerkesztő:
Prof. Dr. Hopp Béla**

ISBN 978-963-688-064-4

**Kiadó:
Szegedi Tudományegyetem**

ELŐSZÓ

Jelen kötetben a *KVANTUMELEKTRONIKA 2025 Szimpóziumon bemutatott* posztterek összefoglalóit tesszük közzé. A rendezvénynek a szegedi ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet adott otthont 2025. szeptember 1-jén, amely méltó helyszíneként szolgált a kvantumelektronika és a kapcsolódó tudományterületek legújabb hazai eredményeinek bemutatására és megvitatására.

Az ELFT Atom-, Molekulafizikai és Kvantumelektronikai Szakcsoportja, az SZTE Fizikai Intézet és az ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet szervezésében megvalósuló szimpózium a hagyományokhoz híven fórumot biztosít az optika, a lézerfizika, az atom- és molekulafizika, valamint a plazmafizika kutatóinak. A program meghívott előadásokkal kezdődött, amelyeket poszterszekció követett, teret adva a tapasztalt kutatók mellett a fiatal kollégáknak és a doktorandusz hallgatóknak is legújabb tudományos eredményeik bemutatására.

A közlemények széles tematikát ölelnek fel, többek között a lineáris és nemlineáris optika, ultrarövid impulzusú és nagyintenzitású lézerrendszerek fejlesztése és alkalmazása, attofizikai kutatások, kvantumoptika és kvantuminformatika, fotonforrások és összefonódott állapotok vizsgálata, plazmonika és nanorészecske-szintézis, valamint különféle spektroszkópiai, érzékelési és orvosi biológiai alkalmazások. A kötetben továbbá elméleti és számítógépes modellezési eredmények is helyet kaptak, amelyek a kvantumelektronika számos részterületének előrehaladásához járulnak hozzá.

A rendezők nevében köszönetünket fejezzük ki valamennyi szerzőnek lelkiismeretes munkájáért. Bízunk benne, hogy a kötet hasznos és inspiráló olvasmányként szolgál mindazok számára, akik a kvantumelektronika és rokon területeinek fejlődését nyomon követik és művelik.

Prof. Dr. Hopp Béla

Tartalom

1. Mohammed A. Al-Seady: Tuning the optoelectronic and photovoltaic properties of natural chlorophyll dye molecules via solvent interaction: a computational insight	7
2. Csókási Áron, Dr. Bozóki Zoltán, Magashegyi István: A végeselemes módszer alkalmazása a fotoakusztikus spektroszkópiában.....	12
3. Maher Darwish, Viktória Horváth, Judit Kopniczky, Zsolt Geretovszky, Attila Kohut: Quantitative thiabendazole detection in real samples via filter-based sers substrates	15
4. Dóra István, Csontos János, Tóth Szabolcs, Tóth László Tamás, Somoskői Tamás, Prabhash Prassannan Geetha, Abt Dániel Jenő, Kovalovszki Balázs, Divéki Zsolt, Nagyillés Balázs, Farkas Balázs, Körmöczi Andor, Börzsönyi Ádám: A SYLOS2A lézerrendszer és a vákuum szerepe a hullámfront stabilizálásában.....	20
5. Földi Péter: A fotonok szerepe a magasrendű felharmonikusok keltése során	24
6. Gábor Bence, Varga Dániel, Sárközi Bálint, Kurkó Árpád Adwaith Kalluvayal-Varooli, Nagy Dávid, Dombi András, Thomas W. Clark, Francis I. B. Williams, Vukics András, Domokos Péter: Erős csatolás kimutatása szubradiáns atomi sokaság és rezonátor-vákuummező között.....	25
7. Gera Antónia, Nagy Csongor, Márton Zsuzsanna, Dombi Péter, Pápa Zsuzsanna, Budai Judit: Felületi plazmon polaritonok ultragyors ellipszometriai vizsgálata	27
8. Gera Tamás, Kondász Bence, Smausz Tamás, Kopniczky Judit, Ajtai Tibor, Hodovány Szabolcs, Ambrus Rita, Csóka Ildikó, Hopp Béla: Polimer alapú mágneses nanokompozitok impulzuslézeres ablációval történő előállítása az olajszennyezések lehetséges kezelése érdekében	29
9. Gombi Csilla, Szabó Anna, Fekete János, Huszár Helga, Horváth László, Bozóki Zoltán: Kvantum kaszkád lézer alapú ammónia mérés: a terepi mérés kihívásai	32
10. Hanyecz Ottó, Kálmán Orsolya, Gábris Aurél, Igor Jex, Kiss Tamás: Univerzális módszer Bell-állapot desztillálására fáziscsillapított esetben.....	36
11. Himics László, Czitrovsky Aladár, Veres Miklós, Nagy Attila: Szövetspecifikus optikai szórási jellemzők vizsgálata lézeres laparoszkópos műtétek célterületének hatékony és nagy pontosságú beazonosítására	40
12. Holló Csaba Tamás, Illés Levente, Erdei Gábor, Lenk Sándor, Sarkadi Tamás, Koppa Pál, Barócsi Attila: Fotonpár-források és alacsony fotonszámú detektálási módszerek fejlesztése	44
13. Holló Csaba Tamás, Perényi Barnabás, Erdei Gábor, Barócsi Attila, Koppa Pál, Sarkadi Tamás: Sagnac interferométer alapú fotonpár források fejlesztése közeli infravörös és telekom hullámhossz tartományokon	48
14. Homik Zsolt, Smausz Tamás, Kopniczky Judit, Hopp Béla: Arany-ezüst kompozit nanorészecskék előállítása vékonyrétegek lézeres ablációja útján	52
15. Viktória Horváth, Dániel Megyeri, Judit Kopniczky, Maher Darwish, Zsolt Geretovszky, Attila Kohut: A paper-based 3D SERS platform for thiram sensing	56
16. Karnok Máté, Kovács Attila Pál, Tóth Noémi, Gilinger Tibor, Javaria Razzaq, Osvay Károly: Keverékekből álló ultravékony folyadékhártyák vastagságának mérése	60
17. Kaszás András, Mechler Mátyás, Ádám Péter: Térben multiplexelt egyfotonforrások struktúrájának optimalizálása.....	64

18. Kiss Mátyás, Szatmári Sándor, S.V. Kukhlevsky: A “bifiláris” hatás kapilláris Z-PINCH lágyröntgen AR+8 lézerekben	68
19. Attila Kohut, Lajos Péter Villy, Linnéa Jönsson, Dániel Megyeri, Gábor Galbács, Maria E. Messing, Zsolt Geretovszky: Mixing dynamics of gold and silver atomic plumes during the spark ablation synthesis of alloy nanoparticles	72
20. Andor Körmöczi, Tamás Szörényi, Zsolt Geretovszky: The electrical behaviour of laser soldered steel sheets	76
21. Magashegyi István, Földi Péter: Keltett áramon alapuló lézer–anyag kölcsönhatás karakterizálása rétegelt szilárdtest modellben.....	80
22. Major Balázs, Chinmoy Biswas, Csizmadia Tamás, Filus Zoltán, Grósz Tímea, Gulyás Oldal Lénárd, Kiss Dániel, Subhendu Kahaly, Varjú Katalin: Attofizikai kísérletek az atomi-, molekuláris- és optikai-, valamint szilárdtestfizika témaköreiből	82
23. Nagyillés Balázs, Nagy Gergely Norbert, Kiss Bálint, Eric Cormier, Földi Péter, Varjú Katalin, Subhendu Kahaly, Mousumi Upadhyay Kahaly, Divéki Zsolt: Közép-infravörös lézerimpulzus vivő-burkoló fázisának becslése gépi tanuláson alapú módszerekkel szilárdtest targeteken keltett magasharmonikus spektrumból	86
24. Nagymihály Roland Sándor, Mikhail Kalashnikov, Lehotai Levente, Pajer Viktor, Bohus János, Csernus-Lukács Nóra, Csontos János, Tóth Szabolcs, Ernestas Kucinskas, Ignas Balciunas, Tomas Stanislauskas, Börzsönyi Ádám: Nagy időbeli kontraszttal rendelkező, ultraszélessávú hibrid frontend a következő generációs nagyintenzitású lézerrendszerekhez	87
25. Nagyné Szokol Ágnes, Holomb Roman, Kámán Judit, Rigó István, Aladi Márk, Kedves Miklós, Ráczkevi Béla, Rácz Péter, Archana Kumari, Bonyár Attila, Borók Alexandra, Szalóki Melinda, Biró Tamás Sándor, Kroó Norbert, Veres Miklós: Polimerbe ágyazott plazmonikus nanorészecskék hatása a femtoszekundumos lézerimpulzus által kiváltott kráterképződésre.....	91
26. Német Nikolett, Kiss Tamás, Scott Parkins: Késleltetett koherens visszacsatolás hatása a parametrikus oszcillátorok kimeneti jelének préseltségére és összefonottságára	95
27. Novák Tibor, Bíró Péter, Erdélyi Miklós: Festék molekula emisszió polarizációs állapotának leírása plazmonikus nanogömbök közelében.....	99
28. Rózsa Dániel, Szipőcs Gergely, Kolonics Attila, Szipőcs Róbert: Impulzusüzemű ER-szállézeres erősítő rendszer fejlesztése nemlineáris mikroszkópai és légköri lézer radar alkalmazásokhoz	102
29. Sallai Krisztina, Hack Szabolcs, Majorosi Szilárd, Czirják Attila: Új egydimenziós atomi modellpotenciál a HHG spektrum minél pontosabb modellezésére	106
30. Seres Imre, Evgeny Shestaev, Maxim Tschernajew, Jójárt Péter, Christian Gaida, Nico Walther, Bartyik Tamás, Gilicze Barnabás, Bengery Zsolt, Dominik Hoff, Marco Kienel, Tino Eidam, Jens Limpert, Börzsönyi Ádám, Várallyay Zoltán, Varjú Katalin: 100 KHZ-es, 400 W, 6.2 FS CEP stabil lézerrendszer három poszt-kompressziós cellával.....	110
31. Smausz Kolumbán Tamás, Kopniczky Judit, Mile Edina, Hopp Béla: Kevert anyagú nanorészecskék előállítása arany és ezüst céltárgyak érintkezési vonalának víz alatti ablációjával	114
32. Szilasi Bálint Morgan, Mechler Mátyás, Ádám Péter: Többfotonos állapotok előállítása jelzett fotonforrások multiplexelésével.....	118

33. **Szipőcs Gergely, Krolopp Ádám, Shau Poh Chon, Rózsa Dániel, Török Peter, Szipőcs Róbert:** Szálcasatolt, SUB-PS-os, három hullámhossz tartományban működő TI-zafír lézer fejre szerelhető, kétfotonos gerjesztésű, pásztázó fluoreszcencia mikroszkóphoz, az agy in vivo vizsgálatához.....122
34. **Róbert Trényi, Árpád Lukács, Paweł Horodecki, Ryszard Horodecki, Tamás Vértesi, Géza Tóth:** Activation of metrologically useful genuine multipartite entanglement.....126
35. **Tóth Attila, Nagy Ladislau, Joós Krisztina, Borbély Sándor:** Több-impulzusos elrendezés által vezérelt szabadelektron hullámcsomag interferencia.....129
36. **Tóth Lázár, Budai Judit, Márton Zsuzsanna, Rácz Péter, Dombi Péter, Pápa Zsuzsanna:** Plazmonikus cirkuláris dikroizmus nanooptikai terek koherens szabályozására.....130
37. **Szabolcs Tóth, Indranuj Dey, Mojtaba Shirozhan, Sudipta Mondal, Balázs Kovalovszki, János Csontos, Prabhash P. Geeth, László Tóth, Tamás Somoskői, István Dóra, Dániel Abt, Subhendu Kahaly, Ádám Börzsönyi:** AZ ELI-ALPS SYLOS3 lézerrendszere és "on-target" mért paraméterei.....131
38. **Sándor Varró:** Anomalous nonlinear Compton scattering in the X-ray regime135
39. **Csaba Vass, Gyula Halasi, Nikolett Oláh, Péter Sándor, Gábor Ligeti, Péter Rácz, Judit Budai, Zsuzsanna Pápa, L. Tóth, Zsuzsanna Márton, F. Blödorn, F. Simperl, A. Imani, P. Carpeggiani, Zoltán Filus, Tímea Grósz, C. Biswas, Balázs Major, Péter Jójárt, Imre Seres, Barnabás Gilicze, Zsolt Bengery, László Óvári, W. S. M. Werner, A. Bellissimo, Péter Dombi:** Ultrafast dynamics in real and momentum space disclosed by the nanoesca at ELI ALPS136
40. **Végh Panna, Molnár Bence, Ailer Pirooska, Bozóki Zoltán, Huszár Helga:** Hűtőközegek szivárgásának detektálására alkalmas fotoakusztikus műszer fejlesztése.....138
41. **Haritha Vijayakumar Sheela, Gábor Horváth, Miklós Füle:** Mozaikszerű optikai rácselektrode hatékonyágának modellezése142

22.

ATTOFIZIKAI KÍSÉRLETEK AZ ATOMI-, MOLEKULÁRIS- ÉS OPTIKAI-, VALAMINT SZILÁRDTESTFIZIKA TÉMAKÖREIBŐL

Major Balázs^{1,2}, Chinmoy Biswas¹, Csizmadia Tamás¹, Filus Zoltán¹, Grósz Tímea¹, Gulyás Oldal Lénárd¹, Kiss Dániel¹, Subhendu Kahaly^{1,3}, Varjú Katalin^{1,2}

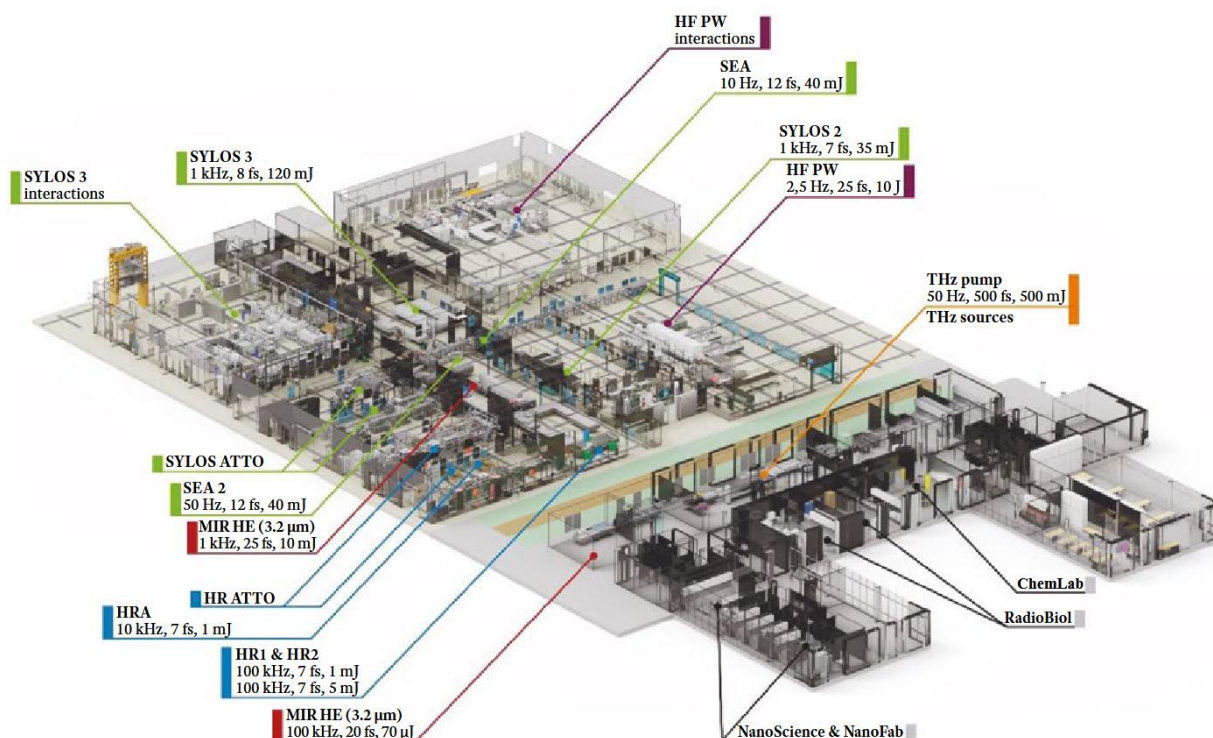
¹ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet, Szeged

²Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

Az attoszekundumos fizika (vagy röviden attofizika) akkor kapott különösen nagy figyelmet, amikor 2023-ban a Nobel-díjbizottság ezen tudományterületen végzett úttörő munkásságukért ítélte oda a fizikai Nobel-díjat három – köztük egy magyar – kutatónak: Pierre Agostininek, Krausz Ferencnek és Anne L’Huilliernek [1,2]. Mint ismert, Alfred Nobel hagyatékának megfelelően olyan eredmények eléréséért ítélke oda a Nobel-díj(ak)at, amik az „emberiséget a legnagyobb mértékben szolgálják”. Azt, hogy a fenti három kutató felfedezései mekkora horderejűek, a tudományos közösség már korábban felismerte, és ennek eredményeként hívta életre a szegedi Extreme Light Infrastructure Attosecond Light Pulse Source (ELI ALPS) kutatóintézetet. Az ELI ALPS-ban a világ legbővebb attofizikai kísérleti eszközparkja található meg, és 2023-as hivatalos megnyitása óta (valójában már évekkel korábban is) számos a tudományterületet meghatározó kísérleti eredményt sikerült itt elérni. Ehhez hozzájárult többek között az, hogy a felhasználói igényekhez igazodva az intézet kísérleti eszközei folyamatos fejlesztés alatt állnak, ezáltal az intézetben egyedülálló berendezések érhetők el az egyedi kísérleti igények kielégítésére. Ebben a rövid összefoglalóban egyrészt ezen unikális technikai megoldások – amik önmagukban is fontos tudományos eredménynek minősülnek – másrészt az ezeknek köszönhetően elérhetővé vált kutatási eredményekből hozunk néhány példát. Az ELI ALPS kutatási infrastruktúrájának lelkét ultragyors (femtosekundumos) lézerek adják. Ehhez kapcsolódnak az úgynevezett magasharmonikus-keltésen (high-harmonic generation, HHG) alapuló attoszekundumos nyalábvonalak és kísérleti állomások (lásd 1. ábra) [3-5]. Ezen fizikai folyamat teszi lehetővé attoszekundumos fényimpulzusok létrehozását, és a HHG az az eszköz, amivel „elektronok atomokban, molekulákban és szilárd anyagokban történő mozgásának” [2] tanulmányozása lehetséges. Ezen folyamat során a lézerek infravörös (infrared, IR) sugárzásából az extrém ultraibolya (extreme ultraviolet, XUV) tartományba eső elektromágneses hullámcsomagok jönnek létre.

Az elektronok mozgásának vizsgálatához önmagában az attoszekundumos impulzus nem elég, a kísérletek kulcseleme a pumpa-próba módszer, amikor is egy pumpa impulzussal létrehozunk a vizsgálni kívánt folyamatot, majd egy próba impulzussal vizsgáljuk azt. A kettő impulzus közti késleltetést pedig kontrolláltan változtatjuk ahhoz, hogy a megfelelő időpillanatokban kapjunk információt a próba segítségével. Attoszekundumos időskálán lezajló folyamatok esetén a késleltetés beállításának is attoszekundumos pontosságúnak kell lennie, ami komoly technikai és tudományos kihívást jelent. Különösen igaz ez például az ELI ALPS HR lézercsaládjához (HRA, HR1, HR2, lásd 1. ábra) [3-5] köthető nyalábvonalak (gyakorlatilag pumpa-próba kísérleti elrendezések), amelyek esetében a nagy átlagteljesítmény miatt nagymértékű hőterhelés éri a főleg vákuumban elhelyezett optikai elrendezést. Ezen hőhatások (főleg hőtágulás) rendkívül nehezíti a pump-próba interferométerek több méteres karjai közti úthosszkülönbség nanométeres precizitással való stabilan tartását (a fénysebesség 0.3 nm/as, tehát néhány attoszekundumos precizitáshoz nanométeres pontosság kell). Az ELI ALPS-ban sikerült egy olyan aktív visszacsatolású, pumpa-próba késleltetést stabilan tartó interferométert kiépítenünk, ami képes 80 as pontossággal működni akár 70 órán keresztül (lásd 2. ábra) [6]. Ez azért különösen fontos, mert a HR Gas nyalábvonalhoz kapcsolódó Reakciós Mikroszkóp (Reaction Microscope, ReMi) kísérleti állomása olyan módon működik, hogy a nyers adatok feldolgozásához a kísérletek során egyetlen lézerimpulzus maximum egyetlen elemi folyamatot (például egyetlen elektron kiszakítása a céltárgy atomból fotoionizáció révén) hozhat

létre, különben a folyamat nem rekonstruálható. Ezáltal kellő mennyiségű adathoz rendkívül hosszú (több napos) mérésekre van szükség.

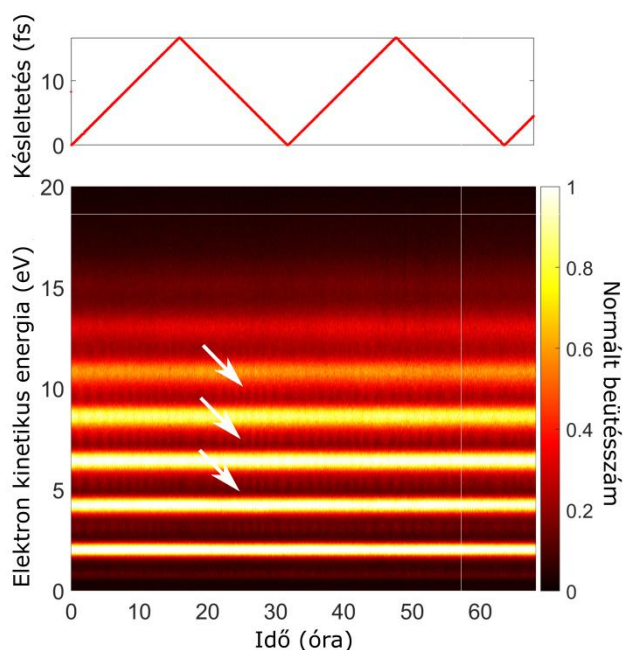


1. ábra: Extreme Light Infrastructure Attosecond Light Pulse Source (ELI ALPS) kutatóintézet kutatási infrastruktúrájának főbb elemei az épület háromdimenziós modelljével feltüntetve. Az elsődleges források (felmtoszekundumos lézerek) főbb paraméterei (ismétlési frekvencia, impulzushossz, impulzusenergia) a releváns helyeken az eszköz neve alatt került feltüntetésre. A nevek mellett található színek azt jelölik, hogy az adott berendezés melyik elsődleges forrás családhoz tartozik. Ebben a munkában a fenti ábrán HR ATTO névvel illetett HR Gas és HR Condensed attoszekundumos nyalábvonalakkal, illetve a hozzájuk csatlakozó ReMi és NanoESCA kísérleti állomásokkal elért eredményekből szemezgetünk. Forrás: [5]

A 2. ábrán a ReMi berendezéssel rögzített fotoelektron-beütésszám látható egy olyan 70 órán át tartó mérés során, ahol az XUV és IR – azaz a attoszekundumos impulzussorozat és femtoszekundumos lézerimpulzus – pumpa- és próba késleltetést 0 és 15 fs között változtattuk (a HR Gas nyalábvonalban) a teljes mérés során összesen több mint két teljes körben. A 2. ábrán látható fehér nyilak mutatják azt a tartományt, ahol a fotoelektron spektrumban interferencia mintázat jelenik meg. Ez a mintázat hordoz információt mind az attoszekundumos impulzusok időbeli alakjáról és időbeli hosszáról, mind az atomokból kilépő elektronok fotoionizációs időkésléltetéséről. Emellett akár azon parciális hullámok külön-külön is mérhetők, amik a fotoionizációs folyamathoz hozzájárulnak [7]. Az ELI ALPS-ban kifejlesztett rendszer az eddigi paraméter limitációkat jelentősen kibővíti.

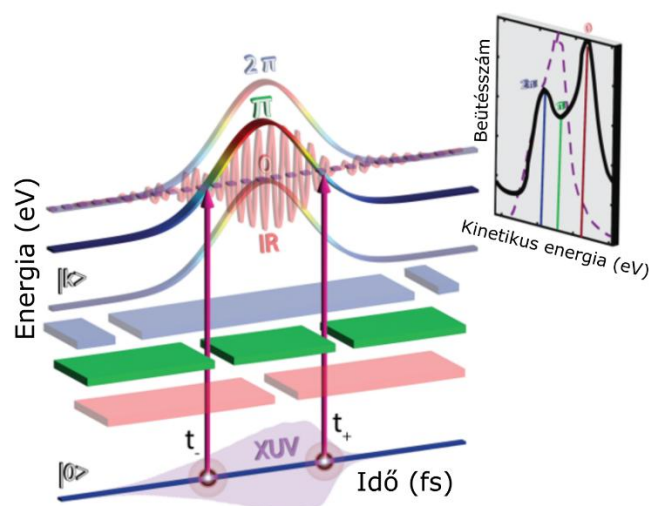
Az előző folyamathoz hasonlóan, ahol a parciális hullámok interferenciája határozza meg a fotoionizációs folyamat eredményeként létrejövő fotoelektronok energia- és momentumeloszlását, egy a HR Condensed nyalábvonalon végzett kísérletben szintén fotoelektron eloszlásban megjelenő interferencia mintázatot elemeztünk. Történt ez annak érdekében, hogy a fotoelektronok kvantumos hullámcsomagjáról információt nyerjünk [8]. A kísérlet lényegében egy időbeli kétréses kísérlet (lásd 3. ábra), ahol az XUV foton elnyelésével az atomból az alapállapotból ($|0\rangle$ a 3. ábrán) távozó elektron valamilyen szabad, úgynevezett kontinuum állapotba ($|k\rangle$ a 3. ábrán) kerül. Egy IR lézerimpulzussal időben átfedve azonban a lézer elektromos tere miatt az atomi állapotok Stark-eltolódást szenvednek. Az XUV impulzus különböző (időbeli) részeiben ionizált elektronok különböző elektromos

térerősséget és különböző Stark-eltolódást tapasztalnak a lézerimpulzus időbeli alakja miatt, és a $|k\rangle$ végállapotuk kicsit más kinetikus energiával jellemezhető lesz (ez eredményezi a 3. ábra jobb felső sarkában látható fotoelektron spektrumon látható eloszlást). Időben szimmetrikus XUV és IR impulzusok esetén minden kinetikus energiához két olyan időpillanat tartozik, amikor az elektron az adott kinetikus energiára tesz szert a fotoionizáció során. Ezen elektronok hullámcsomagjai interferálhatnak (interferencia mintázat jelenik meg a fotoelektron spektrumban), és ez a két időpont jelenti a két rést a kétréses kísérletben (lásd 3. ábra). A kísérleteink során valójában háromréses kísérleteket hajtottunk végre [8], és ezáltal közelebb kerültünk ahhoz, hogy a fotoelektronok kvantumos hullámcsomagjának holográfiájára használjuk ezt a megoldást.



2. ábra: Egy 70 órán át tartó mérés eredménye a Reakciós Mikroszkóp (Reaction Microscope, ReMi) kísérleti állomással. Az alsó ábra argon atomok fotoionizációjának (XUV-IR pumpa-próba elrendezésben) eredményeként az atomoktól elszakadó fotoelektronok számát mutatja a mérés időpontjának és az elektronok kinetikus energiájának függvényében. A felső ábra azt hivatott bemutatni, hogy a 70 órás mérés során a késleltetést folyamatosan változtattuk, ezáltal egy pumpa-próba kísérletet végeztünk el. A fehér nyilak három olyan kinetikus energia- és mérési idő-tartományt mutatnak, ahol az attoszekundumos impulzus(sorozatok) időbeli karakterizálását is lehetővé tevő interferencia mintázatok megjelennek a fotoelektron spektrumban. Lásd még: [6]

Utolsó példaként egy szilárdtest felületén végzett attofizikai mérést említünk meg röviden [9]. Ezen kísérlet során a HR Condensed nyalábvonalat használtuk a NanoESCA kísérleti állomással kombinálva, ami lényegében ugyanúgy fotoelektronok energia- és momentum feloldott mérését teszi lehetővé, akárcsak a ReMi, csak gáz halmazállapotú minták helyett szilárd testek esetében. A kísérlet során a 2. ábrán láthatóval analóg jellegű pumpa-próba mérést végeztünk el, azonban a világon elsőként tudtuk ezt szilárd testben úgy elvégezni, hogy a szilárd test teljes sávszerkezetét (a teljes első Brillouin-zónát) monitorozni tudtuk. Ezáltal ki tudtuk mérni, hogy például egy grafit minta valencia sávjából az XUV foton elnyelésének eredményeként kilépő elektronok egymáshoz képest milyen késleltetéssel távoznak a szilárdtest felületéről attól függően, hogy a kilépés „időpontjában” a Brillouin-zónában hol helyezkedtek el. Ezen eredmény is egyedülálló lehetőségeket nyit az attoszekundumos szilárdtestfizika területén.



3. ábra: A HR Condensed nyalábvonalon egy femtoszekundumos XUV-IR pumpa-próba mérés koncepciójának időbeli kétréses kísérletként való értelmezését bemutató grafika. Az XUV foton elnyelése által az atomból kilépő elektron a $|0\rangle$ alapállapotból a $|k\rangle$ szabad (kontinuum) állapotba kerül. Ennek megfelelően adott kinetikus energiával rendelkezik, amit a jobb felső sarokban látható fotoelektron-spektrumban való megjelenésével detektálhatunk. Az atomi állapotok az időben átfedő IR impulzus miatt Stark-eltolódást szenvednek, aminek eredményeképp a különböző időpillanatokban kiszabaduló elektronok különböző kinetikus energiával rendelkeznek. Egyszerű esetben (időben szimmetrikus XUV és IR impulzusok), általában két olyan időpont van, ami azonos kinetikus energiájú fotoelektronhoz vezet, amik a fázisuktól függően konstruktívan vagy destruktívan interferálhatnak (lásd a 0, π és 2π -vel jelölt esetek). Lásd még: [8]

Felhasznált irodalom

- [1] <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/summary/>
- [2] Varjú Katalin, Dombi Péter, Szabó Gábor, Magyar tudomány **185**(1), 9-19 (2024). <http://dx.doi.org/10.1556/2065.185.2024.1.2>
- [3] S. Kühn et al., J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **50** 132002 (2017). <https://doi.org/10.1088/1361-6455/aa6ee8>
- [4] M. Shirozhan et al., Ultrafast Sci. **4**, 0067 (2024). <https://doi.org/10.34133/ultrafastscience.0067>
- [5] Varjú Katalin, Dombi Péter, Börzsönyi Ádám, Fizikai Szemle **LXXIV**(9), 299-301. (2024).
- [6] T. Csizmadia et al., APL Photonics, közlésre elfogadva (2025). <https://doi.org/10.1063/5.0273558>
- [7] W. Jiang et al., Nat. Commun. **13**, 5072 (2022). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-32753-8>
- [8] F. Vismarra et al., Phys. Rev. Lett. **135**, 033202 (2025). <https://doi.org/10.1103/73tl-w87y>
- [9] A. Bellissimo et al., “Mechanisms and Dynamics of Electron Emission from Graphitic Surfaces: Insights from Correlated and Time-Resolved Spectroscopies”, DPG Spring Meeting of the Condensed Matter Section (SKM) 2025, Talk O7 (2025).

Köszönetnyilvánítás

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