

**IX. SZIMPÓZIUM A HAZAI  
KVANTUMELEKTRONIKAI KUTATÁSOK  
EREDMÉNYEIRŐL**

**KVANTUMELEKTRONIKA  
2021**

**SZEGED**

---

Jelen kutatási eredmények megjelenését az „Ultragyors fizikai folyamatok atomokban, molekulákban, nanoszerkezetekben és biológiai rendszerekben” című, EFOP-3.6.2-16-2017-00005 azonosítószámú projekt támogatja. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.



**KVANTUMELEKTRONIKA  
2021**

**IX. SZIMPÓZIUM A HAZAI  
KVANTUMELEKTRONIKAI KUTATÁSOK  
EREDMÉNYEIRŐL**

**RENDEZTE:**

**ELFT Atom-, Molekulafizikai és Kvantumelektronikai**

**Szakcsoport**

**MTA Lézerfizikai Tudományos Bizottság**

**SZTE TTIK Fizikai Intézet**

**A kiadvány megjelent: 2020. december 16.**



***Szerkesztő:***

***Földi Péter, Magashegyi István***

**ISBN 978-963-306-775-8**

**DOI: <https://doi.org/10.14232/kvantumelektronika.9>**

Kiadó: Szegedi Tudományegyetem  
Természettudományi és Informatikai Kar  
Fizikai Intézet

## ELŐSZÓ

A jelen kötetben a **KVANTUMELEKTRONIKA 2021: IX. Szimpózium a hazai kvantum-elektronikai kutatások eredményeiről** című rendezvényen szereplő meghívott előadások és poszterek anyagainak közleményeit tesszük közzé. A szimpózium a hagyományokat követve az optika, az atom- és molekulafizika és a plazmafizika területén folyó hazai kutatásokról és azok eredményeiről nyújt áttekintést. A kötetben mind angol, mind magyar nyelvű közlemények szerepelnek, hogy az ország számos intézetében dolgozó nem magyar anyanyelvű kutatók számára is lehetőséget biztosítsunk eredményeik publikálására.

A kötet online megjelenési formája miatt a szerkesztési módszer egyszerűsödött a korábbi évekhez képest. Most az első szerzők névsora szerint követik egymást a publikációk a kötetben. Az, hogy az adott munka meghívott előadásként, vagy poszter prezentációként szerepel a szimpóziumon, a fejlécben olvasható. Mind a tartalomjegyzék, mind pedig a névjegyzék linkként is működik, így egyetlen kattintással megtalálható a keresett munka. A közlemények számos témakörhöz tartoznak, a teljesség igénye nélkül: lineáris és nemlineáris optika, lézerfizika, kvantumoptika és kvantuminformatika, lézerek orvosi és biológiai alkalmazásai, lézeres anyagmegmunkálás, lézerspektroszkópia, ellipszometria, plazmonika és THz impulzusok generálása. A közlemények első szerzői a következő intézményekből kerültek ki:

- Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem,
- Debreceni Egyetem,
- ELI-HU Nonprofit Kft.,
- Eötvös Loránd Tudományegyetem,
- Pécsi Tudományegyetem,
- Semmelweis Egyetem,
- MTA Szegedi Biológiai Kutatóközpont,
- Szegedi Tudományegyetem,
- MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont.

A rendezők nevében szeretnénk megköszönni a szerzők lelkiismeretes munkáját, bízunk benne, hogy a kötet hasznos olvasmány lehet a tudományterületet művelők számára.

A szerkesztők

Szeged, 2020. december 10.

# Tartalomjegyzék

**Andrásik Attila, Flender Roland, Budai Judit, Szörényi Tamás, Hopp Béla**

Characterization of plasma reflectivity response of optical glasses processed by 34 fs pulses: analysis in the context of ablation parameters ..... 1

**Andrásik Attila, Flender Roland, Budai Judit, Szörényi Tamás, Hopp Béla**

Surface processing of optical glasses with 34 fs pulses: ablation thresholds and crater shape ..... 7

**Bánhelyi Balázs, Fekete Olivér, Sipos Áron, Szenes András, Tóth Emese, Vass Dávid, Csete Mária**

Optimalizált nanoplazmonika ..... 14

**Biró László, Csehi András**

A nátrium-jodid molekula fotogerjesztésének szabályozása terahertzes pulzusokkal..... 21

**Buzády Andrea, Gálos Réka, Makkai Géza, Xiaojun Wu, Tóth György, Kovács László, Almási Gábor, Hebling János, Pálfalvi László**

Magnéziummal adalékolt sztöchiometrikus lítium- niobát hőmérsékletfüggő dielektromos paraméterei a terahertzes tartományon ..... 27

**Csontos János, Pápa Zsuzsanna, Nagyillés Bálint, Tóth Zsolt, Budai Judit**

Femtosekundumos pumpa-próba ellipszometria ..... 34

**B. Fekete, M. Kiss, A. A. Shapolov, S. Szatmari, S.V. Kukhlevsky**

Soft x-ray AR<sup>+</sup> lasers and wake-field electron accelerators by using low-current capillary z-pinch ..... 39

**Luca Fésűs, Ludovic Martin, Norbert Wikonkál, Márta Medvecz, Robert Szipócs**

Low concentration eosin staining for high chemical contrast nonlinear microscope mosaic imaging of skin alterations in pseudoxanthoma elasticum ..... 45

**Roland Flender, Adam Borzsonyi, Viktor Chikan**

Numerical simulations of THz pulse generation with two-color laser pulses in the 2.15-15.15  $\mu\text{m}$  spectral range ..... 52

**Roland Flender, Adam Borzsonyi, Viktor Chikan**

Numerical study of terahertz pulse generation from few-cycle laser pulses in the mid-IR spectral range..... 56

<b>Tamás Gera, Eszter Nagy, Tamás Smausz, Zsolt Homik, Judit Kopniczky, Judit Budai, Tibor Ajtai, Rita Ambrus, Piroska Szabó-Révész, Béla Hopp</b>	
Size reduction of drug particles by Pulsed laser ablation technique .....	59
<b>Gombkötő Ákos, Varró Sándor, Keresztes Zoltán, Gábor Bence, Földi Péter</b>	
A magasfelharmonikus-keltés kvantumoptikai vonatkozásai .....	64
<b>Hack Szabolcs, Majorosi Szilárd, Benedict Mihály, Varró Sándor, Czirják Attila</b>	
Egy-ciklusú, közeli infravörös lézerimpulzussal vezérelt Alagutazásos ionizáció fázisteres vizsgálata.....	69
<b>Gábor Horváth, Andor Körmöczi, Tamás Szörényi, Zsolt Geretovszky</b>	
The effect of seam geometry on properties of laser welded nickel coated stainless steel stripes .....	74
<b>Illés Gergő, Sarkadi Balázs, Mészáros Anna, Tibai Zoltán, Pálfalvi László, Almási Gábor, Hebling János, Tóth György</b>	
Terahertzes impulzusok előállítása leképzés nélküli mikrostrukturált lítium-niobát kristályban.....	81
<b>Kasza József, Dombi Péter, Földi Péter</b>	
Az atomi magasfelharmonikus-keltés polarizációfüggése diszkrét bázis esetén .....	87
<b>Miklós Á. Kedves, Márk Aladi, József S. Bakos, Gábor Demeter, Gagik Djotyan, Péter Ignác, Béla Ráczkevi, Zsuzsa Sörlei, János Szigeti</b>	
Laser particle acceleration technologies: probe laser beam diagnostics of extended plasmas .....	91
<b>Kis Mariann, James Smart, Maróti Péter</b>	
Citokrómok szerepe fotoszintetizáló bíborbaktériumokban .....	97
<b>Kohut Attila, Horváth Viktória, Kéri Albert, Kopniczky Judit, Hopp Béla, Galbács Gábor, Geretovszky Zsolt</b>	
Egy- és többkomponensű plazmonikus nanorészecskék szikra-plazma alapú előállítása és alkalmazásuk a felületerősített Raman spektroszkópiában .....	102
<b>Kondász Bence, Hopp Béla, Smausz Kolumbán Tamás</b>	
A vegyes szórás mint probléma LASCA perfúziós mérések esetén .....	108
<b>Bence M. Kovács, Zoltán L. Horváth, Attila P. Kovács</b>	
Investigation of ultrashort cladding pulses generated in single mode optical fibers .....	112
<b>Zs. Kovács, B. Gilicze, S. Szatmári, I. B. Földes</b>	
Nagy intenzitású ultraibolya lézerekkel keltett plazmák kontrasztfüggő abszorpciója és dinamikája .....	118
<b>Andor Körmöczi, Gábor Horváth, Tamás Szörényi, Zsolt Geretovszky</b>	
On the electrical resistance of laser joined metal sheets .....	125



<b>Lenk Sándor, Sági-Kazár Máté, Illés Levente, Solymosi Katalin, Solti Ádám, Barócsi Attila</b> Növényi minták fluoreszcencia lecsengési idejének vizsgálatai.....	132
<b>Magashegyi István, Földi Péter</b> Analitikus módszer szilárdtestekben lézerimpulzus által elmozdított töltések kiszámítására .....	137
<b>Szilárd Majorosi, Mihály G. Benedict, Szabolcs Hack, Attila Czirják</b> Orbital angular momentum of high harmonics generated by a neon jet excited with a strong twisted laser pulse.....	143
<b>Mechler Mátyás, Bódog Ferenc, Ádám Péter</b> Bináris időbeli multiplexelésen alapuló periodikus egyfotonforrások optimalizálása .....	150
<b>Portik Attila, Kálmán Orsolya, Kiss Tamás</b> Iterált harmadfokú kvantuminformaticai protokollok .....	157
<b>Sarkadi Tamás, Holló Csaba, Erdei Gábor, Barócsi Attila, Galambos Máté, Koppa Pál</b> Összefonódott fotonpár források fejlesztése .....	162
<b>Áron Sipos, Rita Nagypál, Ferenc Sarlós, Géza I. Groma</b> Vibrational relaxation demonstrated in nicotinamide adenine dinucleotide applying machine learning based analysis.....	168
<b>Szabó Krisztián, Csehi András</b> Többfotonos rezonancia-fokozott ionizációban kilépő elektronok dinamikus interferenciája .....	174
<b>S. Szatmári, Z. Szántó, R. Bognár, R. Dajka, I. B. Földes</b> Status of short-pulse KrF amplifier research and development at Hill, Szeged .....	181
<b>Róbert Szipócs, Luca Fésűs, Ádám Krolopp, Ernő Hettinger, Lajos Vass, Norbert Wikonkál, Péter Török, Gábor Molnár, Gábor Tamás</b> 20 MHz, sub-ps, tunable ti:sapphire laser system for real time, stain free, in vivo histology of the skin.....	188
<b>Tóth A., Csehi A., Halász G.J., Vibók Á.</b> Fotodisszociáció szabályozása THz pulzussal indukált Stark effektussal .....	192
<b>Tóth György, Pálfalvi László, Tibai Zoltán, Krizsán Gergő, Fülöp József András, Almási Gábor, Hebling János</b> Új generációs Terahertzes Impulzus források.....	199
<b>Vukovity Krisztina, Grósz Tímea, Horváth Mercédesz, Kovács Attila Pál</b> Nagy módusátmérőjű fotonikus kristályszal diszperziós görbéinek meghatározása ablakolt Fourier-transzformációs spektrális interferometriával.....	204
<b>Névmutató.....</b>	210

## AZ ATOMI MAGASFELHARMONIKUS-KELTÉS POLARIZÁCIÓFÜGGÉSE DISZKRÉT BÁZIS ESETÉN

Kasza József<sup>1,3</sup>, Dombi Péter<sup>1,2</sup>, Földi Péter<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>ELI-ALPS, ELI-HU Non-Profit Kft., Wolfgang Sandner utca 3, 6728 Szeged

<sup>2</sup>Wigner Fizikai Kutatóközpont, Konkoly-Thege M. út 29-33, 1121 Budapest

<sup>3</sup>Szegedi Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék, Tisza L. krt. 84-86, 6720 Szeged

DOI: <https://doi.org/10.14232/kvantumelektronika.9.16>

### 1. Bevezetés

Atomi rendszerek esetén a magasrendű felharmonikusok keltése jól ismert, mind kísérletileg [1,2], mind pedig elméleti úton sokat tanulmányozott jelenség [3,4]. A legelterjedtebb elméleti magyarázat ráadásul jól interpretálható, szemléletes képet szolgáltat: Az erős lézertér kiszakítja az atomi elektront a mag vonzásából, felgyorsítja azt, de a következő optikai félciklusban az elektron visszatér, és a mozgása során nyert energiát részben magasfelharmonikusok formájában bocsátja ki. Ehhez természetes az szükséges, hogy az elektron valóban „visszatérjen”, azaz a második optikai félciklusban hullámfüggvényének jelentős része fedjen át a kiinduló atommal. Ez lineárisan polarizált gerjesztő tér esetén meg is történik, ugyanakkor könnyen látható módon a cirkulárisan poláros tér olyan klasszikus trajektóriákat hoz létre, amelyek nem térnek vissza a kiindulópontra. Ezt a valós térben végzett kvantummechanikai számítások is igazolják. Természetesen a magasfelharmonikus-keltés polarizációfüggése kísérletileg is ismert, sőt technológiai szempontból is alkalmazott tény (polarizációs kapuzás [5]). Érdekes módon több atomot tartalmazó klaszterek esetén is kimutatható a polarizációfüggés [6,7].

Felmerül a kérdés, hogy ha nem a valós térben, hanem egy diszkrét bázison írjuk le a jelenséget, hogyan interpretálható ez a tapasztalat. Hidrogén atomra gondolva, ez a bázis természetesen nem lehet a kötött állapotok szokásosan  $n, l, m$  kvantumszámokkal indexelt rendszere, hiszen azok nem tartalmazzák a pozitív energiás, szórt állapotokat, amelyek szerepe a fentiek alapján alapvető a felharmonikusok létrejötte szempontjából. Ezzel szemben az ún. Sturm-állapotok [8] olyan bázist alkotnak, amelyek diszkrét rendszert alkotnak, ugyanakkor tartalmazzák a szórt állapotokat is. A továbbiakban ezt a bázist alkalmazva mutatunk rá, hogy az átmeneti dipólmomentumok szimmetria tulajdonságai hogyan vezetnek a magasfelharmonikus-keltés polarizációfüggéséhez. Eredményeink egyrészt a folyamat egy alternatív interpretációját adják, másrészt rávilágítanak arra, hogy az átmeneti dipólmomentum mátrixelemek fázisa ebben az esetben is jelentős szerepet játszik. (Egyetlen átmenet esetén ez a fázis nem játszik szerepet, de több átmenetet figyelembe véve a relatív fázisok természetesen lényegesek. Érdekes módon pl. szilárdtestek esetén erre csak az utóbbi években mutattak rá [9].)

### 2. Modell

Az atomi méreteket figyelembe véve a dipólközelítés nagyon pontos leírást ad már optikai tartományba eső gerjesztés esetén is. Hosszmértéket használva írhatjuk, hogy

$$H = H_{at} - \mathbf{E}(t)\mathbf{D},$$

ahol  $H_{at}$  a szabad atom Hamilton-operátora,  $\mathbf{E}(t)$  a lézertér elektromos tere, míg  $\mathbf{D}$  az atomi dipólmomentum operátora. A továbbiakban először az ezekhez az operátorokhoz tartozó mátrixokat

határozzuk meg a Sturm-bázisban. Ennek a bázisnak ez elemei koordinátareprezentációban csupán a radiális részben különböznek a szokásos kötött hidrogén állapotoktól. Ez azt is jelenti, hogy a kontinuum reprezentációjában most gömbfüggvények írják le az állapotok szögfüggését, ilyen értelemben "strukturált" kontinuumról beszélhetünk. A szórt állapotok reprezentálhatóságának az ára az, hogy  $H_{at}$  nem diagonális ebben a bázisban. Mivel a kiválasztási szabályokat a hullámfüggvények szögfüggő része határozza meg, azok ugyanazok, mint a kötött állapotok esetében. Az egyszerűség kedvéért a bejövő elektromágneses impulzust az x-y síkban polarizáltnak tekintjük, így most csak  $D_x = eX$  és  $D_y = eY$  játszik szerepet, ami a  $\Delta l = \pm 1, \Delta m = \pm 1$  szabályokat jelenti.

A numerikus megoldhatóságot figyelembe véve ennek a bázisnak egy véges részét használjuk, ami praktikus szempontból nem jelent megszorítást, mivel akkora bázist fogunk használni, amely esetén – adott intenzitású külső tér esetén – további bázisállapotok figyelembe vétele már nem befolyásolja az eredményt.

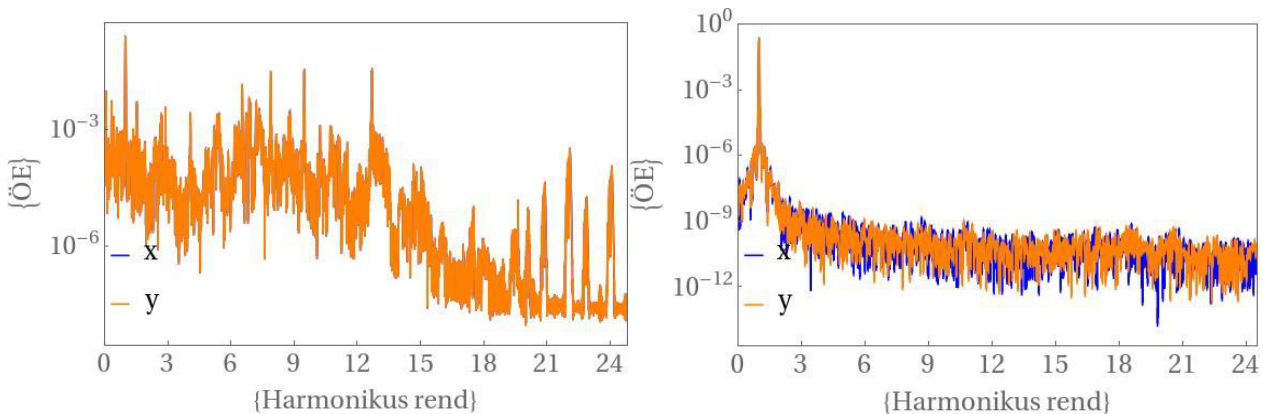
A továbbiakban két típusú, cirkulárisan és (az x irányban) lineárisan polarizált elektromos teret fogunk tanulmányozni. Ekkor

$$DE_{lin} = f(t)\cos(\omega t)(D_x E_0) , \quad DE_{cirk} = f(t)E_0(D_x \cos(\omega t) + D_y \sin(\omega t)), \quad (1)$$

ahol az  $f(t)$  burkolófüggvény lassan változik a periódusidőhöz képest. A továbbiakban  $f(t) = \cos^2(t/\tau)$ , és  $\tau$ -t úgy választjuk meg, hogy az intenzitás maximumát tekintve viszonylag hosszú, legalább 10 ciklusú impulzusokat vizsgálhassunk.

### 3. Eredmények

A felharmonikusok frekvencia szerinti eloszlását a  $\mathbf{D}$  operátor x és y komponensének időfüggő várható értékéhez tartozó intenzitáspektrumok összege adja. A két típusú gerjesztés esetén a számításainkból adódó spektrumok láthatók az alábbi két ábrán, ahol a függőleges tengelyen önkényes egységeket alkalmaztunk.



1/a Ábra: Lineárisan poláros fényvel gerjesztett atom intenzitáspektruma (A számításnál az x és y tengellyel 45 fokos szöget bezáró polarizációt használtunk)

1/b Ábra: Cirkulárisan poláros fényvel gerjesztett atom válaszjele. (Kékkel a dipól operátor x komponensének várható értékéhez tartozó intenzitáspektrum)

Amint láthatjuk, ezek az eredmények teljesen egybecsengenek azzal, amit mind kísérleti úton, mind pedig a mostani modelltől eltérő elméleti számítások alkalmazásával kaphatunk.

Számításaink azt mutatják, hogy a felharmonikusok hiánya nagyon erősen függ attól, hogy az átmeneti dipólmomentum mátrixelemek (azaz  $D$  mátrixelemei) fázisai pontosan mekkorák is. Ha ezeket a fázisviszonyokat elhanyagoljuk (pl. azzal, hogy minden mátrixelemnek csak az abszolút értékét tekintjük), akkor cirkulárisan poláros gerjesztés esetén is kapunk felharmonikusokat.

Mindez azt sugallja, hogy a magasfelharmonikus-keltés polarizációfüggése kvantummechanikai értelemben vett interferenciajelenségeken múlik. A pontos részletek azt mutatják, hogy ebben az esetben ez nem azt jelenti, hogy maguk az időfüggő Schrödinger egyenlet megoldásai is csak alacsony frekvenciás ( $\sim\omega$ ) komponenseket tartalmaznak. Ez abban a kontextusban érdekes, hogy a probléma sok hasonlóságot mutat a jól ismert kétnívós rendszerek esetével. Ilyenkor persze nincs értelme a kontinuumról beszélni, de az analógia szembeötlő. Kétnívósna tekinthető rendszerek cirkulárisan poláros fényvel történő gerjesztésekor az úgynevezett forgóhullámú közelítés (azaz az átmenetei és a gerjesztő frekvencia összegéhez tartozó oszcillációk elhanyagolása) egzakt, azaz valójában nem is közelítés [10]. Ez azzal is jár, hogy folytonos, monokromatikus gerjesztés esetén a dinamika analitikusan megoldható, és a felharmonikusok teljesen hiányoznak. Esetünkben a probléma összetettebb, de a forgóhullámú közelítésnek megfelelő

$$DE_{cirk} = f(t)E_0(D^+ \exp(-i \omega t) + D^- \exp(i \omega t)) \quad (2)$$

összefüggés – amely a dipólmomentum operátor komponenseinek szimmetria tulajdonságaiból fakad – most is fennáll. Itt  $D^\pm = D_x \pm iD_y$ , és ezekre az operátorokra a  $\Delta m = 1$ , illetve  $\Delta m = -1$  kiválasztási szabályok vonatkoznak. Ez azt jelenti, hogy a gerjesztésben megjelenő pozitív (negatív) frekvenciás részek pusztán növelhetik (csökkenthetik) az  $m$  kvantumszámot. Ez azonban esetünkben nem ad könnyen felírható megoldást, és a numerikus módszerek azt mutatják, hogy a rendszer állapotát megadó időfüggő szuperpozícióban megjelennek a felharmonikusok. Emellett az is igaz, hogy nehéz rámutatni a dinamikának olyan kvalitatív részletére, amely az (1) egyenletben részletezett két esetben különbözik. Másszóval, a cirkulárisan poláros gerjesztés esetén hiányzó felharmonikusok nem magától értetődő destruktív interferencia következményei.

Ezzel szemben a dipólmomentum operátor komponensek várható értékének időfüggése már nem tartalmaz felharmonikusokat (így azok a spektrumból is hiányoznak). Ez számításaink szerint bármilyen kezdőállapotra igaz. Így a diszkrét bázist tekintve a dipólmomentum operátorok komponenseinek a szimmetria tulajdonságai és a forgóhullámú közelítés érvényessége vezet oda, hogy az (1) egyenletben részletezett két típusú gerjesztés kvalitatívan különböző felharmonikus spektrumhoz vezet. Ennek az eredménynek az alátámasztása részben numerikus számításokon alapul, jelenleg folyó kutatásaink arra irányulnak, hogy a szimmetrián alapuló effektusok analitikus részleteit felderítsük.

#### 4. Összefoglalás

A fentiekben azt a kérdést jártuk körül, hogy az atomokon történő magasfelharmonikus-keltés polarizációfüggése hogyan jelenik meg egy olyan modellben, ahol a dinamikát nem közvetlenül a valós térben írjuk le. Diszkrét, de a szórt állapotokat is tartalmazó bázist alkalmazva megmutattuk,

hogy a jelenség létrejöttében kulcsszerepet játszanak a dipólmomentum mátrixelemek fázisai. Tágabb értelemben ezen mátrixelemek térbeli, és a gerjesztő impulzus időbeli szimmetriájának az együttese határozza meg a felharmonikus komponensek megjelenését.

### Köszönetnyilvánítás

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg. **EFOP-3.6.2-16-2017-00005-Ultragyors fizikai folyamatok atomokban, molekulákban, nanoszerkezetekben és biológiai rendszerekben.**

Munkánkat támogatták továbbá TUDFO/47138-1/2019-ITM FIKP és a GINOP-2.3.2-15-2016-00036 számú pályázatok. Magát az ELI-ALPS projektet (GINOP-2.3.6-15-2015-00001) az Európai Unió és az Európai Regionális Fejlesztési Alap támogatja.

### Irodalom

- [1] A. McPherson, G. Gibson, H. Jara, U. Johann, T. S. Luk, I. A. McIntyre, K. Boyer, and C. K. Rhodes, *J. Opt. Soc. Am. B* **4**, 595 (1987).  
<https://doi.org/10.1364/JOSAB.4.000595>
- [2] M. Ferray, A. L'Huillier, X. F. Li, L. A. Lompre, G. Mainfray, and C. Manus, *J. Phys. B: At. Mol. Phys.* **21**, L31 (1988).  
<https://doi.org/10.1088/0953-4075/21/3/001>
- [3] P. B. Corkum, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.71.1994>
- [4] M. Lewenstein, P. Balcou, M. Y. Ivanov, A. L'Huillier, and P. B. Corkum, *Phys. Rev. A* **49**, 2117 (1994).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.49.2117>
- [5] G. Sansone *Phys. Rev. A* **79**, 053410 (2009)  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.79.053410>
- [6] H. Ruf, C. Handschin, R. Cireasa, N. Thiré, A. Ferré, S. Petit, D. Descamps, E. Mével, E. Constant, V. Blanchet, B. Fabre, and Y. Mairesse, *Phys. Rev. Lett.* **110**, 083902 (2013).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.110.083902>
- [7] B. Bódi, M. Aladi, P. Rácz, I. B. Földes, and P. Dombi, *Opt. Express* **27**, 26721 (2019).  
<https://doi.org/10.1364/OE.27.026721>
- [8] O. Goscinski, *Advances In Quantum Chemistry*, volume 41, (2002)  
[https://doi.org/10.1016/S0065-3276\(02\)41046-5](https://doi.org/10.1016/S0065-3276(02)41046-5)
- [9] S. Jiang, H. Wei, J. Chen, C. Yu, R. Lu és C. D. Lin, *Phys. Rev. A* **96** 053850 (2017).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.053850>
- [10] P. Meystre, M. Sargent III, *Elements of Quantum Optics* (Springer, 2007.)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-74211-1>