

**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 posztterek 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-pinches ..... 39

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

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 Szipőcs, 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 kristálysál diszperziós görbéinek meghatározása ablakolt Fourier-transzformációs spektrális interferometriával.....	204
<b>Névmutató.....</b>	<b>210</b>

# EGY-CIKLUSÚ, KÖZELI INFRAVÖRÖS LÉZERIMPULZUSSAL VEZÉRELT ALAGUTAZÁSOS IONIZÁCIÓ FÁZISTERES VIZSGÁLATA

Hack Szabolcs<sup>1</sup>, Majorosi Szilárd<sup>2</sup>, Benedict Mihály<sup>2</sup>, Varró Sándor<sup>1,3</sup> és Czirják Attila<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>ELI-ALPS, Szeged, Magyarország

<sup>2</sup>Szegedi Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék, Szeged, Magyarország

<sup>3</sup>Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest, Magyarország

DOI: <https://doi.org/10.14232/kvantumelektronika.9.13>

## 1. Bevezetés

Az atomok erős lézertérben történő ionizációja alapvető szerepet játszik az attoszekundumos fizikában [1]: egy elegendően nagy intenzitású lézerimpulzus hatására az elektron atomi kötött állapotából (általában alagutazással) a kontinuumba távozik. Ez a rendkívül sikeres „három-lépéses modell” első lépése, amely a magas rendű harmonikus keltés és számos attoszekundumos mérés és eljárás elméleti alapja. Jelenleg az alagutazási idő [2] és az alagútból való kilépést jellemző impulzus az alagutazásos ionizáció alapvető fontosságú problémái, mind a kvantumelmélet, mind az attoszekundumos fizikában jellemző kísérleti eredmények értelmezése szempontjából. Az elmúlt években több csoport publikált releváns kísérleti eredményeket [3-7], általában az „attoclock” módszerrel. Bár ezeknek a méréseknek az értelmezése általában nehéz, és vannak ellentmondások is, a cirkulárisan polarizált lézerimpulzussal atomi hidrogén esetén kapott legújabb mérési eredmények [7] megegyeznek látszanak a korábbi elméleti eredménnyel [8,9], miszerint nincs késés a lézerimpulzus csúcsa és az elektronnak az alagút kijáratánál történő megjelenése között.

Kevésbé felderítettek az alagutazásos ionizáció ilyen részletei lineárisan polarizált lézerimpulzus esetén, annak ellenére, hogy ez a legelterjedtebb módszer izolált attoszekundumos impulzusok előállítására: ha a lézerimpulzus elektromos térerőssége csak a fő csúcsot tartalmazó félciklus alatt halad meg egy bizonyos küszöbértéket [10], akkor az alagutazásos ionizáció gyakorlatilag csak ebben a félciklusban lehetséges.

Jelen közleményünkben egyetlen atomnak egy lineárisan polarizált lézerimpulzus hatására történő alagutazásos ionizációját elemezzük a klasszikus fázistéren a Wigner-függvény segítségével. Így a korábbiaknál jobb klasszikus elektronpályákat kaphatunk, amelyek a kvantum-momentum függvényen alapuló kezdő impulzussal indulnak, és nagyon jól egyeznek a későbbi kvantumos időfejlődéssel is. Atomi egységeket használunk.

## 2. Elméleti modell és numerikus szimulációk

Egy egyszerűsített elméleti modell keretein belül dolgozunk: dipól-közelítést használunk az egyetlen aktív elektronnal rendelkező atom és a klasszikus elektromágneses mező kölcsönhatásának leírására, ún. hossz-mértékben. A közeli infravörös lézerimpulzus elektromos terét szinusz-négyszet burkolóval modellezzük, a lineáris polarizáció iránya a z-tengely:

$$E_z(t) = F \cdot \sin^2\left(\frac{\pi t}{NT}\right) \cos\left(\frac{2\pi t}{T} + \phi\right),$$

itt  $F$  a térerősség csúcserőssége,  $N$  az impulzus  $T$  periódusidejű optikai ciklusainak száma,  $\phi$  pedig a vivő-burkoló fáziskülönbség (CEP). Jelen munkánkban  $F = 0.06$ ,  $N = 3$ ,  $T = 110$  (ami kb. 800 nm központi hullámhossznak felel meg) és  $\phi = 0$ . Ezekkel a paraméterekkel a lézerimpulzus időbeli hossza (intenzitás félértékszélességben) a periódusidő közelében van, azaz közel egy-ciklusú.

Ez a lézerimpulzus gerjeszti a hidrogénatomot, amely kezdetben alapállapotban van. Az elektron hullámfüggvénye mindvégig független marad a z-tengely körüli azimutális szögtől, ezért a háromdimenziós (3D) időfüggő Schrödinger-egyenletet célszerűen henger-koordináta-rendszerben írjuk fel, rögzített atommagot feltételezve:

$$i \frac{\partial}{\partial t} \Psi(z, \rho, t) = \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{\partial^2}{\partial z^2} + \frac{\partial^2}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial \rho} \right) - \frac{1}{\sqrt{z^2 + \rho^2}} + E_z(t)z \right] \Psi(z, \rho, t)$$

A közelmúltban kifejlesztett algoritmusunk [11] térben és időben negyedrendben pontosan oldja meg numerikusan a fenti egyenletet, a Coulomb-singularitást peremfeltétellel figyelembe véve. A lézerimpulzus csúcsértékét úgy állítottuk be, hogy a Keldysh-paraméter mindvégig 1 alatt maradjon és a csúcs közelében közel 1 legyen, így az alagutazásos ionizáció a teljes impulzus alatt lehetséges legyen, ugyanis ez a releváns a gáz-HHG jelenleg használatos kísérleti technikai szempontjából.

Mivel a lényeges kvantum-dinamika a lézer polarizációs irányában történik, és a fázisteres elemzés 1-dimenzióban (1D) a legkönnyebben áttekinthető, kiszámítjuk az (általában kevert) 1D-re redukált kvantumállapot sűrűségmátrixát a z-tengely mentén a 3D numerikus megoldásból

$$\varrho(z, z', t) = 2\pi \int_0^\infty \Psi^*(z, \rho, t) \Psi(z', \rho, t) \rho d\rho$$

amiből az alábbi definíció szerint számítjuk ki a Wigner-függvényt:

$$W(z, p_z, t) = \frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^\infty \varrho(z + \zeta, z - \zeta, t) \exp(2ip_z \zeta) d\zeta$$

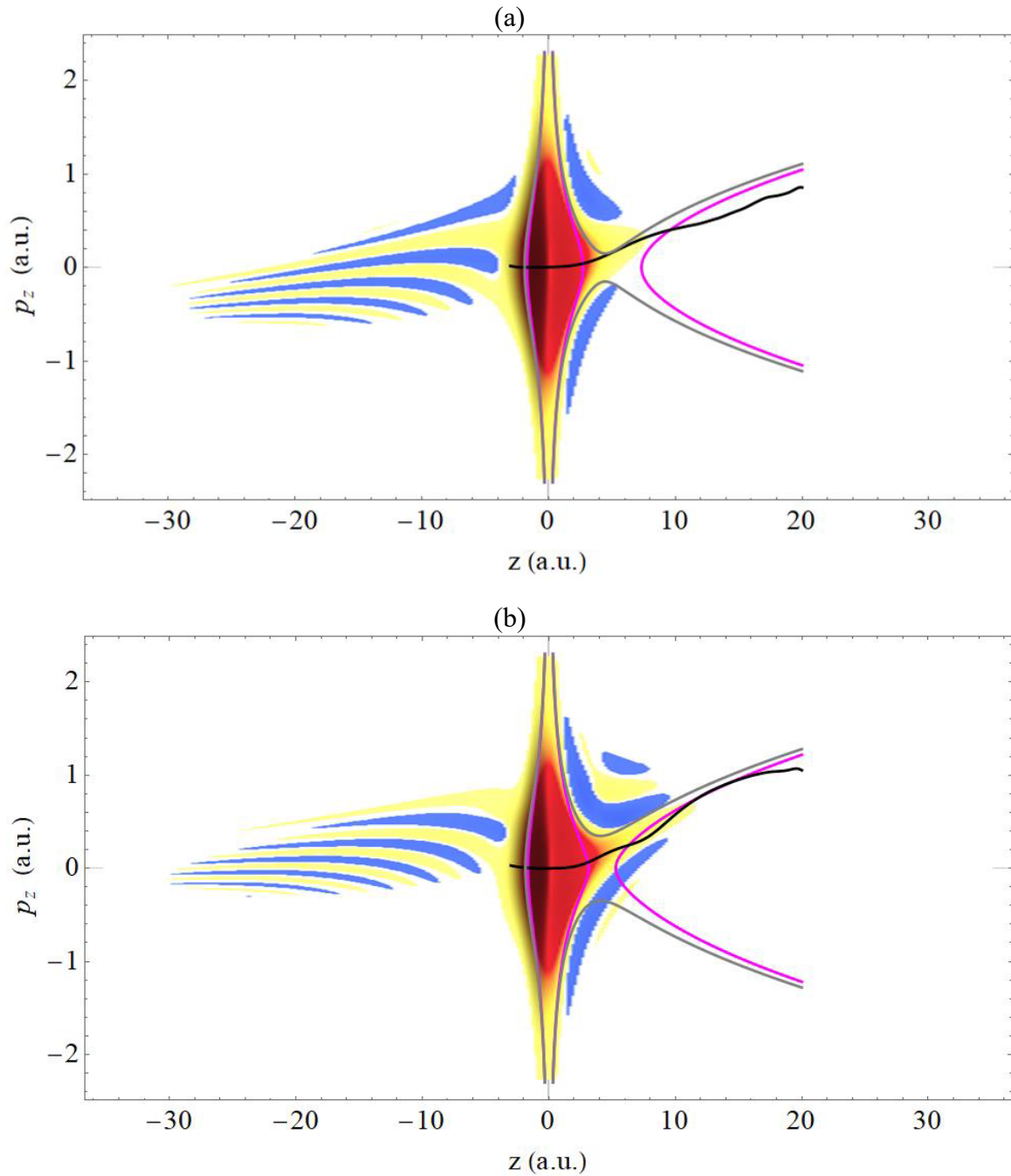
A Wigner-függvényt, negatív értékei és nem-klasszikus mozgásegyenlete miatt, általánosan nem lehet klasszikus fázistér-eloszlásként értelmezni. Azonban a Wigner-függvény alábbi

$$P_n(z, t) = \int_{-\infty}^\infty p_z^n W(z, p_z, t) dp_z$$

momentumai alapján kiszámolhatunk egy helytől függő átlagos impulzus az alábbi definícióval:

$$q(z, t) = \frac{P_1(z, t)}{P_0(z, t)}$$

amelyet általában kvantum-momentum függvénynek szokás nevezni. Ez a fizikai mennyiség, hasonlóan a valószínűségi áramsűrűséghez, nem additív: két kvantumállapot szuperpozíciója esetén az eredő kvantum-momentum függvényben általában interferencia-tagok is fellépnek.



I. ábra

Két pillanatkép a lézerimpulzus hatására a hidrogénatomból kilépő elektron Wigner-függvényéről: (a) 10 atomi időegységgel a lézerimpulzus csúcsa előtt és (b) a lézerimpulzus csúcstétékénél. A Wigner-függvényt a kék-fehér-sárga-vörös színskálával ábráztuk: a kék negatív, a fehér lényegében zéró, majd a sárgától a vörösig növekvő pozitív függvényértéket jelent. A kvantum-momentum függvény a fekete görbe mutatja. A lila görbe egy olyan részecske fázistér-trajektóriája az atommag és a lézertér pillanatnyi eredő potenciáljában, amelynek energiája megegyezik az elektron energiájának pillanatnyi várható értékével. Ugyanebben a potenciálban a szürke görbén mozogva egy olyan részecske, aminek energiája az elektron energia pillanatnyi várható értékének és szórásának összege.

### 3. Eredmények

Az 1. ábra alapján mutatjuk be, hogyan segíti a Wigner-függvény és a kvantum-momentum függvény a lézerimpulzus hatására bekövetkező ionizációt elemzését. A  $z = 0 - 10$  a.u. tartományban a Wigner-függvényben kialakuló, ionizációs folyamatot jelző hullámok ill. „nyúlványok” fő vonulatát jól követi a kvantum-momentum függvény, hasonlóan egy korábbi munkánkhoz [12], az alatta és felette kialakuló oszcillációk pedig kvantum-interferenciát jeleznek. A berajzolt állandó energiájú fázistér-trajektóriák közül a lila színű egyben az alagút tartomány pillanatnyi határát is megadja, a szürke pedig egy olyan mozgáshoz tartozik, amelyik energiája már elég nagy ahhoz, hogy a pillanatnyi potenciálgáton átjutva vezessen ionizációhoz. Utóbbi alakja jól követi a Wigner-függvény kontúrját az alagút tartományában is.

Az energiaviszonyok gondos numerikus elemzése rávilágít arra, hogy lézerimpulzus hatására az elektron energiájának szórása elég nagy lesz ahhoz, hogy a potenciálgát felett átjutva is megnyílik az ionizáció lehetősége, annak ellenére, hogy az energia várható értéke valójában (kis mértékben) csökken a kezdeti állapothoz képest, miközben a lézerimpulzus a fő csúcsához közeledik (összhangban a Stark-effektussal). Tehát, bár látszólag mindvégig az alagutazásos ionizáció tartományban maradnak a paraméterek, valójában a potenciálgát felett ionizációs csatorna is megnyílik. Az alagútnak megfelelő illetve azzal kívülről szomszédos fázistér-tartományban a Wigner-függvény hullámvonulatai és oszcillációi valójában az alagúteffektussal illetve a potenciálgát felett átjutó komponensek kvantum-interferenciáját mutatják. Az alagúteffektussal átjutó komponens alagút tartományon kívüli kezdeti kvantum-momentum függvénye lényegében (a numerikus módszer pontosságával) zéró, ahogy azt az alagutazás energiaviszonyai alapján várnánk is (az alagút tartomány kijárata az a hely, ahol a kinetikus energia 0). Ez azonban nem jelenti azt, hogy az alagutazással kijutó komponens ne befolyásolná az eredő kvantum-momentum függvényt: utóbbi tartalmazza az előbbiből származó interferencia tagokat is.

A kvantum-momentum függvénynek az alagút kijáratában felvett értékét kézenfekvő egy klasszikus részecske-propagáció kezdeti impulzus értékének választani, de ettől kissé eltérő megfontolások is kvalitatívan hasonló fázistér-trajektóriákat eredményeznek. Ezek vizsgálata során szintén jól használható a kvantum-momentum függvény: ha a részecske aktuális helyzete a fázistérben jól követi a kvantum-momentum függvény időbeli viselkedését, akkor a klasszikus trajektória jó összhangban van a kvantumos időfejlődéssel.

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

### Irodalom

- [1] F. Krausz and M. Ivanov, Rev. Mod. Phys. **81**, 163–234 (2009).  
<https://doi.org/10.1103/RevModPhys.81.163>
- [2] A. S. Landsman and U. Keller, Physics Reports **547**, 1 – 24 (2015).  
<https://doi.org/10.1016/j.physrep.2014.09.002>

- [3] P. Eckle, et al., *Science* **322**, 1525–1529 (2008).  
<https://doi.org/10.1126/science.1163439>
- [4] D. Shafr, et al., *Nature* **485**, 343 (2012).  
<https://doi.org/10.1038/nature11025>
- [5] A. S. Landsman and U. Keller, *J. Phys. B* **47**, 204024 (2014).  
<https://doi.org/10.1088/0953-4075/47/20/204024>
- [6] N. Camus, et al., *Phys. Rev. Lett.* **119**, 023201 (2017).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.023201>
- [7] U. S. Sainadh, et al., *Nature* **568**, 75–77 (2019).  
<https://doi.org/10.1038/s41586-019-1028-3>
- [8] L. Torlina and O. Smirnova *Phys. Rev. A* **86**, 043408 (2012).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.86.043408>
- [9] H. Ni, et al., *Phys. Rev. A* **97**, 013426 (2018).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.97.013426>
- [10] M. Lewenstein, et al., *Phys. Rev. A* **49**, 2117 (1994).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.49.2117>
- [11] Sz. Majorosi and A. Czirják, *Computer Physics Communications* **208**, 9–28 (2016).  
<https://doi.org/10.1016/j.cpc.2016.07.006>
- [12] A. Czirják, et al., *Opt. Commun.* **179**, 29–38 (2000).  
[https://doi.org/10.1016/S0030-4018\(99\)00591-X](https://doi.org/10.1016/S0030-4018(99)00591-X)