

# 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 lézermalabot 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 Măgureleiben 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: Attoszekundumos 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 főtítkárral, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztővel.

Kéziratokat nem őrünk 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)



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 frekvenciaképből azt jelenti, hogy a rendszert jellemző fizikai mennyiségek spektrumában a  $\nu$  gerjesztő frekvencia mellett más komponensek is hangsúlyosak. Jellemzően  $\nu$  egész számú többszörösei, 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.

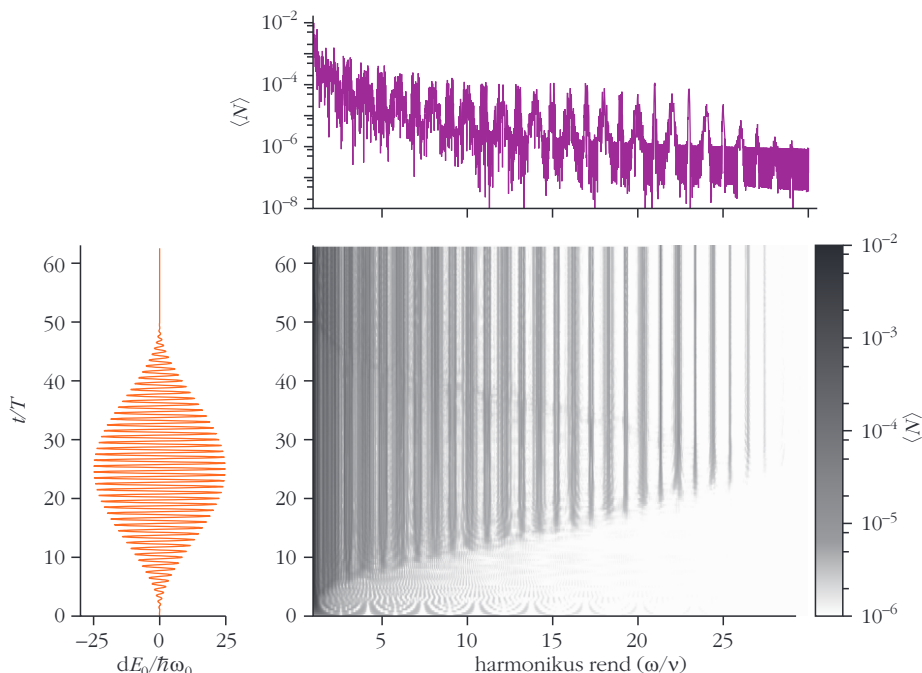
A magas felharmonikusokat keltő intenzív lézerterek tipikus térerőssége a GV/m nagyságrendű. Ezen tartományon – a szokásos ökölszabály értelmében – a gerjesztő impulzust elegendő klasszikusan leírunk, azaz kvantálás nélkül, pusztán időfüggő külső mezőként kezelünk.

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.

Az erős lézertér magas foton-számot is jelent, amit elhanyagolhatóan változtatnak meg az anyaggal való kölcsönhatás során fellépő abszorpció/szórás/emisziós folyamatok. Mindez azonban nem igaz a kis intenzitású felharmonikusokra, amelyekben, amint azt később látni fogjuk, az átlagos foton-szám az egységnyinél sokkal kisebb. Ennek ellenére a felharmonikus módusok terének kvantált kezelése, a HHG folyamatának a kvantumoptika eszközeit használó leírása még csak jelenleg formálódik. A továbbiakban a témában elért első eredmények közül olvashatunk néhányat, lényegében a [6] alapján.



1. ábra. Nagy panel: a foton-számok várható értéke a hozzájuk tartozó,  $v$  egységekben mért frekvencia és az idő függvényében ( $T = 2\pi/v$ ). Bal oldalon a gerjesztő impulzus térerősségének időfüggése látható, a dimenziótlan egység a  $H_{ext}$  kölcsönhatás és az atomi nívók energiakülönbségének arányát fejezi ki. A felső ábrán a foton-számok gerjesztés utáni várható értéke látható.

## Modell

A jelenség tárgyalásakor ahhoz az 1990-es években gyakran használt modellhez [7–10]

érdeemes visszanyúlni, amely egyetlen, kétállapotú atom kölcsönhatását tekinti a gerjesztő fényvel, és így írja le a HHG folyamatát. Ez több, a kísérletekkel kvalitatív egyezést mutató eredményre vezetett, például segítségével a spektrum jellege is megjósolható. (Gázminták esetén a későbbiekben egy másik, az úgynevezett háromlépcsős modell [11] vált a leggyakrabban alkalmazottá.) Nyilvánvaló, hogy a kétnívós-nak gondolt kvantum részecske nem adhatja vissza a valódi atom dinamikájának gazdagságát (különösen a kontinuum szerepét), ugyanakkor a probléma vizsgálatának szempontjából jó kiindulópontot szolgáltat. (Továbbá szilárdtest-rendszerek esetén – legáltalábbis egyelektron képben – realiztikusnak tekinthető leírást ad.)

Tekintsünk tehát egy kétnívós „atomot”, amelyet egy erős, klasszikus elektromágneses impulzus gerjeszt. Emellett a gyenge, másodlagos sugárzást írjuk le sok, különböző frekvenciájú kvantált elektromágneses módussal, amelyek kezdetben vákuumállapotban vannak (azaz a hozzájuk tartozó foton-szám nulla). Az elektromágneses terek a dipólmomentum-operátoron keresztül csatolódnak az atomhoz, függetlenül attól, hogy kvantált vagy klasszikus térről van-e szó. A modell fizikai mondanivalója az, hogy az erős lézertér okozta gerjesztés az időfejlődés során „szétoszlik” a kvantált módusokba. A másodlagos sugárzás frekvenciája nem egyezik meg a gerjesztésével, hanem a tér a felharmonikus módusokba is „kiszóródik”. A rendszert leíró Hamilton-operátor matematikailag a következő:

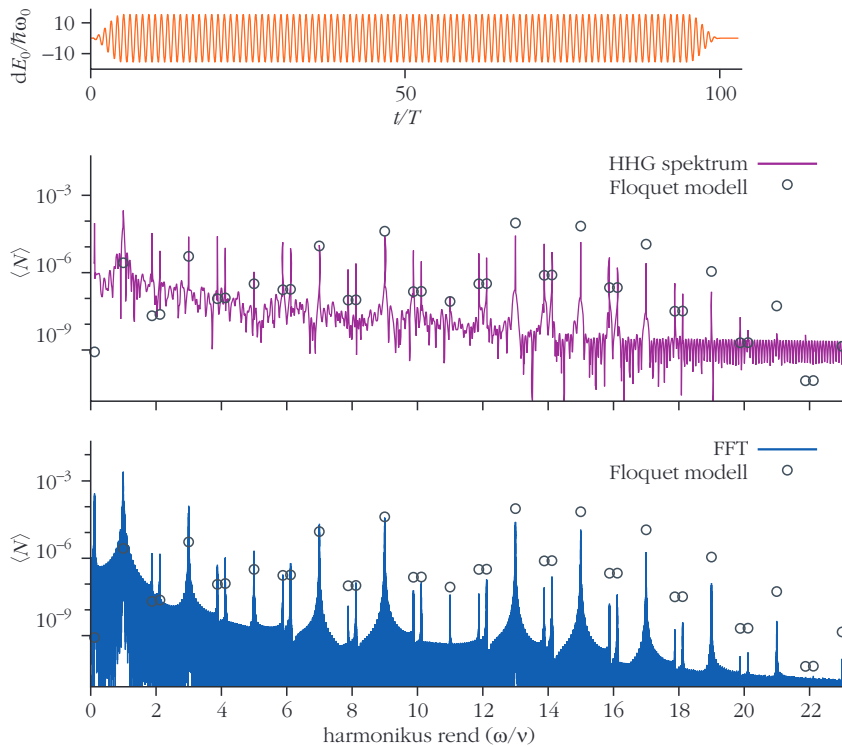
$$H(t) = H_a + H_m + H_{am} + H_{ex}(t), \quad (1)$$

ahol az első tag az  $\omega_0$  átmeneti körfrekvenciával jellemzett szabad atomot, a második

$$H_m = \sum_k \hbar \omega_k N_k$$

a szabad kvantált mezőt írja le, ahol az egyes módusok körfrekvenciáját  $\omega_k$  jelöli,  $N_k$  pedig a foton-számoperátor. A gerjesztő  $E(t)$ , illetve a módusokhoz kapcsolódó  $E_k$  terek kölcsönhatása az atommal ( $H_{ex}(t)$ , illetve  $H_{am}$ ) teljesen hasonló, dipólmomentum  $\times$  térerősség alakú. A gerjesztő tér és az atom kölcsönhatásának erősségét a  $d$  dipólmomentum-mátrixelem és a térerősség  $E_0$  amplitúdója határozza meg. A gerjesztő tér a kísérleteknek megfelelően impulzusszerű, az egyszerűség kedvéért egy  $v$  körfrekvenciájú (vivőfrekvencia) szinuszhullámot tetelezzünk fel, amelyet egy véges időablakon kívül az  $E_0$  maximummal rendelkező burkolófüggvénnyel való szorzás tesz nullává. (Egy konkrét példa esetén a térerősség időfüggése az 1. ábra bal oldalán látható.)

Érdeemes megjegyezni, hogy külső tér nélkül ( $E(t) = 0$ ), ha az atom kezdetben gerjesztett, akkor megindul az energiacsere minden egyes módus és az atom között, az  $\omega_k - \omega_0$  elhangolás által befolyásolt sebességgel (Rabi-frekvenciával). Ezek a különböző frekvenciájú vákuum Rabi-oszcillációk (amelyek az atomon keresztül enyhén össze is csatolódnak), azt eredményezik, hogy az atom fokozatosan megközelíti alapállapotát. A folyamat tehát a spontán emisszió egy igen egyszerű modellje. Természetesen, mivel a numerikus számításokban csak véges sok módust ( $\approx 1000$ ) tudunk figyelembe venni, a dinamikában megjelenő véges sok frekvenciájú oszcilláció egy idő után ismét



2. ábra. A középső panel megegyezik az 1. ábra legfelső részével, de most a gerjesztő impulzus időfüggése más, ez látható a legfelső görbén. Az alsó panelen a dipólmomentum-operátor várható értékének időfüggéséből számolható intenzitáspektrum látható, ugyan-ezen gerjesztés esetére. A körök mindkét esetben a Floquet-módszer segítségével kapott válaszok egy olyan monokromatikus külső térre, amelynek amplitúdója megegyezik a legfelső görbe maximumával.

fázisba kerül, így az atom nem marad örökké az alapállapotban („feléledés”). Ez a jelenség korlátot szab arra az időintervallumra, amíg a modellt megbízhatóan alkalmazhatjuk. Realisztikus paraméterek használata esetén a dinamikailag érdekes tartomány (ami a lézerimpulzus tovahaladásáig tart) rövidebb, mint az említett feléledés időállandója.

## Eredmények

A lézertérrel bekapcsolva az 1. ábrán látható eredményt kapjuk, ahol a középső panelen az idő és a frekvencia függvényében az egyes módusokhoz tartozó fotonszámok várható értékét láthatjuk. A lézertér időbeli lefutását az ábra bal oldali része mutatja, míg a felső panelen a fotonszám várható értékeket láthatjuk a lézerimpulzus tovaterjedése után. Mind itt, mind a középső panel színekódolásában logaritmikus skálázást alkalmaztunk, amire azért van szükség, mert a fotonszámok közelítőleg hat nagyságrendnyi tartományon változnak. A maximum egyértelműen a gerjesztő frekvencia környékén található, azután közel azonos magasságú csúcsok sorozata következik („plató”), majd a felharmonikus csúcsok eltűnnek („levágás”). A kísérletekben mért HHG spektrumok hasonló jellegű szakaszokra bonthatók, mind gáz- [1–3], mind pedig szilárdtest-minta [12–14] esetén. A levágáshoz tartozó frekvencia analitikusan is becsülhető [9], és fizikailag azzal az energiával arányos, amit a HHG egy elemi

folymata során egyetlen elektron maximálisan nyerhet. Mielőtt a fotonszámok dinamikáját elemeznénk, érdemes összevetni a lézerimpulzus távozása után kapott fotonszám várható értékeket a szokásos módon kapható intenzitáspektrummal, amelyet a dipólmomentum-operátor (gyorsulással arányos) második időderiváltjából Fourier-transzformáció segítségével nyerhetünk. A 2. ábrán a lila és a kék görbe a két módszerrel kapott spektrumokat mutatja, a legfelső ábrán látható gerjesztés esetére. E külső térerősség amplitúdója egy rövid felfutó szakasz után konstanssá válik, ami azért érdekes, mert állandó amplitúdó esetén (ami végtelen, monokromatikus gerjesztést jelent) a kétnívós atom problémája könnyen kezelhető az időben periodikus rendszerekre kidolgozott Floquet-módszer segítségével [15]. Ekkor kapjuk a 2. ábrán körökkel jelölt pontokat, amelyek magassága ugyan eltér a véges hosszúságú gerjesztéshez kapcsolódó eredményektől, a hozzájuk tartozó frekvenciák azonban lényegében megegyeznek a HHG csúcsokéival.

A fotonszámok várható értékének dinamikájára visszatérve, az 1. ábrán látható, hogy a lézerimpulzus megérkezését egy rövid transziens időszak követi, azután a fotonszám nőni kezd a felharmonikus módusokban, először az alacsonyabb frekvenciákhoz tartozókban, majd a magasabbakhoz tartozókban is. A levágás frekvenciájához tartozó módus fotonszáma lényegében az impulzus burkolójának maximuma környékén válik észrevehetővé.

Az átlagos fotonszámon túl további érdekes kérdés, hogy az egyes felharmonikus módusokban milyen a fotonok statisztikája. Egy konkrét, mondjuk a  $k$ -edik módus esetén ez a legrészletesebben az egyes (egész)  $n$  fotonszámokhoz tartozó  $P_n^{(k)}$  valószínűségek megadásával lehetséges.

Ezzel a jelöléssel a fotonszám várható érték a  $k$ -edik módusban

$$\langle N_k \rangle = \sum_n n P_n^{(k)}$$

alakban írható, a szórásnégyzetet pedig az alábbi módon fejezhetjük ki:

$$(\Delta N_k)^2 = \sum_n n^2 P_n^{(k)} - \langle N_k \rangle^2.$$

Az összes  $P_n^{(k)}$  megadásánál ugyan globálisabb képet ad, de igen hasznos a fotonszámok várható értékének és szórásának viszonya is. A viszonyítási alap legtöbbször a lézerforrások által természetes módon létrehozott koherens állapot, amely esetében a  $P_n$  valószínűsége



gek Poisson-statisztikát követnek,  $\alpha$  paraméterrel jellemzett koherens állapot esetén

$$P_n(\alpha) = \exp(-|\alpha|^2) \frac{|\alpha|^{2n}}{n!}.$$

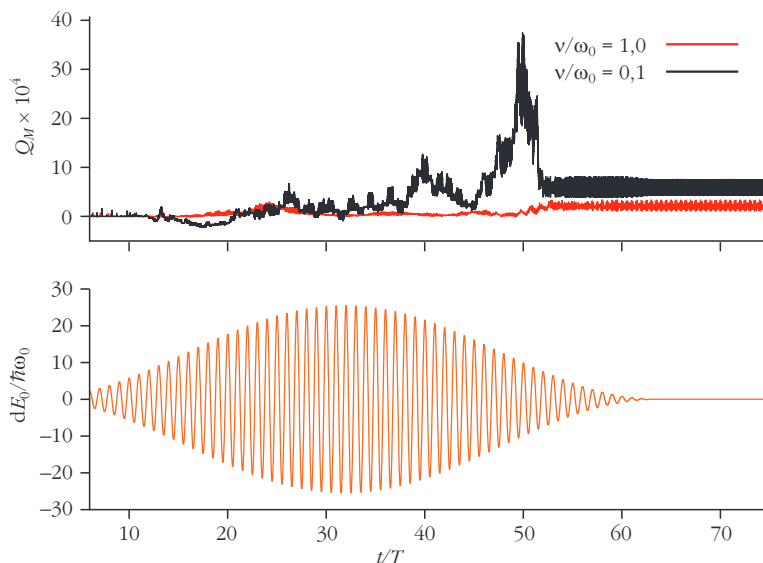
(Az egyszerűség kedvéért itt és a továbbiakban a  $k$  módusindexet nem írjuk ki.) Ennél természetesen „élesebb” (szub-Poisson) és „szélesebb” (szuper-Poisson) eloszlások is előfordulhatnak, az előbbi esetre példa az az állapot, amelyben pusztán egyetlen, nemnulla fotonszám valószínűsége nem tűnik el – és így szükségképpen egységnyi. Szuper-Poisson eloszlással rendelkezik például a hőmérsékleti sugárzás. E tulajdonság leírására használatos a

$$Q_M = \frac{(\Delta N)^2}{\langle N \rangle} - 1 \quad (2)$$

Mandel-paraméter [16], amely koherens állapotokra eltűnik, szub-, illetve szuper-Poisson eloszlás esetén pedig rendre negatív, illetve pozitív, így könnyen kezelhető, számszerű jellemzést ad. Esetünkben, mivel  $\langle N \rangle$  kicsiny, annak van a legnagyobb valószínűsége (közel 100%), hogy egyáltalán nincs foton a módusban. A nemnulla fotonszámok ennél jóval kisebb súllyal ( $10^{-4}$ – $10^{-6}$  valószínűséggel) vannak jelen a módusok állapotában. Ez a tulajdonság azt is jelenti (3. ábra), hogy a Mandel-paraméter nagyon kis értékeket vesz fel. Ugyanakkor az általunk vizsgált összes numerikus paraméter eseteire általánosan érvényes állításokat fogalmazhatunk meg. Arra a kérdésre, hogy milyen jellegű a felharmonikus módusok fotonstatisztikája, modellünk alapján a válasz az, hogy szuper-poissoni: a Mandel-paraméter – a kezdeti, tranziens szakaszt leszámítva – az időfejlődés folyamán mindig pozitív és a gerjesztés megszűntével is pozitív marad. Más szóval, a felharmonikus módusok nagyon közel vannak a foton nélküli vákuumállapothoz, az igen alacsony valószínűséggel megjelenő nemnulla fotonszámok eloszlása pedig szélesebb a referenciaként szolgáló koherens állapotokénál.

## Összefoglalás

A magasfelharmonikus-keltés folyamata során a felharmonikus sugárzás intenzitása igen alacsony, kvantumoptikai értelemben ezek a módusok nagyon kevés foton tartalmazznak. Egy jól átlátható modell segítségével a fotonszámok dinamikája követhető ezekben a módusokban, és a gerjesztés után az egyes módusokhoz tartozó fotonszám várható értékek a klaszikus HHG spektrumhoz nagyon hasonló eloszlást mutatnak, jellegzetes HHG csúcsokkal. Egyetlen módus statisztikája pedig enyhén szuper-Poisson eloszlást követ.



3. ábra. A (2) egyenlettel adott Mandel-paraméter időfüggése a 8. felharmonikus frekvencián ( $\omega = 8\nu$ ). A fekete görbe az atomi átmenettel rezonáns gerjesztéshez tartozik ( $\nu = \omega_0$ ), a piros pedig az erősen elhangolt esetet írja le ( $\nu = \omega_0/10$ ). Alul a gerjesztő impulzus időfüggése látható.

## Irodalom

1. M. Ferray, A. L’Huillier, X. F. Li, L. A. Lompre, G. Mainfray, C. Manus: Multiple-harmonic conversion of 1064 nm radiation in rare gases. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics* 21 (1988) L31.
2. A. L’Huillier, Ph. Balcou: High-order harmonic generation in rare gases with a 1-ps 1053-nm laser. *Phys. Rev. Lett.* 70 (1993) 774–777.
3. C.-G. Wahlström, J. Larsson, A. Persson, T. Starczewski, S. Svanberg, P. Salières, Ph. Balcou, A. L’Huillier: High-order harmonic generation in rare gases with an intense short-pulse laser. *Phys. Rev. A* 48 (1993) 4709–4720.
4. G. Farkas, C. Tóth: Proposal for attosecond light pulse generation using laser induced multiple-harmonic conversion processes in rare gases. *Physics Letters A* 168 (1992) 447–450.
5. F. Krausz, M. Ivanov: Attosecond physics. *Rev. Mod. Phys.* 81 (2009) 163–234.
6. Á. Gombkötő, A. Cziráj, S. Varró, P. Földi: Quantum-optical model for the dynamics of high-order-harmonic generation. *Phys. Rev. A* 94 (2016) 013853.
7. A. E. Kaplan, P. L. Shkolnikov: Superdressed two-level atom: Very high harmonic generation and multiresonances. *Phys. Rev. A* 49 (1994) 1275–1280.
8. R. Burlon, G. Ferrante, C. Leone, P. A. Oleinikov, V. T. Platonenko: Modeling harmonic generation by a degenerate two-level atom. *J. Opt. Soc. Am. B* 13 (1996) 162–169.
9. F. I. Gauthey, B. M. Garraway, P. L. Knight: High harmonic generation and periodic level crossings. *Phys. Rev. A* 56 (1997) 3093–3096.
10. A. Di Piazza, E. Fiordilino, M. H. Mittleman: Analytical study of the spectrum emitted by a two-level atom driven by a strong laser pulse. *Phys. Rev. A* 64 (2001) 013414.
11. P. B. Corkum: Plasma perspective on strong field multiphoton ionization. *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993) 1994–1997.
12. S. Ghimire, A. D. DiChiara, E. Sistrunk, P. Agostini, L. F. DiMauro, D. A. Reis: Observation of high-order harmonic generation in a bulk crystal. *Nat. Phys.* 7 (2011) 138–141.
13. S. Ghimire, G. Ndabashimiye, A. D. DiChiara, E. Sistrunk, M. I. Stockman, P. Agostini, L. F. DiMauro, D. A. Reis: Strong-field and attosecond physics in solids. *J. Phys. B* 47 (2014) 204030.
14. G. Ndabashimiye, S. Ghimire, M. Wu, D. A. Browne, K. J. Schaffer, M. B. Gaarde, D. A. Reis: Solid-state harmonics beyond the atomic limit. *Nature* 534 (2016) 520.
15. G. Floquet: Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques. *Ann. École Norm. Sup.* 12 (1883) 46–88.
16. L. Mandel: Sub-Poissonian photon statistics in resonance fluorescence. *Opt. Lett.* 4 (1979) 205.