

**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

## A MAGASFELHARMONIKUS-KELTÉS KVANTUMOPTIKAI VONATKOZÁSAI

**Gombkötő Ákos<sup>1</sup>, Varró Sándor<sup>2,3</sup>, Keresztes Zoltán<sup>1</sup>, Gábor Bence<sup>1</sup>, Földi Péter<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Szegedi Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék, Tisza L. krt. 84-86, 6720 Szeged*

<sup>2</sup>*ELI-ALPS, ELI-HU Non-Profit Kft., Wolfgang Sandner utca 3, 6728 Szeged*

<sup>3</sup>*Wigner Fizikai Kutatóközpont, Konkoly-Thege M. út 29-33, 1121 Budapest*

DOI: <https://doi.org/10.14232/kvantumelektronika.9.12>

### 1. Bevezetés

Nagyintenzitású elektromágneses terek esetén a magas fotonszám miatt nem szokás a mező kvantált, azaz a fotonképet alkalmazó leírását alkalmazni. Ugyanakkor a magasfelharmonikus-keltés folyamata során a jelenség alacsony hatékonysága miatt a felharmonikusok a gerjesztésnél már sokkal kisebb intenzitásúak, így ilyenkor még a szokásos ökölszabály szerint is hasznos a felharmonikus módusok kvantumoptikai leírása. Emellett, érdekes módon, kísérleti eredmények utalnak arra, hogy maga az erős gerjesztő tér is rendelkezik olyan tulajdonságokkal, amelyek csak ilyen módon értelmezhetők [1,2]. Lényegében arról van szó, hogy az anyagi rendszerrel történő kölcsönhatás után a gerjesztő tér és a felharmonikusok együttes fotoneloszlásában a felharmonikus spektrumra emlékeztető struktúra fedezhető fel. Ez a tapasztalat mutatja, hogy még ebben az intenzitástartományában is vannak olyan effektusok, amelyek a kölcsönhatás teljesen kvantumos leírását igénylik.

Erős terekkel kapcsolatban – néhány fontos korai eredménytől [3,4] eltekintve – az elméleti leírás eléggé hiányos, jelenleg is folyó kutatásaink ezt a hiányt igyekeznek betölteni

### 2. Modell

A magasfelharmonikus-keltés folyamatának leírásához három fizikai rendszert kell jellemeznünk: a tipikusan az infravörös tartományba eső gerjesztést, a vele kölcsönható anyagi rendszert, illetve a másodlagos sugárzást, ami az UV frekvenciákig elérő felharmonikusokat is tartalmazza. Ez azt jelenti, hogy a teljes rendszert a következő Hamilton-operátor írja le:

$$H = H_e + H_m + H_{HH} + V_{e-m} + V_{HH-m}, \quad (1)$$

ahol az egyes tagok a gerjesztést (excitation), az anyagi rendszert (matter), a felharmonikusokat (HH: high-order harmonics), a gerjesztés és az anyagi rendszer kölcsönhatását, valamint a felharmonikusok és az anyag kölcsönhatását jelentik (ebben a sorrendben). Kvantumos leírás esetében a szabad tereket leíró  $H_e$  és  $H_{HH}$  Hamilton-operátorok  $H_{field} = \sum \hbar\omega_n (a_n^+ a_n + 1/2)$  alakúak, ahol a szumma a figyelembe vett módusokon fut végig. Ez elvben az összes populált módot jelenti, de a modell (esetlegesen numerikus) megoldhatósága érdekében elképzelhető, hogy csak kevesebb módot tudunk figyelembe venni. A kvalitatív kép szempontjából pl. a gerjesztést elegendő olyan monokromatikus sugárzásnak tekinteni, ahol az összeg egyetlen tagot tartalmaz. A kölcsönhatási operátorok ( $V_{e-m}$  és  $V_{HH-m}$ ) esetén dipólközelítést alkalmazunk. Hosszmértékben  $V = -\mathbf{D}\mathbf{E}$  formába írható, ahol  $\mathbf{D}$  az anyagi rendszer dipólmomentumának megfelelő operátor,  $\mathbf{E}$  pedig az elektromos tér. Ez utóbbi nem feltétlenül szükséges, hogy maga is operátor legyen, erős gerjesztés esetén tekinthetjük klasszikus időfüggő mezőnek. Ez azért érdekes, mert jelenleg még erősen leegyszerűsített modellek esetén is igen összetett probléma a teljesen kvantumos leírás kezelése. A

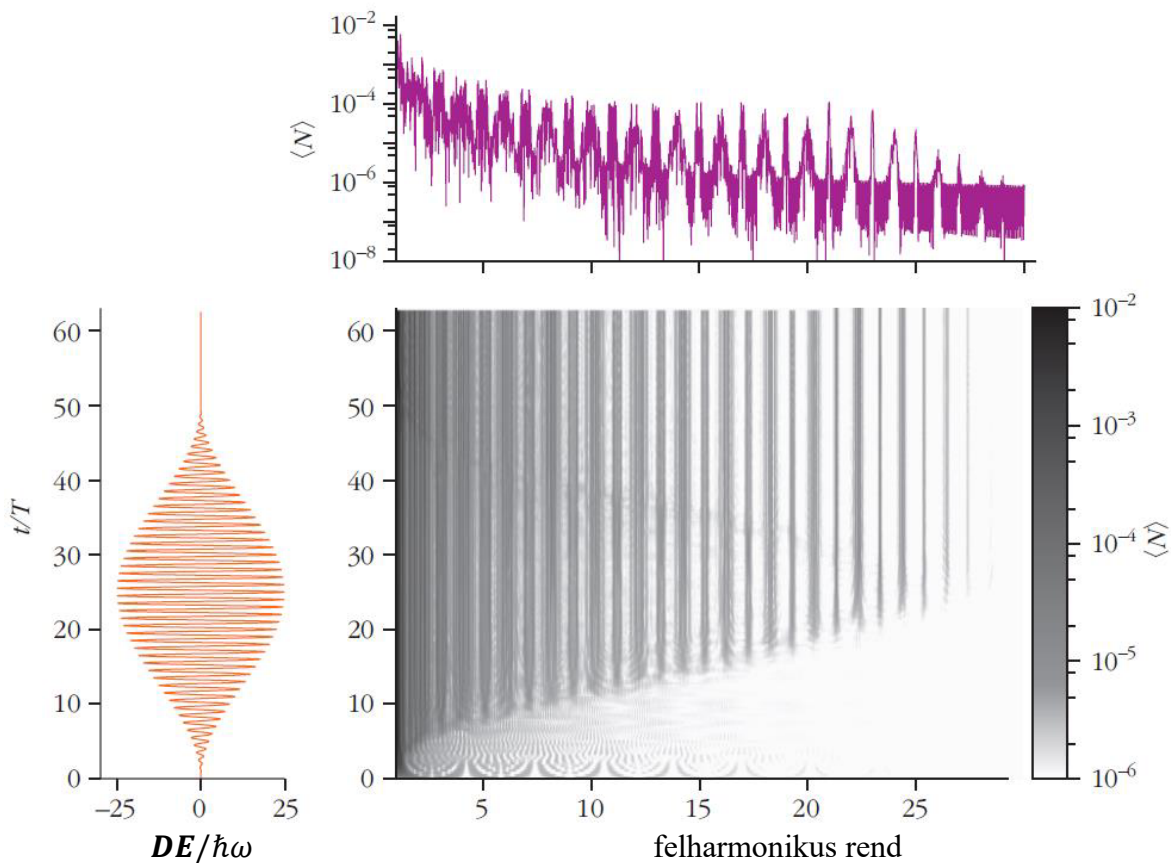
továbbiakban azokat az eredményeinket ismertetjük, amelyek a kölcsönhatásban résztvevő három rendszer közül kettőnek a kvantumos leírásából adódnak.

### 3. Kvantált felharmonikusok, kétállapotú atom és klasszikus gerjesztés

Első modellünkben [5,6] a felharmonikusokat kvantumosan írjuk le, a gerjesztés pedig klasszikus, azaz  $H_e$  hiányzik az (1) egyenletből, továbbá

$$\begin{aligned} V_{e-m} &= -\mathbf{D}\mathbf{E}_e = f(t)\cos(\omega t)(\sigma_x E_0), \\ H_m &= \hbar\omega_0\sigma_z, \end{aligned}$$

ahol a kétnívós közelítésnek megfelelően a Pauli-mátrixok jelennek meg, az  $f(t)$  burkolófüggvény pedig lassan változik a  $T = 2\pi/\omega$  periódusidőhöz képest. Eredményeink alapján ekkor egy adott felharmonikus jelenléte vagy hiánya alig észrevehetően befolyásolja a többi dinamikáját, azaz a HH módusok lényegében függetlenek. Így minden egyes ilyen módus időfejlődését jó közelítéssel kiszámíthatjuk, ha azt a Hamilton-operátort tekintjük, amelyben  $H_{HH}$  pusztán az adott módust tartalmazza. Ezen a módon több ezer frekvencia esetén is meghatározhatjuk a dinamikát, beleértve azokat is, amelyek nem egész számú többszörösei  $\omega$ -nak. Így kaptuk az 1. ábrát.



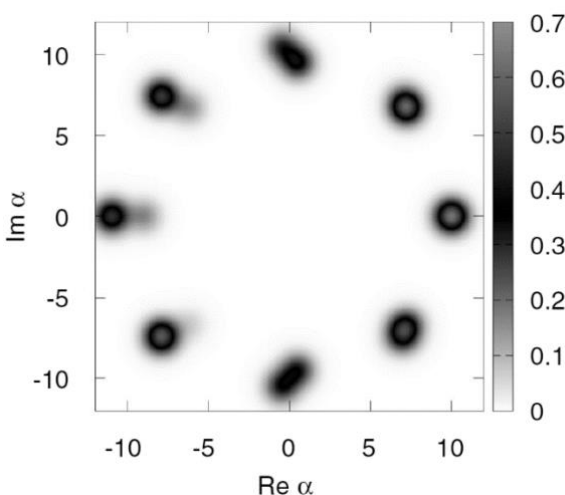
1. ábra: A központi panelen a fotonszámok várható értéke látható az  $\omega$  egységekben mért frekvencia és az idő függvényében ( $T = 2\pi/\omega$ ). Bal oldalon a gerjesztő impulzus térerősségének időfüggése látható dimenzióatlan egységekben. A felső ábra a fotonszámok gerjesztés utáni várható értékét mutatja [6].

Ezen az ábrán látszik, hogy a kezdetben nulla fotonszám várható értékkel jellemzett módusok hogyan populálódnak az idő előrehaladtával, és hogyan alakul ki a HHG spektrum. A jól ismert kísérleti eredményekkel kvalitatív egyezésben azt kapjuk, hogy  $\omega$  egész számú többszöröseikhez közel jelennek meg észrevehető maximumok a fotonszám várható értékekben, látható egy „plató” a spektrumban, illetve a harmonikus csúcsok egy idő után eltűnnek („levágás”). Mindez azt mutatja, hogy már a lehető legegyszerűbb anyagi modell (a kétállapotú atom) is alkalmas arra, hogy a magasfelharmonikus-keltés folyamatáról kvalitatívan helyes képet adjon. Emellett az is látható, hogy a spektrum szerkezetében kvalitatív különbség van a páratlan és páros felharmonikusok között, ezt a szerkezetet a modell közelítésein belül analitikusan meg tudjuk magyarázni. A felharmonikusokra vonatkozó független-módus közelítésen belül feltérképeztük a magas felharmonikusok koherencia tulajdonságait is [5], megmutattuk, hogy több nemklasszikus tulajdonság (préseltség, szub-poissoni fotonstatisztika) jelen van a felharmonikus sugárzásban, jellemzően a páros felharmonikusok esetén. Általában ezek a jellemzők az egyatomos anyagi rendszer esetében kevésbé térnek el a klasszikus határesetétől. Ugyanakkor a fotonszám-keresztkorreláció vizsgálata közben jelentős antikorrrelációt sikerült kimutatni a páros-páratlan felharmonikusok között.

Előzetes eredményeink szerint az egyatomos spektrum szerkezete lényegében megegyezik az  $N$ -darab koherensen gerjesztett kétszintes atom (Dicke-modell) kollektív sugárzási spektrumával.

#### 4. Kvantált gerjesztés és kétállapotú atom

Az előző fejezet eredményei mutatják, hogy a felharmonikus módusok jelenléte – fizikailag a keltési folyamat alacsony hatékonysága miatt – nem befolyásolja számottevően az anyagi rendszer és a gerjesztő módus csatolt dinamikáját. Mivel a kísérleti eredmények a kölcsönhatás után a gerjesztés fotonstatisztikájára, a „hiányzó fotonokra” vonatkoznak [1,2], érdemes a gerjesztést kvantumosan kezelni, miközben a fentiek alapján (és a számítások megkönnyítése érdekében) a felharmonikusok jelenlétét elhanyagoljuk [7,8]. Ha a gerjesztő módus kezdetben koherens állapotban van, akkor a dinamika folyamán ez az állapot több, szintén koherens részre esik szét. Kicsit részletesebben, arról van szó, hogy a kölcsönhatás során kvantumos összefonódottság épül fel a gerjesztő módus állapota és a kölcsönhatást leíró dipólmomentum operátor sajátállapotai között. Az összefonódott állapot egyes tagjaihoz különböző dinamika tartozik, más utakat járnak be a fázistéren. A lenti ábra a kétállapotú atom esetére (amikor  $D_x = \sigma_x$ , összesen két sajátállapottal) mutatja ezt a jelenséget a Wigner-függvény segítségével.



2. ábra: A gerjesztő módus Wigner-függvényének időfejlődése. A nyolc, jól elkülöníthető rész különböző időpillanatokhoz tartozik az első optikai ciklusban:  $t = 0$ ;  $t = 1/8T$ ;  $t = 2/8T, \dots, t = 7/8T$ . A módus kezdőállapota egy  $\alpha = 10$  indexű koherens állapot, míg az atom  $t = 0$ -ban alapállapotban van. A kölcsönhatás erősségét jellemző Rabi-frekvencia az atomi rezonanciafrekvencia fele, a gerjesztés pedig távol van a rezonanciától:  $\omega/\omega_0 = 3$  [8].

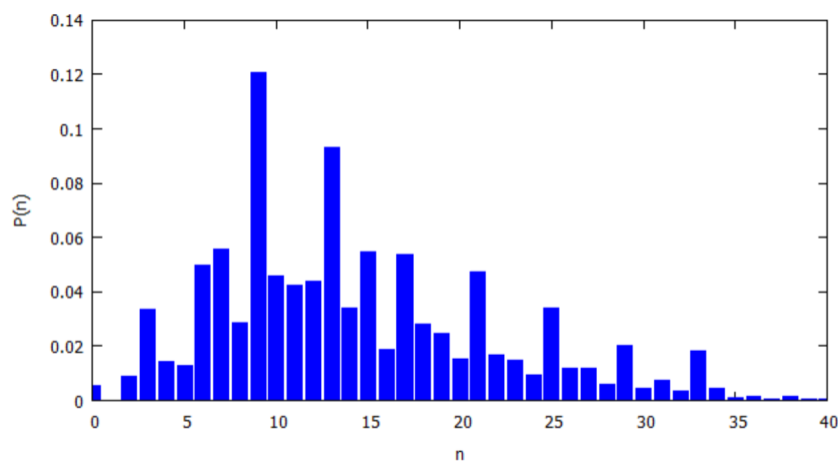
A folyamat során – nagyon jó közelítéssel – az történik, hogy az anyagot leíró Hamilton operátor gyors átmeneteket indukál az összefonódott állapot részei között, és ezek az átmenetek azok, amelyek a felharmonikusok létrejöttéért felelősek. Másszóval ahhoz, hogy a felharmonikusok megjelenjenek, mindenképpen szükség van a szabad anyagi rendszert leíró  $H_m$  operátorra is.

### 5. Kvantált gerjesztés és kvantált felharmonikusok

Az (1) egyenletben nem szerepel közvetlen kölcsönhatás a gerjesztés és a HH módusok között. Az anyagi rendszer az, ami csatolást hoz létre az elektromágneses terek között. Ezt a legtisztábban úgy tanulmányozhatjuk, ha bevezetünk egy olyan Hamilton-operátort, amelyben az anyag csak magasrendű szuszceptibilitás jellegű paramétereken keresztül jelenik meg:

$$H_{g-HH} = H_g + H_{HH} + \sum_m \chi^{(m)} [a_g^m a_m^\dagger + (a_g^\dagger)^m a_m], \quad (2)$$

ahol a keltő és eltüntető operátorok  $g$  indexe a gerjesztésre vonatkozik,  $m$  pedig azt a HH módust jelenti, amely frekvenciája a gerjesztésének az  $m$ -szerese:  $\omega_m = m\omega$ . Hasonló Hamilton-operátort egyetlen taggal a szummában ( $m=2$ ) a másodharmonikus-keltés, illetve a vele ellentétes folyamat, a parametrikus lekonverzió leírására szokás használni [9]. A (2) Hamilton-operátor által generált dinamika esetén könnyen tudunk az egyes módusok fotonzámaiból megmaradó mennyiséget konstruálni (az említett  $m=2$  speciális esetben pl.  $N = N_g + 2N_2$  felcserélhető  $H_{g-HH}$ -val), ami azt mutatja, hogy ezzel a módszerrel valóban pusztán a felharmonikus-keltés jelenségére tudunk koncentrálni. A részletek természetesen a  $\chi^{(m)}$  mennyiségek egymáshoz viszonyított nagyságában és relatív fázisaikban rejlenek. Az utóbbiakról – a teljes dinamika megoldása, majd pusztán a módusok állapotterére történő redukálása nélkül – keveset mondhatunk. Ugyanakkor, mivel a tipikus harmonikus spektrumok ismertek, a magasrendű szuszceptibilitások abszolút értékeit megválaszthatjuk úgy, hogy számításaink visszaadják ezeknek a spektrumoknak az 1. ábra felső részén is látható tulajdonságait. Előzetes eredményeink szerint, pusztán néhány módus figyelembe vételével is igen érdekes, strukturált fotonszám-eloszlásokat kaphatunk. Erre mutat példát a 3. ábra.



3. ábra: A (2) Hamilton-operátor által generált dinamika 2,5 optikai ciklus utáni eredménye az  $m=2, 3, 4$  és  $5$  HH módusok figyelembe vételével. Az ábrán a négy HH módus együttes fotonzámoszlását láthatjuk. A  $\chi^{(2)}$ ,  $\chi^{(3)}$ ,  $\chi^{(4)}$  és  $\chi^{(5)}$  mennyiségek valóságosak, nagyságukat úgy választottuk meg, hogy a kísérleti spektrumokban megjelenő „platónak” megfelelően a fotonszámok várható értéke azonos legyen ezekben a módusokban.

A (2) egyenlet után említett fotonszám megmaradási tulajdonság azt is jelenti, hogy a fenti ábra struktúrája megjelenik a gerjesztésből „hiányzó” fotonok eloszlásában is, ami a kísérletekkel közvetlenül összehasonlítható eredmény.

## 6. Összefoglalás

A fentiekben azt a munkát foglaltuk össze, amelyet a magasfelharmonikus-keltés kvantumoptikai leírása kapcsán végeztünk [5-8]. Megmutattuk, hogy a folyamatban résztvevő gerjesztés, anyagi rendszer és a másodlagos sugárzás hármából bármelyik kettőt kvantáltan kezelve érdekes eredmények adódnak. Ennek fényében további munkánk célja a teljes folyamat kvantumos leírása.

## 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] N. Tsatrafyllis, I. K. Kominis, I. A. Gonoskov, P. Tzallas, Nat. Comm. **8**, 15170 (2017).  
<https://doi.org/10.1038/ncomms15170>
- [2] N. Tsatrafyllis, S. Kühn, M. Dumergue, P. Földi, S. Kahaly, E. Cormier, I. A. Gonoskov, B. Kiss, K. Varjú, S. Varró, P. Tzallas, Phys. Rev. Lett. **122**, 193602 (2019).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.122.193602>
- [3] J. Bergou, S. Varró, J. Phys. A: Math. Gen. **14**, 1469 (1981).  
<https://doi.org/10.1088/0305-4470/14/6/023>
- [4] J. Bergou, S. Varró, J. Phys. A: Math. Gen. **14**, 2281 (1981).  
<https://doi.org/10.1088/0305-4470/14/9/023>
- [5] A. Gombkötő, A. Czirják, S. Varró, P. Földi, Phys. Rev. A **94**, 013853 (2016).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.94.013853>
- [6] P. Földi, Fizikai Szemle **67**, 345 (2017).
- [7] Á. Gombkötő, S. Varró, P. Mati, P. Földi, Phys. Rev. A **101**, 013418 (2020).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.101.013418>
- [8] Á. Gombkötő, S. Varró, P. Mati, P. Földi, Fizikai Szemle **70**, 163 (2020).
- [9] T. Toyoda and K. Wildermuth, Phys. Rev. D **22**, 2391 (1980).  
<https://doi.org/10.1103/PhysRevD.22.2391>
- [10] P. Meystre, M. Sargent III, Elements of Quantum Optics (Springer, 2007.)  
<https://doi.org/10.1007/978-3-540-74211-1>