

fizikai szemle

**Krausz Ferenc
Nobel-díja**

**Kapcsolódó
hazai kutatások
Az ellipszistről**

2024/1

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

A Matematikai és Természettudományi Értesítőt az Akadémia 1882-ben indította
A Matematikai és Fizikai Lapokat Eötvös Loránd 1891-ben alapította

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:
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:
Asbóth János, Biró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczi Bence, Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba, Szabados László, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

Olvasószerkesztő:
Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő:
Hock Gábor

A folyóirat e-mail címe:
fsz_szerkesztok@elft.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://fizikaiszemle.elft.hu>



A címlapon:

Krausz Ferenc a müncheni Max Planck Intézet laboratóriumában
(Fotó: Stefan Höck/LMU)

TARTALOM

<i>Dombi Péter:</i> Krausz Ferenc Nobel-díja és a kapcsolódó hazai kutatások	1
<i>Bakos József:</i> Visszaemlékezések Krausz Ferenc Nobel-díjával kapcsolatban	2
<i>Tóth Csaba, Varró Sándor:</i> A sokfotonos fémfelületi folyamatoktól az alagútmisszióig át az attoszekundumos fényimpulzusokig: a 2023. évi fizikai Nobel-díj előzményei a KFKI/SZFKI-ban	6
<i>Szipőcs Róbert:</i> Az izolált attoszekundumos impulzusok előállítását megalapozó lézerfizikai fejlesztések a kilencvenes évek közepén a Bécsei Műszaki Egyetemen	12
<i>Dombi Péter:</i> Krausz Ferenc – magyar Nobel-díj az extrém nemlineáris optikáért	16
<i>Slíz-Balogh Judit, Mádai Attila, Sári Pál, Horváth Gábor, Barta András:</i> A Kordylewski-porholdak asztropolarimetriája	20

REFLEKTORFÉNYBEN

<i>Dombi Péter:</i> Interjú Kroó Norberttel	24
---	----

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Bartos-Elekes István:</i> Krausz Ferenc 2016-ban a XXVI. nagyvárad Schwartz Lajos Emlékverseny meghívott előadója volt	27
<i>Baranyai Klára:</i> Az ellipszisről (már csak?) fizikaórán	28
<i>Sükösd Csaba:</i> Miért körpályához közeli (kis excentricitású) pályán keringenek a bolygók a Nap körül?	31

MEGEMLÉKEZÉS

<i>Kovács József, Szabó M. Gyula:</i> Jankovics István (1943–2023)	34
<i>Hamvas György, Trócsányi Zoltán:</i> Trajtmár Sándor (1931–2023)	35
<i>Faigel Gyula, Pusztai Tamás:</i> Gránásy Lászlóra emlékezünk	35

MELLÉKLETEK – Fizikai Szemle (fizikaiszemle.elft.hu)

Kármán Tamás: A Fizikai Szemle 2024. évi falinaptára

P. Dombi: Ferenc Krausz's Nobel Prize and related research in Hungary
J. Bakos: Recalling Ferenc Krausz in association with his Nobel Prize
Cs. Tóth, S. Varró: From multiphoton metal surface processes through tunnel emission to attosecond light pulses: the antecedents of the 2023 Nobel Prize in Physics at KFKI/SZFKI
R. Szipőcs: Developments in laser physics that formed the basis for the production of isolated attosecond pulses in the mid-1990s at the Vienna University of Technology
P. Dombi: Ferenc Krausz – Hungarian Nobel Prize for extreme nonlinear optics
J. Slíz-Balogh, A. Mádai, P. Sári, G. Horváth, A. Barta: Astropolarimetry of the Kordylewski dust cloud

IN THE SPOTLIGHT

P. Dombi: Interview with Norbert Kroó

TEACHING PHYSICS

I. Bartos-Elekes: Ferenc Krausz was invited lecturer at the 2016 XXVIth Lajos Schwartz Memorial Competition in Nagyvárad
K. Baranyai: About the ellipse (only?) in physics class
Cs. Sükösd: Why do the planets orbit the Sun in a near-circular (small eccentricity) orbit?

COMMEMORATION

J. Kovács, M. Gy. Szabó: István Jankovics (1943–2023)
Gy. Hamvas, Z. Trócsányi: Sándor Trajtmár (1931–2023)
Gy. Faigel, T. Pusztai: We remember László Gránásy

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap



KRAUSZ FERENC NOBEL-DÍJA ÉS A KAPCSOLÓDÓ HAZAI KUTATÁSOK



A Fizikai Szemlében átfogó összeállítást közlünk Krausz Ferenc Nobel-díjjal kitüntetett eredményeiről és a fény-anyag kölcsönhatási folyamatok kutatásának hazai előzményeiről. Ugyan a lézert legtöbbször folytonos fényforrásként ismerik, már a világ első lézere, a rubinlézer is impulzusüzemben működött a pumpáláshoz használt fotográfiai villanólámpák miatt. Az ilyen lézerek az impulzushossz (a lézerimpulzusok időtartama) és ezért az elérhető csúcsintenzitás tekintetében is szédületes fejlődésen mentek keresztül az 1960-as évektől kezdve – amint azt a kapcsolódó részletes cikkemben (16–19. old.) is bemutatom. Ezt a fejlődést eleinte két rövid impulzusok előállítására alkalmas technika tette lehetővé: a lézerrezonátorokon belüli Q-kapcsolás és a módusszinkronizáció. Ezekkel lehetett igazán rövid, nano- majd pikoszekundumos lézerimpulzusokat előállítani és a csúcsintenzitást jelentősen megnövelni. Ez a töretlen fejlődés azóta is tart – nem kis részben Krausz Ferenc

munkájának köszönhetően, aki az 1990-es évek elejét a femtoszekundumos módusszinkronizációs módszerek kutatásának szentelte, és azóta is aktívan fejleszti a világ leginnovatívabb lézerrendszereit.

A rövid impulzusú lézerek technológiáját két további fontos találmány vitte előre 1985 után: a 2018-ban Nobel-díjjal kitüntetett lézerfény-erősítési technológia (Gérard Mourou és Donna Strickland találmánya), valamint a titánnal adalékolt zafirkristály mint lézeraktív anyag használata. Ezt nagy erősítési sávzélességének és előnyös mechanikai tulajdonságainak köszönhetően ma is széles körben használják femtoszekundumos kutatólaboratóriumokban mind lézeroszillátorokban, mind erősített lézerrendszerekben. A titán-zafir technológia jelentőségét mi sem mutatja jobban, mint az a tény, hogy a világ jelenleg legintenzívebb lézere, a bukaresti ELI-NP központban 2023-ban átadott 10 PW-os lézer teljes mértékben erre a technológiára épül: a romániai kutatóközpontban működő berendezés egy titán-zafir lézererősítő-láncolat.

Krausz Ferenc mindezen fejlesztési területeken kitüntette magát. Az 1990-es évek elején a Bércsi Műszaki Egyetemen módusszinkronizációs módszereket fejlesztett. 1993-ban Szipőcs Róberttel társfeltalálóként jegyezte a csörpölt tükröket, melyeket először Ferencz Kárpát készített el Csillebércen. Ezeket a tükröket nagy sikerrel használták Bécsben kapillárisos (gázzal töltött üreges optikai szálak) impulzuskompresszorok fejlesztésére, így a 2000-es évek elejére ő volt az első, aki erősített 5 femtoszekundumos impulzusokat használhatott a kutatásaihoz. Ez a versenylőny meghatározónak bizonyult az attoszekundumos kutatásokban is: a Bércsi Műszaki Egyetemen elsőként tudtak izolált attoszekundumos impulzusokat előállítani. Az ehhez szükséges lézertechnológiai, impulzuskompressziós háttérrel Szipőcs Róbert cikke részletesen is bemutatja.

Krausz Ferenc kutatásai azonban nem korlátozódtak a femtoszekundumos technológia fejlesztésére. Érdeklődése a rövid lézerimpulzusok atomokkal való kölcsönhatásával kapcsolatban minden bizonnyal Bakos József KFKI-s laboratóriumában alakult ki. A Nobel-díjas kutató nyolcvanas évekből KFKI-s tartózkodásakor már jó ideje folytak az atomok és Q-kapcsolt lézerimpulzusok kölcsönhatására irányuló vizsgálatok. Ezt a háttérrel mutatja be Bakos József cikke.

Mindezzel párhuzamosan Farkas Győző, Horváth Zoltán és munkatársaik szintén a KFKI-ban intenzíven érdeklődtek az erős elektromágneses tér és az anyagi rendszerek kölcsönhatásai iránt. Ennek a munkának a háttérét Tóth Csaba és Varró Sándor cikke mutatja be, amely közvetlenül vezetett el a Nobel-díj részletes indoklásában is bemutatott 1992-es publikációhoz. Ebben Farkas Győző és Tóth Csaba elsőként vetítették előre attoszekundumos impulzusok keltését, mégpedig az akkor már ismert magas rendű felharmonikuseltéti folyamat segítségével. Az elméleti felvetés kísérleti igazolására 2001-ig kellett várni, az attofizika „annus mirabilisében” Pierre Agostini és Krausz Ferenc egymástól függetlenül igazolta attoszekundumos fényimpulzusok létét.

Krausz Ferenc 2001 óta nemcsak számos fontos atomhőfizikai és szilárdtestfizikai folyamat attoszekundumos időbontott mérését végezte el elsőként, hanem aktívan részt vesz a közoktatásban tanuló diákok képzésében is, amit a *photonworld.de* honlap kiváló oktatóanyagai példáznak legjobban. Az utánunk következő generációk ügye iránti odaadását jól mutatja Bartos-Elekes István visszaemlékezése Krausz Ferenc 2016-os előadására a XXVI. Schwartz Emlékversenyen.

A Fizikai Szemle cikkgyűjteménye jól bemutatja azt a folyamatot, ami a lézerfizika hőskorától a legmodernebb attoszekundumos kísérletekig vezetett. A hatalmas fejlődést más szemmel nézve azt is láthatjuk, hogy miként köszöntött be a (lézer feltalálása előtti) lineáris optika korszaka után a nemlineáris, majd az extrém nemlineáris optika kora. A cikkek bepillantást adnak Krausz Ferencnek abba az úttörő kutató- és lézerfejlesztő munkájába is, ami lehetővé tette azt, hogy az attoszekundumos fényforrások manapság már nemcsak hagyományos kutatólaborokban vannak jelen, hanem a szegedi ELI-ALPS lézerközpontban a világ minden tájáról érkező kutatók, felhasználók számára is hozzáférhetők.

DOMBI PÉTER

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont és ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet

VISSZAEMLEKEZÉSEK KRAUSZ FERENC NOBEL-DÍJÁVAL KAPCSOLATBAN

Bakos József

HUN-REN Wigner FK, RMI Plazmafizikai Főosztály

Történeti bevezetés, a kutatás tárgya, kapcsolatok, körülmények

1968-ban a Szovjet Akadémia moszkvai Fizikai Kutató-intézetében kezdtem dolgozni a szovjet és a magyar tudományos akadémiák közti együttműködési megállapodás keretében a Nyikolaj Boriszovics Delone vezette csoportban, ahol az éppen aktuális témával, az atomok sokfotonos ionizációjával foglalkoztak. Atomok sokfotonos ionizációjáról akkor beszélünk, ha a fénykvantum energiája kisebb, mint az atom ionizációs energiája és a ionizációhoz több fénykvantum együttes energiájára van szükség az energiamegmaradás törvénye szerint. Ezt csak viszonylag nagy intenzitású fénynyaláb tudja megfigyelhetően előidézni, és a lézerek felfedezése, megalkotása tette lehetővé ezek létrehozását, tanulmányozását.

A Delone-csoportban lézeres fotoionizációs kísérleteket végeztek Q-kapcsolt impulzusú rubin- és neodímium-lézerek fényimpulzusaival különböző nemesgázokban és alkáli elemek gőzeiben. Hasonló kutatások folytak ebben az időben a francia akadémia Párizs melletti Saclayban lévő kutatóintézetében G. Mainfray vezetésével főleg alkáliföldfémekben Q-kapcsolt és frekvenciahangolt neodímiumlézerek használatával, valamint a coloradói Joint Institute for Laboratory Astrophysics (JILA) kutatóintézetben, illetve a coloradói egyetem és a National Bureau of Standards közös kutatóintézetében Boulderban, az Egyesült Államokban.

A moszkvai intézetben velem együtt dolgozó csoport által, valamint 1970-ben való hazatérésem után a munkatársaimmal együtt itthon elért eredményeinket 1971-ben egy speciálisan az atomok sokfotonos ionizációjának szentelt, Balatonföldváron megrendezett nemzetközi konferencián ismertettük. Ezen a fent már említett kutatóintézetek munkatársain kívül számos a téma iránt érdeklődő kutató jelent meg és tartott előadást. A konferencián elhangzottokról egy összefoglaló cikk írására

kaptam felkérést az *Advances in Electronics and Electron Physics* folyóiratnak a konferencián részt vevő szerkesztőtől, Marton Lászlótól, amely írás 1974-ben meg is jelent [13].

1974-ben egyéves tanulmányútra kaptam meghívást a JILA intézetből, ahol az atomok sokfotonos ionizációja esetén az atomok energiaállapotainak a lézertér hatására fellépő megváltozásával foglalkoztam. Itt a Stark-effektus szerepével foglalkoztam a sokfotonos ionizációban, és írtam egy összefoglaló cikket [16].

Egy év után hazatérve a Központi Fizikai Kutató Intézet Optikai Osztályán még folytattam a külföldön elkezdett munkát, majd a Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetben plazmafizikával kezdtem foglalkozni és nemzetközi plazmafizikai konferenciát (International Conferences on Ionized Gases, ICPIG) rendeztem a Budapesti Műszaki Egyetemen 1985-ben [20]. Ebben az időben a Budapesti Műszaki Egyetemen a Kísérleti Fizika Tanszéken Krausz Ferencet mint diákot is érdekelni kezdte a sokfotonos ionizáció témaköre. Én ekkor mint másodállású egyetemi docens, majd professzor tartottam előadásokat az egyetemen lézerfizikai témakörökben. A Központi Fizikai Kutatóintézetben lévő lézerlaboratóriumomban pedig közös kutatási munkát végeztünk a BME Fizikai Intézete oktatóival együtt – segítve őket az akadémiai tudományos fokozat megszerzésében (Füzessy Zoltán a Fizika Tanszékről és Kuti Csaba a Kísérleti Fizika Tanszékről), illetve segítve az egyetemen egy saját lézerlaboratórium kiépítését (Füzessy Zoltán vezetésével).

A KFKI-ban kifejlesztett kutatási tematika átengedésével holografikus interferometrikus vizsgálatokat és kutatásokat indítottuk el az egyetemen. Ez utóbbi elég sikeresnek bizonyult, mert a kutatási eredményeken túl az eredmények gyakorlati felhasználása is kézenfekvő volt. Ferike – akkor csak így hívtuk Krausz Ferencet – akkor már igen aktív volt, tehetségét már akkor publikációkkal bizonyította [17–19]. A Műegyetemen abban az időben igyekeztek modern időszerű perspektivikus kutatási irányokat választani, így kézenfekvő volt a lézerekkel kapcsolatos kutatások iránti érdeklődés és támogatásuk. Részben ezért lett rögtön sikeres Füzessy Zoltán holografikus interferometrikus laboratóriuma is.

A nagy intenzitású lézersugárzás anyaggal való kölcsönhatásának kutatása a KFKI-ban két irányban indult el. Az első irány alapját az adja, hogy a nagy intenzitású lézersugár a szilárd fémfelületről akkor is elektronokat vált ki, ha a lézersugár kvantumának energiája kisebb, mint a fém kilépési munkája. Ekkor sokfotonos fotoeffektusról



Bakos József professzor emeritus a Wigner FK RMI-ben, korábban az RMKI Plazmafizikai Főosztály vezetője és egyetemi tanár a BME Fizikai Intézetében. Hajdani tanítványa, doktorandusza a BME-en, Krausz Ferenc 2023-ban Nobel-díjat kapott kutatási eredményeiért abban a témakörben – az atomok sokfotonos ionizációja folytatásaként az atomok ionizációja extrém erős és rövid idejű lézerekben –, amelyet a moszkvai FIAN-ban, majd a KFKI-ban 1968–1994 között, ha megszakításokkal is, lényegesen kisebb lézerintenzitásokkal és hosszabb lézerimpulzusokkal vizsgáltak.

beszélünk, ugyanis több foton együttes energiája fedezi a kilépési munkát. A jelenség leírásában nehézséget jelent, hogy a fémbe lévő elektron kölcsönhatása a fénytérrel erősen függ sok atom együttes hatásától és a fém szerkezetétől, beleértve a fém felületét is. Ez persze a bonyolult jelenség előnye is – többek között ezért érdemes vele foglalkozni.

A másik irány alapja a gázatomok ionizációja erős lézerterekben. Itt az atommag centrális erőterében kötött elektront szakítja le a lézersugárzás (több) fotonja a magról, ezzel ionizálva az atomot. Természetesen az erős lézertér és az atomnak a lézertér hatására módosuló tere együtt határozzák meg az elektron mozgását a kvantummechanika törvényeinek megfelelően. Ebben az esetben is azonban lényegesen különböző scenáriók lehetségesek attól függően, hogy mennyire erős a fény elektromos tere az atommag elektromos teréhez hasonlítva.

Gondolat formájában megjelent, hogy mi lenne, ha a gázokkal kapcsolatos sokfotonos lézerkutatások az egyetem keretében történnének. Krausz Ferenc aktivitása, fiatalossága, lelkesedése és tehetsége ebben az irányban igen biztató volt. Az egyetemi Fizikai Intézet éppen esedékes igazgatóválasztása után azonban a kutatási témák hangsúlyai eltolódtak az éppen kifejlődő lézeres kutatásoktól a szilárdtestfizika felé, más emberek részvételével. Ekkor Krausz Ferenc lehetőséget kapott egy bécsi látogatásra. Gondolom, a bécsi tapasztalatok, valamint a budapesti helyzet alakulása alapján választotta a neki felajánlott bécsi doktori képzést. A bécsi egyetemen megvolt a megfelelő fogadókészség és a hozzá tartozó anyagi fedezet, hogy a doktori iskola elvégzése után végül mint egyetemi tanár az alant felsorolt tematikának a leginkább érdekes és fontos részeivel foglalkozhasson, ami azután a Nobel-díj elnyeréséhez is vezetett.

A lézerfénytérrel való atomionizáció lehetőségei

a) „Nem túl erős” a fénytér, de a többfotonos ionizációhoz elegendő

Domináns a mag Coulomb-tere. Az ionizációhoz szükséges, „egymás után elnyelődő” fénykvantumoknak az ionizációhoz még nem elegendő összenergiája nem egyezik meg egyetlen gerjesztett nívó energiájával sem. Nincs sem egy, sem sokfotonos rezonancia. Ekkor az ionizációs ráta hatványfüggvény formájában függ a fény intenzitásától, ahol a hatvány az ionizáció számára az energiamegmaradási törvény által meghatározott fotonszámmal egyenlő.

b) „Középerős fénytér” és egy- vagy többfotonos rezonanciák

Az atomi állapotok energiája jelentősen változik a fény intenzitásától függően (dinamikus vagy „AC” Stark-effektus, esetleg Autler–Townes-effektus). Az ionizációhoz szükséges, „egymás után elnyelődő” fénykvantumoknak az ioni-

zációhoz még nem elegendő összenergiája megegyezik valamelyik megengedett atomi átmenet energiájával, illetve ehhez közel kerül (egy- vagy sokfotonos rezonanciák). Általában a nívók jelentős részének változik az energiája a fényintenzitás függvényében.

c) Alagúteffektus

Az atom elektromos terével összemérhetővé válik a lézer elektromos tere. Adott (mag-elektron) elrendezésben a lézer elektromos tere a fény minden fél periódusában az atommag elektromos terével ellenirányúvá válik. Potenciálgát alakul ki. Ezen a gáton keresztül a gát tulajdonságaitól függően elektronemisszió válik lehetővé. Alagúteffektussal megvalósuló ionizáció megjelenésére például impulzusüzemű (Q-kapcsolt és módusszinkronizált lézer) használata esetén lehet számítani.

d) A lézer periodikusan változó elektromágneses tere dominál

Az atom Coulomb-tere csak perturbáció. Az elmúlt két évtizedben a lézerek területén alapvető fejlesztések, felfedezések történtek, aminek eredményeként a lézer impulzusideje a femtoszekundumos vagy az annál is rövidebb attoszekundumos tartományba esett, a fény periódusidejének nagyságrendjébe került. Sőt, a legrövidebb nagy intenzitású fényimpulzus ideje már kisebb mint egy fényhullám periódusideje; ma már lehetővé vált a fény egy fél periódusának idejénél rövidebb idejű fényimpulzusok generálása megfelelő intenzitással és ezek kölcsönhatásának tanulmányozása. Ilyenkor jellemző a felharmonikus komponensek megjelenése a lézerfény spektrumában. Ezen a területen elért eredmények vezettek végső soron Krausz Ferenc idejére Nobel-díjához.

Középerős fénytér, sokfotonos ionizációs rezonanciák, a nívószerkezet torzulása

Amit most e történeti visszatekintésben részletesebben vizsgálunk, az a b) pontban leírt témában elért kísérleti eredmények körébe tartozik. Ezeket a moszkvai, a budapesti és az amerikai kutatásaink folyamán értük el 1968 és 1978 között; s ez valamilyen szinten a mostani Nobel-díjjal jutalmazott kutatások előzményének tekinthető.

A következőkben az akkori lehetőségeknek megfelelően a kísérletekhez Q-kapcsolt rubin- és neodímiümműveg-lézereket használtunk, amelyeknek frekvenciáját kis tartományban hangolni is lehetett. Vizsgált atomként az alkáliák és a nemesgázok jöttek szóba. Közülük is az alkáliatomok ionizációs potenciálja néhány elektronvolt, és következésképp a ionizációjukhoz lényegesen kevesebb fotonra van szükség, mint a nemesgázok esetén. Gázkisülésben például hélium esetén a triplet metastabil állapot jól populálódik és az ionizációhoz neodímiümlézer használva öt foton elegendő a metastabil állapotban lévő héliumatom ionizációjához.

Az ionizáció egyik alapvető jellemzője, hogy az ionizált atomok száma hogyan függ a fény intenzitásától. Ha az atomi nívószerkezetet változatlanul, a fénytér nélkülivel azonosnak feltételezzük, akkor az ionizált atomok száma hatványfüggvény alakjában függ a fénytér intenzitásától, és a kitevő az ionizációhoz szükséges fénykvantumok száma. Ehhez az is kell, hogy az „egymás után elnyelődő” fénykvantumok összenergiája sohasem esik egy megengedett atomi átmenet közelébe.

Külön esetet jelent, ha az alapállapotból kiindulva az „egymás után elnyelődő fénykvantumok” által képviselt abszorbeálódó energia még az ionizációhoz szükséges energia elérése előtt megegyezik egy lehetséges gerjesztett atomi állapot energiájával vagy a közelében van. Ekkor *sokfotonos rezonanciáról* lehet beszélni. Ekkor az egész ionizációs folyamat valószínűsége is megnő. Ez a helyzet a triplet metastabil állapotban lévő héliumatomok ionizációjánál, ahol egy Q-kapcsolt neodímiumüveg-lézer hangolható frekvenciájú infravörös fotonjait használtuk a triplet metastabil atomok ötfotonos rezonanciaionizációjára. A negyedik elnyelődő kvantum viszi az atomot a közvetlenül az ionizációs határ alatt elhelyezkedő gerjesztett állapotok közül az egyikbe ($13\ ^3S$). Az 1. ábra a triplet hélium nívószerkezetét mutatja a metastabil állapottól ($2\ ^3S$) az ionizációs határig (IP) a hélium energianívóival és az egymás után elnyelődő fénykvantumok energiáival.

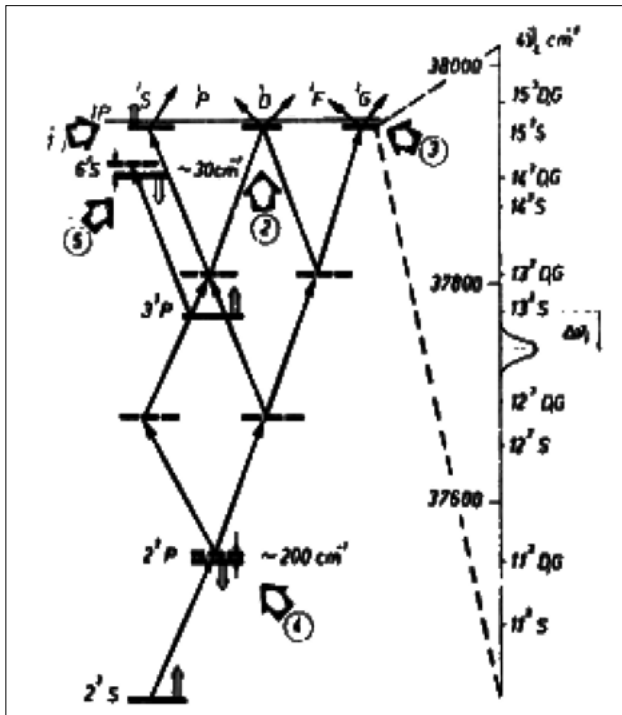
Az 1. ábrán [8] a nyílak mutatják az egymás után elnyelődő fénykvantumok következtében az atom lehetséges „virtuális mozgásirányát”, energiaállapotait (szaggatott vízszintes vonalak) a $2\ ^3S$ metastabil állapotból kiindulva. Az ábra jobb oldalán a tízes főkvantumszám feletti atomi

energiaállapotok láthatók – kinagyítva a függőleges energiaskáának egy a lehetséges „hangolással” létrehozható rezonanciák körüli részletét. A skálán „hullám” jelöli a négy elnyelt foton által átadott energia értékét a skálán jelölt atomi energiaállapothoz ($13\ ^3S$) viszonyítva ($\Delta\omega_i$). A bal oldali skála a hullámszámskála (cm^{-1}).

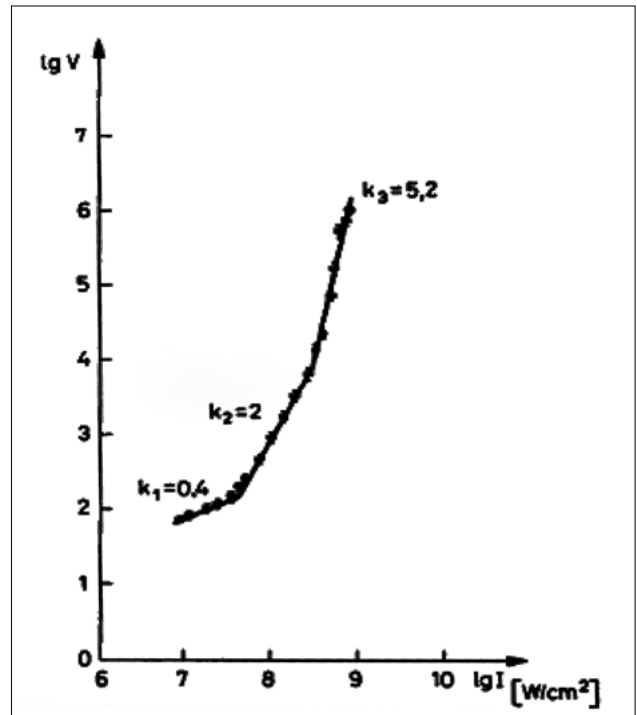
A kísérletben egy Q-kapcsolt neodímiumüveg-lézer impulzusait fókuszáltuk egy üvegsőben létrehozott héliumgázkisülésben elhelyezett Langmuire-szonda elé. A szonda elektromos jelét oscillográffal regisztráltuk a lézerimpulzusok teljesítményének függvényében. A 2. ábra mutatja az eredményt, azaz a szonda sokfotonos ionizációs jele amplitúdójának (v) logaritmusát a fényimpulzus amplitúdója (I) logaritmusának függvényében. $\Delta\lg v / \Delta\lg I = k$ az abszorbeált fotonok száma.

Három szakasz különböztethető meg. A legkisebb meredekségű szakasz meredeksége $k_1 = 0,4$. Ez az azon nívókról való ionizáció következtében fellépő áram, mely az ionizációs határtól kevesebb mint egy foton energiájának megfelelő távolságra lévő energianívókról származik. Ekkor a meredekségnek egynek kellene lennie. Azonban ennél az intenzitásnál az ionizáció átmeneti valószínűsége már telítésbe megy, ezért a meredekség kisebb. A következő szakasz az, ahol a meredekség $k_2 = 2$. Itt azok a nívók adnak járulékot, melyek az ionizációs határtól kettő és három fotonnyi energiakülönbség között helyezkednek el. Hasonlóan a $k_3 = 5,2$ szakasz a triplet metastabil nívóról való ionizáció következménye. Annak, hogy a meredekség itt ötnél valamivel több, a négyfotonos rezonancia az oka (lásd 1. ábra).

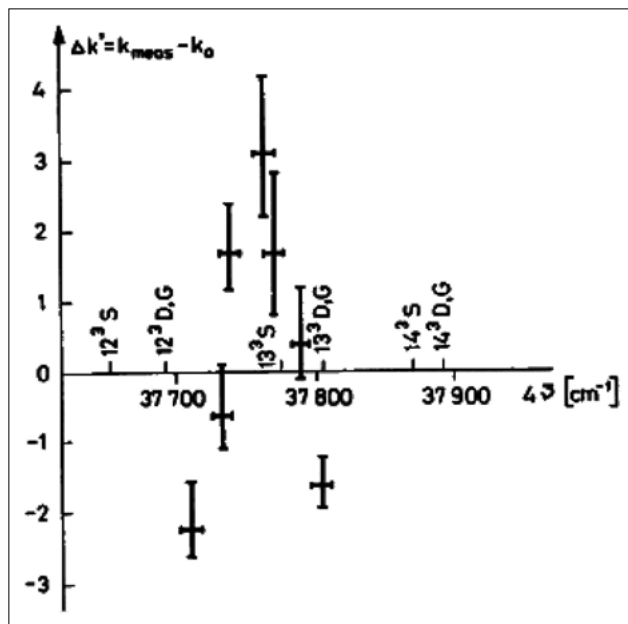
A rezonancia nélküli kitevő $k_0 = 5$ lenne. $\Delta k = k_{\text{meas}} - k_0$ függését mutatja a 3. ábra a „rezonáns nívó



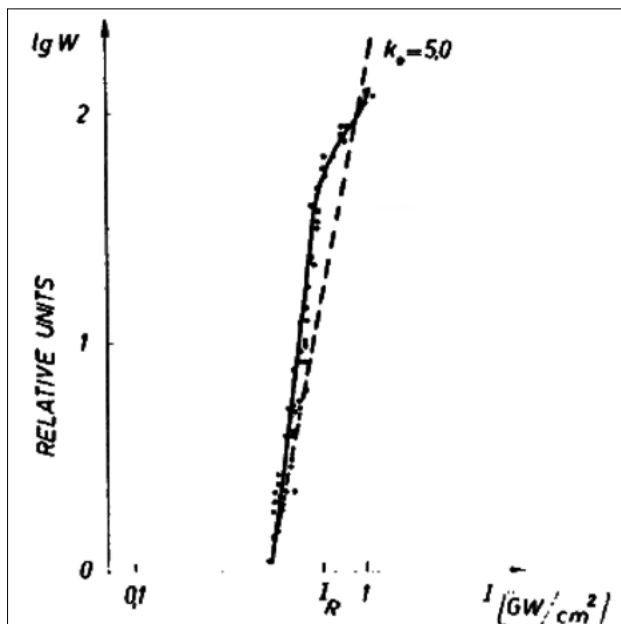
1. ábra.



2. ábra.



3. ábra.



4. ábra.

négyfoton-hullámszáma” függvényében. Az ábrában a pozitív és negatív érték ilyen összeállításban való megjelenése rezonanciajellegre utal. Valójában egy egyszerű megfontolás a következő modell szerinti leírást valószínűsíti. A nagy intenzitású lézertérben az atom rezonanciafrekvenciája a tér növekvő erőssége függvényében eltolódik a kisebb frekvenciák felé. Amennyiben kis intenzitásoknál a lézer frekvenciája a rezonancia alatt volt, az intenzitás növelésével a 13^3S , a „négyfotonos rezonanciánívó” közeledik a rezonanciához, és ezért az átmenet valószínűsége megnő, intenzitása nagyobbá válik, mint amit a fényintenzitás ötödik hatványa szerint várnánk. Következésképpen ennek megfelelően a „rezonánssá váló” ionizáció sebessége is megnő. A további lézerintenzitás-növelés következtében bekövetkező nívóeltolódás hatására a lézer frekvenciája már a rezonancián túljutva visszatér az eredeti ötös hatványfüggvény szerinti intenzitásfüggéshez, ami a logaritmikus ábrázolás miatt az 5 meredekségű egyenest jelenti – ez látható a 4. ábrán.

Hivatkozások

1. Ё. Бакош, Ё. Кантор, А. Киш: Наблюдение трехфотонной ионизации атома гелия, находящегося в возбужденном метастабильном состоянии $2s$. *Краткие сообщения по физике* 11 (1970) 371.
2. Ё. Бакош, Ё. Кантор, А. Киш: Трехфотонная ионизация атома гелия, находящегося в возбужденном метастабильном состоянии $2s$. *Краткие сообщения по физике* 11 (1970) 18.
3. Ё. Бакош, Ё. Кантор, А. Киш: Зондовый метод регистрации ионов, созданным излучением в плазме после свечения разряда. *Препринт ФИАН* № 122 (1970)
4. Ё. Бакош, Т. У. Арсланбеков, А. Киш, М. Л. Нагаева, К. В. Петросян, К. Роза: Многофотонная ионизация возбужденного атома гелия. *Препринт ФИАН* № 64 (1971) 31.
5. J. Bakos, A. Kiss, L. Szabó, M. Tendler: Resonance multiphoton ionization of the triplet metastable He atoms. *Phys. Lett.* 39(4) (1972) 283., *KFKI Preprint*, KFKI-72-27
6. J. Bakos, A. Kiss, L. Szabó, M. Tendler: Multiphoton ionization of

different order from excited states of the He atoms in a glow-discharge. *Phys. Letter* 38A(4) (1972) 317.

7. J. Bakos, A. Kiss, L. Szabó, M. Tendler: Light intensity dependence of the multiphoton ionization probability in the resonance case. *Phys. Lett.* 41A(626) (1972) 163.
8. J. Bakos, A. Kiss, L. Szabó, M. Tendler: Resonance multiphoton ionization. *KFKI Preprint*, KFKI-72-69
9. J. Bakos, A. Kiss, L. Szabó, M. Tendler: Measurement of the perturbation of atomic levels by intense light using the process of resonant multiphoton ionization. *JETP Letters* 18 (1973) 237.
10. Ё. Бакош, М. Л. Нагаева, В. Г. Овчинников, Д. Рубин: Исследование частотной зависимости процесса многофотонной ионизации атомов гелия, возбужденных в $2s$ -состояния. *Краткие сообщения по физике*, № 3 (1973)
11. Ё. Бакош, В. Д. Овсянников, Л. П. Рапопорт: Влияние вынужденных резонансных переходов на вероятность многофотонной ионизации атома. *KFKI Preprint*, KFKI-72-57, *Acta Phys. Hung.* 37(1-2) (1974) 105-113.
12. J. Bakos: Resonance phenomena in the multiphoton ionization of excited atoms. *KFKI Preprint*, KFKI-72-68, *Acta Phys. Hung.* 37(1-2) (1974) 115-131.
13. J. Bakos: Multiphotons ionization of atoms. *Advances in Electronics and Electron Physics* 36 (1974) 58.
14. Ё. Бакош, А. Киш, М. Л. Нагаева, В. Г. Овчинников: Исследование зависимости процесса трехфотонной ионизации атома гелия, находящегося в метастабильном состоянии от частоты циркулярно-поляризованного света. *Физ. Плазмы*, № 1 (1975) 693.
15. Ё. Бакош, Н. Б. Делоне, А. Киш, Н. Л. Монаков, М. Л. Нагаева: Трехфотонная ионизация атома гелия. *Ж. Эксп. Теор. Физ.* № 781 (1976) 501.
16. J. Bakos: AC Stark effect and multiphoton processes in atoms. *Phys. Rep.* 31C (1977) 211.
17. F. Krausz, T. Juhász, J. S. Bakos, Cs. Kuti: Microprocessor-based system for the measurement of the characteristics of ultrashort laser pulses. Technical University Budapest, *Preprint* (1985)
18. F. Krausz, P. Lásztity, J. S. Bakos, E. Wintner, G. Leising: The influence of photoinduced structural distortions on interband absorption in polyacetylene. *Appl. Phys. B* 45 (1988) 21.
19. F. Krausz, T. Juhász, J. S. Bakos, Cs. Kuti: Microprocessor-based system for measurement of the characteristics of ultra-short laser pulses. *J. Phys. E. Sci. Instr.* 19 (1986) 1027.
20. J. S. Bakos, Zs. Soerlei: Proceedings of the 17. International conference on phenomena in ionized gases held at Budapest, Hungary, 8-12 Jul. 1985 v. 1. (1985).

A SOKFOTONOS FÉMFELÜLETI FOLYAMATOKTÓL AZ ALAGÚTEMISSZIÓN ÁT AZ ATTOSZEKUNDUMOS FÉNYIMPULZUSOKIG: A 2023. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJ ELŐZMÉNYEI A KFKI/SZFKI-BAN

Tóth Csaba¹, Varró Sándor²

¹BELLA Lézeres Részecskegyorsító Centrum, LBNL, Berkeley, Kalifornia, USA,

²ELI-ALPS, ELI-HU Non-Profit Kft., 6728 Szeged, Wolfgang Sandner utca 3.

Bevezetés – a Nobel-díj apropóján

Mint azt a tavaly októberi híradásokról megtudtuk, a 2023. évi fizikai Nobel-díjat három olyan kutatónak ítélték oda, akik kimagasló eredményeket értek el az attoszekundumos fényimpulzusok kísérleti megalkotásában, illetve azok alkalmazásaiban az elektronok ultragyors dinamikájának vizsgálatára. Különös öröme adhat okot a magyar kutatófizikus-közösség számára az a tény, hogy az egyik díjazott, Krausz Ferenc külföldön végzett munkájának gyökerei Magyarországra nyúlnak vissza. Ez a körülmény a Nobel-díj-bizottság által kiadott részletes indoklásban [1] két speciális hivatkozás [2, 3] formájában is megnyilvánul, amely referenciák a Központi Fizikai Kutatóintézet (KFKI) Szilárdtestfizikai Kutatóintézetében (SZFKI) korábban végzett, a Nobel-díj által elismert témához szorosan kapcsolódó fontos kutatásokra utalnak. Bár erről az attoszekundumos tudományterületről és a hozzájuk kapcsolódó hazai attoszekundumos eredményekről jelentek már meg korábban is hasonló összefoglalók a *Fizikai Szemle*ben [4–6] – köztük a friss Nobel-díjas Krausz Ferenc és a néhai Farkas Győző tollából –, talán mégis érdemes most ebben az új, örömteli helyzetben még egyszer kiemelni ennek a témának a kvantummechanika alapjaihoz visszanyúló érdekességét és fontosságát, valamint röviden áttekinteni az SZFKI-ban korábban folyó, a sokfotonos fémfelületi fotoemisszióval kapcsolatos releváns kutatások eredményeit. Megjegyzendő, hogy a KFKI egy másik intézetében, a Részecske és Magfizikai Kutatóintézetben (RMKI) is zajlottak hasonló, gázok sokfotonos ionizációjára vonatkozó kutatások, amelyekről Bakos József cikkében olvashatunk a *Fizikai Szemle*nek ugyanebben a számában.



Tóth Csaba fizikus, diplomáját és doktori fokozatát az ELTE TTK-n szerezte, majd az MTA budapesti Szilárdtestfizikai Kutatóintézetének tudományos munkatársaként számos nemzetközi együttműködésben vett részt Európa különböző lézerlaboratóriumokban. 1993-tól az USA-ban előbb a houstoni Rice Egyetemen, majd a Kaliforniai Egyetem egyik San Diego-i lézerlaboratóriumában dolgozott, 2000 óta a kaliforniai LBNL-ben, Berkeley-ben végez kutatásokat az ultrarövid, nagy intenzitású lézerimpulzusokkal plazmákban történő részecskegyorsítás és az ilyen kísérletekhez szükséges legújabb, PW-os lézerrendszerek fejlesztése területén.

A fény-anyag kölcsönhatások vizsgálata ultrarövid időskálákon a KFKI-ban

A fény-anyag kölcsönhatások egyik legelemibb példája a fotoeffektus (fényelektromos jelenség), aminek ele-gáns értelmezéséért (1905) Albert Einstein az ő saját Nobel-díját kapta 1921-ben. A kötött állapotból fény hatására kilépő elektronok energiaeloszlásának leírására kifejlesztett első modell szerint: „az elektronok maradék mozgási energiája egyenlő a gerjesztő foton energiájából kivonva a kilépési munkának megfelelő potenciál (illetve atomok esetében az ionizációs potenciál) értékének megfelelő energiát”. Az így megfogalmazott törvényszerűség a kvantummechanika kialakulásának egyik legfontosabb mérföldköve lett. Ennek általánosítása a kvantumelektrodinamika (QED), amely az elektromágneses kölcsönhatások (pl. a fény és a töltött részecskék kölcsönhatásának) általános elmélete, és egyben a modern kvantumtérelméletek prototípusa is. Kellően intenzív fénnel (pl. lézersugárással) gerjesztve az anyagi rendszert (atomokat, molekulákat, vagy szilárdtestet, pl. fémfelületet), annak válaszfüggvénye (pl. a fémfelületből távozó elektronáram intenzitásfüggése) eltér az egyenes arányosságtól. Az utóbbi példánál maradva az elektronáram az intenzitás magasabb hatványával lehet arányos, sőt annak transzcendens függvénye is lehet, mint például az optikai alagúteffektus esetében. Az ilyen nemlineáris folyamatok során az elektron egyszerre több fotonot nyel el, s ennek elméleti leírásához vagy a QED magasabb rendű perturbációs számítása használható, vagy eleve nem perturbatív módszerek szükségesek [7]. Ezek a sokfotonos jelenségek az elektron ener-



Varró Sándor 1979-ben szerzett fizikus diplomát a JATE (SZTE) TTK-n, ugyanekkor kezdte fizikusi pályáját doktori ösztöndíjasként az időközben többször átszervezett KFKI-ban, ahol 1999-től tudományos tanácsadó, a Wigner FK SZFI-ben 2023-ig. 1988–89-ben a MPI-ben dolgozott Humboldt-ösztöndíjasként. 1999-től az MTA doktora, 2001-ben habilitált, 2005-ben magántanári címet kapott az SZTE-n. 2014-től az ELI-ALPS, ELI-HU Kutatási és Fejlesztési Non-profit Kft. alkalmazásában az Elméleti és Szimulációs Csoport vezetője. Főbb kutatási területei az intenzív lézerekben lejátszódó sokfotonos folyamatok kvantum-elektrodinamikája, mértékinvariáns és relativisztikus Wigner-függvények, attosec.-os impulzusok.

giaspektrumában egy-egy fotonenergiányi távolságra lévő energiaszintek fellépésével kapcsolatosak. Az ilyen jelenségek kísérleti igazolása a lézeres foton-elektron, illetve fénymag kölcsönhatások vizsgálatának kulcskérdése volt az 1960-as, 1970-es években.

Amennyiben a lézertérrel való kölcsönhatás igen erős, akkor ezt egzaktul figyelembe vehetjük az ún. Volkov-állapotok segítségével [8]. A legegyszerűbb esetben szemiklasszikus és nemrelativisztikus leírást használva, valamint a lézersugárzás elektromos terét az ω frekvenciájú $\mathbf{F} = F_0 \mathbf{e} \sin(\omega_0 t + \phi)$ monokromatikus térrel modellezve a Volkov-állapotokat (mint a Schrödinger-egyenlet egzakt megoldásait) a következőképpen fejezhetjük ki

$$|\psi_p(t)\rangle = |\mathbf{p}\rangle \exp \left[-\frac{i}{\hbar} E t - i \mu_0 \frac{c(\mathbf{p} \cdot \mathbf{e})}{\hbar \omega_0} \sin(\omega_0 t + \phi) - i \frac{U_0}{2\hbar \omega_0} \sin(2\omega_0 t + 2\phi) \right] e^{i\delta_0}, E = \frac{\mathbf{p}^2}{2m} + U_0, \quad (1)$$

(az állapot kezdőfázisát az $e^{i\delta_0}$ tényező tartalmazza). Az (1) egyenletben bevezettük a μ_0 dimenziótlan intenzitásparámért, és az U_0 ponderomotoros energiaeltolódást (dinamikus Stark-eltolódást),

$$\mu_0 = \frac{eF_0}{mc\omega_0} = 1,06 \cdot 10^{-9} \left[\frac{S_0}{(\text{W}/\text{cm}^2)} \right]^{1/2} \left[\frac{1}{(\hbar\omega_0/\text{eV})} \right], \quad (2)$$

$$U_0 = (1/4) \mu_0^2 mc^2.$$

A μ_0 intenzitásparáméter klasszikus mennyiség, a fotonenergiát a (2) egyenlet jobb oldalán csak az egyszerűbb becslések kedvéért vezettük be. A Newton-egyenletből egyszerűen megkapható, hogy $\mu_0 = v_{\text{osc}}/c$, ahol v_{osc} a szabad elektron oszcillációjának sebességamplitúdója az $S_0 = F_0^2/8\pi$ intenzitású $\mathbf{F}(t)$ térben. Optikai tartományban ($\hbar\omega_0 \approx 1$ eV), 10^{18} W/cm² intenzitásoknál a $v_{\text{osc}}/c = \mu_0$ hányados egységnyi nagyságrendű, vagyis a nemrelativisztikus leírás már nem használható.

A nemlineáris fotoeffektus nem perturbatív leírásához, az ún. Keldis-közelítésben a végállapotot egy $|\psi_p(t)\rangle$ Volkov-állapottal reprezentáljuk, és a kezdőállapotot a $|\psi_g(t)\rangle \exp\{-(i/\hbar)E_g t\}$ alapállapotnak vesszük, ahol $|E_g| = A$ az ionizációs potenciál. Egy n -edrendű abszorpció folyamat átmeneti mátrixelemére a következő adódik:

$$T_{fi}^{(n)} = -2\pi i B_n(z_0, u_0) \langle \mathbf{p} | V | \psi_g \rangle \times \delta(E_p + U_0 + |E_g| - n\hbar\omega_0), \quad (3)$$

$$B_n(z_0, u_0) = \sum_{k=-\infty}^{\infty} J_{n-2k}(-z_0) J_k(-u_0),$$

ahol V az elektront kötő potenciál, és bevezettük a $B_n(z_0, u_0)$ ún. általánosított Bessel-függvényt a következő paraméterekkel: $z_0 = \mu_0 c(\mathbf{e} \cdot \mathbf{p})/\hbar\omega_0$ és $u_0 = U_0/2\hbar\omega_0$. Ezek a függvények az (1) Volkov-állapotok Fourier-kifejtéséből adódnak az

$$\exp(iz \sin \phi) = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} J_n(z) e^{in\phi}$$

Jacobi–Anger-formula felhasználásával. A szemiklasszikus leírásban a sokfotonos átmenetek megjelenése valójában a fényfrekvenciás periodikus fázismoduláció következménye. A delta függvény az energiamérleget fejezi ki; n abszorbeált foton energiája fedezi az $|E_g| + U_0$ Stark-eltolódott ionizációs energiát és a kimenő elektron $E_p = p^2/2m$ kinetikus energiáját, ahol $p = [2m(n\hbar\omega_0 - |E_g| - U_0)]^{1/2}$. Ha $u_0 \ll z_0$, akkor $B_n(z_0, u_0) \approx J_n(-z_0)$, vagyis a sokfotonos amplitúdók jól közelíthetők egyetlen Bessel-függvénnyel. Keldis [9] megmutatta, hogy a w teljes ionizációs valószínűség a $\gamma = \omega_0 \sqrt{2mA}/eF_0 = 2\omega_0 \tau$ parameter („Keldis-gamma”) értékétől függően két minőségileg különböző intenzitásfüggést mutat. Ha $\gamma \gg 1$, akkor $w \sim S_0^n$, vagyis ebben az ún. sokfotonos tartományban ez a valószínűség az n -edrendű perturbációs számítással összhangban van, s ez a Bessel-függvény hatványsorának első tagjából is kiadódik. Az ellenkező $\gamma \ll 1$ esetben,

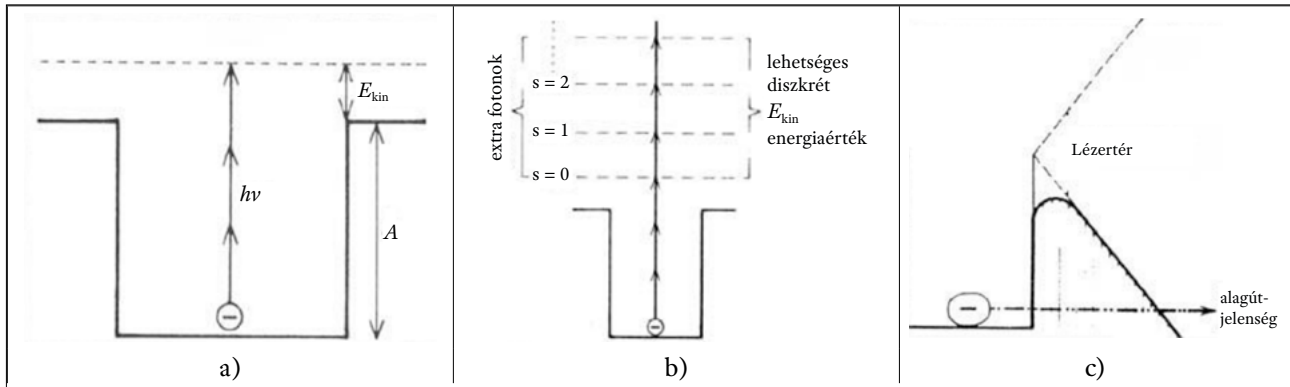
$$w \sim \exp\{-4\sqrt{2mA^3/3\hbar eF_0}\},$$

ami az F_0 sztatikus elektromos térbeli alagúteffektus valószínűségével analóg kifejezés. A Keldis-gamma kifejezhető a következőképpen is: $\gamma = 2\omega_0 \tau = 4\pi\tau/T_0$, ahol τ a lézertér által letört maximális potenciállépcsőn történő alagutazás ideje, és T_0 az optikai periódusidő. Minél nagyobb az intenzitás, annál vékonyabb a letört potenciállal, tehát az alagutazási idő kisebb lehet, mint egyetlen optikai periódusidő (lásd az 1c. ábrát). Például Coulomb-potenciál esetében (H-atom) $A = e^2/2a_0 = 13,6$ eV, ahol $a_0 = \hbar^2/m_e^2 = 0,5 \times 10^{-8}$ cm a Bohr-sugár. Ebben az esetben a Keldis-gamma (reciproka) így is kifejezhető:

$$\frac{1}{\gamma} = \frac{eF_0 a_0}{\hbar\omega_0} = \frac{\text{egy Bohr-sugár távolságon végzett munka}}{\text{egy foton energiája}}. \quad (4)$$

Ez azt mutatja, hogy az optikai alagúthatás ($1/\gamma \gg 1$) akkor dominál, ha a lézertér által egy Bohr-sugár távolságon végzett munka sokkal nagyobb, mint a fotonenergia.

A nemlineáris folyamatok fentebb leírt elméletének fémek esetére való alkalmazásával és azok kísérleti vizsgálatával már az 1960-as évektől foglalkozott a KFKI-ban Farkas Győző és csoportja (köztük Horváth Zoltán György és a szerzők is: Tóth Csaba mint Farkas Győző diplomamunkása, majd doktorandusza, később kollégája, illetve Varró Sándor mint Farkas Győző évtizedeken keresztüli közeli munkatársa). Ezen kutatások során több olyan eredmény is született – jórészt a KFKI-ban pl. [10, 11], majd nemzetközi együttműködések keretében francia [12, 13], kanadai [14], görög [15] és orosz [16] laboratóriumokban elvégzett mérések alapján – amelyek bizonyították, hogy a kvantumelektrodinamika pontosan írja le a sokfotonos folyamatokat mind a viszonylag kis fényintenzitások (perturbatív tartomány), mind pedig az intenzív lézerterek esetében; és ez érvényes az op-

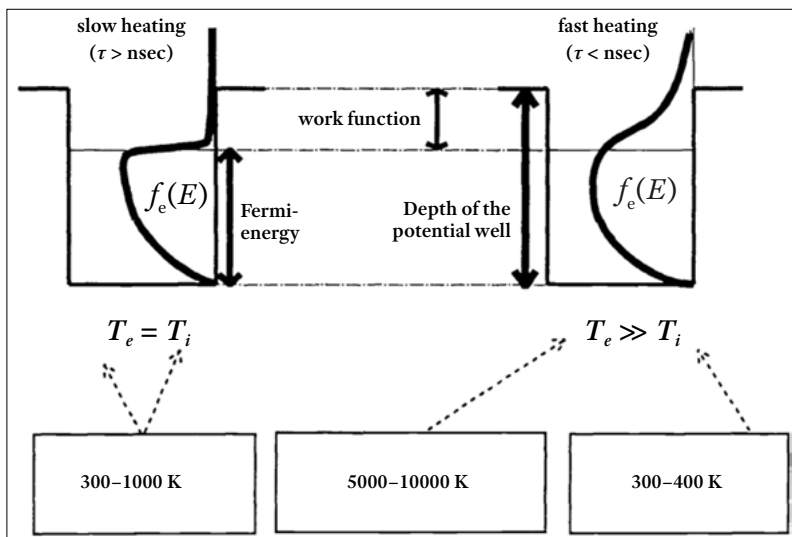


1. ábra. a) A lineáristól eltérő, magasabb rendű, avagy sokfotonos fotoeffektus energiasémája: a fémekből kilépő elektronok maradék kinetikus energiája $E_{kin} = N \cdot h\nu - A$, ahol N a minimálisan szükséges fotonok száma, $h\nu$ a megvilágító fény fotonjainak kvantumenergiája, A a kilépési munka. b) Volkov-állapotok energiaszintjei (lásd a (3) formulát): az intenzív lézerterek hatására és jelenlétében kilépő elektronok további, a szükségesnél nagyobb számú fotonokat is elnyelhetnek, ezzel további energiára téve szert. c) Az optikai alagútemisszió oszcilláló külső elektromos tér, azaz pl. erős lézertér elektromos terének hatására

तिकai alagútemisszióra, valamint az ahhoz vezető átmeneti tartományokban is. Mindezen kísérletezés közben az is kiderült, hogy az atomok esetében megismert elméleti módszerek jól alkalmazhatók a fémekből, illetve szilárd anyagokból intenzív fény által létrehozott elektronkibocsátás leírására is.

Az úgynevezett nemegyensúlyi elektrongerjesztési folyamatok (lásd 2. ábra) részletes vizsgálatának szükségessége is felmerült bennünk már akkoriban: vajon hogyan is zajlik le az elektronok „azonnali” fotonelnyelése a szubpiko-, esetleg szubfemtosekundumos időskálán? Ez atomok esetében az elektronok energiaszintek közötti átugrásának vizsgálatát, illetve fémek és szilárdtestek esetében valamilyen „csobbanáshoz” hasonló, nemegyensúlyi folyamatok megértését tűzte ki célul. Ez ma is a kutatások homlokterében van (most már laboratóriumban is elérhető, attosekundumos fényforrások segítségével,

éppen a 2023. évi fizikai Nobel-díjasok tevékenységének köszönhetően). Igaz, hogy annak idején nekünk nem volt néhány pikosekundumnál rövidebb impulzusokat generáló lézerünk, de ez a hiány nem akadályozott meg minket különféle hipotézisek felállításában. Mindemelllett azért a meglévő pikosekundumos lézereinkkel elkezdtünk több ide vonatkozó kísérletet is – például magas rendű autokorrelációs [17], és spektroszkópiai [18] mérési elrendezésekkel –, hogy megeljük a nemegyensúlyi elektrongerjesztések nyomait a fémfelületből kilépő fotoelektronok és másodlagos fénykibocsátások spektrumának elemzésével. Ezen kísérletek eredményei között olyan is volt, amelyben meglepően nagy, több száz eV energiájú elektronok kilépését figyeltük meg már viszonylag kis fényintenzitások esetében is [19]. Ez arra utalt, hogy lennie kell valamilyen ultragyors fűtési mechanizmusnak is az általunk akkoriban elérhető pikosekundumos időtartományoknál rövidebb időskálákon is.



2. ábra. A termikus elektronemisszió típusai lassú fűtés és nem egyensúlyi, ultragyors felmelegítés hatására. Az elektronok $f_e(E)$ Fermi-eloszlását a fém potenciálgödörében a vas-tag görbék jelképezik mindkét esetre, a függőleges tengelyen az energia. T_e és T_i az elektrongáz (T_e), illetve az ionrács (T_i) „pillanatnyi”, önmagával egyensúlyban lévő rendszerként értelmezett hőmérsékletének értékeit jelentik

A küszöb fölötti ionizáció és magasharmonikus-keltés (ATI, ATP és HHG)

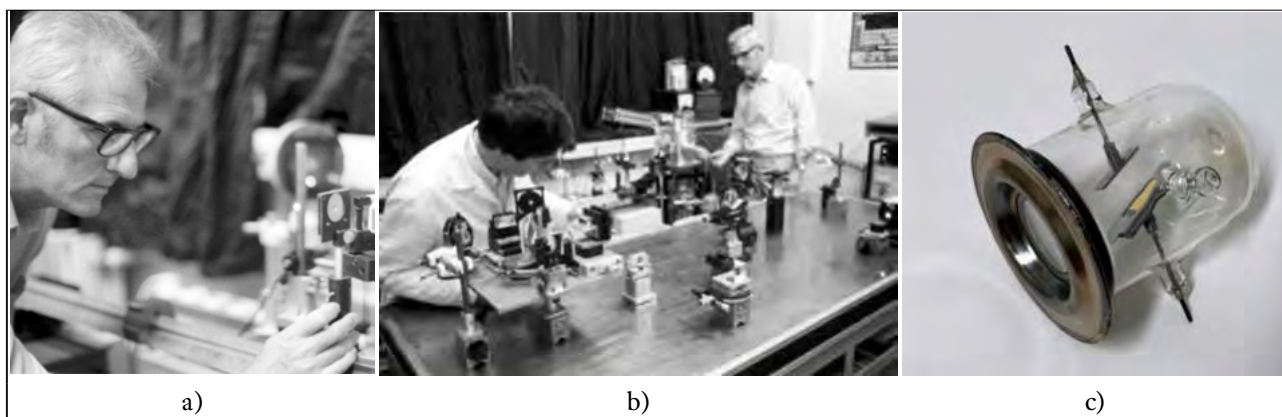
Amint azt az előző fejezetek leírásából is láthattuk, intenzív terekben a fotoionizáció során a kilépéshez minimálisan szükségesnél több foton elnyelése is lehetséges. Ennek a folyamatnak, az úgynevezett küszöb fölötti ionizációnak az első kísérleti megfigyelése ugyanahhoz a francia kutatócsoporthoz fűződik, amelyben egy másik idei Nobel-díjas kutató a pályáját kezdte. Pierre Agostini és munkatársai közölték az első olyan cikket [20], amelyben a szabaddá váló elektronok energiaspektrumának analizálásával kimutatták az ilyen, „küszöb fölötti ionizációs” (Above Thresh-

old Ionization – ATI) folyamat létét. Ehhez hasonlóan, a KFKI-ban Farkas Győző vezetésével végzett kísérleteinkben fémekre is kimutattunk hasonló jelenséget, a „küszöb fölötti fotoemisszió” (*Above Threshold Photoeffect* – ATP) létét, azaz diszkrét, vonalas energiaspektrummal rendelkező elektronok kibocsátását, ahol az energiaspektrumban lévő csúcsok közti távolság éppen a gerjesztő fotonok kvantumenergiájának felel meg [21]. További kísérleteink – ismét csak magyar-francia együttműködés keretében, Pierre Agostini részvételével – azt is kimutatták [22], hogy ha egyre hosszabb (esetünkben 12 μm) hullámhosszú fényt használunk a fémfelület megvilágítására, akkor az elektronkilépés jellege eltolódik a sokfotonos folyamatoktól az alagútmisszió területére. Az atomok fotoionizációja és a fémfelületekből kilépő elektronok fotoeffektusa közötti analógia a továbbiakban is nagyon hasznosnak bizonyult. Miután 1991-ben Anne L’Huillier (a harmadik idei Nobel-díjas) kutatótársaival magas rendű harmonikusok megjelenését figyelte meg nemesgázokra fókuszált intenzív lézerimpulzusok terében [23], mi azonnal a fémekre vonatkoztatott lehetőségeket kerestük. A hevesen meg rángatott harmonikus oszcillátorok analógiájából következtethetően várható volt, hogy az elektronkibocsátás mellett „felhangok” (azaz fény esetében felharmonikus optikai sugárzás) jelennek meg. Eme felületi harmonikusok kísérleti vizsgálata és első kimutatása fémfelületeken a KFKI-ban és nemzetközi együttműködésben történt meg [24]. Ilyen előzmények után és persze Farkas Győző intuícióira utalva talán könnyebben érthetővé válik, hogy azonnal nekiláttunk nemcsak ezeknek a fémfelületi magas harmonikusoknak a kísérleti megfigyeléséhez, hanem eljátszottunk a gondolattal (és egy Commodore-64 személyi számítógépre írt egyszerű programmal), hogy milyen nagyszerű is lenne ezeket a harmonikus komponenseket összelebegtetni szubfemtosekundumos impulzusok létrehozása érdekében. Ez a módszer a fémek

esetére azért látszott még a gázbeli harmonikusoknál is érdekesebbnek, mert itt minden egyes harmonikusrend megjelenhet, páros és páratlan is egyaránt. Ez ellenében van a gázok esetével, ahol a nemesgázok térbeli szimmetriája következtében csak a páratlan rendű magas harmonikusok jelenhetnek meg. Ezért is utaltunk az attosekundumos impulzusok létét megjósoló cikkünk [2] utolsó soraiban is arra, hogy a szilárd felületeken megvalósuló harmonikusokeltetés különösen érdekes terület lehet – ami be is igazolódott a következő évtizedek során. Ma már külön szakterületként jelenik meg a gázokbeli illetve a felületi harmonikusok keltése – és persze ezzel együtt az attosekundumos impulzusok generálása és alkalmazása is a kétféle módszerrel.

Femtosekundumos lézerfejlesztés és az attosekundumos lézerimpulzusok létének igazolása – Krausz Ferenc úttörő munkássága

A fentebb leírt elektronmissziós és felületi magasharmonikus-keltési kísérletekkel párhuzamosan, ugyanakkor egymás munkájára és eredményeire szorosan figyelve és rendszeresen kommunikálva, Krausz Ferenc bécsi laboratóriumában intenzív és céltudatos femtosekundumos lézerfejlesztés zajlott [4]. Ennek a folyamatnak is volt egy kulcsfontosságú KFKI-s kapcsolata: a csörpölt lézertükrök kifejlesztése Szipőcs Róbert és Ferencz Kárpát által (lásd az ide vonatkozó cikket ugyanebben a *Fizikai Szemle*-számban Szipőcs Róberttől). Miután Krausz Ferenc kutatócsoportja sikeresen megvalósította a csak néhány optikai ciklusú impulzusokat szolgáltató femtosekundumos lézereket [3], majd azokkal sikeresen gerjesztett nemesgázokban magas harmonikusokat, elkezdődhetett annak bizonyítása is, hogy a sok egymással szinkronban lévő magas harmonikus fényimpulzus so-



3. ábra. a) bal oldali fotó: Farkas Győző, a sokfotonos folyamatok kutatásának kiemelkedő, iskolateremtő alakja a KFKI kutatólaboratóriumában 1990-ben; b) jobb oldali fotó: Farkas Győző a jelen cikk egyik szerzőjével, Tóth Csabával, az elektronspektroszkópiai kísérletek beállítása közben. c) A fent leírt korai kísérletekben alkalmazott klasszikus céltárgy egy ún. „csöbör” volt. Ez az informális elnevezés egy fémlektrodákat tartalmazó, vákuumra ($<10^{-7}$ mbar) leszivattyúzott és lezárt üvegedényt jelentett. Az egyik elektróda mindig gondosan előkészített, felületkezelt, rendkívül sima aranylemez volt olyan elrendezésben, amely lehetővé tette mind a lézeres megvilágítás hatására a fémlemezről kilépő elektronok, mind pedig a felületnél keletkező másodlagos fényjelenségek észlelését

rozata valóban létrehoz interferometrikus összelebegés eredményeképpen attoszekundumos impulzusokat is, ahogy azt korábban megjósoltuk [2]. A Krausz Ferenc és munkatársai által kidolgozott mérési módszer (amelynek kulcseleme egyébként megint csak az intenzív terekben lejátszódó elektronkibocsátás során keltett elektronok energiaspektrumának elemzésén alapul) bizonyította először az egyedi, különálló attoszekundumos fényimpulzusok létét. Az ezt követő két évtizedben (Krausz Ferenc előbb bécsi, majd müncheni laboratóriumával az élen) egyre több specifikus kísérletet végeztek a világ több – ettől kezdve mindenütt „attoszekundumosnak” nevezett – laboratóriumában az atomi és molekuláris elektronátmenetek, szilárdtestekbeli elektrongerjesztési folyamatok pontosabb megértését célozva a szubfemtosekundumos, attoszekundumos időskálán. Ezek a kísérletek éppen azokra a kérdésekre válaszoltak, amelyeket a korábbi KFKI-s „foton-elektron” kutatások már korábban felvetettek. Ilyen típusú kutatásokra példa a forró elektronok dinamikájának vizsgálata különböző halmazállapotú anyagokban [25], vagy az elektron-elektron szórási és elektronkilépési folyamatok attoszekundumos felbontású tanulmányozása [26].

Távlatok és tanulságok

Az attoszekundumos mérés technika kifejlesztése és az intenzív attoszekundumos impulzusok előállításának lehetősége számos új alkalmazási területet nyitott meg már eddig is; és hamarosan még többet fog elérhetővé tenni. Ezek közül itt csak két témát említünk meg – egyet röviden, egy másikat kicsit részletesebben –, amelyek megint csak kapcsolódnak a KFKI-ban korábban kezdett és a Wigner Fizikai Kutatóközpontban napjainkban is folyó kutatásokhoz.

a) Felületi plazmonok

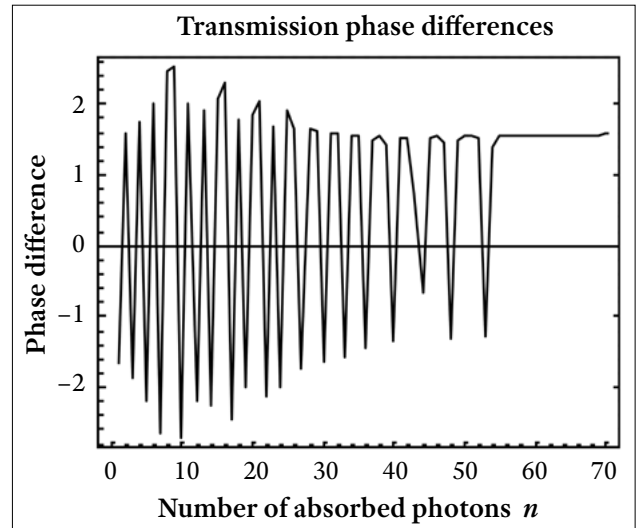
A felületi koherens elektronállapotok – vagy más néven plazmonok – kutatása szintén hosszú évtizedekre tekinthet vissza a KFKI-ban, SZFKI-ban, Wigner FK-ban. A Kroó Norbert és munkatársai által kezdett szisztematikus kutatások eme felületi jelenségek összekapcsolására ultragyors gerjesztő fényimpulzusokkal, valamint felületi fény- és elektronmikroszkópiával mára egy új szakterület, a nanoplazmonika létrejöttéhez vezettek. Ezen belül jelentős hazai eredmények is születtek például a nemlineáris plazmonikában [27] és a plazmonok által gerjesztett másodlagos fotonok statisztikai tulajdonságainak a vizsgálatában is [28]. Ennek a témának nemzetközi elismertségű művelője ma a Wigner FK-ban Dombi Péter, Krausz Ferenc egykori doktorandusza (lásd Dombi Péter cikkét ugyanebben a *Fizikai Szemle*-számban). A téma szervesen kapcsolódik az attoszekundumos világhoz, amelyről egy nemrégiben megjelent áttekintő cikk ad részletes képet [29].

b) Ultragyors, attoszekundumos elektroncsomagok

Az attoszekundumos fényimpulzusok a magas rendű felharmonikus komponensek konstruktív interferenciájából származnak. Ezzel analóg jelenséget várunk a küszöb feletti elektronok hullámfüggvény-komponenseinek összelebegéséből is [30]. A jelenség elméleti leírásához a lézerréteg által a fémfelületen indukált oszcilláló kettős-réteg közeli terén történő kvantummechanikai szórás-problémát oldottuk meg. A rugalmatlanul szóródó, a fémfelületből ezzel a speciális sokfotonos fotoeffektussal kiszabadított elektron Ψ_{II} hullámfüggvénye $E_0 + n\hbar\omega_0$ energiájú szabadelektron-de Broglie-hullámok szuperpozíciója, amely a következő alakra hozható:

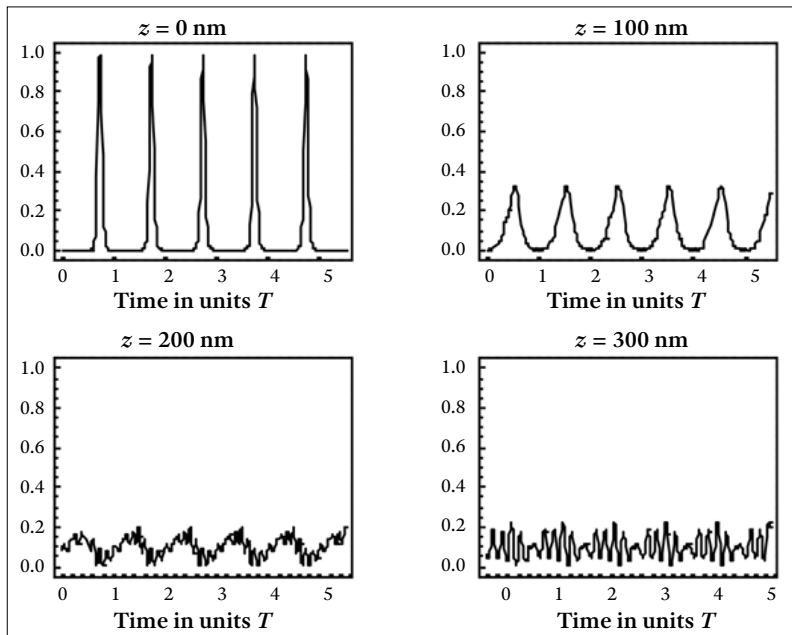
$$\Psi_{II} = \sum_n T_n \exp \left[-2\pi i \left(\frac{E_0}{\hbar\omega_0} + n \right) \frac{t}{T_0} + 2\pi i \sqrt{\frac{2mc^2}{\hbar\omega_0} \left(\frac{E_0}{\hbar\omega_0} + n \right)} \frac{z}{\lambda_0} \right], \quad (5)$$

ahol T_n az n -edik csatorna valószínűségi amplitúdója. Látható, hogy az idő természetes egysége a T_0 optikai periódusidő (pl. 2,6 femtoszekundum a Ti:zafir-lézernél), és a természetes hosszegység $\lambda_0 [\hbar\omega_0/2mc^2]^{1/2}$, amely a fémfelületre merőleges irányban vett távolság egysége; ez jó közelítéssel 1 nm a tárgyalt esetben. Az alábbi, 4. ábra az egymást követő abszorpciók amplitúdók relatív fázisát mutatja.



4. ábra. Az n -fotonos transzmissziós amplitúdók fáziskülönbsége radiánban

Az 5. ábrán a fémfelületre merőleges irányban távozó elektronok áramsűrűségének időbeli viselkedését mutatjuk be. Itt a $(\hbar/4q_0) \text{Re}[\Psi_{II}^*(-i\partial_z \Psi_{II})]$ dimenziótlan (normált) mennyiséget ábrázoltuk az elektronspektrum $54 < n < 66$ tartománybeli komponenseinek szuperpozíciója felhasználásával. A fém felületét ($z = 0$) ideális $T/10 \approx 250$ attoszekundumos csúcsokból álló vonulat hagyja el, amely fokozatosan szétfolyik a vákuumban terjedő de Broglie-hullámok inherens diszperziója miatt (a fázisok



5. ábra. A fémfelületre merőleges irányban távozó elektronok áramsűrűségének időbeli viselkedése

nem triviális z -függése következtében). A fémfelületről 300 nanométer távolságban már csak egy zajszerű elektronáram-sűrűséget látunk. A [30] jelű hivatkozásban ugyanakkor bebizonyítottuk, hogy az áramsűrűség ezen kollapszusa a terjedés során periodikusan, részlegesen visszafordul, és az attoszekundumos hullámvonalat a fémfelületről makroszkopikus távolságokra újraéled.

Végezetül érdemes tehát észrevennünk, hogy a Központi Fizikai Kutatóintézetben az 1960-as évek óta folyamatosan végzett alapfizikai kutatások is jelentős mértékben – sokszor az igényes tudományos légkör megteremtésével és fenntartásával, máskor ifjú tehetségek gondozásával, ismét máskor inspirációk nyújtásával – járultak hozzá a természetben lezajló ultragyors jelenségek egyre mélyebb és részletesebb megértéséhez, ennek a tudományterületnek a nemzetközi felemelkedéséhez és Nobel-díjjal való elismeréséhez.

Köszönetnyilvánítás

A jelen cikk témáinak összeállításában, a leírt események és motivációk pontos felidézésében, valamint a kézirat végső formába öntésében sok segítséget kaptunk Horváth Zoltán György és Czitrovsky Aladár, egykori SZFKI-s munkatársainktól is, akiknek ezúton mondunk köszönetet.

Hivatkozások

1. Nobel-indoklás: Scientific Background to the Nobel Prize in Physics 2023. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2023/advanced-information/>
2. Farkas Gy., Tóth Cs.: *Phys. Lett.* A168 (1992) 447.
3. Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O., Szpöcs R., Ferencz K., Spielmann Ch., Sartania S., Krausz F.: *Opt. Lett.* 22 (1997) 522.

4. Krausz F.: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* 52/1 (2002) 12.
5. Farkas Gy.: Attoszekundum időtartamú fényimpulzusok. *Fizikai Szemle* 56/12 (2006) 408.
6. Major B., Kőrös P., Varjú K.: Attoszekundumos impulzusokeltetés makroszkopikus optimalizációja. *Fizikai Szemle* 67/10 (2017) 331.
7. Varró S.: Szabad elektronok és intenzív fény kölcsönhatásának elméleti vizsgálata. (PhD dissertation, 1981). *Magyar Fizikai Folyóirat* XXXI (1983) 399–454.
8. Volkov D. M.: *Z. für Phys.* 94 (1935) 250.
9. Keldysh L. V.: *Sov. Phys. JETP*. 47 (1964) 1307.
10. Farkas Gy., Horváth Z. Gy.: *Phys. Stat. Sol.* 3(a) (1970) K29.
11. Farkas Gy., Horváth Z. Gy., Kertész I.: *Physics Letters* 39A (1972) 231.
12. Lompré L. A., Thébault J., Farkas Gy.: *Appl. Phys. Lett.* 27 (1975) 110.
13. Lompré L. A., Mainfray G., Manus C., Thébault J., Farkas Gy.: *Phys. Rev. Letters* 43 (1979) 1243.
14. Farkas Gy., Chin S. L.: *Appl. Phys.* B37 (1985) 141.
15. Farkas Gy., Horváth Z. Gy., Tóth Cs., Fotakis C., Hontzopoulos E.: *Journal of Appl. Phys.* 62 (1987) 4545.
16. Tóth Cs., Farkas Gy., Vodopyanov K. L.: *Appl. Phys.* B53 (1991) 221–225.
17. Farkas Gy., Tóth Cs.: Experimental investigation of the coherence properties of picosecond laser pulses by higher (5th) order correlation method. In: *Ultrafast Phenomena in Spectroscopy*, Kryukov P. G., Popov Yu. M. (eds), ONTI FIAN, Moscow (1987) 107–110.
18. Algatti M. A., Farkas Gy., Tóth Cs.: Experimental investigations on nonequilibrium electron and thermal light emission from metals induced by short laser pulses. *KFKI Reports*, KFKI 1987-66
19. Farkas Gy., Tóth Cs.: Energy spectrum of photoelectrons produced by picosecond laser induced surface multiphoton photoeffect of gold. *Phys. Rev.* A41 (1990) 4123.
20. Agostini P., Fabre F., Mainfray G., Petite G., Rahman N. K.: *Phys. Rev. Lett.* 42 (1979) 1127.
21. Farkas Gy., Tóth Cs., Kőházi-Kis A.: *Optical Engineering* 32 (1993) 2476.
22. Farkas Gy., Tóth Cs., Kőházi-Kis A., Agostini P., Petite G., Martin P., Berset J. M., Ortega J. M.: Infrared electron photoemission from a gold surface. *J. Phys.* B31 (1998) L461–468.
23. Ferray M., L'Huillier A., Li X. F., Lompre L. A., Mainfray G., Manus C.: *J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.* 21 (1988) L31.
24. Farkas Gy., Tóth Cs., Moustazis S. D., Papadogiannis N., Fotakis C.: *Phys. Rev.* 46A (1992) R3605.
25. Jordan I., Huppert M., Rattenbacher D., Peper M., Jelovina D., Perry C., von Conta A., Schild A., Wörner H. J.: *Science* 369 (2020) 974.
26. Cavalieri A. L., Müller N., Uphues Th., Yakovlev V. S., Baltuška A., Horvath B., Schmidt B., Blümel L., Holzwarth R., Hendel S., Drescher M., Kleineberg U., Echenique P. M., Kienberger R., Krausz F.: *Nature* 449 (2007) 1029.
27. Kroó N., Varró S., Farkas Gy., Dombi P., Oszetzky D., Nagy A., Czitrovsky A.: Nonlinear plasmonics. *J. Modern Optics*, 55 (2008) 19–20, 3203.
28. Varró S., Kroó N., Oszetzky D., Nagy A., Czitrovsky A.: Hanbury Brown-Twiss type correlations with surface plasmon light. *J. Modern Optics*, 58:21 (2011) 2049.
29. Dombi P., Pápa Zs., Vogelsang J., Yalunin S. V., Sivis M., Herink G., Schäfer S., Groß P., Ropers C., Lienau C.: *Rev. Mod. Phys.* 92 (2020) 025003.
30. Varró S., Farkas Gy.: Attosecond electron pulses from interference of above-threshold de Broglie waves. *Laser and Particle Beams* 26(1) (2008) 9–19.

AZ IZOLÁLT ATTOSZEKUNDUMOS IMPULZUSOK ELŐÁLLÍTÁSÁT MEGALAPOZÓ LÉZERFIZIKAI FEJLESZTÉSEK A KILENCVENES ÉVEK KÖZEPÉN A BÉCSI MŰSZAKI EGYETEMEN

Szipőcs Róbert

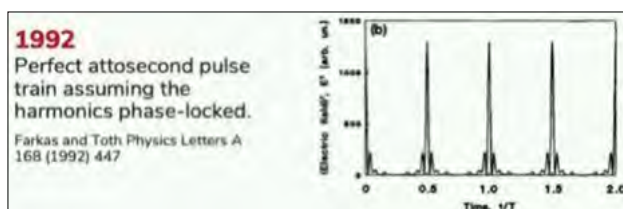
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Írásomban a következő pár oldalon azt szeretném bemutatni, hogy az izolált attoszekundumos impulzusok előállítása miért éppen Krausz Ferencnek sikerült először a világon, és hogy ezt az eredményt milyen alapvető fontosságú lézerfizikai, lézertechnológiai fejlesztések előzték meg a kilencvenes években – többek között a Bécsi Műszaki Egyetemen, az ő szakmai vezetésével.

Ahhoz, hogy az egész fejlesztési folyamatot megértjük és értékeljük, talán a legvégén érdemes elkezdenünk a történetet, vagyis ott, hogy egy magas rendű nemlineáris optikai folyamat, a magasharmonikus-keltés (HHG) révén hogyan lehet rövid, nagy intenzitású lézerimpulzusokkal attoszekundumos impulzussorozatokat, illetve egyedi, izolált attoszekundumos impulzusokat előállítani – például nemesgázokban – attól függően, hogy a lézerimpulzusunk hossza hogyan viszonyul annak (esetünkben tipikusan 800 nm körüli) középhullámhosszához. A nemlineáris optika rejtelseibe, azon belül a magasharmonikus-keltés elméleti alapjaiba Dombi Péter és Tóth Csaba írásai vezetnek be az olvasót ebben a Nobel-díjhoz kapcsolódó különszámban; itt röviden csak összefoglalom a legfontosabb megállapításokat, törvényszerűségeket.

Először is, a gázatomok polarizálhatóságának szimmetriafüggése miatt csak a páratlan sorszámú harmonikusok állnak elő a HHG során. Másodszor, a legmagasabb sorszámú (legrövidebb hullámhosszú) harmonikus rendjét az azt előállító lézerimpulzus maximális térerőssége (E) határozza meg, vagyis minél nagyobb a fókuszált térerősség az atomokban, annál magasabb harmonikusokat tudunk előállítani. A harmadik, és az izolált attoszekundumos impulzusok előállítása szempontjából rendkívül fontos megállapítás, hogy a magas harmonikusok minden térerősség-maximumban egyidőben, egymással azonos fázisban előállnak, így egy most már vi-

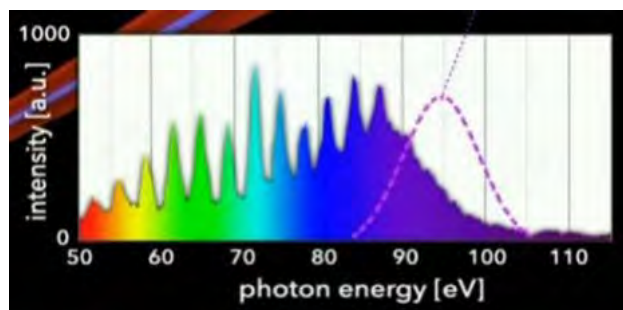
szonylag egyszerűen megépíthető, 20–30 fs-os Ti-zafír lézererősítő impulzusainak nemesgázba (pl. Kr) történő fókuszálása esetén egy attoszekundumos impulzussorozatot (1. ábra), nem pedig egy időfelbontásos mérésekre jól használható, izolált attoszekundumos impulzust kapunk.



1. ábra. Magasharmonikus-keltés révén létrehozott attoszekundumos impulzussorozat [1]

Izolált, egyedi attoszekundumos impulzusokat a magasharmonikus-keltés során kizárólag olyan lézergerjesztés esetén tudunk előállítani, amikor a lézerimpulzust leíró $E(t)$ időfüggvény csak egy, a többinél lényegesen nagyobb időbeli maximummal rendelkezik, és így az ebben keltett magas harmonikusok rendje, energiája lényegesen meghaladja a többi maximumban keltett vonatkozó értékeket. Ebben az esetben, ha megfelelő spektrális szűrőt alkalmazva (2. ábra) kiválasztjuk a legnagyobb energiával rendelkező XUV (kemény ultraibolya) komponenseket, akkor ezek egyedi, attoszekundumos lézerimpulzusokként jelennek meg a szűrés után [1, 2].

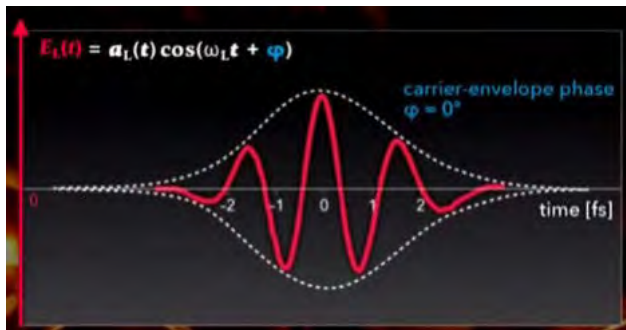
A magasharmonikus-keltéshez használt nagy energiájú lézerimpulzusnak ilyenkor – izolált attoszekundumos impulzusok előállításakor – praktikusán két feltételnek kell megfelelnie: az első, hogy a lézerimpulzus



2. ábra. A legmagasabb energiájú magas harmonikusok kiválasztása megfelelő spektrális szűrő alkalmazásával (lila szaggatott vonallal jelölve) izolált (nem sorozat) attoszekundumos impulzus előállítását eredményezi [1, 2]



Szipőcs Róbert, PhD, okleveles villamosmérnök (BME, MSc), lézerfizikus (SZTE, PhD), a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, az R&D Ultrafast Lasers Kft. ügyvezetője. A részben Krausz Ferencsel közösen, a femtoszekundumos lézertechnológia fejlesztése területén elért eredményeiért többek között Nemzetközi Gábor Dénes-díjat, Akadémiai Szabadalmi Nívódíjat, az ELFT Bródy Imre-díjat és az MTA Fizikai Tudományok Osztálya Fizikai Díját kapta.



3. ábra. Egy fázisstabilizált lézeroszcillátor esetén a térerősség maximumát rögzíteni tudjuk az $I(t)$ függvény maximumában, illetve az egymást követő lézerimpulzusokban a térerősség maximális értéke, s így a keltett XUV spektrum szélessége sem változik. Ha a lézerimpulzus megfelelően rövid, akkor csak egy, a többinél lényegesen nagyobb térerősség-maximuma van, ami alkalmas izolált attoszekundumos impulzusok előállítására a 2. ábrán bemutatott spektrális szűrő alkalmazásával [1, 2]

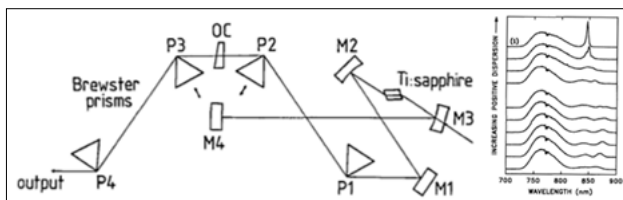
térbeli kiterjedése maximum másfél-kétszerese legyen a lézerimpulzus középhullámhosszának (ami egy 800 nm-en működő Ti-zafir lézer esetében kb. 5 fs időbeli hosszúságú lézerimpulzusokat feltételez), másodsor, hogy a térerősség-maximum folyamatosan éppen az impulzus fényintenzitás-idő-függvényének, $I(t)$ -nek maximumába essen, ami ún. fázisstabilizált lézeroszcillátort és erősítőrendszert feltételez (3. ábra).

Összefoglalva: az izolált, időfelbontásos mérésekre alkalmas attoszekundumos lézerimpulzusok előállításához Krausz Ferenc kollégámnak (Ferinek) először is szüksége volt szub-mJ energiájú, 5 fs-nál rövidebb időtartamú, fázisstabilizált lézerimpulzusokra, amelyek előállításáról valójában 1993-ban szerintem senki – még ő maga – sem gondolkodhatott, hiszen ehhez még egy sor fontos új lézerfizikai, lézertechnológiai fejlesztésre is szükség volt. Ezek közül volt olyan, amelyet időközben már szintén Nobel-díjjal ismertek el, pl. Theodor W. Hänsch 2005-ben a frekvenciafésű és a fázisstabilizált fs-os lézerek megvalósításáért kapott Nobel-díjat [1].

Akkor most térjünk vissza időben 1993-ba, a Bécsei Műszaki Egyetemre, ahol Feri vezetésével pár éve már komoly kutató-fejlesztő munka folyt, hogy a Ti-zafir kristályon mint lézeraktív közegen alapuló fs-os lézeroszcillátorok segítségével előállítsák a lehető legrovidebb lézerimpulzusokat a lézer kimenetén. Ezeknek a lézereknek a „szolitonszerű” működését Feri egy nagyon alapos, *IEEE Journal of Quantum Electronics* folyóiratbeli cikkben foglalta össze [3], ami tulajdonképpen az 1993-as habilitációs eljárásának, professzori kinevezésének is az alapja volt a Bécsei Műszaki Egyetemen. A részletek bemutatása nélkül most csak néhány fontosabb eredményt emelnék ki a cikkből, amelyek a következők: a módusszinkronizált szilárdtest-lézerekben, mint pl. a Ti-zafir lézer esetében a rezonátorban kialakuló lézerimpulzusok hosszát ($\Delta\tau$) alapvetően két folyamat, az ún. önfázis-moduláció (SPM) és az ezt kompenzáló, az egész rezonátorra nézve eredően negatív diszperzió (D) nagysága határozza meg, amit szolitonszerű impulzusformálódásnak nevezünk. Ezt a következő egyszerű összefü-

gés formájában tudjuk felírni: $\Delta\tau \sim \text{const} \times |D|/(\varphi E)$, ahol φE az impulzus egy körülfutására számított nemlineáris fázistolása – ez tulajdonképpen a lézerimpulzus ún. önfázis-modulációját, spektrális kiszélesedését írja le.

Az összefüggésből látszik, hogy ahhoz, hogy rövidítsük a lézerimpulzusokat, a lézerünkben az eredő (negatív) diszperzió abszolút értékét egyre közelebb kell vinnünk a nullához. Ennek gyakorlati korlátját 1993-ban a diszperziókompenzálásra használt Brewster-szögű prizmapárok (negatív) harmadrendű diszperziója jelentette [4]. Egy ilyen, a TU Wien-en megépített, prizmapárokat tartalmazó lézerelrendezést mutatok be a 4. ábra bal oldalán, míg a jobb oldalon egy olyan mérési sorozat eredményét mutatom be, amikor az eredő negatív diszperzió értékét ($|D|$) egyre csökkentették az egyik prizma (P2) lézernyalábba történő betolásával – a pozitív anyagi diszperzió növelésével –, és mérték a lézer kimeneti spektrumát [4]. Az ezzel az elrendezéssel előállított legrövidebb lézerimpulzusok hossza a mérések szerint $\sim 12,5$ fs volt, amit alapvetően a diszperziókompenzálásra használt prizmapárok diszperziós tulajdonságai korlátoztak, hiszen a lézer spektruma még éppen belefért a negyedhullámú rétegekből felépülő lézertükrök 180–200 nm-es sáv szélességébe [5].



4. ábra. Prizmapárt diszperziókompenzáló elemként tartalmazó femtoszekundumos Ti-zafir lézer (bal oldal) és kimeneti spektrumának változása a prizma (P2) pozíciójának függvényében (jobb oldal). A prizma (pozitív) anyagi diszperziója a lézernyalábba történő betolásakor nő, így a rezonátorban az eredő negatív diszperzió értéke, $|D|$ csökkenthető

Ahhoz, hogy megértsük, miért jelentett végső korlátot a femtoszekundumos Ti-zafir lézeroszcillátorok impulzushossza esetében a diszperziókompenzálásra használt Brewster-szögű prizmapárok használata, értenünk kell ezeknek a lézereknek a működését [3].

Ahhoz, hogy ultrarövid lézerimpulzusokat állítsunk elő, annak szükséges, de nem elégséges feltétele, hogy rendelkezünk egy széles sávú erősítő közeggel, ami jelen esetben egy optikailag gerjesztett Ti-zafir kristályt jelent, aminek erősítési tartománya a 680–1060 nm-es hullámhossz-tartományra esik. Itt fontos megjegyeznünk, hogy a lézerimpulzusok elektromos térerősségét az időtartományban leíró $E(t)$ függvény, valamint az optikai frekvenciatartományban leíró $E(\omega)$ függvény Fourier-transzformációs kapcsolata következtében minél rövidebb egy lézerimpulzus, annál szélesebb az optikai frekvenciaspektruma. Ezt az összefüggést általában a következő egyszerűbb formában szoktuk felírni:

$$\Delta\tau \Delta\nu \geq \text{állandó},$$

ahol az állandó értéke a lézerimpulzus időbeli alakjának

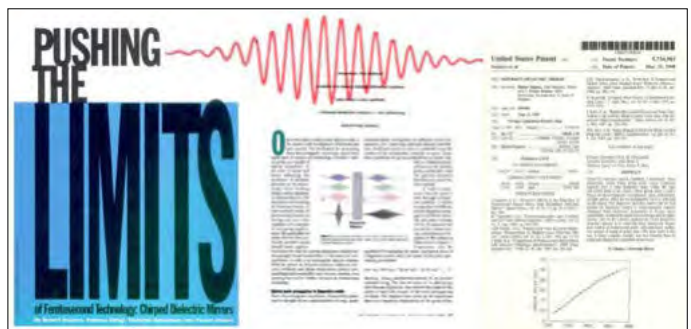
függvénye. Pl. sech^2 időalakok esetén 0,315, Gauss-impulzusok esetén pedig 0,44. Egyenlőség az összefüggésben akkor áll fenn, ha a lézerimpulzus „csörpmentes”, vagyis az egyes frekvenciakomponensek fázisa lineárisan változik (vagy nulla) a frekvencia függvényében. A Ti-zafír lézer előbb említett erősítési sávzélessége 1993-ban akár 4 fs-nál rövidebb impulzusok előállítását is lehetővé tette volna, ha nem lettek volna azok a további korlátozó fizikai tényezők, amelyeket most röviden ismertetni fogok.

Először is ahhoz, hogy femtoszekundumos lézerünk impulzus-üzemmódban működjön, a különböző frekvenciakomponenseket *módusszinkronizálni* kell, ami annyit jelent, hogy az egyes frekvenciakomponensek térerősségét leíró koszinusz időfüggvények fázisa a tér egy adott pontjában, egy adott időpillanatban egyszerre nulla legyen, vagyis az egyes frekvenciakomponensek elektromos térerősségtérképei fázishelyesen adódjanak össze az adott helyen, az adott időpillanatban. Erre a célra tökéletesen megfelel a Ti-zafír kristályban a változó $I(t)$ fényintenzitás hatására szinte azonnal létrejövő törésmutató-változás, a Kerr-hatás [2, 3], amit a megfelelő tervezési paraméterek beállítása után Kerr-lencsés módusszinkronizálásra lehet használni. Ehhez olyan rezonátort kell megterveznünk, amelyben nagyobb fényintenzitások esetén kisebb a veszteség – vagy nagyobb az erősítés –, mint egyébként. A lézer módusszinkronizált működése mindaddig fennmarad, amíg ez a megnövekedett differenciális erősítés a módusszinkronizált állapotára jellemző. Ezt az állapotot a nulla diszperzióhoz közeledve egyre nehezebb fenntartani prizmás kompresszorok alkalmazása esetén, mert a lézerimpulzusok spektrumának egy része egy idő után már a pozitív diszperziós tartományba esik, így időben szétfolyik, és ez mint extra veszteség jelentkezik. A differenciális erősítés értéke egy idő után nullára csökken, azaz megszűnik a módusszinkronizált működés.

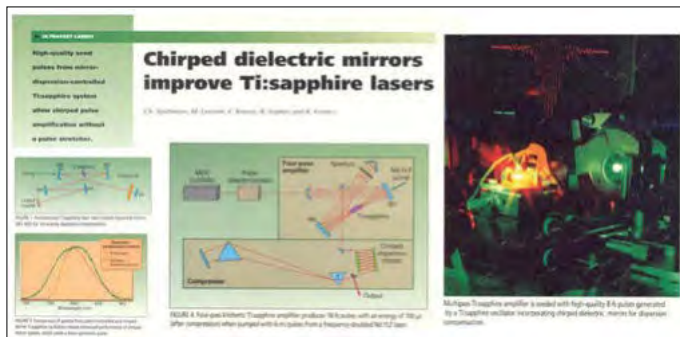
Erre – és sok egyéb, a femtoszekundumos lézerekhez, erősítőkhöz és kompresszorokhoz kapcsolódó problémára – hoztak megoldást azok a vékonyrétegtükrök-minták (a diszperziókompenzálás céljára általam korábban megtervezett lézertükrök), amelyeket 1993 nyarán magammal hoztam Bécsbe. Feri – nem igazán minden előzmény nélkül – ragaszkodott ahhoz, hogy ellenőrizzük egy fehér fényű Michelson-interferometer segítségével, hogy a tükrök minták valóban negatív (anomális) diszperzióval rendelkeznek-e 800 nm körül, a tükrök nagyreflexiójú tartományában – mint ahogyan én azt a számításaim alapján feltételeztem. Ahogy az első Michelson-interferométeres méréseken, az adatok kiértékelésén túlvoltunk, egy csapásra megváltozott minden körülöttem: Adreas (Stingl), – aki később a Stingl OAG majd a Femtolasers GmbH alapítója és ügyvezetője lett – Christiannal (Spielmann) nekiálltak, hogy egy olyan Ti-zafírt építsenek, amiben a prizmák helyett az új, diszperziókompenzáló tükrök biztosítják a rezonátorban az eredő anomális (negatív) diszperziót és széles sávban a nagy reflexiót.

Feri a tanszéken lévő összes használható asztali AT számítógépet behordatta a (vendég-) szobámba, hogy azokon újabb és újabb tükröterveket készítsék újabb és újabb specifikációk szerint, amelyekben az alkalmazott 2 mm hosszú Ti-zafír kristály pozitív másodrendű diszperziója mellett figyelembe vettük már annak szintén harmadrendű pozitív diszperzióját is. Az elkészített újabb terveket telefaxon küldtük el Ferencz Kárpát kollégámnak, aki – látva lelkesedésünket – most már lézeroptikai minőségű, szabványos 25,4 mm átmérőjű hordozókra párologtatta le Budapesten az újabb tükrömintákat, majd küldte el azokat nekünk Bécsbe. Innentől kezdve már csak annyi dolgunk volt Ferivel, hogy megírjunk két, azóta nagyon sokszor hivatkozott *Optics Letters*-cikket az akkor Bécsben együtt végzett munkánkról: egyet az első, fs-os Ti-zafír lézerben is kipróbált csörpölt tükrökről [6], egyet pedig az első, tükrödiszperzió-kompenzált (mirror-dispersion controlled, MDC) Ti-zafír lézerről [7]. A cikkek megjelenése előtt viszont még augusztusban, Budapesten úgy döntöttem, hogy megírom a diszperzív (csörpölt) dielektrikumtükrökre vonatkozó magyar és amerikai szabadalmi bejelentésünket [8], hiszen úgy gondoltam, ennek még jelentős szerepe lehet további szakmai munkánk, életünk során. Ebben – úgy tűnik – nem is sokat tévedtem...

Az 1993-ban Budapesten általam elsőként megtervezett, majd Bécsben Ferivel továbbfejlesztett csörpölt tükrök femtoszekundumos, fázisstabilizált (!) lézeroszcillátorokban, erősítőkhöz betöltött szerepét, jelentőségét ebben a cikkben nem részletezem, csak hivatkozom Krausz Ferencsel közösen jegyzett közleményeinkre, mint például az Optical Society of America (OSA) *Optics and Photonics News* című havilapjában megjelent összefoglaló cikkünk (5. ábra, bal oldal), vagy az 1998-ban elfogadott, *diszperzív dielektrikumtükrökre* és *MDC Ti-zafír oszcillátorokra* vonatkozó közös magyar és USA-beli szabadalmainkra (jobb oldal). Az 5. ábra közepén lévő kis színes ábrán azt szemléltettük, hogy egy normális (pozitív) diszperzióval rendelkező közegen (pl. a Ti-zafír kristályon) áthaladó ultrarövid lézerimpulzus hogyan nyúlik meg időben a diszperzió hatására. A jobb oldalon lévő USA-beli szabadalmi bejelentésen pedig egy (csörpölt) diszperzív dielektrikumtükör mért cso-



5. ábra. Az *Optics & Photonics News*-ban Krausz Ferencsel közösen megírt cikkünk [9] a csörpölt tükrökkel elért első eredményeinkről, valamint a pár évvel később, 1998-ban elfogadott közös, USA-beli szabadalmi bejelentésünk [8]



6. ábra. A Bécsi Műszaki Egyetemen megépített Ti-zafir oszcillátorokban és erősítőkhöz használt csörpölt tükrök szerepét, jelentőségét mutatja be a *Laser Focus World*-ben 1995 végén megjelent cikkünk [10]



7. ábra. 5 fs-os, szub-mJ energiájú lézerpulzusok előállítása nemesgázzal töltött üvegek kapillárisában nagy energiájú, ~20 fs-os lézerpulzusok spektrális kiszélesítését majd csörpölt tükrökkel történő diszperziókompenzálását követően [1, 12]

portkésleltetési függvénye látható, ami közel állandó értékű anomális (negatív) diszperziót mutat a tükör nagy reflexiójú tartományán, így megfelelő számú reflexió alkalmazása esetén alkalmas a (pozitív) anyagi diszperzió megfelelő kompenzálására.

Egy további hasonló összefoglalóban, a *Laser Focus World*-ben megjelent közös cikkünkben a csörpölt tükrök Ti-zafir oszcillátorokban és erősítőkhöz betöltött szerepét, jelentőségét mutattuk be (6. ábra). Az ábra bal oldalán egy prizmapárok alkalmazása nélkül megépített MDC Ti-zafir oszcillátor rajza, alatta a lézer kimenetén mért spektrum látható, összehasonlítva egy prizmapáros oszcillátoréval. Az ábra középső részén egy olyan 1 kHz-es ismétlési frekvencián működő Ti-zafir erősítő rajza látható, ahol az erősített impulzusok kompressziójára egy prizmapár és csörpölt tükrök kombinációját használjuk úgy, hogy a prizmapárok negatív másodrendű és negatív harmadrendű diszperzióját kombináljuk a kifejezetten erre a célra megtervezett csörpölt tükrök negatív másodrendű és pozitív (!) harmadrendű diszperziójával. Ennek segítségével gyakorlatilag tökéletes diszperziókompenzálást sikerült megvalósítanunk a CPA (chirped pulse amplification) rendszerünk kimenetén.

A csörpölt tükröket az első bécsi kísérleteket követően egyéb ultragyors lézerrendszerekben is eredményesen alkalmaztam, többek között az első olyan hangolható, ~100 fs-os Ti-zafir lézerekben, amelyek nélkül ma már elképzelhetetlen lenne a munka a nemlineáris mikrosz-

kópiát (pl. kétfoton-abszorpciós fluoreszcenciát) alkalmazó laborokban, vagy olyan optikai parametrikus oszcillátorokban (OPO) és erősítőkben (OPA), amelyek nagy hatásfokkal tudják a Ti-zafir vagy egyéb femtoszekundumos oszcillátorok, erősítők (pl. Yb-szállézek) fényét más hullámhossz-tartományokba konvertálni. Az érdeklődő olvasó figyelmébe ajánlom a témában 2000-ben a PhD-fokozat megszerzése céljából megírt disszertációm [11].

Befejezésül szeretném még a Krausz Ferencsel közösen végzett egyik utolsó munkánkat megemlíteni. Ebben olasz kollégák segítségével (M. Nisoli, S. de Silvestri és O. Svelto) egy nemesgázzal töltött üvegek kapillárisában létrejövő spektrális kiszélesítést, majd megfelelő sáv szélességgel rendelkező csörpölt tükrökkel történő diszperziókompenzálást követően sikerült a Bécsi Műszaki Egyetemen megépített, 1 kHz-es ismétlési frekvencián működő Ti-zafir erősítő 18–20 fs-os lézerpulzusait az 5 fs-os időtartományba konvertálni [12]. Ez akkor, 1997-ben egy rendkívül jelentős lépés volt az izolált attoszekundumos lézerpulzusok előállításának irányában – mint az Krausz Ferenc kollégám 2023. december 8-án tartott előadásából is kiderült [1]. A vonatkozó előadásrészletről készült képernyőfotót a 7. ábrán mutatom meg.

Irodalom

- 2023 Nobel Prize lectures in physics, Pierre Agostini, Ferenc Krausz and Anne L'Huillier, <https://www.youtube.com/watch?v=vXJFBW-2kI>
- Krausz F.: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* 2002/01, 12.
- Krausz F., Fermann M. E., Brabec T., Curley P. F., Hofer M., Ober M. H., et al.: Femtosecond solid state lasers. *IEEE J. Quantum Electron.* 28 (1992) 2097.
- Curley P. F., Spielmann Ch., Brabec T., Krausz F., Wintner E., Schmidt A. J.: Operation of a femtosecond Ti:sapphire solitary laser in the vicinity of zero group-delay dispersion, *Opt. Lett.* 18 (1993) 54–56.
- Szipőcs R., Ferencz K.: Recent developments of laser optical coatings in Hungary. *Opt. Engineering* 32 (1993) 2525.
- Szipőcs R., Ferencz K., Spielmann C., Krausz F.: Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers. *Opt. Lett.* 19 (1994) 201.
- Stingl A., Spielmann C., Krausz F., Szipőcs R.: Generation of 11-fs pulses from a Ti:sapphire laser without the use of prisms. *Opt. Lett.* 19 (1994) 204.
- Szipőcs R., Krausz F.: Dispersive dielectric mirror. U. S. Pat. No.: 5,734,503 (1993).
- Szipőcs R., Stingl A., Spielmann Ch., Krausz F.: Pushing the limits of femtosecond technology: Chirped dielectric mirrors. *Optics & Photonics News* 6(6) (1995) 16.
- Spielmann Ch., Lenzner M., Krausz F., Szipőcs R., Ferencz K.: Chirped dielectric mirrors improve Ti:sapphire lasers. *Laser Focus World*, December 1995, 55–60.
- Szipőcs R.: Dispersive Properties of Dielectric Laser Mirrors and their Use in Femtosecond Pulse Lasers. Dissertation for PhD degree (SZTE, 2000). http://www.szipocs.com/picks/Dispersive_Properties_of_Dielectric_Laser_Mirrors_and_their_Use.pdf
- Nisoli M., De Silvestri S., Svelto O., Szipőcs R., Ferencz K., Spielmann Ch., Sartania S., Krausz F.: Compression of high-energy laser pulses below 5 fs. *Opt. Lett.* 22 (1997) 522–524.

KRAUSZ FERENC – MAGYAR NOBEL-DÍJ AZ EXTRÉM NEMLINEÁRIS OPTIKÁÉRT

Dombi Péter^{1,2}

¹ HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest,

² ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet, Szeged

Az emberiség történelmében a lézer egy viszonylag „fiatal” találmány. Az életünket forradalmian átalakító újítások közül eltölpül a maga 63 évével a villanykörte, a napelem, a rádió vagy a belsőégésű motor mellett. Viszont közel egyidős az atomerőművel vagy a félvezető tranzisztorral. Az első lézert 1960-ban építették meg, és a Nobel-bizottság már 1964-ben Nobel-díjjal ismerte el a lézerek működési elvének kidolgozását. Érdekesség, hogy az első működő lézert megépítő Theodore Maiman viszont sohasem kapott Nobel-díjat.

1964-ig az optika szó mindössze egyszer jelent meg a Nobel-díjak rövid, egymondatos indoklásában, azután azonban a lézerfizika fejlődése töretlen, és a lézerek új optikai tudományterületek kialakulását is lehetővé tették. Kimondottan lézerfejlesztési eredményekért legutóbb Gérard Mourou és Donna Strickland kapta meg a legmagasabb tudományos elismerést egy újfajta lézertényerősítési elv ért, amely azóta is meghatározó szerepet játszik femtoszekundumos lézerrendszerekben. Az ilyen lézertényerősítők elengedhetetlenek például újfajta látáskorrekciós műtétek elvégzésénél is.

A legtöbb, lézerekhez kapcsolódó fizikai (és kémiai) Nobel-díjat azonban a lézerek valamely konkrét kutatási területen történő alkalmazásáért ítélik oda – ahogyan ez 2023-ban is történt. Egy néhány perces gyorslemez eredményeként megállapíthatjuk azt, hogy a lézerek 13–14 Nobel-díjas felfedezéshez, találmányhoz vagy kutatási módszerhez kapcsolódnak szorosan. Ezen a téren nagyon hosszú a lista, elég csak az optikai szálakra, a lézercsipeszre, a frekvenciafésűkre, a femtokémiai kutatásokra vagy a csapdázott atomokkal kapcsolatos Nobel-díjakra gondolni. Kulcsszerepet játszanak a lézerek a gravitációs hullámok detektálásában vagy akár a holográfiában is. Ez utóbbiért Gábor Dénes sohasem kapott volna Nobel-díjat a lézerek nélkül, melyek az egyetlen hatékony eszközt jelentik optikai hologramok előállításának. Ebbe az egyre erősebb sorozatba illeszkedik Krausz Ferenc 2023-as kitüntetésével is.



Dombi Péter az MTA doktora, az MTA Lézerfizikai Bizottságának elnöke. 2005-ben szerzett PhD-fokozatot a bécsi Műszaki Egyetemen Krausz Ferenc témavezetése mellett. Jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont kutatóprofesszora és a szegedi ELI-ALPS Lézeres Kutatóintézet osztályvezetője. Kutatási területei a lézerfizika, a nanooptika és az ultragyors fény-anyag kölcsönhatások.

Ebben a cikkben a díjazott munkásságát az eddig megjelent cikkekhez képest más perspektívából fogom bemutatni. A korábbi írások inkább a Nobel-bizottság által kiadott közlemény fordítására és annak ábraanyagára szorítkoztak. Itt viszont a Nobel-díjas kutatásokat a nemlineáris optika, illetve az extrém nemlineáris optika nézőpontjából fogom tárgyalni, és részletesen is bemutatom azt a módszertani áttörést hozó kísérletet, amelylyel Krausz Ferenc 2001-ben be tudta bizonyítani attoszekundumos impulzusok keltését.

Kezdjük tehát az alapokkal! A Maxwell-egyenletekből nem mágneses, szabad töltéshordozóktól mentes, izotróp közegben néhány lépésben el tudunk jutni a következő, polarizációs forrástaggal rendelkező hullámegyenlethez:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0 c^2} \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}, \quad (1)$$

ahol $\mathbf{P}$ jelöli a polarizációs vektort, $\mathbf{E}$ a térerősségvektor, ϵ_0 a dielektromos állandó és c a fénysebesség. Fennáll továbbá a $\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi \mathbf{E}$ összefüggés is, ahol χ a szuszceptibilitás, ami a legáltalánosabb esetben tenzormennyiség. A fentiekből látjuk tehát, hogy a közegben terjedő fény elektromos tere polarizációt indukál, amely az elektromágneses tér forrását is jelenti egyben. Ha az indukált polarizáció lineárisan függ az elektromos tértől, akkor a fény közegbeli terjedése esetén a lineáris optika tartományában vagyunk. Ezzel a hatással megmagyarázható számos jól ismert optikai alapjelenség, például a közegek törésmutatója vagy a kettős törés.

Felléphetnek azonban magasabb rendű hatások is, amikor már az indukált polarizáció nemlineáris viszonyban van az elektromos térrel. Ekkor a következő összefüggés érvényes:

$$\mathbf{P} = \sum_i \mathbf{P}^{(i)} = \underbrace{\epsilon_0 \chi^{(1)} \mathbf{E}}_{\text{lin. tag}} + \underbrace{\epsilon_0 \chi^{(2)} \mathbf{E} \mathbf{E} + \epsilon_0 \chi^{(3)} \mathbf{E} \mathbf{E} \mathbf{E} + \dots}_{\text{nemlineáris tagok}} \quad (2)$$

Az „unalmas”, a törésmutatóért felelős lineáris $\chi^{(1)}$ szuszceptibilitással itt ne foglalkozunk, hanem nézzük a polarizáció nemlineáris tagjait! A $\chi^{(2)}$ másodrendű szuszceptibilitás felelős számos érdekes nemlineáris optikai jelenségért, mint például a másodharmonikus-keltésért: egy megfelelő kristályban a vörös lézertényt kék vagy ultraibolya fénné tudjuk átalakítani. Ugyanígy $\chi^{(2)}$ -hatás például a Pockels-effektus is: egy külső statikus elektromos térrel meg tudjuk változtatni egy kristály

törésmutatóját. A harmadrendű nemlineáris szuszceptibilitás, $\chi^{(3)}$ is fontos egy lézerlaborban dolgozó kutató számára; a közeg törésmutatójának lézerintenzitástól való függése köthető hozzá, olyan következményekkel, mint például egy intenzív lézernyaláb önfokuszálása. Azonban általános szabály, hogy minél magasabb rendű folyamatról van szó, annál kisebb hatásokkal következik az be.

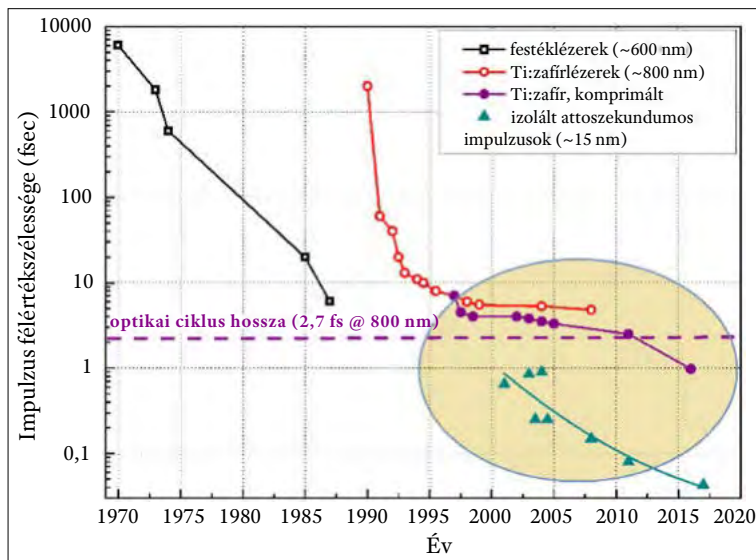
A harmadrendű felharmonikusok keltése például lényegesen kisebb hatékonyságú a másodharmonikus-keltéshez képest.

Következő lépésként becsüljük meg, hogy mi az a térerősség, aminél a nemlineáris hatások észlelhetővé válnak! A hidrogénatom első Bohr-sugarának megfelelő távolságban az atomon belüli térerősség $\sim 5 \times 10^{11}$ V/m. Tegyük fel, hogy ennél három nagyságrenddel alacsonyabb térerősségnél $\sim 10^8$ V/m-nél már észlelhetők ilyen effektusok – ez a laboratóriumi észlelésekkel is jól egybeesik. Ahhoz, hogy a lézerimpulzus maximális térerőssége 10^8 V/m legyen, a fókuszoltban $1,3 \times 10^9$ W/cm²-es csúcsintenzitást kell elérnünk az $I = (c\epsilon_0/2)E^2$ összefüggés alapján. Láthatjuk, hogy ezt a fényintenzitást akár egy 10 W-os folytonos lézernyaláb 1 μm^2 -es felületre történő fókuszálásával már el tudjuk érni. Viszont mindenképpen a lézerek jól irányított fénye szükséges ahhoz, hogy esélyünk legyen a fókuszoltban ilyen intenzitás, illetve térerősség elérésére. Nem véletlen az, hogy az optikai másodharmonikus-keltést is lézerekkel észlelték először Peter Franken és munkatársai, mégpedig a lézerek 1960-as megjelenése után alig egy évvel [1]. Az észlelt hatás annyira meglepő volt, hogy a folyóirat szerkesztője a másodharmonikus-keltést bizonyító foltot törölte a cikk fő ábrájából, mérési műtermékeknek gondolva azt. A nemlineáris optikai jelenségek fontossága miatt azonban ez a munka véleményem szerint szintén Nobel-díjat ért volna.

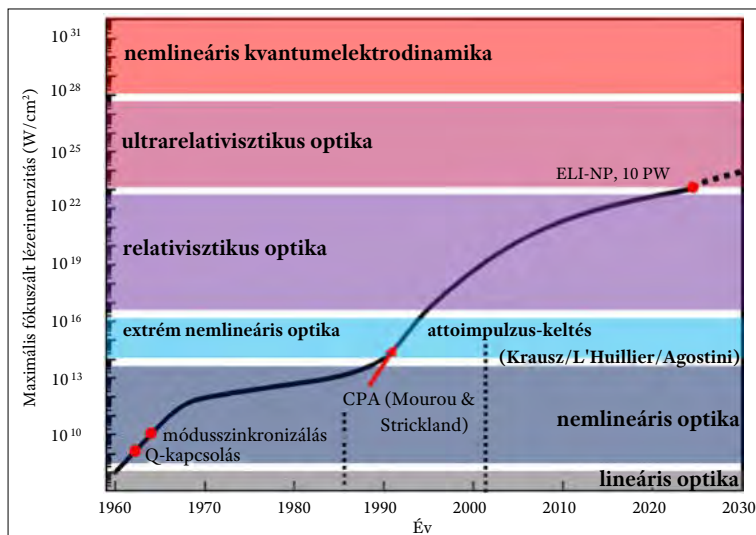
A nemlineáris optika azóta is fontos szerepet játszik számos alkalmazásban leginkább azért, hogy lehetővé teszi az eredetileg eltérő színű lézernyalábok hatékony előállítását, és a nyalábon belül a fény Po-cckels-hatásra építő kapcsolását. Azonban, ahogyan azt a fenti numerikus példából is láthatjuk, a klasszikus nemlineáris optikában a külső lézertér még mindig csak az atomon belüli térerősség perturbációjának tekinthető, ezért ezt a fény-anyag kölcsönhatási tartományt perturbatív nemlineáris optikának is szokták nevezni.

Krausz Ferenc Nobel-díjában ennél magasabb lézerintenzitások játszanak szerepet:

ezeknél a kölcsönhatásoknál a közeg megvilágító lézertere már nem tekinthető az atomi terek perturbációjának, hanem azzal összemérhető. Ilyen intenzív fényt a lézerek fejlődésének köszönhetően már az 1970-es évektől kezdve elő lehet állítani. Magasabb lézerintenzitást kétféleképpen lehet elérni: a lézerimpulzusok optikai erősítésével, vagy azoknak időbeli összenyomásával. Az egyre



1. ábra. A legrövidebb impulzusokat biztosító lézerek impulzushosszának változása logaritmikus skálán, kiegészítve az izolált attoszekundumos impulzusok hosszával. Az 1990-es éveket a titán-zafir lézertechnológia robbanásszerű fejlődése határozta meg. A bekarikázott tartományban megvalósított fejlesztések jelentős része Krausz Ferenc nevéhez kötődik mind a lézertechnológia, mind az attoszekundumos impulzusok előállítása terén. Az ábrán jelöltem a 800 nm-es lézernyaláb optikai ciklusának (az oszcilláció periódusidejének) hosszát is, hiszen az ennél rövidebb lézerimpulzusok spektruma szinte kezelhetetlenül szélessé válik, a teljes látható tartományt lefedti



2. ábra. Lézerrel elérhető maximális fókuszált fényintenzitás (logaritmikus skálán), valamint az intenzív fény-anyag kölcsönhatások intenzitástartományai és meghatározó folyamatai. A sávok közti távolság azt jelzi, hogy az egyes tartományok közötti átmenet nem ugrásszerű, az például a lézer hullámhosszától is függ. Az ábrán jelöltem a fázismodulált impulzuserősítést (CPA) 1985-ös demonstrálását és a 2001-es „annus mirabilis” is, amikor Krausz Ferenc és Pierre Agostini egymástól függetlenül, két különböző kísérleti módszerrel bizonyította az attoszekundumos impulzusok létét. A lézertechnológiában szintén fontos módusszinkronizálást és Q-kapcsolást ebben az írásban terjedelmi okok miatt nem mutatom be

rövidebb impulzusok előállításának időrendjét mutatja be az 1. ábra, kiemelve az 1980-as évekig a legrövidebb impulzusokat biztosító festéklézereket és az 1990-es évek forradalmian új technológiáját, a titán-zafirlézereket. Ez utóbbiakat Szipőcs Róbert írása mutatja be részletesen ebben a lapszámban, melyben a lézerekből nyert impulzusok kompressziós módszereit is tárgyalja.

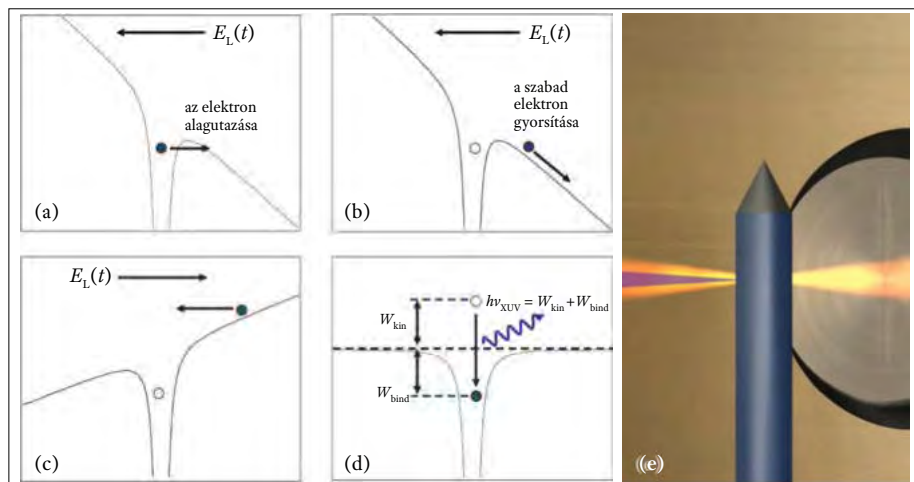
A lézerrerősítők és az impulzuskompresszorok fejlődésének köszönhetően az intenzív lézerek 1980-as években megkezdte fejlődése új lendületet kapott. Ezt mutatja be a 2. ábra. Jól látható, hogy a fentiekben a nemlineáris optikai folyamatok észleléséhez becsült 10^9 W/cm²-es intenzitáshoz képest a világ jelenleg legintenzívebb lézerével, a bukaresti ELI-NP lézerközpontban működő 10 PW-os lézerrel 14 nagyságrenddel nagyobb intenzitás is elérhető, a fókuszoltban akár 10^{23} W/cm² is. A lézertechnológia ilyen mértékű fejlődését nézve érthetővé válik Gérard Mourou és Donna Strickland Nobel-díja is, hiszen a fejlődés nagy részét az ő 1985-ös találmányuk tette lehetővé, ahogyan azt a 2. ábrán is bemutatottam.

Az ábra megmutatja a fény-anyag kölcsönhatás már tárgyalt, *lineáris és nemlineáris optikai* tartományait, majd a részletesen bemutatandó *extrém nemlineáris optikát*. Efölötti intenzitásoknál a lézerfény elektromos tere az elektronokat már *relativisztikus* mozgásra készíti, és ilyen intenzitásoknál a közeget is ionizálja – ez már a lézeres plazmafizika területe. Az *ultrarelativisztikus tartományban* a tér által mozgatott részecskék sebessége nagyon közel kerül a fénysebességhez. Még ennél is magasabb lézerfény-intenzitásoknál, a *nemlineáris kvantumelektrodinamika* tartományában pedig már a vákuum is „közegként” viselkedik a fény számára olyan egzotikus következményekkel, mint például a fény általi elektron-pozitron párkeltés „a semmiből”. A tartományok közötti határ erősen függ a lézerfény hullámhosszától is. A 10^{16} W/cm² fölötti intenzitásokkal ebben az írásban nem foglalkozom, hiszen az attoszekundumos kutatásokhoz, attoszekundumos impulzusok keltéséhez kb. 10^{15} W/cm²-es fókuszált intenzitású lézerfény is elég.

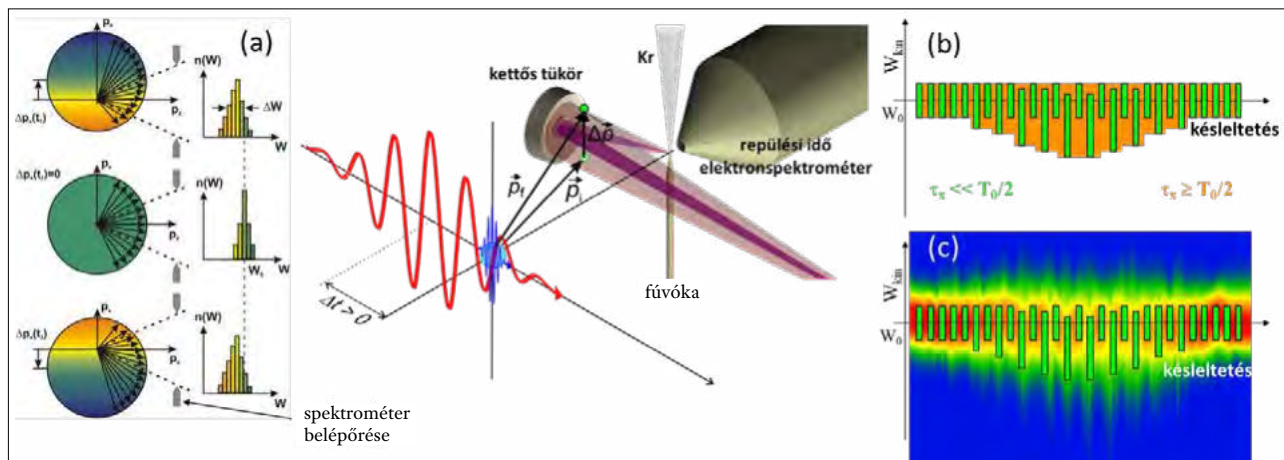
Nézzük meg tehát, hogy mi is az az extrém nemlineáris optika, mik azok a kölcsönhatások, amelyek attoszekundumos impulzusok előállításához kellenek. Extrém nemlinearitásnak azt nevezzük, amikor a külső lézertér összemérhető az atomi térerősséggel. A fenti, a hidrogénatomhoz kapcsolódó numerikus példából kiindulva

ez 3×10^{16} W/cm² lézerintenzitás esetén érvényes, gyengébben kötött elektronoknál pedig már 10^{15} W/cm²-nél is. Ilyenkor a lézerfény oszcilláló tere olyan mértékben torzítja az atomi potenciált, hogy a leggyengébben kötött elektron alagutazással elhagyja az atomot. Az ionizáció után a megfelelő fázisban kilépő elektron a lézerfény elektromos terében további energiára tesz szert, és lineárisan polarizált fény esetén visszatér ahhoz az ionhoz, ahonnan származik. Ekkor véges valószínűséggel rekombinálódhat is az ionnal, és a lézertérbeli mozgása során felvett többletenergiáját nagyfrekvenciás (ún. extrém ultraibolya, XUV) fény kisugárzásával adja le: az eredeti lézerfrekvenciának akár több századrendű felharmonikusai is megjelenhetnek a lézerfény intenzitásától és hullámhosszától függően. Ezt a folyamatot mutatja be a 3. ábra. Felharmonikusokkeltést ezzel a mechanizmussal először Charles Rhodes chicagói laborjában észleltek 1987-ben [2].

Az alagutazással kilépett elektron mozgása során az ion-elektron rendszer dipólmomentuma erősen nemlineárisan oszcillál, ezért igen magasrendű felharmonikusok is megjelennek. Ezért is hívják az ilyen jelenségek körét extrém nemlineáris optikának. Itt is ugyanúgy lehet nemlineáris polarizációt definiálni, mint a perturbatív nemlineáris optikában, azonban mivel az elektron mozgása erősen nemlineáris, számos új jelenség is észlelhető, mint például a nagyon magasrendű felharmonikusok megjelenése vagy a közel azonos intenzitású felharmonikusokkal rendelkező spektrális tartomány. Erre a *Fizikai Szemle* 2023. novemberi számában megjelent cikkünkben [6] hoztunk példát. Így érthetővé válik az is, hogy miért olyan szembeötlő a különbség a perturbatív nemlineáris optikai és az extrém nemlineáris optikai folyamatok között.



3. ábra. Magas rendű felharmonikusok keltése – az extrém nemlineáris optika alapfolyamata. (a) Az atom leggyengébben kötött elektronja alagutazással kilép az atomból, ha az intenzív lézertér elég nagy mértékben torzítja a potenciált. (b), (c) A szabad elektront az oszcilláló lézertér gyorsítja, melynek során jelentős többletenergiára tesz szert. (d) Az oszcilláló tér miatt az elektron visszatér az ionhoz, amellyel rekombinálódik és a többletenergiáját egy nagyenergiájú, extrém ultraibolya (XUV) tartománybeli foton kisugárzásával adja le. (e) Attoszekundumos impulzusok keltése gázfúvókában. A jobbról érkező lézerimpulzus lyukat fúr a fémkupakba, az abban lévő nemesgázatomokon keltett XUV sugárzás a lézerimpulzusénál kisebb divergenciával, a lézerrel azonos irányba lép ki az extrém nemlineáris optikai kölcsönhatás után. Az XUV sugárzást a levegő elnyeli, ezért az attoszekundumos kísérleteket vákuumban végzik



4. ábra. (a) Izolált attoszekundumos impulzusok létezésének bizonyítására szolgáló kísérleti elrendezés és a mérés elve. (b) Az elektronspektrumok várt kiszélesedésének a mértéke a lézertér $T_0/2$ félperiódusához képest hosszú (narancssárga) és rövid (zöld) XUV impulzusok esetére az XUV és az infravörös impulzusok közti késleltetés függvényében. (c) A kísérleti eredmények (szinkódolt kinetikusenergia-spektrumok) alátámasztják az utóbbi esetet: az XUV impulzusok lényegesen rövidebbek az infravörös lézertér félperiódusánál. Az eredmények pontos kiértékelése 650 asec-os értéket ad az XUV impulzusok hosszára [4, 5]

Krausz Ferenc már az 1990-es években felismerte azt is, hogy a magas rendű felharmonikusok az időtartományban szükségszerűen attoszekundumos impulzusok formájában jelennek meg – nem utolsósorban Farkas Győző és Tóth Csaba 1992-ben publikált eredményének köszönhetően [3]. Ezután Krausz Ferenc a Bécsi Műszaki Egyetem favoritenstrassei épületének második pinceszintjén lévő laborban jó pár évet szentelt egy olyan kísérleti elrendezés kialakításának, amellyel ez be is bizonyítható. Ugyan a helyszín nem volt teljesen ideális optikai kísérletek elvégzésére a közelben húzódó metróvonal miatt, azonban a kitartás (és a késő éjszakai, metrómentes órákban elvégzett kísérletezés) meghozta a gyümölcsét. Híres 2001-es *Nature*-cikkében a 4. ábrán bemutatott ötlettel igazolta azt, hogy a magas rendű felharmonikusok attoszekundumos impulzusok formáját öltik [4, 5].

A 3e. ábrán bemutatott XUV-keltés után az együtt haladó infravörös lézerimpulzust és az XUV nyálábót egymáshoz képest változtatható késleltetéssel egy második kriptongázjetre fókuszálta. Az XUV fotonok könnyedén ionizálták a kriptonatomokat mintegy 75 eV-os elektronokat keltve, melyeket egy repülési-idő-elektron-spektrométerrel detektált. Azonban az elektronok energiáját a jelenlévő infravörös tér is befolyásolja, mégpedig a kriptonatomok XUV-impulzus általi ionizációjakor meglévő vektorpotenciáljával arányosan. A 4a. ábrán bemutatottak szerint az infravörös tér hatása abban nyilvánul meg, hogy a kilépő elektronok impulzusához valamikor Δp impulzust ad hozzá, ami az eredeti, viszonylag keskeny kinetikusenergia-eloszlást kiszélesíti. Ha az XUV-impulzus hosszú (az infravörös tér 2,7 fs-os optikai ciklusa felénél hosszabb), akkor az elektron kilépésének időpillanata nem elég élesen definiált, így az infravörös tér ionizációkori vektorpotenciálja sem az, következésképpen az elektronspektrumok kiszélesedése akkor is jelen van, amikor az XUV impulzus maximuma a zérus vektorpotenciálú időpillanattal esik egybe. Ha azonban az XUV-impulzus elég rövid, a fotoionizáció élesen je-

lenik meg, és az elektronspektrumok kiszélesedésében periodikus moduláció észlelhető, éppen ahogy a 4c. ábra mutatja. 2001-ben ez az időbontott mérés szolgáltatotta a végső bizonyítékot attoszekundumos impulzusok létezésére.

Az így előállított attoszekundumos impulzusokkal számos mérést végeztek a bécsi, majd később a müncheni laborokban elektronok ultragyors dinamikájával, Auger-folyamatokkal, fotoemissziós késleltetésekkel kapcsolatban, melyeknek a részletei túlmutatnak ennek a cikknek a keretein. Ezekkel a kísérletekkel Krausz Ferenc 2001-től kezdve egyre inkább gyakorlatilag kiterjesztette a femtokémiában már ismert pumpa-próba módszereket az attoszekundumos folyamatok vizsgálatára, és számos fontos alapkutatási felfedezést tett főleg a belső héjakon elhelyezkedő elektronok dinamikájával kapcsolatban. Az attoszekundumos mérés technikának az a nagy ígérete, hogy ha pontosan tudjuk, hogy a fény miként hoz létre kémiai vagy akár biológiai releváns molekulákban elektronátmeneteket, akkor egy következő lépésben az elektronok dinamikáját vagy akár a szerkezeti dinamikát megfelelően formált fényimpulzusokkal irányítani is tudjuk. Így pedig remélhetőleg lehetővé válik kémiai reakciók vezérlése vagy makromolekulák átalakulásainak irányítása is. A Nobel-bizottság éppen ezt a potenciált ismerte el a 2023-as díj odaítélésével.

Hivatkozások

1. Franken P. A., Hill A. E., Peters C. W., Weinreich G.: *Phys. Rev. Lett.* 7 (1961) 118.
2. McPherson A., Gibson G., Jara H., Johann U., Luk T. S., McIntyre I. A., Boyer K., Rhodes C. K.: *J. Opt. Soc. Am. B* 4 (1987) 595.
3. Farkas Gy., Tóth Cs.: *Phys. Lett. A* 168 (1992) 447.
4. Hentschel M., Kienberger R., Spielmann Ch., Reider G. A., Milosevic N., Brabec T., Corkum P., Heinzmann U., Drescher M., Krausz F.: *Nature* 414 (2001) 509.
5. Krausz F.: Atomok és elektronok mozgásban. *Fizikai Szemle* LII/1 (2002) 12–18.
6. Dombi P., Varjú K.: Krausz Ferenc, az attofizika úttörője – a 2023-as fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* LXXIII/11 (2023) 390–393.

A KORDYLEWSKI-PORHOLDAK ASZTROPOLARIMETRIÁJA*

Slíz-Balogh Judit^{1,2}, Má dai Attila^{1,2}, Sári Pál^{1,2}, Horváth Gábor^{1,2}, Barta András³

¹ HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport,

² ELTE Biológiai Fizika Tanszék, Környezetoptika Laboratórium,

³ Estrato Kutató és Fejlesztő Kft., Budapest

Egy közös tömegközéppont körül keringő égitestpár gravitációs terében Leonhard Euler 1767-ben fedezte föl a keringési síkbeli L1, L2 és L3, továbbá Louis Lagrange 1772-ben az L4 és L5 egyensúlyi pontokat. Az L1, L2 és L3 pontok a két égitestet összekötő egyenes mentén helyezkednek el: az L1 a kisebb tömegű égitestnek a nagyobb tömegűvel ellentétes oldalán, L2 a két égitest között, L3 a nagyobb tömegű égitestnek a kisebb tömegűvel ellentétes oldalán – bár az L1 és L2 pontok helyét, elnevezését gyakran fölcserélik –, míg az L4 és L5 pontok olyan egyenlő oldalú háromszögek harmadik csúcspontjai, amelyek másik két csúcspontjába esik a két égitest. Ha ezen öt Lagrange-pontba egy harmadik testet helyezünk megfelelő kezdősebességgel, akkor e test az égitestpárral azonos szögsebességgel együtt kering, miközben nem módosul a relatív pozíciója. Megfelelő tömegarányok mellett az L4 és L5 pontok stabilak, vagyis ha egy harmadik testet nem túl nagy mértékben kimozdítunk belőlük, az e pontok közelében maradványúgynevezett librációs (lengő, billegő, rezgő) mozgást végez. Ezáltal mindkét Lagrange-pont „égi porszívóként” csapdába ejti a hozzá nem túl nagy sebességgel közeledő bolygóközi port vagy aszteroidákat [1].

* Az ELTE Biológiai Fizika Tanszék 1998. évi alapításának 25. évfordulójára.

A Naprendszerben a Lagrange-féle librációs mozgásra több példa is ismert: i) a Nap–Vénusz-rendszer L4 pontja körül 1 libráló aszteroida, ii) a Nap–Föld L4 pontja körül 2, iii) a Nap–Mars L4 pontja körül 1 és L5 pontja körül 13, iv) a Nap–Jupiter L4 és L5 pontja körül több ezer trójai és görög kisbolygó, v) a Nap–Uránusz L4 pontja körül 2, vi) a Nap–Neptunusz L4 pontja körül 24, L5 pontja körül pedig 4 libráló aszteroida ismert.

Ugyanakkor, az L1, L2 és L3 pontok mindig instabilak, azaz ha kimozdítjuk belőlük a harmadik testet, az kezdetben lassan, majd egyre gyorsabban eltávolodik tőlük. Ha a harmadik test tömege a másik két nagy test m_{nagyobb} és m_{kisebb} tömegéhez képest elhanyagolható, akkor az L4 és L5 pontok stabilitása csak a két nagy tömeg arányától függ [2]: e két Lagrange-pont csak akkor stabil,



Sári Pál okleveles gépészmérnök, aki évtizedek óta hazai és külföldi csillagászati távcsövek tartószerkezetének és csillagkövető órágépének mechanikai és elektronikai tervezését, építését, karbantartását és továbbfejlesztését végzi. A HATNetSouth (Hungarian Automated Telescope Network South) exobolygókutató hálózat és a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport tagja.



Slíz-Balogh Judit a BME-n végzett matematikus-mérnökként, majd menedzserként dolgozott a Graphisoft SE szoftverfejlesztő cégnél. Azután az ELTE-n szerzett csillagász diplomát, majd ott doktorált a Fizika Doktori Iskola Ré-szecskefizika és Csillagászat programjában. Fő kutatási területe az égi mechanika, azon belül a Naprendszer Lagrange-pontjainak kaotikus dinamikája és képalkotó polarimetriája. Jelenleg a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport tagja.



Horváth Gábor az ELTE-n végzett fizikus, az MTA doktora, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék egyetemi tanára, az ELTE Környezetoptika Laboratórium és a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport vezetője. A vizuális környezet optikai saját-ságaival, az állatok polarizációérzékelésével foglalkozik, valamint fotobiofizikai, biomechanikai, égi mechanikai és asztropolarimetria kutatásokat végez. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa.



Má dai Attila okleveles gépészmérnök, aki sok éve csillagászati obszervatóriumok távcsöveinek optikai és elektronikai tervezésében, építésében, szoftverellátásában, tesztelésében, karbantartásában, továbbfejlesztésében és szoftverfrissítésében vesz részt. Jelenleg a HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport tagja.



Barta András az ELTE-n végzett fizikusként, majd ott szerzett PhD-fokozatot biofizikából a Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumában. Jelenleg ipari műszerek, elsősorban minőség-ellenőrző eszközök fejlesztésével foglalkozik az Estrato Kutatási és Fejlesztési Kft. vezetőjeként. Számos kutatásfejlesztési pályázat előkészítésében és megvalósításában vett és vesz részt. A HUN-REN-ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport is az ő polarizáció-kiértékelő programját használja.

ha $m_{\text{kisebb}}/(m_{\text{nagyobb}} + m_{\text{kisebb}}) < 0,03852$, máskülönben az L4 és L5 instabil. A Föld és Hold $m_{\text{Hold}}/(m_{\text{Föld}} + m_{\text{Hold}}) = 0,012195 < 0,03852$ tömegarányából következik, hogy L4 és L5 pontjaik stabilak, miáltal azok körül összegyűlhetnek a bolygóközi részecskék.

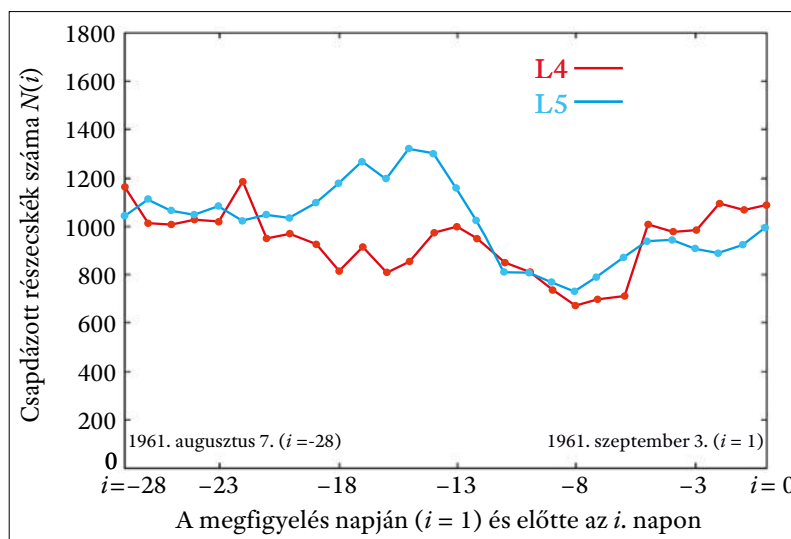
Az 1950-es évek vége felé ezért kezdte el keresni Kazimierz Kordylewski lengyel csillagász a Föld–Hold-rendszer L4 és L5 pontjainál esetleg fölgyülemlert porhalmazt [3]. Kordylewski a lengyel Tátra-hegységbeni Kasprowy Wierchben lévő csillagászati obszervatóriumában 1961-ben szabad szemmel megfigyelt, majd fotometriával is kimutatót az L5 pont körül két, igen gyenge fényű, 6° maximális szögkiterjedésű, elnyúlt porfelhőt. 1963/64-ben több hónapot töltött a magyarországi Piszkestető csillagászati obszervatóriumában, főleg azzal a céllal, hogy ezen általa fölfedezett porfelhőket az ottani fényszennyezésmentes éjjeli égbolton is vizuálisan megfigyelje.

1961-től mások is elkezdtek vadászni az éjszakai égbolton a Kordylewski-ről elnevezett porholdra az L5 és L4 pontok környékén. E több évtizedes vadászat során néhányan észlelték, mások viszont nem tudták kimutatni a Kordylewski-porholdat. Így alakult ki a csillagász-közösség egy részében az a szkeptikus vélemény, hogy habár a Kordylewski-porholdak létezhetnek, vizuális és fotometriai észlelésük nem eléggé meggyőzően bizonyított, továbbá fennmaradásuk (stabilitásuk) is bizonytalan, mert az L4 és L5 pontok elméleti stabilitását (vagyis a Föld és Hold mindkét pont környéki együttes gravitációs csapdázóképességét) a Nap gravitációs perturbációja leronthatja.

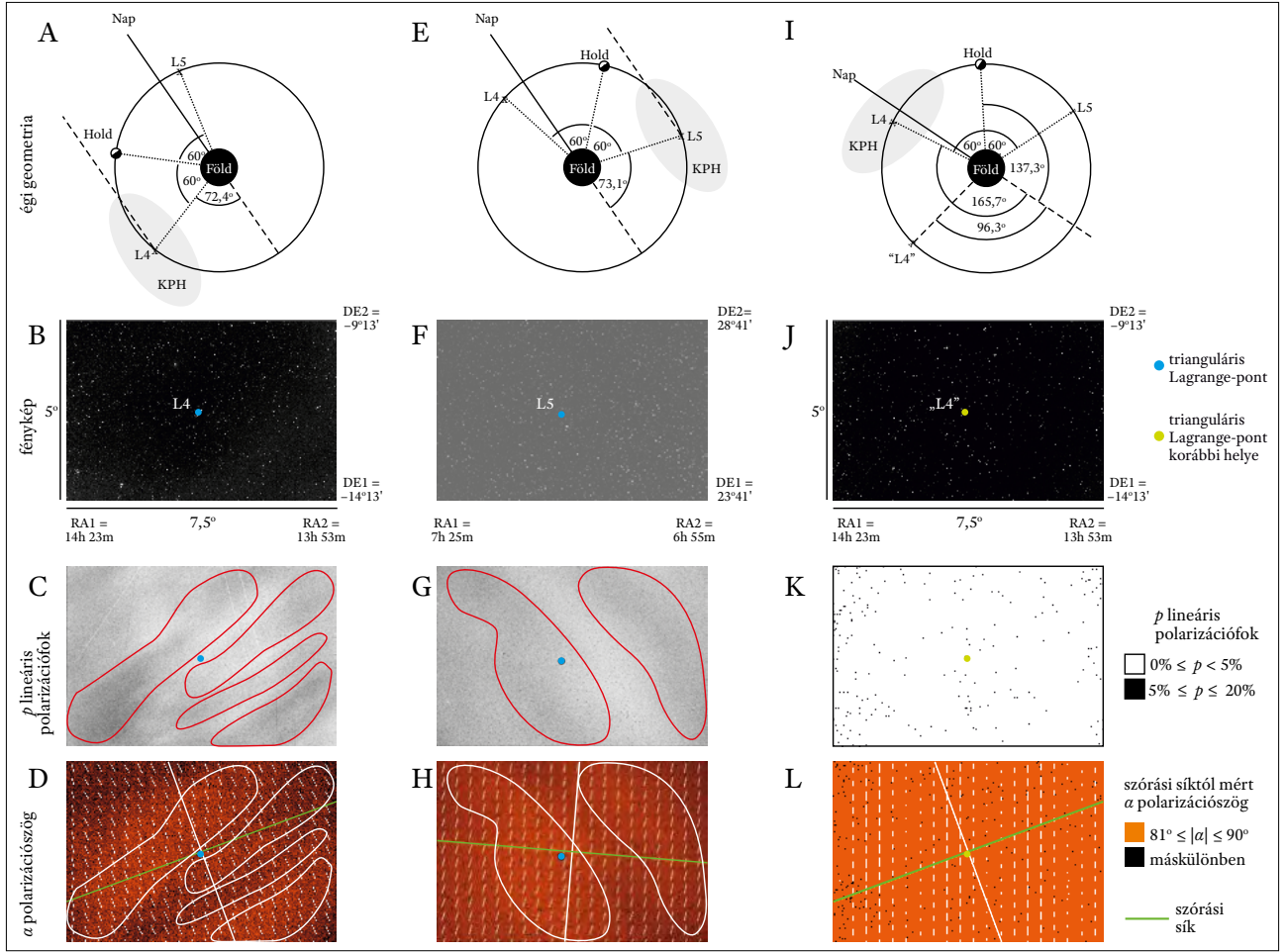
E patthelyzetben akkor történt fordulópon, amikor 2017. augusztus 17. és 18. éjjelén egy képalkotó polariméterrel ellátott nagy látószögű csillagászati távcsővel Slíz-Balogh Juditnak két egymást követő alkalommal sikerült mérnie az L5 pont körüli Kordylewski-porhold lineáris polarizációs mintázatait [4, 5].

Ennek az volt a szerencsés előzménye, hogy miközben Judit az ELTE Csillagászati Tanszék doktoranduszaként évek óta vizsgálta a Föld–Hold-rendszer L5 pontja körüli részecskék kaotikus dinamikáját [6], meghallgatta Horváth Gábor állati és emberi polarizáció-érzékelésről tartott előadás-sorozatát az ELTE Biológiai Fizika Tanszékének Környezetoptika Laboratóriumában. Több előadás is arról szólt, hogy képalkotó polarimetriával miként mérhetők az égbolt polarizációs mintázatai, és azok milyen fontos szerepet játszanak számos állat térbeli tájékozódásában. Amikor kiderült, hogy Judit csillagász (is), az előadó megemlítette, hogy sok év óta arra buzdítja a csillagászokat – de addig mindhiába –, hogy távcsövéket lássák el egy képalkotó polariméterrel, és próbálják meg kimérni a Kordylewski-porholdak polarizációs jeleit. Mivel Juditnak szerencséire akkor már Sári Pál gépészmérnök közreműködésével megépült a badacsonytördemici magánobszervatóriuma, és éppen a Kordylewski-porholdak számítógépes modellezése volt a doktori témája, úgy döntött, hogy Barta Andrással, az Estrato Kft. vezetőjével, Horváth Gábor exdoktoranduszával és Máday Attila gépészmérnökkel felszerelteti a badacsonytördemici magántávcsövet egy forgó analizátoros lineáris képalkotó polariméterrel. A távcső látómezeje – néhány jól megválasztott módosítás után – a porholdak szögkiterjedésének nagyságrendjébe esett. Judit e polariméteres távcsövével rendszeresen próbálkozott a Kordylewski-porholdak polarizációjának mérésével. A magyarországi éjszakai égbolt kedvezőtlen asztrológiája miatt e kitaró vadászata csak egy év után, 2017 augusztusában hozta meg az első eredményt [5].

A 2017. augusztus 17-ei és 18-ai két polarimetriai észleléssel együtt az L5 pont körüli Kordylewski-porholdat összesen 16 alkalommal figyelték meg csillagászok, míg az L4 pont körül csak ötször. E $16/5 \approx 3$ -szoros aszimmetriának több oka is lehet. Például a megfigyelési pró-



1. ábra. A Föld–Hold-rendszer L4 (piros) és L5 (kék) Lagrange-pontjai által 1961. szeptember 3. ($i = 0$) előtti i -edik napon csapdába esett részecskék $N(i)$ száma $i = -28, \dots, -1, 0$ függvényében, számítógéppel modellezve [7]



2. ábra. A Föld–Hold-rendszer L4 és L5 Lagrange-pontja körül Badacsonytördemecen képkalkotó asztropolarimetriával észlelt Kordylewski-féle porholdak (KPH) égi geometriája, valamint p lineáris polarizációfokának és α polarizációs szögének mintázatai a Hold keringési síkjában. (A–D) 22:00:34 GMT (greenwichi középido); 2022. július 3.; a porhold fázisa: 65%; fázisszög: 72,4°; epocha: 2000,0; képközép: RA (rektaszenczió) = 14 óra 11 perc 3,89 másodperc; DE (deklináció) = $-11^{\circ} 39' 10,65''$. (E–H) 23:02:52 GMT; 2021. október 31.; a porhold fázisa: 65%; fázisszög: 73,1°; epocha: 2000,0; képközép: RA = 7 óra 9 perc 26,57 másodperc; DE = $26^{\circ} 9' 40,3''$. Az L4 és L5 pontok helyét kék pontok jelölik. Az α -mintázatokon a fehér pálcikák a helyi polarizációirányt mutatják. A zöld szórási síkra merőleges irányt a fehér egyenes szemlélteti. A porholdak főbb foltjainak körvonalát piros, illetve fehér zárt görbék jelzik a p - és α -mintázatokon. A p - és α -mintázatokon az egymásra merőleges fehér és zöld egyeneseken túli vonalak műholdak nyomai. (I–L) 20:14:51 GMT; 2022. július 24.; fázisszög: 96,3°; epocha: 2000,0; képközép: RA = 14 óra 11 perc 3,89 másodperc; DE = $-11^{\circ} 39' 10,65''$), amikor az L4 pont nem volt ebben az égi ablakban, ezért „L4” az L4 pont 2022. július 3-i 22:00:34 GMT időpontbeli helyét jelöli [8]

bákolások alatti változó, gyakran kedvezőtlen égi vagy csillagászati feltételek – ugyanis a Napnak és a Holdnak megfelelően mélyen kell járnia a horizont alatt, hogy fényük ne szennyezze az éjszakai eget, továbbá a légkörnek minél aeroszolmentesebbnek kell lennie, hogy megfelelően nagy legyen az optikai átlátszósága.

Az L4 és L5 porholdak aszimmetrikus megfigyelési gyakorisága egy további lehetséges okának kiderítése érdekében számítógépes modellezéseket végeztünk [7], amelyek során meghatároztuk az L4 és L5 pontok részecskecsapdázási képességét a porholdak 16 (L5) + 5 (L4) = 21 publikált megfigyelési dátuma előtti 28 napos időszakokban – figyelembe véve a Nap gravitációs hatását, valamint a földpálya excentricitását és a Hold pályasíkjának dőlésszögét az ekliptikához képest. Azt találtuk, hogy a megfigyelési dátumtól függően az L5 pont legfőljebb 9%-kal nagyobb befogási képességű, mint az L4 (aminek pontos fizikai oka egyelőre nem világos).

A csapdázási hatékonyság ezen eltérése lehet az egyik oka annak, hogy a Kordylewski-porholdat miért figyelték meg sokkal gyakrabban az L5 pont körül, mint az L4 környékén.

Az 1. ábra egy példát mutat a Föld–Hold-rendszer L4 és L5 pontjai körül 1961. szeptember 3. (a porhold legelső, Kordylewski általi megfigyelésének napja) előtti i -edik napon csapdába esett, libráló részecskék $N_{L4}(i)$ és $N_{L5}(i)$ számaira i ($= -28, \dots, -1, 0$) függvényében [7]. A porhold többi ismert 20 észlelési dátuma előtti 28 napos időszakokra néha az $N_{L4}(i) > N_{L5}(i)$, olykor az $N_{L4}(i) < N_{L5}(i)$ viszony volt jellemző, míg máskor az $N_{L4}(i) \approx N_{L5}(i)$ közelítő egyenlőség. Az $N_{L4}(i)$ és az $N_{L5}(i)$ görbe sokszor egyaránt nőtt vagy csökkent az idővel, de számos alkalommal időben ellentétesen változott (1. ábra). Mindazonáltal a vizsgált négyhetes időtartományok végéig mindig az L5 pont csapdázott valamennyivel több ($\leq 9\%$) részecskét [7].

A bolygóközi por által szórt napfény polarizációjának éjszakai észlelésében hatékonynak bizonyult csillagászati polarimetria magyarországi alkalmazását az országunkra jellemző igen kedvezőtlen asztróklíma gátolja. Egyrészt korlátozottak a fényszennyezésmentes helyek, másrészt pedig évente csak tíz körüli éjszakán igaz egy-szerre az, hogy kedvezően aeroszolszegény a felhőtlen égbolt, és egyidejűleg a Föld–Hold-rendszer L4 vagy L5 Lagrange-pontja holdmentes égbolton tartózkodik. E probléma kiküszöbölése végett kedvező asztróklímájú helyszíneken (például száraz sivatagokban) érdemes folytatni a bolygóközi por poláros szórt fényének vizsgálatát egy hordozható nagy látószögű, polariméterrel felszerelt teleszkóppal.

E célból alakult meg 2022. július 1-én az ELTE Biológiai Fizika Tanszékén Horváth Gábor vezetésével a Magyar Kutatási Hálózat (korábban Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, ELKH) és az ELTE közös Asztropolarimetria Kutatócsoportja, ami a (ELKH-) HUN-REN–ELTE-0116607 számú, 66 hónap futamidejű pályázat keretében elkezdett építeni egy hordozható széles látómezőjű polarizációs távcsövet. Ezzel a következő öt évben a namíbiai Khomas régióbeli középső fennsík egyik ideális asztróklímájú asztrófarmján, az ISABIS Astro Lodge-ban tervezzük mérni a bolygóközi porok, köztük a Kordylewski-porholdak és az állatövi fény polarizációs sajátságainak változását és dinamikáját. 2023. július–augusztusában sikeresen lezajlott az első négyhetes namíbiai mérőkampányunk, aminek eredményei publikálás alatt állnak.

Amíg ezen új távcső fölépült, és elkezdődhetek vele a namíbiai megfigyelések, addig a Badacsonytördemici magánobszervatóriumban működő polarizációs teleszkóppal folytatódtak a polarimetriai mérések. Az utóbbi távcsővel elért legújabb eredményként Badacsonytördemicen 2021. október 31-én éjjel harmadszorra észleltük az L5 pontnál a Kordylewski-porholdat, és 2022. július 3. éjszakáján első alkalommal az L4 pont körüli porholdat (2. ábra) [8]. A 2017. évi kettővel együtt e két új polarimetriai észlelés alkalmasint elosztatja a Föld és a Hold L4 és L5 Lagrange-pontjainál kialakult Kordylewski-porholdak létezése körüli bizonytalanságot.

Köszönetnyilvánítás

A HUN-REN–ELTE Asztropolarimetria Kutatócsoport kutatásait a Magyar Kutatási Hálózat (korábban Eötvös Loránd Kutatási Hálózat, ELKH) „Hordozható képalakító polariméteres csillagászati távcső építése és a Föld kedvező asztróklímájú területein történő alkalmazásai, különös tekintettel a Kordylewski-porholdakra” című, (ELKH-) HUN-REN–ELTE-0116607 számú, 2022–2027 (66 hónap) futamidejű pályázata támogatja.

Hivatkozások

- Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G.: Kordylewski porholdjának polarimetriai észlelése: Lagrange égi porszívója. *Természet Világa* 150 (2019) 169–175.
- Horváth Á., Horváth G.: A Kordylewski-féle porholdak kialakulásának számítógépes modellezése. *Fizikai Szemle* 40 (1990) 338–344.
- Horváth G., Slíz-Balogh J.: Interjú Kazimierz Kordylewski lengyel csillagász fiával: porholdmérés polarimetriával. *Élet és Tudomány* 74 (2019) 425–427.
- Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G.: Celestial mechanics and polarization optics of the Kordylewski dust cloud in the Earth–Moon Lagrange point L5 – Part I. Three-dimensional celestial mechanical modelling of dust cloud formation. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 480 (2018) 5550–5559. DOI: 10.1093/mnras/sty2049
- Slíz-Balogh J., Barta A., Horváth G.: Celestial mechanics and polarization optics of the Kordylewski dust cloud in the Earth–Moon Lagrange point L5 – Part II. Imaging polarimetric observation: new evidence for the existence of Kordylewski dust cloud. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 482 (2019) 762–770. DOI: 10.1093/mnras/sty2630
- Slíz J.: A Föld–Hold rendszer L5 Lagrange-pontja körüli Kordylewski-porhold kaotikus dinamikája és képalakító polarimetriája. Doktori (PhD) értekezés (2020), ELTE TTK, Fizikai Intézet, Budapest, 99 o. (témavezető: Süli Áron, konzulens: Horváth Gábor)
- Slíz-Balogh J., Érdi B., Horváth D., Horváth G.: Why was the Kordylewski dust cloud observed more frequently at the L5 Lagrange point than at L4? Asymmetry of the particle capture at the triangular Lagrange points of the Earth–Moon system. *Icarus* 374 (2022) 114814. DOI: 10.1016/j.icarus.2021.114814
- Slíz-Balogh J., Márai A., Sári P., Barta A., Horváth G.: First polarimetric evidence of the existence of the Kordylewski dust cloud at the L4 Lagrange point of the Earth–Moon system. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 518 (2023) 5236–5241. DOI: 10.1093/mnras/stac3429

Mi az a Lagrange-pont?

A közös tömegközéppontjuk körül keringő két égitest gravitációs terében egy harmadik, kisebb test számára létrejön öt egyensúlyi pont, ezek a *Lagrange-pontok*. A csillagászatban ez a térnek az az öt pontja (L1, L2, L3, L4, L5), ahol két nagyobb égitest (például a Nap és a Föld, vagy mint ebben a dolgozatban kifejtik a szerzők: a Föld és a Hold) kombinált gravitációs ereje megegyezik egy sokkal kisebb, harmadik test centrifugális erejével. Mivel pedig a klasszikus fizikában az erő és a vele megegyező ellenerő kioltja egymást, a kisebb test ebben az esetben relatíve nyugalomban maradhat. A Lagrange-pont tehát ebből a szempontból hasonló a *geostacionárius pályához*. A pontok a nevüket Joseph-Louis Lagrange-ról, a 18. században élt matematikusról kapták, aki 1772-ben írt a jelenségről a háromtest-problémát boncolgató tanulmányában.

INTERJÚ KROÓ NORBERTTEL



Kroó Norbert (született Budapesten, 1934. szeptember 19-én) fizikus, kutatóprofesszor, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja (1990), az Európai Akadémia tagja (1993). A fizikai és matematikai tudományok kandidátusa (1965), a fizikai és matematikai tudományok doktora (1968). Az MTA főtitkára (1999–2005), az MTA alelnöke (2005–2011), emeritus kutatóprofesszor, c. egyetemi tanár (Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem). Az MTA Központi Fizikai Kutatóintézet Szilárdtestfizikai Kutatóintézete igazgatója (1981–1998).

Elsősorban a szilárdtestfizika, az optika és a neutronfizika kérdéseivel foglalkozik. Kutatásai során vizsgálta a rendezett kondenzált rendszerek szerkezetét, dinamikáját és optikai tulajdonságait. Fontos eredményeket ért el a szilárdtestlézerek fizikája, fejlesztései és alkalmazásai területén, itt több szabadalmat regisztrált. A fémek fizikájával kapcsolatban a különböző fémrétegek, illetve fém–fémoxid–fém-szerkezetek fényemittáló (azaz fénykibocsátó) tulajdonságaival foglalkozott. Emellett jelentősebb eredményei vannak több lézerfizikai területen: a lézerfény és az anyag kölcsönhatásának vizsgálata, a gázlézerek fizikája és gyakorlati alkalmazásai, valamint a lézerek és az alagútmikroszkópia együttműködése-kombinálása. Munkája során foglalkozott a nemlineáris optika, a felületi plazmonok és a nanofizika egyes kérdéseivel is. Kutatásaihoz a neutronszórás, a lézerspektroszkópia és az alagútmikroszkópia módszereit alkalmazza. Jelenleg a fúziós reaktor technikai megvalósításán dolgozik. Több mint kétszáz tudományos dolgozatot írt és negyven szabadalmat jegyeztetett be.

Kedves Norbert, köszönöm, hogy elfogadtad a felkérést erre az interjúra. Vágjunk is egyből a közepébe, kezdjük tehát a tudományos pályád kezdetével! Gyerekkori családi háttérrel mennyire volt meghatározó a pályaválasztásban?

Gyönyörű gyemekkorom után 1945-től kezdődően nehézé vált az életem, de a tanulmányaimat szüleim minden nehézségük ellenére bátorították és támogatták. Édesapám nyolcgyermekes családban nőtt fel, testvérei az ipar különböző területein tevékenykedtek eredményesen, és talán ezért én is ilyen pályára vágytam. Ezt erősítette egyébként nyaranként a Csepeli Vas- és Fémműben végzett zsebpénzkereső munkám is. Először gépészmérnöki pályában gondolkodtam, majd az elektronika fejlődését tapasztalva villamosmérnöki területre váltottam. A harmadikos és negyedikes gimnazistakoromban átéltem sikeres szereplést az országos fizika-, majd matematika-versenyeken terelt a fizika felé.

Közéleti tevékenységedben most sem sajnálsz az időt az aktív tanárokkal való kapcsolattartásra. Neked kik voltak a meghatározó tanáraid, akik szerepet játszottak abban, hogy fizikus lettél?

Tanítóim és tanárim mindig nagyon fontosak voltak számomra. Elemi iskolai tanítómra, Janka nénire még most is hálával gondolok. A budapesti, IX. kerületi Fáy András Gimnáziumban 8 évet töltöttem és Bárány Sándor matematika-, valamint Stróbl Ernő fizikatanáraimon kívül Harasztiné magyartanárom, Váradi igazgató és Udvarhelyi igazgatóhelyettes urak mellett több tanárom is meghatározónak bizonyult további sorsomban. A középszinten tanító tanárok iránti érdeklődésemet motiválta az ELFT-ben sok éven keresztül végzett munkám mellett

feleségem 40 éves, nagy elhivatottsággal végzett gimnáziumi tanári munkája is. Az Alapítvány a Természettudományi Oktatásért kuratóriumi elnökségének elvállalását ezek a tapasztalatok is befolyásolták, ezt a feladatot ma is örömmel látom el.

Ugorjunk egy kicsit az időben az egyetemi diplomaszerezésedig. Ezután hogyan kerültél a nem sokkal azelőtt alapított csillebérci KFKI-ba?

1958-ban végeztem az ELTE fizikus szakán, és akkor óriási volt az érdeklődés a frissen végzett fizikusok iránt. Nekem nyolc állásajánlatom volt, de egyértelműen a KFKI mellett döntöttem, ahová ketten is hívtak. Jánossy Lajos a KFKI akkori igazgatója optikai témára, Pál Lénárd igazgatóhelyettes pedig szilárdtestfizikai kutatásokra invitált.



Kroó Norbert az 1980-as években az SZFKI felületi plazmonos kutatólaboratóriumában

Akkor még nem voltak lézerek (az első lézert csak 1960-ban építették meg – a szerk.), így az optika kevés kutatási lehetőséget kínált. A szilárdtestfizika viszont óriási sebességgel fejlődött, ezért az utóbbit választottam. Az optika felé, különösen a lézerfény és az anyag kölcsönhatásaival kapcsolatos kutatásokhoz pedig 1971-ben fordultam. Ez a szerelem, noha változó jelleggel, azóta is tart.



A Szilárdtestfizikai Kutatóintézet alapító igazgatójaként süteményt szolgál fel napon az intézet női dolgozóinak az 1980-as években

Számos külföldi intézetben dolgoztál huzamosabb ideig Oroszországtól kezdve Svédországon át Németországig. Melyik ilyen tartózkodás volt a legmeghatározóbb a tudományos pályádod?

Pályám kezdetén a külföldi munkalehetőség fehér holló volt. Az 1963-ban elnyert egyéves IAE-ösztöndíjamat óriási szerencsének tartottam. Svédországban tudtam egy évet dolgozni, mégpedig a svéd anyagvizsgáló atomreaktornál. A második hosszú idejű külföldi munkám a dubnai Egyesített Atomkutató Intézetben valósult meg, ahol igazgatóhelyettesként dolgoztam 1969 és 1971 között. 1996-ban Németországban kaptam egy professzori díjat az Alexander von Humboldt Alapítványtól, amely egyéves kutatási lehetőséget is jelentett, amit a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben több év alatt, több részletben „fogyasztottam el”. Miután letelt az idő, az intézet vezetése nekem ajándékozta annak a laboratóriumnak a berendezéseit, amelyben dolgoztam, ezeket haza is szállították és az akkori Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetben helyezték el 2008-ban. Ezeken kívül pedig rövidebb, néhány hetes, vagy néhány hónapos munkát végeztem például Saclay-ban (Franciaország), Vincában (Jugoszlávia), a Rutherford Appleton Laboratóriumban (Anglia), Tokai Murában (Japán), Jülichben (Németország) és Oak Ridge-ben (USA) is.

Ha egyetlen eredményt kellene kiemelni a szilárdtestfizikát, a neutronfizikát, az optikát és újabban a (fúziós) plazmafizikát is felölelő gazdag életpályád eredményeiből, melyikre lenne az?

Mindig a legutolsó eredményem volt számomra a legkedvesebb, mindig annak örültem a legjobban. Ez most természetesen a nanoplazmonikus fúziós kutatásaink legfrissebb eredményeit jelenti, melyek jelentősége kiteljesedésük után kutatási eredményeim leltárában a legjelentősebb helyet foglalhatja majd el.

Engem mindig érdekelt a rendszerváltás körüli időszak, és Te éppen ebben a nagyon izgalmas történelmi korban voltál első és eddig egyetlen magyarként az Európai Fizikai Társulat elnöke 1993 és 1995 között. Hogyan értékeled ezt a két éves ciklust, mennyire sikerült a „keleti” és a „nyugati” kutatói közösségeket közelíteni egymáshoz?

Csodálatos két év volt, tele reményekkel és lehetőségekkel. A korábbi évek tapasztalatai alapján mind a keleti, mind a nyugati gondolkodásmódot megismertem és ez segített hidakat építeni a kettő között. Ezt kollégáim is láthatták, és mindenben segítettek erőfeszítéseimet. Ebben sokat segített az a tapasztalathalmaz is, amit az ELFT-ben elnökként, főtítkárként és a tanács tagjaként végeztem, továbbá az, hogy társulatunkat az EPS tanácsában is képviselhettem. Mindig csapatmunkában gondolkodtam, és ez itt is bejött. Az már egy szomorú tapasztalat, hogy néhány évvel későbbtól kezdődően ez a tendencia ellaposodott a tudományban is.



Kroó Norbert az MTA főtítkáráként Budapesten fogadja Madeleine Albright amerikai külügyminisztert 2000-ben

Az Akadémiai Díjtól kezdve a Lamb-díjon át a Prima Primissimáig számtalan elismerésben részesültél. Melyikre vagy ezek közül a legbüszkébb?

Sohasem azért dolgoztam, hogy ezt elismerjék, de az azért fáj, ha ez nem következett be, és ez sajnos néhány esetben megtörtént. Általában itt is mindig a legutolsó kitüntetésnek örültem, de a finn köztársasági elnök által odaítélt Oroszlánrend Parancsnoki Fokozata máig tartó mély nyomokat hagyott bennem. Elsősorban azért, mert a laudációban kihangsúlyozták, hogy tudományos eredményeim mellett a finn-magyar tudományos együttműködés erősítése és az európai tudománypolitika alakításában játszott meghatározó szerepem jogosított fel erre a

díjra. A finn nagykövet szerint pedig én első magyarként érdemeltem ki ezt. Nagyon örültem a Prima Primissima Díjnak is, mert az a szakmai közösség döntésén alapult, ugyanúgy, mint a nagy számú, rangos külföldi elismerésem.



Kroó Norbert a Helsinki Műszaki Egyetem díszdoktori címének átvételekor 2003-ban

Jól emlékszem legelső találkozásunkra 2005-ben, amikor még az MTA főtákaraként fogadtál a Széchenyi téren. Külföldön szerzett friss doktorival sokan eltanácsoltak a hazaköltözéstől, Te azonban amellett érveltél, hogy itthon is sok lehetőségem lesz. Így hát, hazaköltöztem, és ezt a lépést azóta sem bántam meg. Mit tanácsolnál ma egy külföldön doktoráló magyar fiatalnak?

A külföldi tapasztalatok hazahozatala döntő fontosságú, és ezt hazánk is joggal elvárhatja minden magyartól. Én is ezt az elvet követtem, úgy ahogyan ezt Vörösmarty Mihály a „Gondolatok a könyvtárban” című verse utolsó soraiban megfogalmazta: „Mi dolgunk a világon? Küzdeni / Erőnk szerint a legnemesbékért. / Előttünk egy nemzetnek sorsa áll. / Ha azt kivíttuk a mély sülyedésből / S a szellemharcok tiszta sugaránál / Olyan magasra tettük, mint lehet, / Mondhatjuk, térvén őseink porához: / Köszönjük élet! áldomásodat, / Ez jó multság, férfi munka volt!”. Egyébként ez a vers az MTA Könyvtára születése alkalmából 1826-ban íródott, ezért közvetve az MTA-ban végzett munkámnak is írányt szabott.

Rá akartam kérdezni a kedvenc versedre is, de ezzel megelőztél. Viszont ha már a tanácsoknál tartunk, a fizika mely területét tartod most a legizgalmasabbnak, miért érdemes egy mai fiatalnak a fizikuspályát választania?

Húsz évvel ezelőtt úgy éreztem, hogy a fizika a többi tudományterület és a gazdaság szolgálová szegődik és egyre kevésbé játszik önálló diszciplína szerepet. A kutatásokat segítő infrastrukturális fejlődés azonban új helyzetet teremtett. Lehetővé vált az extrémumok, az extrém

nagy és kis távolságok, évmilliárdok és attoszekundumok (*a másodperc milliárdodrészeinek milliárdodrésze – a szerk.*), igen nagy és igen kis energiák kutatása, ami a fizikának is új lendületet adott. Ez egyébként a gazdaság felé is új utakat nyitott, elég csak például a nanotechnológia robbanásszerű fejlődésére gondolni. Ez motiválhatja azt is, hogy különböző tudományterületek és technológiák ötvözésétől új, úttörő eredmények várhatók. Ilyen lehet például a közelmúltban indult nanoplazmonikus lézeres fúziós programunk is. Konkrét tudományterületként a biofizikát és az alkalmazott kvantummechanikát emelném ki.

Nem titok, hogy nagy család vesz körül, és számos unokával illetve dédunokával büszkélkedhetsz. Vannak közöttük akik a természettudományos vagy a mérnöki pályát választották?

Valóban szép család vesz körül. Két gyermekem, 8 unokám és 7 dédunokám is hozzájárul kiegyensúlyozott, boldog életemhez, melynek sajnos szomorú és máig nem megemésztett eseménye volt feleségem 2020 februárjában bekövetkezett halála. Vele 62 éven keresztül éltünk boldog házasságban. Fiam villamosmérnök, lányom pedig építésmérnök. Unokáim közül ötnek van már egyetemi végzettsége, közülük hárman lettek mérnökök: bioinformatikus, belsőépítész és kertépítész mérnökök.

Azt is sokan tudják, hogy hívő keresztényként foglalkoztatnak a vallásos hit és a természettudományos igazságok viszonyával kapcsolatos kérdések. Miért látod úgy, hogy nincs ellentmondás a világ megismerésének ezen két aspektusa között?

Úgy gondolom, hogy csodálatos, finomhangolt világunk, ahol mindennek fontos funkciója van, nem jöhetett létre magától, mindez egy Teremtőre enged következtetni. Ez természetesen vonatkozik az ezt a világot szabályzó természettörvényekre is. A vallás (a hit) a Teremtő felé vezető hidat jelenti, ami nyilván nem lehet ellentmondásban a Teremtő törvényeivel, amelyekre a tudomány is épül. A vélt ellentmondások pedig legtöbbször ismerethiányon, illetve sokszor jóindulatú, sokszor pedig szándékos félremagyarázásokon alapulhatnak. Ezért minden nap tapasztalhatunk ilyen konfliktusokat, de ezek az ideák konfliktusai. A tudományos és vallási ideáknak mindig filozófiai, kulturális és történelmi vonatkozásai vannak. Ezeket éppen ezért nem lehet a tudomány és vallás közötti konfliktusoknak nevezni.

Ezzel akkor meg is köszönöm, hogy bepillantást engedtl egy nagyon izgalmas életút sokak által még nem ismert részleteibe. Jó egészséget és sok szakmai sikert kívánok neked a továbbiakhoz is!

Az interjút készítette: Dombi Péter

KRAUSZ FERENC 2016-BAN A XXVI. NAGYVÁRADI SCHWARTZ LAJOS EMLÉKVERSENY MEGHÍVOTT ELŐADÓJA VOLT

Az idei Nobel-díjakat a szokásos sorrend szerint október első teljes hetében kezdték kihirdetni.

Hétfőn Karikó Katalin sikerét továbbítottam a francia barátainknak, akik az ő berobbanó sikerét egykor nekem is jelezték. A levélben megjegyeztem, hogy kedden délelőtt Krausz Ferencnek fogok szurkolni (ezt elküldtem Krausz Ferencnek is). A fizikai Nobel-díjat Krausz Ferencnek és két francia fizikusnak ítelték oda. A díjazottakat bemutató kép megjelenése pillanatában egy már előkészített e-mailben gratuláltam a házaspárnak – hiszen ez a díj a kettőjük sikere, mert a hihetetlen mennyiségű munka csak közös erőfeszítéssel jöhetett létre. Angéla másnap egy hosszabb levélben válaszolt; elmondta, hogy mit éreztek a telefonos bejelentéskor, felborult az aznapi tervük, Ferenc intézeti előadása helyett az intézetben őt ünnepezték. A tévében láttam, hogy egy kolléganője a nyakába ugrik. Csodálatos hangulat lehetett, ami csak estére lanyhult, ekkor a családdal elmentek abba a közeli görög vendéglőbe, ahova 2017 tavaszán minket is elvittek. Ferencről nem vártam választ, hiszen ő az egész világról kaphatta gratulációkat, de egy pár nap múlva mégis kedvesen reagált, egyben emlékezett a *Fizikumra* is.

Mivel Krausz Ferenc tudománya magasságáig nem érek, nem érhetek fel, néhány találkozásunk és a levelezésünk alapján inkább emberként szeretném őt bemutatni.

Krausz Ferencről bővebben a 2009-es emlékversenyen hallottam Horváth Zoltántól, aki a lézeres előadása közben „elkotyogta”, hogy a világon sokan foglalkoznak lézerekkel, de a következő „lézeres” Nobel-díjat bizonyára Krausz Ferenc fogja megkapni. Megjegyeztem a nevét, és örültem a *Thomson Reuters 2015-ös esélyeslatolgtató magánakciójának*: talán Krausz Ferenc is megkapja a Nobel-díjat.¹

A 2015-ös verseny szervezése közben, már éjfél után egy bemutatkozó levelet írtam Krausz Ferenc professzornak az MPQ honlapján megjelölt e-mail-címére, és egyben meghívtam egy előadás erejéig a novemberi versenyre. Reggelre itt volt a válasz: „Szívest-örömost tennék eleget neki, de sajnos a kérdéses időpontban Koreában leszek vendégprofesszori minőségben. Ha a meghívás a jövő évre is érvényes marad, szívesen jönnek, amennyiben sikerülne időben rögzíteni az időpontot.”

Megbeszéltük, rögzítettük a szokásos novemberi dátumot, de jött a hír: „A helyzet az, hogy van egy elkötelezettségem a kínai akadémia felé egy háromhetes vendégprofesszori tartózkodásra Pekingben, amelyre eredeti terveim szerint az év első felében akartam sort keríteni. Sajnos ezt a tervet néhány előre nem tervezett esemény megghiúsította. [...] Ez az emlékverseny jelenlegi időpontjával csak úgy lenne összeegyeztethető, hogy Pekingből hazajövök és újra visszamegyek, ami meglehetősen körülményes.”

Nehezen (minden kész anyagot átdátumoztunk), de előrehoztuk a versenyt négy héttel. Megérte, mert megismerkedtünk, és azóta is csodálom azt az embert, aki az ő státuszában a fizika népszerűsítése érdekében, az adott szaváért és a „kis halakért” is elvállalt volna még egy ilyen hihetetlen plusz terhet is.

A megbeszélt időpontra Angélával együtt egy szép fehér BMW-vel érkeztek. A technikusokat és a kísérletekhez szükséges eszközöket egy mikrobusz szállította. A Fizikum meglátogatása közben igencsak csodálkozott a neki teljesen idegen mérőrendszerem szerkezetén, ugyanis mi a Fizikumban a számítógéppel mérünk, nem a sokkal gyengébb (100/ μ s) USB-s eszközök adatait olvasatjuk be egy éppen ott levő PC-be. Ez a módszer úgy alakulhatott ki, és lett igen sikeres (atomóra, 3520/ μ s), hogy az induláskor nem ismertem Einstein véleményét a megvalósíthatatlanságról: „Mindenki tudja, hogy bizonyos dolgokat nem lehet megvalósítani, mígnem jön valaki, aki erről nem tud, és megvalósítja”. Másként szólva 1986-ban az elektronikai ismereteim alapján teljesen más úton indultam el; ezt magam találtam ki magamnak, és 1989-ben *szabadalmat is kaptam rá*.

A verseny délelőttjén a technikusok felszerelték a kísérleteket. Krausz Ferenc mindent ellenőrzött, majd néhány kollégával elmentek „az irodalom és a fizika virtuális találkozájára” (a *Holnaposok szoborcsportjához az Ady Endre Liceum előtt*) és egy kávéra.

Az elméleti előadások (*Trócsányi Zoltán, Raffai Péter, Krausz Ferenc*) két nyelven folytak, a közönség két kivétitőn (magyarul és románul) követhette ugyanannak a bemutatónak a diáit. Az előadóké volt a színpadon elhelyezett nagy vetítővászon. A román változat az ablak melletti vetítővászonra került, ezt Berger Tibor magyarázta románul – lényegében Krausz Ferenc szavait ismét-

¹ Már 2015-ben megjövendőlték: Krausz Ferenc Nobel-díjat fog kapni https://drive.google.com/file/d/13fM4K_VJO3OqBRy5Rrv9SIV-KxDMNXKKi/



Az irodalom és a fizika virtuális találkozója Nagyváradaon

telte, de jól ismervén a témát szabadon ki is egészítette azokat.

Délután *három előadásra* került sor. Amikor Krausz Ferenc az előadása bevezetőjében a kísérleteihez használt megvilágító fényimpulzus szükséges időtartamára adott mechanikai példát, a stroboszkópos technika általam 1977-ben megteremtett elvi feltételeire gondoltam. Akkor az ИФК-120 villanólámpa egy villantásnyi energiáját a gyári ajánlás felére csökkentettem. A kondenzátort az ajánlottak mintegy tizedére választottam, így a τ időállandó $\tau = \tau_0/10$ lett, de megkésztettem a tápfeszültséget, és betartottam az ajánlott $CU^4 < 25 \mu F \cdot kV^4$ biztonsági korlátot. A sokkal nagyobb kezdőáram miatt a fényimpulzus időhossza lényegesen tovább csökkent. Addig az esés vége felé a szabadesési golyó képe függőleges rögbilabdává alakult, most tüéles gömbként fejezte be a képi esést.

Krausz Ferenc ráadásként csodálatosan szervezett kísérletes bemutatót is tartott. Egy magyarázó demóban *hosszabb*, majd *igen rövid* LED-eredetű impulzusokkal világította meg a keringő golyókat. Egyértelmű lett, hogy az elektronok esetében attoszekundumos nagyságrendű

fényimpulzusokra van szükség. A *gitárhanggal modulált lézerefényt* optikai kábelon továbbította és távol egy *de-moduláló rendszerrel levette a zenét*, azt hangszórón hallottuk. A diákságnak nagyon tetszett, hogy *egy papírral távkapcsolta a zenét*. Mindent ajándékba hagyott az iskolának. A *Bihari Napló egész-oldalas* interjúja végén a kollaboráció is szóba kerül.

Még Váradon meghívott bennünket a következő év tavaszára a Max Planck Kvantumoptikai Kutatóintézetbe egy egyhetes tanulmányi kirándulásra. A verseny győzteseivel együtt hat diákot vittem, kettőt a Gojdu Líceumból. Mivel a feleségek még Váradon összebarátkoztak a *varrot-tasok révén*, a sofőrrel együtt összesen kilencen voltunk a tanfelügyelőség 8+1 személyes mikrobuszában.

A verseny hangulatához tartozik, hogy az esti vacsorára vendégünk volt Meleg Vilmos színművész, aki meggyőző, öblös hangján Ady-verseket szavalt. A moldáviai kollégák érezték az ünnepi hangulatot, hallottak Adyról, de egyáltalán nem értették a szavalatot. Amikor Vilmos befejezte, egyikőjük felállt, és ő is meglepő biztonsággal szavalt két román verset. A kitört tapsot értékelismerésnek éreztem, Vilmos külön gratulált a moldáviai kolléga előadásának. *A Schwartz Emlékverseny mindig teljesen két-nyelvű volt, a vendégek hozzászóltak a két nyelvű beszédhez*

Örök élmény marad az *MPQ-nak* és környezetének *meglátogatása*. Az új, akkor már majdnem kész *CALA (Centre for Advanced Laser Applications)* műszaki berendezéseitől szinte elakadt a lélegzetünk.

A díj odaítélése láttán hirtelen ezek jutottak eszembe. Újból gratulálok Krausz Ferencnek, és azt kívánom, hogy a rengeteg maga által magának kirótt munkája mellett még sokáig legyen energiája a számban egyre növekedő családjára és a napi több kilométeres futásra.

Bartos-Elekes István, nyugalmazott fizikatanár

AZ ELLIPSZISRŐL (MÁR CSAK?) FIZIKAÓRÁN

Baranyai Klára
Berzsényi Dániel Gimnázium

Az ellipszis a normál fizikaórán

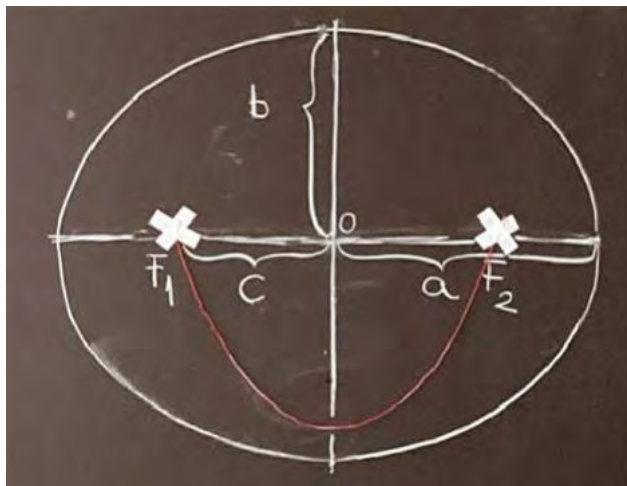
A fizika tanítása közben egyre gyakrabban ütközünk (és az új NAT bevezetésével még gyakrabban fogunk ütközni) abba a problémába, hogy matematikából ismertnek gondolt dolgokra hivatkozunk, amikről kiderül, hogy a gyerekeknek fogalmuk sincs róluk.

Tipikusan ilyen az ellipszis, amiről régen matematikaórán kilencedikben, a halmazok témakörében mint pont-halmazról megtanulták, hogy mi a definíciója. Mára még az emelt szintű érettségi anyagából is kikerült a hiperbolával együtt. Valami fogalmuk van a gyerekeknek arról, hogy az ellipszis lapult körféleség, de a pontos definícióját, vagy a fókuszpontjainak mibenlétét nem ismerik.

Ha értelmesen szeretnénk a Kepler-törvényekről beszélni, szűkös időnkben tehát még az ellipszis definícióját is meg kell tanítanunk. Ez nem is olyan nehéz, egy fonál és



Baranyai Klára 1988-ban szerzett matematika-fizika szakos tanári diplomát az ELTE TTK-n. Azóta a budapesti Berzsényi Dániel Gimnáziumban tanít. Az ELTE Fizika Tanítása Doktori Programban szerzett PhD fokozatot 2015-ben.



1. ábra. Ellipszis rajzolása a táblára

némi ragasztószalag segítségével a táblára rajzolva gyorsan megmutathatjuk (1. ábra). A gyerekek pedig általában örülnek a táblán mosolygó ellipszisnek, gyorsan lefényképezik, és azt gondolják, hogy ezzel meg is tanulták.

Az ellipszis a tehetséggonдозásban

Az iskolában minden évben szervezünk tehetséggonдозó fizikátábort, ahová a legérdeklődőbb diákokat hívjuk el [1]. A változatos tábori programban szerepel kiscsoportos mérés is, minden évfolyamnak más-más feladattal. A tizenegyedikesek számára az idén az ellipszishoz kapcsolódó feladatokat gyűjtöttünk össze. Ennek a csokornak minden része ismert, a versenyfelkészítés magasabb szintjein megjelenik. De talán mások számára is érdekes lehet – gondolatébresztő kiscsoportos vagy egyéni projektmunkákhoz –, ha például valaki fizikát és matematikát összekapcsoló feladatot szeretne a diákjainak adni, ami túlmutat a kötelező tananyagban. Ez a csokor korántsem teljes, az ellipszis még számtalan helyen felbukkan (például a geometriai és a hullámoptikában [2], a relativitáselméletben [3], a rezgőmozgás fázisterében), amikről itt nem esik szó.

A súrlódásmentes talajon eldőló pálca végpontjának pályája és az ellipszográf

Milyen pályát írnak le a súrlódásmentes talajon eldőló pálca pontjai?

A mérés előkészületeként egy farúd alsó végére csapágyakat szereltünk, így a rúd alsó vége jó közelítéssel súrlódásmentesen mozoghatott a talajon a csapágykereken (2. ábra). A diákok a rudat függőleges helyzetből lökésmentesen elengedték, és a dőlés síkjára merőleges nézőpontból videóra vették a mozgását. A rúd egyes pontjait színes pöttyök felragasztásával megjelölték, így a videó alkalmas volt arra, hogy az emelt érettségien is sze-



2. ábra. Csapágykerekek a rúd végén

juk le a mozgást egy olyan derékszögű koordináta-rendszerben, amelynek x -tengelye a talajon fekvő vízszintes, y -tengelye pedig a kezdetben függőleges pálcán megy át! Legyen a pálca hossza a , a tömegközéppont távolsága a pálca felső végétől b . Ha a pálca dőlése közben α szöget zár be a vízszintessel, az ábráról leolvashatók a végpont koordinátái:

$$x = b \cdot \cos \alpha, \quad y = a \cdot \sin \alpha.$$

A tizenegyedikes diákok év vége felé már tanultak koordináta geometriát. Lelkes, a régebbi tananyagot még ismerő matematikatanáraiknak köszönhetően mindegyikük ismerte az ellipszis kanonikus egyenletét:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1.$$

Összevetve a fenti egyenletekkel látható, hogy esetünkben a pálya paraméteres egyenletrendszere egy olyan ellipszist határoz meg, amelynek nagytengelye függőleges és a pálca hosszának kétszeresével egyenlő, kistengelye vízszintes és a b távolság kétszeresével egyenlő.

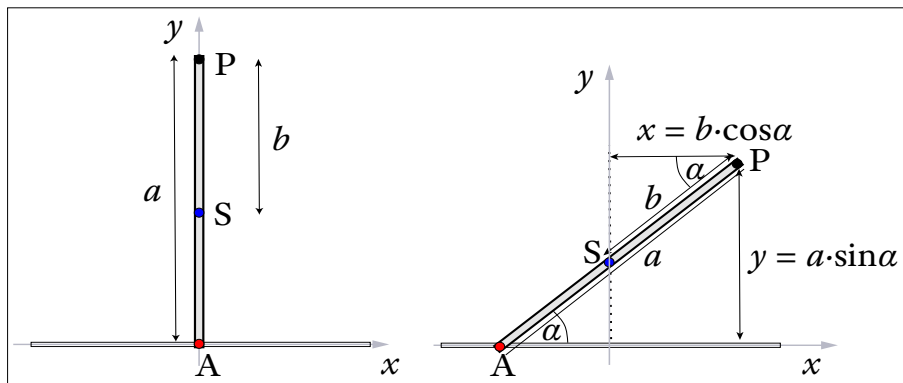
Ha a pálca egy másik pontjának pályáját szeretnénk meghatározni, hasonló eredményre jutunk, csak ott a nagytengely felét a pont talaj feletti magassága, a kistengely felét pedig a pontnak a tömegközépponttól mért távolsága határozza meg. Az ellipszis fókuszpontjait csak közvetetten szerkeszthetjük meg az $a^2 + b^2 = c^2$ összefüggés segítségével (a c -t lásd az 1. ábrán).

Ez a tény a versenyfeladatok világában nem újdonság, de ma már egyre kevesebb diák gondolja végig. Ráadásul nagyon érdekesen kapcsolódik egy ellipsziszrajzoló szerkezethez, egy úgynevezett ellipszográfhoz, ami a zsinóros módszertől különböző utat kínál szabályos ellipszis rajzolásához.

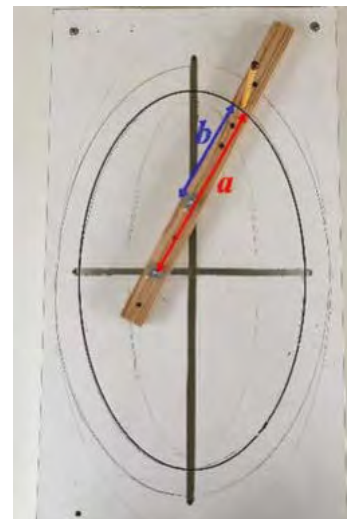
Ez az ellipszográf (4. ábra) egy sík lapon mozgó pálca. A sík lapban két, egymásra merőleges, egyenes horony van. A pálca két tetszőlegesen kiszemelt pontjára olyan csúszkát szerelnek, ami lehetővé teszi, hogy a pálca mozgása közben a kiszemelt pontok egyike mindig az egyik, míg a másika mindig a másik horonyban mozogjon. Ha a pálca egy harmadik pontjába ceruzát helyezünk, az ellipszist fog

repló Tracker programmal kirajzoltassák a mozgás pályáját. A pálya ellipsziszívnek látszik. De vajon tényleg az?

A rúd tömegközéppontja (S) függőleges pályán mozog, hiszen a rúdra csak a talaj függőleges nyomóereje, illetve a szintén függőleges nehézségi erő hat. A rúd alsó vége (A) vízszintesen mozog, hiszen a talaj vízszintes. Ír-



3. ábra. Dőlő pálca a koordináta-rendszerben



4. ábra. Ellipszográf

rajzolni. Esetünkben a sík lap egy bútorlap, amibe réseket vágtunk, a csúszkák pedig csavarok voltak. A csavarokat és a ceruzát a farúd különböző furataiba lehet helyezni. A bútorlapon a különböző beállításokkal nyert ellipszisek láthatók.

Azt, hogy az így kapott görbe tényleg ellipszis, az eldőlő pálca példájához hasonlóan láthatjuk be.

Az ellipszográfnak természetesen van számítógépen leprogramozott verziója is. Ám a tapasztalataim szerint a valóságban megépített eszköz a maga kézzelfogható mivoltában sokkal hitelesebb és ámulatba ejtőbb, mint a digitális változat. Én Gödöllőn a Református Líceumban láttam először ezt az eszközt; Pertis Szabolcs kollégám mutatta meg, és annyira lenyűgözött, hogy azonnal megcsületett a vágy, hogy megépítsem és megmutassam a diákjaimnak.

Az ellipszis és a Melde-cső

A higany mérgező volta miatt a Melde-cső már csak a fizikafeladatokban jelenik meg. A vérnyomást még higanymilliméterben mérjük, de a diákok már nem látnak higanyos nyomásmérő eszközöket. Tapasztalataim szerint, ha valahol mégis találkoznak ilyenekkel, többnyire hőmérőnek gondolják. Melde-csövet sem forgalmaznak már, de az iskolai kémialaborok számára beszerezhető higany, és vékony üvegsőből egy kis ügyességgel könnyen készíthetők Melde-csövek mindenféle egészségkárosodás nélkül.

Kérdés: ha a Melde-csövet a zárt végénél rögzítjük és függőleges síkban lassan körbeforgatjuk, milyen görbén mozog a bezárt levegőoszlop vége?

A mérés annál látványosabb, minél hosszabb a higanyszál, hiszen annál nagyobb a nyomás- és térfogatkülönbség a cső különböző állásai esetén. Ezért hosszú, körülbelül egy méteres lécre szerelt csöveket készítettem. Ezeket nem tudtuk a végükénél rögzíteni, középen fogtuk állványba. Feljegyeztük a különböző szögeknél mért hosszúságadatokat. A végén polárkoordinátás grafikont készítettünk, így lényegében a vizsgálandó görbe kicsinyített képe rajzolódott ki. Ez is ellipszisnek látszik, melynek nagytengelye függőleges, kistengelye vízszin-

tes. Vajon tényleg ellipszis-e, és ha igen, hol vannak a fókuszpontjai?

A görbe valóban ellipszis, de ennek bizonyításához érdemes az ellipszis polárkoordinátás egyenletét is megismerni. Ezt már nagyon ritkán tanulják a diákok, de nem nagyon bonyolult; éppen olyan feladat, ami megfelelő kihívás lehet egy matematika iránt fogékony diák számára projektfeladatként. Én a tábori méréshez segédanyagot adtam a diákoknak, amit párban kellett feldolgozniuk. Emlékesztetőül a függőleges nagytengelyű ellipszis polárkoordinátás egyenlete (az origót az egyik fókuszpontba helyezve):

$$r = \frac{l_0}{1 + e \cdot \sin \varphi},$$

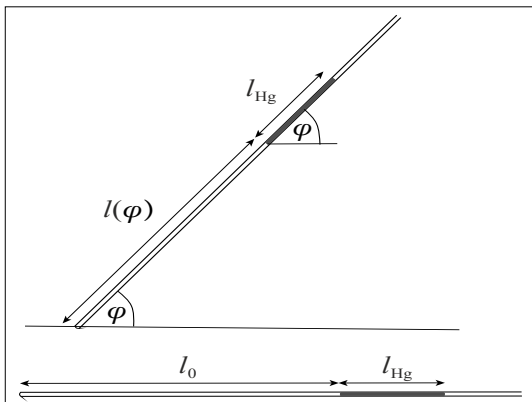
ahol l_0 az ellipszis kistengelyével párhuzamos vezérsugár hossza (*semilatus rectum*), e pedig a numerikus excentricitás.

Tekintsünk egy vízszintes Melde-csövet, amiben egy l_0 hosszúságú levegőoszlopot l_{Hg} hosszúságú higanyoszlop zár el! A külső légnyomás p_0 .

Ha a cső a vízszintessel φ szöget zár be, az $l(\varphi)$ hosszúságú levegőoszlop nyomása a külső légnyomás és a



5. ábra. Diákok mérnek a Melde-csövekkel



6. ábra. A körbe forgó Melde-cső

ferde higanyoszlop hidrosztatikai nyomásának összegével egyezik meg (6. ábra):

$$p(\varphi) = p_0 + l_{\text{Hg}} \rho_{\text{Hg}} g \cdot \sin \varphi.$$

A Boyle–Mariotte-törvény szerint:

$$p_0 \cdot l_0 = (p_0 + l_{\text{Hg}} \rho_{\text{Hg}} g \cdot \sin \varphi) \cdot l(\varphi),$$

innen:

$$l(\varphi) = \frac{p_0 \cdot l_0}{p_0 + l_{\text{Hg}} \rho_{\text{Hg}} g \cdot \sin \varphi} = \frac{l_0}{1 + \frac{l_{\text{Hg}} \rho_{\text{Hg}} g}{p_0} \cdot \sin \varphi}.$$

Ezt összevetve az ellipszis polárkoordinátás egyenletével láthatjuk, hogy tényleg ellipszis rajzolódott ki a polárkoordinátás grafikonunkon, a beforrasztott végén

rögzített Melde-csőbe zárt gázoszlop végpontja tényleg ellipszisen mozog. Az ellipszis egyik fókuszpontja maga a rögzítési pont, az excentricitása a függőleges higanyoszlop nyomásának és a külső légnyomásnak a hányadosa, a *semilatus rectum* pedig a vízszintes légoszlop hosszúsága.

Záró gondolatok

A dőlő pálca és a Melde-cső két önkényesen választott, talán sokak számára ismert példa, az ellipszis két különböző arcát mutatja meg. Matematikailag is másként érdemes közelíteni hozzájuk. Egy átlagos diák egyikkel sem találkozik, de a tapasztalataim szerint azok, akik fogékonyak a fizikára és a matematikára, örömmel tanulnak efféle dolgokat, büszkeséggel tölti el őket, hogy valamit megtapasztalnak, és azt számítással is alá tudják támasztani.

Ha valaki szívesen megismételné vagy továbbfejlesztené a projektet, a Berzsenyi Gimnázium fizikátáborának honlapján megtalálja a mérési feladatlapokat, a matematikai segédanyagokat és a Melde-cső készítésének leírását is [4].

Irodalom

1. <https://sites.google.com/berzsenyi.hu/bdgfizikabor/> (2023. 08. 23.)
2. Gnädig Péter, Honyek Gyula, Vigh Máté: 333+ furfangos feladat fizikából Typotex, Budapest 2017., 230. feladat
3. Bokor Nándor: Milyen alakú a száguldó autó kereke? *Fizikai Szemle* 68/6 (2018) 203–209.
4. <https://sites.google.com/berzsenyi.hu/bdgfizikabor/f%C5%91oldal/2023-kir%C3%A1lyr%C3%A9t?authuser=0> (2023. 08. 23.)

MIÉRT KÖRPÁLYÁHOZ KÖZELI (KIS EXCENTRICITÁSÚ) PÁLYÁN KERINGENEK A BOLYGÓK A NAP KÖRÜL?

Sükösd Csaba

BME Nukleáris Technikai Intézet

„Az excentricitás (e) az ellipszis középpontja és gyújtópontja közötti távolságnak (c) és a fél nagytengely hosszának (a) hányadosa: $e = c/a$.

Az excentricitás nemcsak az ellipszis alakú pályákra, hanem két égitest gravitációs egymásra hatása által létrejött egyéb pályákra is értelmezhető. Amennyiben

Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és némely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanár- és oktatással kapcsolatos program vezetője.



$e = 0$, akkor körről beszélünk. Ha $0 < e < 1$, akkor ellipszről, $e = 1$ esetében paraboláról, míg $e > 1$ esetében hiperboláról van szó. Ebben az összefüggésben egy egyenest felfoghatunk egy végtelen excentricitású pályának. Az itt felsorolt pályákat együttesen kúpszeleteknek nevezzük” [1].

Az 1. táblázat megadja a Naprendszer bolygópályáinak excentricitását és pályasíkjuknak az ekliptika síkjához való hajlásszögét is (inklináció). A táblázatban felsoroljuk még a Plútó törpebolygót is.

Látható, hogy a Merkúr és a Plútó kivétel, mert mind az inklinációjuk, mind pedig pályájuk excentricitása jóval nagyobb, mint a többi bolygóé. De még ezek a pályák sem nagyon elnyúlt ellipszisek, hiszen az excentricitásuk messze van az $e = 1$ határtól.

Mi lehet az oka annak, hogy a Naprendszer bolygói nem elnyúlt ellipszis pályákon keringenek? Amikor a

1. táblázat.		
Bolygó	Excentricitás	Inklináció (°)
Merkúr	0,20563069	7,00487
Vénusz	0,00677323	3,39471
Föld	0,016710219	1,578694
Mars	0,09341233	1,85061
Jupiter	0,04839266	1,30530
Szaturnusz	0,05415	2,48446
Uránusz	0,04716771	0,76986
Neptunusz	0,00858587	1,76917
Plútó	0,24880766	17,14175

Naprendszer kialakult, egyes anyagcsomók a körülöttük lévő anyagot gravitációsan befogták és így „kitisztították” a közelükben lévő teret. Így alakultak ki a bolygók. Az ember azt gondolná, hogy amikor ezek a bolygók kialakultak, akkor a kezdeti sebességük véletlenszerű irányba mutatott. A mozgásuk során a perdületük megmarad, így a mostani pályák perdülete azonos kell legyen azzal, mint ami a kialakuláskor volt.¹ Ezért két kérdés rögtön felmerül. Ha ez így van, akkor vajon miért vannak a bolygópályák valamennyien közel az ekliptika síkjához (miért kicsi az inklinációjuk)? A második kérdés az, hogy vajon miért nincsenek elnyúlt ellipszis pályán keringő bolygók.

Miért az ekliptika síkjában (vagy ahhoz közel) keringenek a bolygók?

Arra, hogy miért mozog mindegyik bolygó az ekliptika síkjához közel, könnyen találunk magyarázatot a Naprendszer kialakulásában, és ez a magyarázat többé-kevésbé általánosan ismert. A Naprendszer szülőanyagát – egy nagyrészt hidrogénből és kisebb részben héliumból álló, csillagközi molekulafelhőben lévő „felhőmagot” – kb. 4,5 milliárd évvel ezelőtt érthette el egy szupernóva-robbanás lökeshulláma, nehezebb elemekkel feldúsítva azt, és beindítva a csillagkeletkezéshez szükséges összehúzóási folyamatot. A lökeshullámnak (is) köszönhetően az anyagfelhő örökölt valamekkora perdületet. Mivel az anyagfelhőre a továbbiakban külső forgatónyomaték nem hatott, e perdületnek a továbbiakban meg kellett maradnia. Az anyagfelhőt azonban a saját gravitációja

¹ A helyzet nem ennyire egyszerű, hiszen a Naprendszer sok testből áll, amelynek a tömegközéppontja általában nem esik egybe a Nap középpontjával. Sőt, ez a tömegközéppont a Nap középpontjához képest is állandó mozgásban van: vannak esetek, amikor nagyon közel esik a Nap középpontjához, de vannak esetek, amikor még a Nap tömegén is kívül esik. Úgyhogy ez az egész rendszernek ad egy bizonyos „kollektív” mozgást is. Csak a teljes rendszer perdülete lesz megmaradó mennyiség. Az, hogy a továbbiakban csak egyetlen bolygó és a Nap mozgását tekintjük, egészen biztosan egy közelítés, de talán ebből is megtudunk valamit a folyamatok fizikai lényegéről.

elkezdte összehúzni. Az összehúzódas során csökkent a felhő tehetetlenségi nyomatéka, ezért a szögsebessége egyre nagyobb lett (ahogyan a piruettozó jégtáncos forgása felgyorsul, amikor a testéhez közel húzza a kezét és a lábait). A gyors forgás miatt a felhő deformálódott: az „egyenlítője” mentén szélesebb lett, arra merőlegesen pedig belapult (emiat nem tökéletesen gömb alakú a forgó Föld sem). Először egy belapult zsemle, majd további összehúzódas követően szinte „palacsintaszerű” lett. Egy idő után a gravitációs összehúzódas csak úgy tudott folytatódni, ha a forgó palacsintaszerű anyaghalmoz több darabra szakadt: a közepén lévő Nap anyaga (amely az egész rendszer tömegének legnagyobb hányadát alkotja) viszonylag kis perdületet örökölt, ezért még tovább tudott összehúzódni, és be tudott indulni a fúzió. A perdület legnagyobb részét pedig a Naptól távol lévő anyagdarabok mozgása vitte el (a Naprendszer perdületének a 99,5%-a a tömeg 0,2%-át kitevő bolygókban van [2]). Ezért a Naptól távoli – továbbra is összehúzódo, de a Naphoz képest mozgó – anyagdarabokból kialakultak a bolygók. Ahhoz, hogy a rendszer mechanikai energiája minimális legyen (a Napba minél nagyobb tömeg minél kisebb perdülettel húzódhasson össze), ezek mozgásának kellett elvinni a kezdeti perdület legnagyobb részét, ezért a bolygók valamennyien olyan síkban keringtek, hogy a perdületvektoruk nagyjából ugyanabba az irányba – az ekliptika síkjára merőlegesen – mutasson. Ennek az elképzelésnek egy további bizonyítéka az is, hogy a bolygók nemcsak az ekliptika síkjához közeli síkban, hanem ugyanabban az irányban is keringenek.

Nehezebb megválaszolni azt a kérdést, hogy vajon miért keringenek ezek valamennyien körhöz közeli – kis excentricitású – pályán.

Miért körhöz közeli pályán keringenek a bolygók?

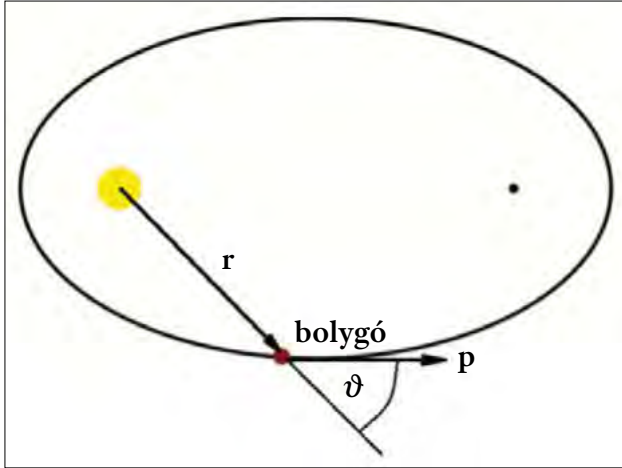
A kérdés megválaszolásához hasonlítsuk össze az azonos perdületű, de különböző excentricitású Kepler-pályákat! Milyen (fizikai) szempontból kitüntetett a körpálya a többihez képest? A számítások egyszerűsítése érdekében a szokásos módon először redukáljuk a két test mozgását egyetlen test mozgására a két testet összekötő relatív koordináta és a redukált tömeg bevezetésével.

Ezek után már számolhatunk úgy, mintha a Nap rögzített lenne, és csak a bolygó mozgását tekintjük – tudván, hogy a bolygó és a Nap együttes redukált tömegét kell a keringő bolygóhoz társítani. Mivel a Nap tömege sokkal nagyobb, mint a bolygóé, a redukált tömeg eléggé közel esik a bolygó saját tömegéhez, hiszen $m_2 \gg m_1$ esetén $m = m_1 m_2 / (m_1 + m_2) \approx m_1 m_2 / m_2 = m_1$.

Írjuk fel a bolygó teljes energiáját! $E = p^2 / (2m) - \gamma(mM)/r$, ahol $p(\mathbf{r})$ a bolygó lendületének abszolútértéke a Naptól mért $\mathbf{r}$ pontban, M a Nap tömege, m pedig a bolygó redukált tömege (γ a gravitációs állandó).

Kepler 2. törvénye szerint a mozgás során a perdület megmarad, azaz $[\mathbf{r} \times \mathbf{p}(\mathbf{r})] = \mathbf{I}$. A perdületvektor abszo-

lútértéke: $I = r \cdot p(\mathbf{r}) \sin \vartheta(\mathbf{r})$, ahol $\vartheta(\mathbf{r})$ a pálya adott pontjában a lendületvektor és a vezérsugár által bezárt szög ϑ .



1. ábra

Ebből kapjuk, hogy $p(\mathbf{r}) = [r \cdot \sin \vartheta(\mathbf{r})]^{-1}$. Más szóval, a Naphoz közel gyorsan mozog a bolygó, a Naptól távol pedig lassan. Ebből a lendületet behelyettesíthetjük az energia kifejezésébe: $E = I^2/[2mr^2 \cdot \sin^2 \vartheta(\mathbf{r})] - \gamma(mM)/r$.

A mozgás során ennek a mennyiségnek is állandónak kell maradnia (mechanikai energia megmaradása konzervatív erőterben). Az egyenletből kapjuk a következőt:

$$\sin^2 \vartheta(\mathbf{r}) = \frac{I^2}{2mr^2 \left(E + \gamma \frac{mM}{r} \right)}.$$

Mivel $0 \leq \sin^2 \vartheta(\mathbf{r}) \leq 1$, a következő egyenlőtlenség adódik:

$$0 \leq \frac{I^2}{2mr^2 \left(E + \gamma \frac{mM}{r} \right)} \leq 1.$$

Az egyenlőtlenség 0 határértéke vagy $I = 0$ esetén (azaz az égitest a Naphoz egyenes vonalban közeledik vagy távolodik), vagy pedig $r \rightarrow \infty$ esetén érhető el. Ezek egyike sem jön szóba zárt ellipszispályák esetén; sőt, intuitíve megállapíthatjuk azt is, hogy a 0 közeli értékek távol esnek a Naprendszerbeli közel kör alakú, véges pályáktól. Vizsgáljuk ezért az egyenlőtlenség másik oldalát!

A másik oldali egyenlőtlenségből kis átrendezéssel kapjuk, hogy, $2mr^2[E + \gamma(mM)/r] - I^2 \geq 0$, illetve

$$(2mE)r^2 + (2\gamma m^2 M)r - I^2 \geq 0.$$

A bal oldalon álló kifejezés r függvényében egy parabola. Az, hogy ez a parabola felfelé, vagy lefelé nyitott, az E energia előjelétől függ. Ha $E < 0$, akkor a parabola nyílása lefelé mutat, és ekkor – és csak ekkor – lehet olyan $r_1 \leq r \leq r_2$ korlátozott intervallum, amelyre az egyenlőtlenség teljesül. Meg is határozhatjuk a két szélsőértéket az egyenlet megoldásával. Ezek lesznek a Naptól való távolság legnagyobb és legkisebb értékei – azaz az *ellipszis nagytekercze végpontjainak a távolsága az ellipszis fókuszpontjában álló Naptól!*

$$r_{1,2} = \frac{-2\gamma m^2 M \pm \sqrt{4m^4 \gamma^2 M^2 + 8mEI^2}}{4mE}.$$

A valós megoldás létezésének feltétele, hogy a diszkrimináns ne legyen negatív, azaz $4m^4 \gamma^2 M^2 + 8mEI^2 \geq 0$ legyen. Figyelembe véve, hogy $E < 0$, ez nem magától értetődő kérdés. A vizsgálathoz ebből a kifejezésből kifejezzük az energiát: $E \geq 4m^4 M^2 \gamma^2 / (8mI^2) = -m^3 M^2 \gamma^2 / (2I^2)$.

Ez alsó korlátot ad az energiára, azaz, egy bolygó számára nem lehet akármekkora az I és az E ahhoz, hogy zárt (ellipszis-) pályán mozogjon.

Amennyiben az energia éppen eléri a minimális lehetséges értékét, a diszkrimináns nulla lesz, és csak egyetlen r -re teljesül az egyenlet: az ellipszis nagytekerczének mindkét végpontja ugyanakkora távolságban lesz a Naptól. Az *ellipszisből kör lett*.

Ebben az esetben tehát a kör sugara:

$$r = -2m^2 M \gamma / (4mE) = -\gamma m M / (2E).$$

Kissé átalakítva visszakapjuk az r sugarú körpályán keringő bolygó energiájára szokásosan ismert összefüggést: $E = -(1/2)[\gamma m M / r]$.

A fentieket összefoglalva azt kaptuk, hogy *az azonos perdületű ellipszis bolygópályák közül a körpálya energiája a legkisebb*.

Ezzel a felismeréssel adhatunk egy magyarázatot arra, hogy miért körközele pályákon keringenek a bolygók. Az elnyúlt ellipszispályákon a Nap-közele pontokban ható árapályerők igencsak erősek, és ez a plasztikus deformálható nagy testek (bolygók) időről időre történő deformálásával jelentős energiavesztést jelenthet: a gravitációs energia csökken, disszipálódik, hővé alakul. Természetesen emellett több más folyamat során is disszipálódhat energia (pl. kisebb égi objektumokkal való ütközések során). Ezért az évmilliók során az elnyúlt pályák perdülete megmarad ugyan, de az energiájuk csökken, és így egyre inkább közelít a körhöz. A Naprendszer létrejöttékor valószínűleg sokkal többféle ellipszispálya jött létre véletlenszerűen, ám a Naprendszer néhány milliárd éve alatt az energiavesztések miatt ezek valamennyien tartanak a köralakhoz. Ez a folyamat egyébként a kettőscsillagok esetében is megfigyelhető. A csillagászok szerint a pálya excentricitásának értéke utal a kettős rendszer korára: egy idő után a pálya alakja közelít a körhöz.

Az, hogy Naprendszerünk a Merkúr és a Plútó „ki-lógnak a sorból”, mind az excentricitás, mind az inklináció terén, ezeknek az égitesteknek a többi bolygótól különböző eredetére, vagy különböző múltbéli sorsára utalhat.

Irodalom

1. [https://hu.wikipedia.org/wiki/Excentricit%C3%A1s_\(csillag%C3%A1szat\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/Excentricit%C3%A1s_(csillag%C3%A1szat)) (letöltve 2023. július 30.)
2. Petrovay Kristóf: a Naprendszer keletkezése (Meteor Csillagászati Évkönyv 2008 207. o.) http://real-eod.mtak.hu/4356/1/Meteor_2008.pdf (letöltve 2023. augusztus 4.)

JANKOVICS ISTVÁN (1943–2023)

Néhány nappal 80. születésnapja után, 2023. szeptember 20-án elhunyt Jankovics István csillagász, az MTA doktora, az ELTE címzetes egyetemi tanára, az ELTE Gothard Asztrofizikai Observatórium és Multidiszciplináris Kutatóközpont nyugalmazott igazgatója.

Jankovics István 1943. szeptember 15-én született Budapesten. Az ELTE Természettudományi Karán szerzett matematika-fizika szakos tanári oklevelet 1967-ben. Ezt követően az MTA Csillagászati Kutatóintézetében dolgozott előbb tudományos segédmunkatársaként, 1969 és 1975 között tudományos munkatársaként, majd 1975-től 1990-ig tudományos főmunkatársaként.

Doktori tanulmányait az Örmény Tudományos Akadémia Bjurakani Asztrofizikai Observatóriumában végezte Viktor Ambarcumján vezetésével 1971 és 1975 között, amelynek lezárásaként 1975-ben Jerevánban védte meg kandidátusi értekezését. 1981 és 1983 között a Landessternwarte Heidelberg-Königstuhl Humboldt-ösztöndíjas vendégkutatója, majd 1987–1988-ban a Zentralinstitut für Astronomie der Akademie der Wissenschaften potsdami obszervatóriumának állami ösztöndíjas kutatója volt. Heidelbergben megismerkedett a nagy felbontású spektroszkópia alapjaival, és első magyar csillagászként eljutott az Európai Déli Observatórium (ESO) chilei La Silla-i telephelyére is, ahol az akkori legmodernebb eszközökkel végezhetett megfigyeléseket. A heidelbergi évek, az ott kialakult szemléletmódja, tudományos és személyes kapcsolatai alapvetően meghatározták későbbi pályafutását. 1990-ben az ELTE szombathelyi Gothard Asztrofizikai Observatóriumának munkatársa lett, amelyet aztán 1993 és 2013 között, nyugállományba vonulásáig igazgatóként irányított. 1999-ben védte meg a Magyar Tudományos Akadémia doktora cím elnyeréséért benyújtott értekezését. 1976-tól a Nemzetközi Csillagászati Unió, 1983-tól a német Astronomische Gesellschaft, 1990-től pedig a European Astronomical Society tagja volt. Az MTA Csillagászati és Űrfizikai Bizottságának 1975-től, a Szombathelyi Tudományos Társaságnak pedig alapítóként 1994-től volt tagja. Négy idegen nyelven, angolul, németül, oroszul és örményül is tárgyalási szinten beszélt.

Tudományos pályafutásának első szakaszában szupernóva-kutatással, majd a csillagkeletkezés és a csillagfejlődés korai fázisainak kérdéseivel foglalkozott. Jelentős, nemzetközileg is elismert eredményeket ért el a nyílthalmazok vörös törpecsillagainak és azok flertevékenységének vizsgálata terén. Később érdeklődése az emissziós objektumok, elsősorban a T Tauri és Herbig-féle Ae, Be csillagok nagy felbontású spektrosz-

kópiája felé fordult. A szakterület fejlődéséhez jelentősen hozzájáruló, értékes megállapításokat tett az Orion-populációhoz tartozó fiatal csillagok tömegvesztéségi mechanizmusáról. A T Tauri csillagok spektrumában megfigyelhető tiltott emissziós vonalak kékeltolódását (aszimmetriáját) szakmai körökben Appenzeller–Jankovics–Östreicher-effektusként is emlegetik.

Obszervatóriumalapító elődjének példáját követve vallotta, hogy korszerű tudományt csak korszerű eszközökkel lehet művelni, intézetfejlesztési stratégiáját is ennek szellemében alkotta és valósította meg. Úttörő munkát folytatott a digitális képi adatfeldolgozás hazai meghonosítása terén, amelynek eredményeként a Gothard Observatórium már az 1990-es évek első felében olyan informatikai infrastruktúrával volt felszerelve, amilyen a nagy nyugati csillagászati intézetekben is csak nem sokkal korábban kezdett általánossá válni. A 2002-ben új környezetben megnyitott Gothard Tudomány- és Technikatörténeti Állandó Kiállítás keretében bemutatott alapokon az obszervatórium a lendületes infrastrukturális fejlesztések nyomán technikailag magas szinten álló, jól felszerelt, nemzetközi mércével mérve is modern csillagászati kutatóhely lett. A fejlesztéseket később is folytatta, ennek jó példája, hogy a nevéhez kötődik a nagy felbontású csillagászati spektroszkópia magyarországi bevezetése, amelynek eredményeként Konkoly-Thege Miklós és Gothard Jenő után több mint száz évvel újra színképeket rögzíthettünk magyar távcsőre szerelt spektrográffal. Jankovics István két évtizedes vezetése alatt az évszázados hagyományokkal rendelkező obszervatórium a kornak megfelelő új tartalommal modern egyetemi oktató-kutató intézmény rangjára fejlődött, méltón képviselve az Eötvös Loránd Tudományegyetemet Nyugat-Magyarországon.

Tudományos, tudományszervezési, oktatási és közművelődési tevékenységét 2013-ban Szombathely Megyei Jogú Város Közgyűlése Gothard Jenő-díjjal, az Eötvös Loránd Tudományegyetem pedig a Pro Universitate Emlékérem arany fokozatával ismerte el. 2014. március 15-én a Magyar Érdemrend Tisztikeresztje kitüntetés vehette át. Nyugállományba vonulása után hasznos és értékes tanácsaival, tapasztalatainak megosztásával még éveken át segítette a Gothard Observatórium fejlődését, de az intézetet érintő döntések meghozatalakor még ma is felmerül, hogy István vajon mit szólna ehhez...

Emlékét megőrizzük, nyugodjék békében!

Kovács József, Szabó M. Gyula

TRAJMÁR SÁNDOR (1931–2023)

Trajmár Sándor Bogácson született 1931. szeptember 7-én. Elemi iskoláit Bogácson, középiskolai tanulmányait pedig Mezőkövesden, a Szent László Gimnáziumban végezte. Érettségi után Debrecenben, a Kossuth Lajos Tudományegyetemen szerzett diplomát 1955-ben fizikai kémiai, és mint vegyész az Észak-Magyarországi Vegyi Művekhez került állásba.

Az 1956-os események után egyetemi évfolyamtársával, Csanak Magdolnával elhagyta Magyarországot, és vele Ausztriában házasságot kötött. 1957-ben az USA-ba nyertek bevándorlási engedélyt, és Kaliforniában telepedtek le. Első állásában rövid ideig egy kisebb olajvállalatnál mosott olajos hordókat, majd szintén rövid ideig a Stauffer Kémiai Társaság kutatólaboratóriumában dolgozott. 1958 és 1961 között a University of California (Berkeley) egyetemén folytatta tanulmányait és szerzett doktori fokozatot fizikai kémiai területen. 1961-ben kutatói állást kapott a *California Institute of Technology*-hoz tartozó *Jet Propulsion Laboratory*-ban, amelynek 35 éven át volt munkatársa.

Kutatásait az atom- és molekulafizika területén végezte, és egy nemzetközileg elismert kutatócsoportnak volt a vezetője – volt kémiai Nobel-díjas beosztottja is. Eredményeiről közel 200 tudományos cikket és könyvfejezetet publikált, valamint hasonló számú tudományos

előadást tartott a világ különböző egyetemein, kutatóintézeteiben és tudományos konferenciákon, továbbá a *Fizikai Szemle* hasábjain is olvashattunk (*Trajmár Sándor: Elektron-atom (-molekula) ütközési folyamatok, Fizikai Szemle LIV. évf. 4. szám, 2004*). Laboratóriumában számos külföldi professzor töltötte szabad kutatási évét, és nagyszámú doktorandusz végezte kutatási tevékenységét. Ezekben az években a *University of California* és a *University of Southern California* fizikatanzszékein volt egyetemi docens néhány évig. Munkássága során többek között a Nemzetközi Atomenergia-ügynökség és a NASA tanácsadójaként is dolgozott, két NASA-kitüntetést is elnyert. 1997-ben nyugdíjba vonult, és feleségével együtt elköltözött San Francisco félszigetére, a Szilíciumvölgybe.

Szüülőfalujának iskoláját, templomának felújítását támogatta, Bogács Község Önkormányzata 2017-ben díszpolgárává választotta.

Felesége halálát követően évekig egyedül, otthonában élt, amerikai magyar és magyarországi barátaival tartotta a kapcsolatot, rokonai látogatták és töltöttek vele hosszabb-rövidebb időt.

2013. szeptember 17-én váratlanul hunyt el otthonában, 92 éves korában. Emlékét megőrizzük.

Hamvas György, Trócsányi Zoltán

GRÁNÁSY LÁSZLÓRA EMLÉKEZÜNK

Kollégánk és kedves barátunk, Gránásy László – vagy ahogy közelebbi ismerősei hívtuk, Grána – 2023. november 1-jén távozott el közülünk. Hirtelen halála mélyen megrázott mindenkit, aki ismerte. Az alábbi sorokkal szeretnénk emlékezni rá, megmutatva, hogy nemcsak egy kiváló fizikust, lelkes kutatót, hanem egy sokoldalú személyiséget, igaz magyart és jó barátot veszítettünk el.

Gránásy László 1955-ben született. Fiatalkora az akkori rendszer konszolidációjának időszakára esett. Ekkor a fiatalok úgy tudtak kitörni a szürkeségből, hogy kiemelkedően sportoltak vagy jól tanultak. Grána ez utóbbi irányba indult, és ez a választása végigkísérte az általános iskolától az egyetemig. Tehetsége több irányú volt: érdeklődő volt, jó memóriája volt, kitűnően rajzolt, jó hallással rendelkezett. Eleinte két terület, a fizika és zoológia érdekelte legjobban; fizikus vagy Afrika-kutató szeretett volna lenni. Végül a fizika mellett döntött. A budapesti Kőrösi Csoma Sándor Gimnázium fizika tagozatán végezte el a középiskolát, majd az ELTE fizikus szakára jelentkezett.

Az egyetem végeztével egy alapos tudású, kiváló fiatalember indult útjára. Gondolkodása egy természettudósra jellemzően logikus, tényekre építő volt. A munka, kutatás mellett fiatal korában számos hobbija volt: sokat olvasott, érdekelte a világháborúk története, a hajózás,



Kirándulás Coloradóban, 2006

a tengeri élővilág; vitorlázott, kajakozott, barlangászott, túrázott és gitározott. Ahogy az évek teltek, a hobbiakat feladta, a kutatást helyezve előtérbe. A hobbiak közül talán a gitározás maradt meg az utolsó pillanatig.

Kezdő kutatóként üvegfémek előállításával és termikus stabilitásuk vizsgálatával foglalkozott. Ebben a témakörben készült a diplomamunkája, egyetemi doktori dolgozata és kandidátusi disszertációja. 1995 után részt vett a fullerénszármazékokban lejátszódó fázisátmenetek kísérleti vizsgálatában, melyből több sikeres publikáció született. Ezzel párhuzamosan érdeklődése egyre inkább az elsőrendű fázisátmenetek elméleti problémáinak irányába fordult. Humboldt-ösztöndíja alatt dolgozta ki a nukleációs folyamatok fenomenologikus diffúz határfelületi modelljét, amelyet sikerrel alkalmazott kondenzációs, kristályosodási és fázisszeperációs folyamatok leírására. Az ebben a témakörben készült munkáival nyerte el az MTA doktora címet 2004-ben.



Baráti vitorlázás, Adria, 2000

A 2000-es évektől fázismező-modellezéssel kezdett el foglalkozni. Kidolgozta a polikristályos megszilárdulás és a kristálymagképződés egyesített fázismező-elméletét, majd a megszilárdulási folyamatok leírására az úgynevezett atomisztikus fázismező-elméletet is sikerrel használta. Ezeket a munkákat azonban már a saját, a 2000-es évek elején alakult kutatócsoportjában végezte, amely az idők során fokozatosan egy 5–8 főre bővült. A csoport tagjait nagyon megbecsülte, filozófiája, amit egy ismert amerikai film címéből szokott idézni, így hangzott: „a few good men”, amit úgy tolmácsolt, hogy kevés, de jó emberrel szeretne dolgozni; olyanokkal, akiknek csillog a szeme a tudománytól és a tettvágytól. Ő maga biztosan ilyen volt. Kutatási területe iránt végtelenül lelkesedett. Ha valaki érdeklődést mutatott, mindig készen állt egy tudományos diskuszióra. Bárkinek bármikor képes volt egy rögtönzött előadást tartani, a korábbi előadásai során összegyűlt, máséval összetéveszthetetlen szín- és formavilágú PowerPoint-diái segítségével.



Tudományos előadás egy sörözőben, Seattle, 2010

Energiáját – agglegényként, családi kötelezettségek híján – mind a munkájára és a csoportja támogatására fordította. Mindent megadott a csoport tagjainak. Ahogy mondani szokta: pénzt, paripát, fegyvert, hogy a munkát minél jobban végezhesék. A csoport összetartását az általa csak „kihelyezett csoportzüllésnek” nevezett eseményekkel is erősítette, amelyeket több-kevesebb rendszerességgel olyan vendéglátóhelyeken tartottak, ahol sört is csapoltak. Nagyvonalúságát mutatja az is, hogy az ilyen összejöveteleket mindig így indította: „Mindenki meg van hívva!”

Többször említett álma egy, a Föld legszebb részeit bejáró nagy vitorlášhajó volt, a fedélzeten az egész csoportjával, a hajó gyomrában pedig a számítógép-klaszterével, de ha az nem megoldható, legalább ultragyors internetkapcsolattal hozzá. Elképzelése szerint ebben a környezetben a nap egy része kemény munkával, a többi része intenzív kikapcsolódással, jó hangulatban telhetne, felkészülve a munka következő napi folytatására.

Ha ezt az idilli állapotot nem is, jó körülményeket azért sikerült teremtenie. Számos EU-s és hazai projektnek volt a vezetője, amelyekből felépítette azt a számítógépes labort, amely biztosította a háttérrel a nagy számítási igényű feladatokhoz, a forrásokat a konferenciákon történő részvételhez, valamint a csoport tagjainak támogatásához.

Pályafutása során több meghívást is kapott külföldi látogatásra, munkavégzésre. Dolgozott Németországban, Japánban, Angliában, Norvégiában és az Amerikai Egyesült Államokban is. Ezek közül legjelentősebb az angliai Brunel Egyetem állandó professzori állása volt, amit két év után feladott, mert visszacsábította a hazaszeretete. Sokkal jobban érezte magát, ha sikereit magyar kollégáival együtt, egy magyar intézmény színeiben érte el.

Életművét az állam Széchenyi-díjjal, a Magyar Tudományos Akadémia és ezzel a magyar tudományos közélet levelező taggá választással ismerte el. Mi, kollégái, mindig hálással és meleg szívvel fogunk emlékezni rá.

Faigel Gyula, Pusztai Tamás

Nobel-díj-átadási ünnepség, Stockholm, 2023. december 10.

<https://www.youtube.com/watch?v=IDIA7cfNk8A>



A 2023. évi fizikai Nobel-díj bejelentése október 3-án



A Max Planck Kvantumoptikai Intézet laboratóriumában



Nobel Lecture 2023. december 8-án a Stockholmi Egyetemen
<https://www.youtube.com/watch?v=xVXjFBW-2kI>



Karikó Katalinnal és Csák Jánossal a Stockholmi Magyar Nagykövetség fogadásán 2023. december 9-én (fotó: Dombi Péter)



A díjátadás 2023. december 10-én Stockholmban



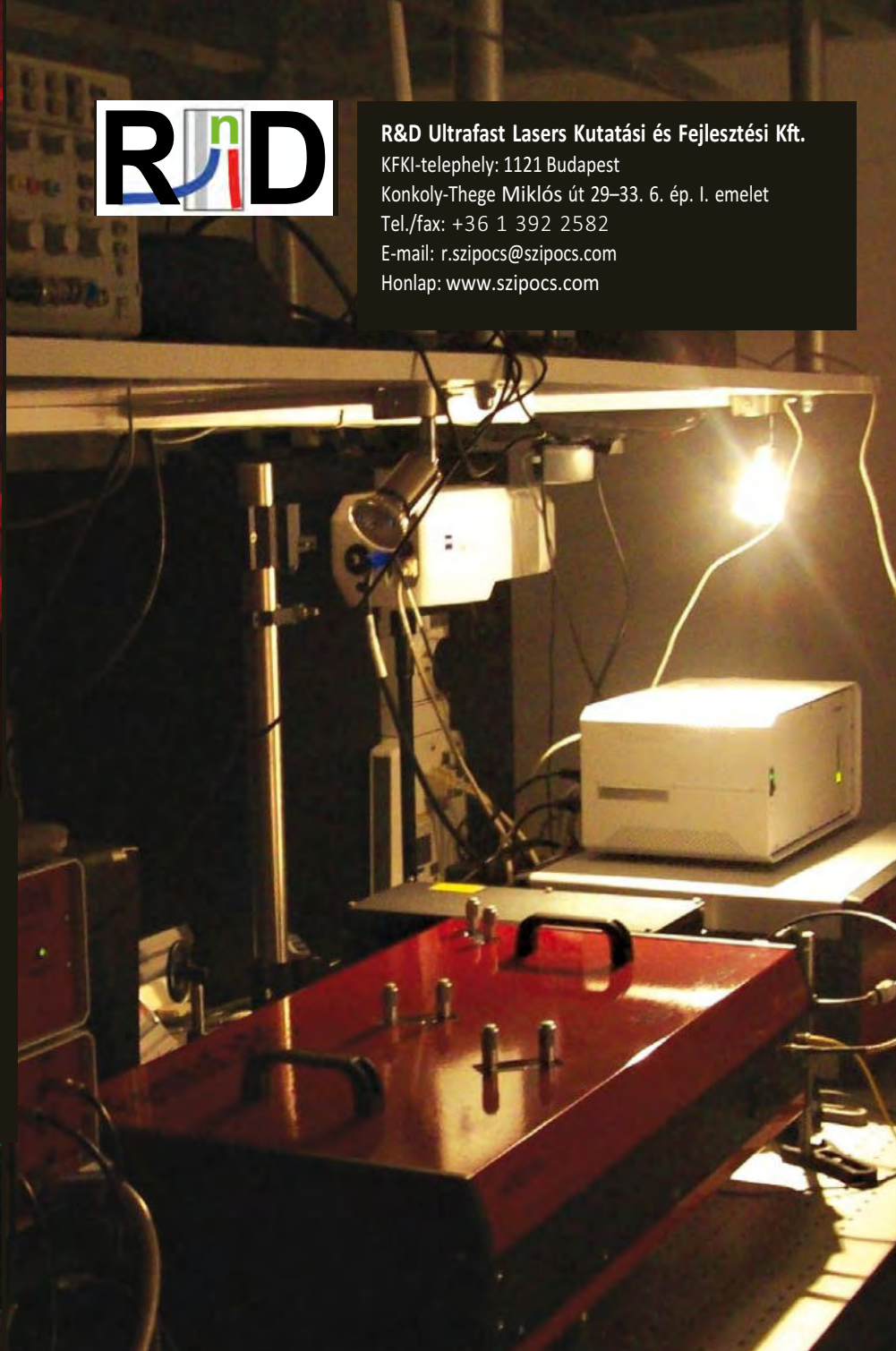
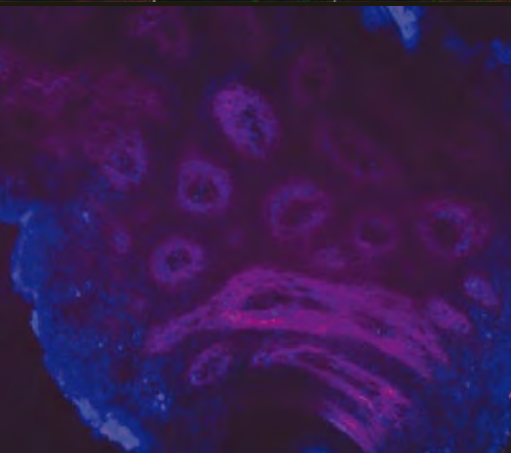
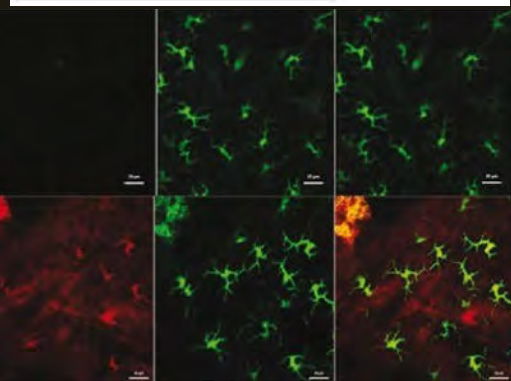
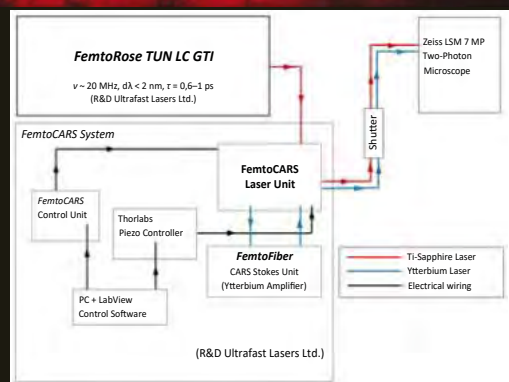
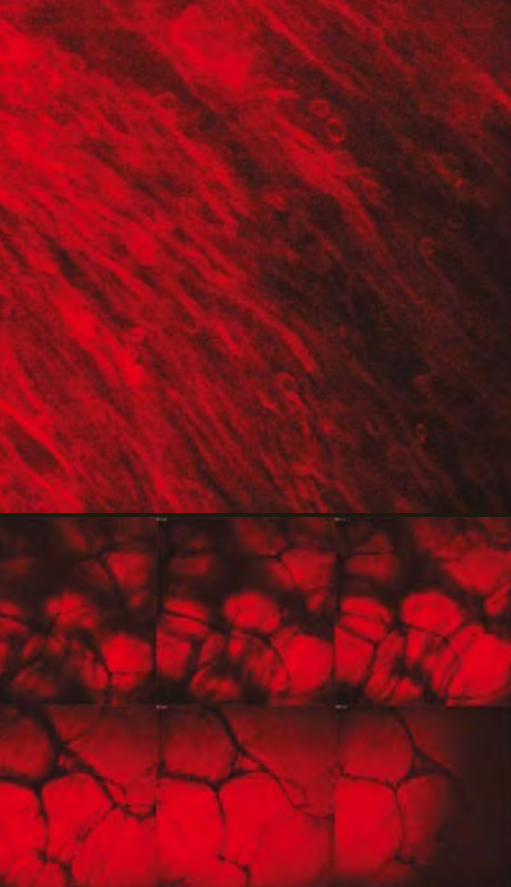
Krausz Ferenc átveszi a Nobel-díját Károly Gusztáv svéd királytól

Forrás: <https://www.mpg.mpg.de/en>



R&D Ultrafast Lasers Kutatási és Fejlesztési Kft.

KFKI-telephely: 1121 Budapest
Konkoly-Thege Miklós út 29–33. 6. ép. I. emelet
Tel./fax: +36 1 392 2582
E-mail: r.zipocs@zipocs.com
Honlap: www.zipocs.com



Két hullámhosszon szinkron működő, szub-ps-os lézerrendszerek fluoreszcensjelölés-mentes, 3D mikroszkópiás eljárásokhoz (2P, SHG, CARS, FLIM)

R&D Ultrafast Lasers Kft. – az Ön partnere a pásztázó 3D mikroszkópiában

Egyéb kapcsolódó termékeink, szolgáltatásaink:

- ionosan porlasztott, kis diszperziójú vagy diszperziókompenzáló tükrök
- komplett lézer- és nemlineáris mikroszkóplaboratóriumok kiépítése
- szaktanácsadás
- femtoszekundumos lézerrendszerek szervizelése, karbantartása