

fizikai szemle

*Fókuszban
a lézerek:*

Szeged,
Budapest, Pécs
Kroó Norbert 90

2024/9

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

SZERKESZTŐSÉG:

Felélő szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő

Olvasószerkesztő: Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG:

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

A beküldött tudományos, ismeretterjesztő és fizikatanítási cikkek a Szerkesztőbizottság, illetve az általa felkért, a témában elismert szakértő jóváhagyó véleménye után jelenhetnek meg.

Kiadja és terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III.

Telefon/fax: (1) 201-8682

Felélő kiadó: Groma István főtítkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

<http://fizikaiszemle.elft.hu>,

e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

fiz_szerkesztok@elft.hu. A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük. Kéziratokat nem őrzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felélő vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán. Az egyes számok ára: 1500,- Ft (a dupla számoké 3000,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

A lapot az MTA Magyar Tudományos Művek Tára (MTMT) archiválja



A címlapon:

Lovász Béla a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont lézerlaboratóriumában

TARTALOM

Ormos Pál: Kroó Norbert köszöntése 90. születésnapján 293

FÓKUSZBAN A LÉZEREK – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztő: Dombi Péter

Dombi Péter: Fókuszban a hazai lézeres kutatások – Bevezetés 294

Ajtai Tibor, Bozóki Zoltán, Csete Mária, Erdélyi Miklós, Földi Péter, Füle Miklós, Geretovszky Zsolt, Hopp Béla, Osvay Károly, Tóth Zsolt, Szabó Gábor: Lézeres kutatások a Szegedi Tudományegyetem Fizikai Intézetében 295

Varjú Katalin, Dombi Péter, Börzsönyi Ádám: Az ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet 299

Dombi Péter, Kroó Norbert, Szipőcs Róbert, Veres Miklós: Femtoszekundumos lézeral alkalmazások a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban 302

Krizsán Gergő, Turnár Szabolcs, Polónyi Gyula, Almási Gábor, Tóth György: Nagy energiájú terahertzes kutatások a Pécsi Tudományegyetemen 306

Barócsi Attila, Bokor Nándor, Bordács Sándor, Erdei Gábor, Gádosor Patrik, Holló Csaba, Koppa Pál, Kornis János, Lenk Sándor, Maák Pál, Papp Zsolt, Sarkadi Tamás, Simon Ferenc: Lézeres kutatások a BME TTK Fizikai Intézetében 312

Czitrovsky Aladár, Veres Miklós, Nagy Attila Tibor: Lézerfejlesztések és alkalmazások a KFKI-ban és annak utódintézeteiben 318

REFLEKTORFÉNYBEN

Újfalussy Balázs: Közvetlenül is igazolták Wigner Jenő 90 éves feltevését, Wigner-kristályt figyeltek meg elektronmikroszkóppal 326

HÍREK, ESEMÉNYEK

Németh Géza: Staar Gyula, a Természet Világa egykori főszerkesztője 80 éves 327

~~~~~

P. Ormos: Honouring Norbert Kroó on his 90th birthday

## LASERS IN FOCUS

P. Dombi: Hungarian laser research in focus – Foreword

T. Ajtai, Z. Bozóki, M. Csete, M. Erdélyi, P. Földi, M. Füle, Zs. Geretovszky, B. Hopp, K. Osvay, Zs. Tóth, G. Szabó: Laser research at the Institute of Physics of the University of Szeged

K. Varjú, P. Dombi, Á. Börzsönyi: The ELI ALPS Laser Research Institute

P. Dombi, N. Kroó, R. Szipőcs, M. Veres: Femtosecond laser applications at the HUN-REN Wigner Research Centre for Physics

G. Krizsán, Sz. Turnár, Gy. Polónyi, G. Almási, Gy. Tóth: High-energy terahertz research at the University of Pécs

A. Barócsi, N. Bokor, S. Bordács, G. Erdei, P. Gádosor, Cs. Holló, P. Koppa, J. Kornis, S. Lenk, P. Maák, Zs. Papp, T. Sarkadi, F. Simon: Laser research at the Institute of Physics, Faculty of Natural Sciences of the Budapest University of Technology and Economics

A. Czitrovsky, M. Veres, A. T. Nagy: Laser developments and applications at KFKI and its successor institutions

## IN SPOTLIGHT

B. Újfalussy: Eugen Wigner's 90-year-old hypothesis was directly confirmed by observing a Wigner crystal by electron microscope

## NEWS, EVENTS

G. Németh: Gyula Staar, the former editor-in-chief of Természet Világa is 80 years old

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS  
INNOVÁCIÓS  
MINISZTERIUM

nka  
Nemzeti Kulturális Alap



# KROÓ NORBERT KÖSZÖNTÉSE 90. SZÜLETÉSNAPJÁN



Kroó Norbert

Kivételesen gazdag életút fontos állomását ünnepeljük: *Kroó Norbertet*, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tiszteletbeli elnökét köszöntjük 90. születésnapja alkalmából. A tiszteletet parancsoló évszám alkalmat ad arra, hogy áttekintsük és méltassuk a tudós, tudományos közéleti személyiség eseményekben és eredményekben gazdag eddigi életművét. Rendkívül ritka, hogy egy

ember a tudománnyal kapcsolatos tevékenység olyan széles spektrumában alkot maradandót, mint Kroó Norbert: az alaptudományos kutatáson és az alkalmazások kidolgozásán túl a tudománypolitikai aktivitása mind a hazai, mind a nemzetközi porondon a legbefolyásosabb szervezetekben páráját ritkítja. Tudós pályafutása döntően a Központi Fizikai Kutatóintézethez (illetve annak jogutódjaihoz) kötődik, persze jelentős időt töltött külföldi kutatóhelyeken is – elsősorban Svédországban, Németországban, valamint a Szovjetunióban. Ez utóbbi országban a híres dubnai atomkutató intézetnek igazgatóhelyettese is volt 1968 és 1971 között.

A fizikusdiploma 1958. évi megszerzését követő hosszú pályafutás során természetszerűleg több területen is dolgozott. Kezdetben a neutronszerzés módszerével anyagok tulajdonságait vizsgálta. Később figyelme a lézerekre irányult: a lézerek működése, a fény-anyag kölcsönhatás részletei irányították vizsgálódását. A nyolcvanas évektől kezdve úttörőként kezdett az „újfajta” fény, a fémek felületén kialakuló plazmonok elméletével-gyakorlatával foglalkozni, e terület jelenleg is leköti érdeklődését. E lézerefény által keltett, megfelelő struktúrákkal szabályozott felületi elektronhullámok igen nagy elektromos tereket képviselhetnek, igen kis karakterisztikus méretekkel rendelkeznek – sokkal kisebbel, mint az ezeket létrehozó fény hullámhossza. Nagyon érdekes az elméleti leírásuk és rendkívül széles a lehetséges alkalmazások tere, új világot nyitnak a nanotechnológiában. Lényeges alapvető hozzájárulásként német együttműködésben meghatározta a felületen terjedő plazmonhullám méretét (lecsengési hosszát) nagy feloldású pásztázó alagútmikroszkópiával. E technika továbbfejlesztésével nanométeres struktúrákban kialakuló, nemlineáris hatások által erősített igen nagy térerősségű plazmonok további részletes jellemzését érték el. Ezen alapvető jelentőségű és nagyra értékelt tudományos eredmények alapul szolgálnak újszerű gyakorlati alkalmazásokhoz. Jelenleg azt igyekeznek kimutatni, hogy a plazmonokban kialakuló hatalmas térerősség elegendő-e akár fúziós reakciók beindítására is – ez a jelenségkör köztudomásúlag a jelenlegi alkalmazott fizika egyik „szent grálja”.

Kroó Norbert a tudomány szervezésében is mindig élen járt. A saját kutatócsoportjának is helyet adó Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet (ez természetesen a KFKI része) alapítója, és 1981-től 1998-ig igazgatója is volt. Az intézetben egészen kiváló további kutatások folytak-folynak. Különösen releváns ma *Krausz Ferenc* Nobel-díjával kapcsolatban, hogy *Farkas Győző* és *Tóth Csaba* itt jósolta meg először az attoszekundumos lézerimpulzusok előállításának lehetőségét – mert *Krausz Ferenc*, bár Bécsben, majd Münchenben végezte a tavaly Nobel-díjjal kitüntetett munkáját, folyamatosan szoros kapcsolatban van a KFKI-val. 1993-ban pedig itt készültek el az első, az ultrarövid lézerimpulzusok előállításában kulcsszerepet játszó diszperzív („csörpölt”) dielektrikumtükrök *Krausz Ferenc*, *Szipőcs Róbert* és *Ferencz Kárpát* közreműködésével.

A kutatói előmenetel csúcsa Magyarországon a Magyar Tudományos Akadémia tagsága. Kroó Norbert ide 1985-ben nyert felvételt, és itt is meghatározó szereplővé vált: 1999 és 2005 között főtitkár, majd 2005 és 2011 között alelnöki pozíciót töltött be. Talán magától értetődő, hogy igen nagyszámú tudományos, tudománypolitikai testület tagja, tanácsadója, melyek tételes felsorolása szinte lehetetlen. Esetünkben természetesen ki kell emelni, hogy az Eötvös Loránd Fizikai Társulatnak 1980 és 1985 között főtitkára, majd 1985 és 1989 között elnöke volt, azt követően pedig tiszteletbeli elnök. Mostani elnökként nagyon örülök, hogy jelenleg is odaadó, nagyon aktív tagja az elnökségnek, hatalmas tapasztalata és szakértelme hasznos segítségünk.

Óriási kapcsolatrendszerre, elismertsége révén természetesen számtalan külföldi grémiumnak is tagja, ezek közül most csak kettőt emelek ki. Igen korán tagja lett, majd különböző bizottságok szintjén aktív szereplőjévé vált az Európai Fizikai Társaságnak (EPS), ezek megkoronázásaként pedig 1991-től 1993-ig a szervezet alelnöki, majd 1993-tól 1995-ig az elnöki tisztségét is betöltötte. Ugyancsak hatalmas elismerés és megtiszteltetés (és felelősség), hogy Európa meghatározó alapkutatót támogató szervezetének, az Európai Tudományos Tanácsnak (ERC) is tagja volt 2005 és 2013 között.

A kivételesen eredményes tevékenységet a társadalom elismeri és nagyra értékeli. Ennek megfelelően Kroó Norbert számos kitüntetés birtokosa is, ezeket szintén lehetetlen itt felsorolni, csak néhány fényesebb felvillantására van mód: Akadémiai Díj (1970), Gyulai Zoltán-díj (az ELFT díja, 1971), Magyar Érdemrend parancsnoki keresztje a csillaggal (2004), Willis E. Lamb-díj (2009), Prima Primissima díj (2011), Lánchíd-díj (2012).

Amint látjuk, a kivételes életmű folyamatosan tovább épül. Mind a tudomány, mind a tudománypolitika-tudományszervezés területén fáradhatatlanul tevékenykedik továbbra is. Mindezekhez jó egészséget, sok energiát, harmonikus magánéletet kívánunk kollegáknak, barátunknak. Boldog születésnapot, kedves Norbert!

Szeged, 2024. július. 31.

Ormos Pál

# FÓKUSZBAN A HAZAI LÉZERES KUTATÁSOK – BEVEZETÉS

Amikor 1963-ban Csillebércen elkezdett működni az első magyar lézer, még kevesen gondolták, hogy 60 évvel később a lézertechnológia ennyire meghatározó lesz a felfedező és az alkalmazott kutatásban, illetve akár az iparban vagy az orvoslásban. Napjainkban az ország számos pontján folynak lézeres kutatások, és ennek az erős és összetartó magyar kutatói közösségnek köszönhető az is, hogy Szegeden felépülhetett egy modern, kizárólag lézeres kutatóközpont, az ELI-ALPS. Ez az intézet mostanra már a világ minden tájáról fogad fizikus, kémikus vagy akár biológus kutatókat, kísérleti felhasználókat.

A *Fizikai Szemle* ebben a hónapban a magyar lézeres kutatások legjavát mutatja be. Az ELI felépülte még inkább reflektorfénybe helyezte Szeged városát, ezért az utunk innen indul. Tematikus lapszámunk első cikke a Szegedi Tudományegyetem lézeres kutatásairól ad áttekintést, illetve részletesebben tárgyal egy fontos alkalmazást is: az aeroszolok lézeres vizsgálatát (ld. 295–298. o.).

A városban található az ELI konzorcium magyar tagintézménye is, ezért a második cikk ennek a kutatóközpontnak a felépítéséről és kutatásairól számol be (ld. 299–301. o.).

Innen egy nagyobb földrajzi ugrással Budapestre jutunk. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont munkatársai nemcsak a nemzetközi élmezőnybe tartozó ultragyors fizikai alapkutatásokról számolnak be, hanem lézeres fúziós kísérletekről, fontos optikai szál-lézeres alkalmazásokról az orvostudományban, s végül

szó esik a lézeres spektroszkópia legmodernebb módszereiről is (ld. 302–306. o.).

A negyedik cikk Pécsre vezet minket. A város THz-es iskolája messze földön híres. Az elektromágneses spektrum infravörös és mikrohullámú része közti tartományában végzett kutatásokról ad áttekintést a Pécsi Tudományegyetem munkatársainak cikke (ld. 306–311. o.).

A jelenkori lézeralkalmazások sorát a Budapesti Műszaki Egyetem munkatársainak bemutatkozása zárja, akik a magnetooptikától kezdve a különböző kvantumtechnológiai alkalmazásokon át a spektroszkópia számos területéig sok érdekes lézeralkalmazást vonultatnak fel (ld. 312–317. o.).

A kurrens kutatásokat tudománytörténeti perspektívába helyezi a lapszám utolsó lézeres írása, amely végigköveti a KFKI-nak és utódintézményeinek optikai és lézeres fejlesztéseit az elmúlt 65 évben. Ez a cikk nemcsak fontos mérföldköveket mutat be, hanem jól érzékelteti azt a változó társadalmi környezetet is, amelyben a magyar lézerfizikusok az elmúlt évtizedekben dolgoztak (ld. 318–325. o.).

A cikksorozat elolvasása után pedig már az sem lesz meglepő az olvasónak, hogy 2023-ban egy olyan magyar kutató kapott Nobel-díjat, akinek a karrierje Budapesten indult, és akinek a munkája számos ponton találkozott itthoni lézeres kutatásokkal és fejlesztésekkel. A *Fizikai Szemle* 2024. januári száma éppen ezeket a kapcsolódásokat mutatta be egy tematikus cikksorozat keretében.



Domby Péter  
az MTA doktora,  
vendégszerkesztő

# LÉZERES KUTATÁSOK A SZEGEDI TUDOMÁNYEGYETEM FIZIKAI INTÉZETÉBEN

Ajtai Tibor, Bozóki Zoltán, Csete Mária, Erdélyi Miklós, Földi Péter, Füle Miklós  
Geretovszky Zsolt, Hopp Béla<sup>®</sup>, Osvay Károly, Tóth Zsolt, Szabó Gábor

Szegedi Tudományegyetem, Fizikai Intézet, Szeged

<sup>®</sup>E-mail: bhopp@physx.u-szeged.hu

A lézerek, lézerrendszerek fejlesztése és különböző területeken való alkalmazása, a fény-anyag kölcsönhatások modellezése, elméleti leírása nagy hagyományokkal rendelkező kutatási terület intézetünkben. Az intézetben jelenleg folyó interdiszciplináris kutatások kiterjednek többek között a környezetvédelem, az orvostudomány, a nanotechnológia és az alkalmazott optika területeire.

Az *Advanced Optical Imaging Kutatócsoport*<sup>1)</sup> nagy térbeli feloldású optikai mikroszkópiai eljárások fejlesztésével, tesztelésével és alkalmazásával foglalkozik. Egyik legfontosabb kutatási területük a lokalizációs mikroszkópia, melynek során egyedi fluoreszcens molekulák térbeli helyzetének <10 nm-es meghatározásával

hozzák létre a végső képet. A módszert elsősorban orvosi és biológiai minták nanostruktúrájának feltérképezésére és kvantitatív elemzésére alkalmazzák.

Az erős lézerterek nagyon sok (impulzusonként akár 1015) foton együttes hatásából épülnek fel, ugyanakkor az általuk keltett felharmonikusok már több nagyságrenddel gyengébbek. Emiatt a harmonikus módusok kvantált, azaz fotonképet alkalmazó leírása elvi jelentőséggel bír, de például új típusú fényforrások kifejlesztésének a lehetőségét is felveti. Az *Elméleti Fény-Anyag Kölcsönhatási Kutatócsoport* évek óta vizsgálja ezt a kérdéskört, legutóbbi eredményük a magasfelharmonikus-keltés egy igen általános, anyagfüggetlen modelljének a megalkotása.



Ajtai Tibor az SZTE Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének (OKT) tudományos főmunkatársa, a HUN-REN-SZTE Fotoakusztikus és Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport tagja, a Lézeres Aeroszolkutatások Kutatócsoport alapító tagja és vezetője. Hopp Béla az OKT egyetemi tanára, az SZTE Fizikai Intézete és a Fény-anyag Kölcsönhatási Kutatócsoport vezetője. Erdélyi Miklós az OKT tanszékvezető egyetemi tanára, kutatási területe a nagy térbeli feloldású optikai mikroszkópia. Bozóki Zoltán az OKT professzora, az ELKH-SZTE Fotoakusztikus Környezetifolyamat-megfigyelési Kutatócsoport vezetője, a Hilase Kft. (az SZTE egyik legsikeresebb spin-off cége) tártulajdonosa és ügyvezető igazgatója. Földi Péter az SZTE Elméleti Fizikai Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára, az ELI ALPS rész munkaidős munkatársa, kutatási területe a fény-anyag kölcsönhatás és a transzportfolyamatok kvantumos leírása. Geretovszky Zsolt az OKT docense, a Nano- és Mikromegmunkálási Labornak és az SZTE IKIKK 3D Központjának szakmai vezetője. A fény-anyag kölcsönhatás területén belül aktívan foglalkozik a lézeres anyagmegmunkálás különböző területeivel, a nanoszerkezetek elektromos kísérletekben történő előállításával, tulajdonságaiknak hangolhatóságával és jellemzésével, valamint additív úton előállítható szerkezetek vizsgálatával. Füle Miklós a Kísérleti Fizikai Tanszék tanszékvezető docense, az ELI ALPS Kutatóintézet részdísz munkatársa.

Akik kimaradtak a képről: Csete Mária az OKT tudományos főmunkatársa, a Nanoplaszmonika Kutatócsoport vezetője. Osvay Károly az OKT habilitált docense a TeWaTi Lézerlaboratórium és Kutatócsoport vezetője; 2006 óta részt vesz az ELI programban, 2008 és 2010 közt az ELI-PP projektmenedzsere, 2013 és 2019 közt az ELI ALPS alapító kutatási technológiai igazgatója. Jelenleg a Nemzeti Lézeres Transzmutációs Laboratórium vezetője. Tóth Zsolt az Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézetének docense, kutatási területe az ultrarövid lézerimpulzusok által keltett plazmák vizsgálata; érdeklődési köréhez tartozik a spektroszkópiai ellipszometria és a pásztázó elektronmikroszkópia. Szabó Gábor akadémikus, a Szegedi Tudományegyetemért Alapítvány Kuratórium elnöke, az ELI-HU Non-profit Kft. ügyvezető igazgatója.

Az Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézet<sup>2)</sup> és a Nagy Intenzitású Lézer Laboratórium<sup>3)</sup> közös kutatása a nagy intenzitású lézerek által generált plazma és a környezet közötti kölcsönhatásokat tanulmányozza. Kísérleti módszerekkel vizsgálták a mechanikai és termikus jelenségeket a lézerplazma és a céltárgy, illetve a gáz- és folyadékkörnyezet közötti határfelületen. Tervezik a nagyenergiájú lézerplazma és az ezzel létrehozott reaktív oxigént tartalmazó nanorészecske-kolloidok orvosi alkalmazási lehetőségeinek feltárását.

A lézeres fotoakusztikus spektroszkópia a gázanalitikában is használatos eljárás, mely az utóbbi évtizedekben kapott különös hangsúlyt. Előnyei közé tartozik a többi analitikai eljáráshoz viszonyított nagy érzékenység és alacsony kimutatási határ, mely nyomgázok egymilliárdod résznyi (ppb) szintű koncentrációjának meghatározására alkalmas, különösen a kvantumkaskád-lézer mint fényforrás alkalmazásával. A fotoakusztika a környezeti folyamatok megfigyelésében, illetve a szennyezőforrások lokalizációjában és a forráserősség meghatározásában is használatos módszer. A Fotoakusztikus Kutatócsoport<sup>4)</sup> munkatársai számos fotoakusztikus rendszert fejlesztettek ki, melyek alkalmasak például a környezetszennyező nitrogénvegyületek ( $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ) detektálására vagy a ki-lélegzett levegő komponenseinek mérésére.

Az Osvay Károly és Bor Zsolt által 1998-ban alapított *Tewati Labor*-ban<sup>5)</sup> 2023 végén lépett működésbe a harmadik generációs TW csúcsteljesítményű lézerrendszer. A 100 Hz ismétlési frekvenciájú lézerrendszer nagy intenzitású ágában – a kompresszorkamra telepítését követően – 36 mJ-nál nagyobb energiájú, 26 fs-nál rövidebb idejű, 800 nm központi hullámhosszú impulzusokat keltenek. A lézerrendszert sikeresen alkalmazzák céltárgyrendszerek fejlesztésére, amorf anyagok vágására, illetve a lézeralapú röntgen-CT-berendezés fejlesztésére a Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium<sup>6)</sup> keretében.

A szegedi lézeres műhelynek a kezdetektől szerves részét alkotta a lézeres anyagmegmunkálás különféle részterületeinek kutatása és művelése. A Nano- és Mikro-megmunkálás Kutatócsoport<sup>7)</sup> mindmáig folytatja ezt a hagyományt, és mind mikro-, mind pedig makroméretben jelentős kompetenciával bír. Témaválasztásuk döntően alkalmazásorientált: kutatási projekteik nem tisztán alapkutatási jellegűek, hanem ipari érdeklődésre is számot tartanak. A közelmúlt támogatott és aktuálisan futó témái például a nagy átlagteljesítményű anyagmegmunkáló szállítók tanulmányozása és alkalmazása, a lézeres vágás, a 3D fémnyomatás alapjául szolgáló, ún. szelektív olvasztás, vagy a lézeres kötés (hegesztés és forrasztás) akkumulátortechnológiai kutatás-fejlesztése.

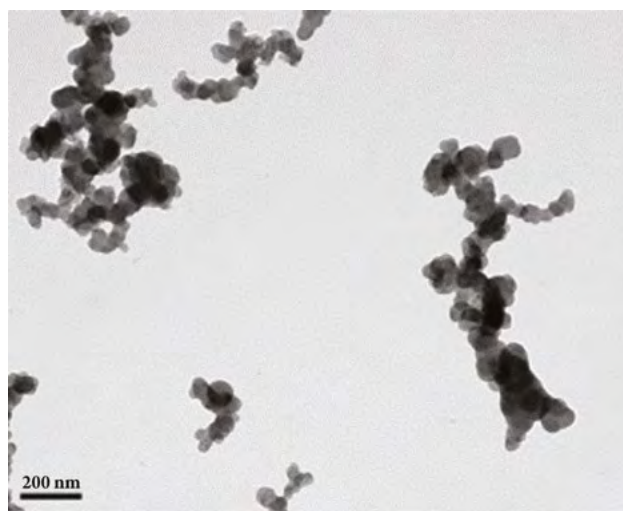
A Nanoplazmonika Kutatócsoport<sup>8)</sup> a nanoplazmonikai jelenségek numerikus modellezésére, optimalizálására és analízisére specializálódott. Plazmonikus struktúrák integrálásával maximalizálják kvantuminformáció kódolásra alkalmas detektorok és fényforrások hatékonyságát, nanolézereket és metaanyagokat terveznek

a fény-anyag kölcsönhatások határainak kiterjesztésére. A nemlineáris válaszok négydimenziós optimalizálásával, szimmetria- és topológiai jelenségek bevonásával tökéletes abszorbereket fejlesztenek, a mágneses mező emulálásával aszimmetrikus választ mutató optikai izolátorokat és elektromágneses árnyékolásra alkalmas elemeket terveznek.

Az intézetben működő kutatócsoportok szoros együttműködésének egyik fő területe az aeroszokok lézeres generálása és karakterizálása.

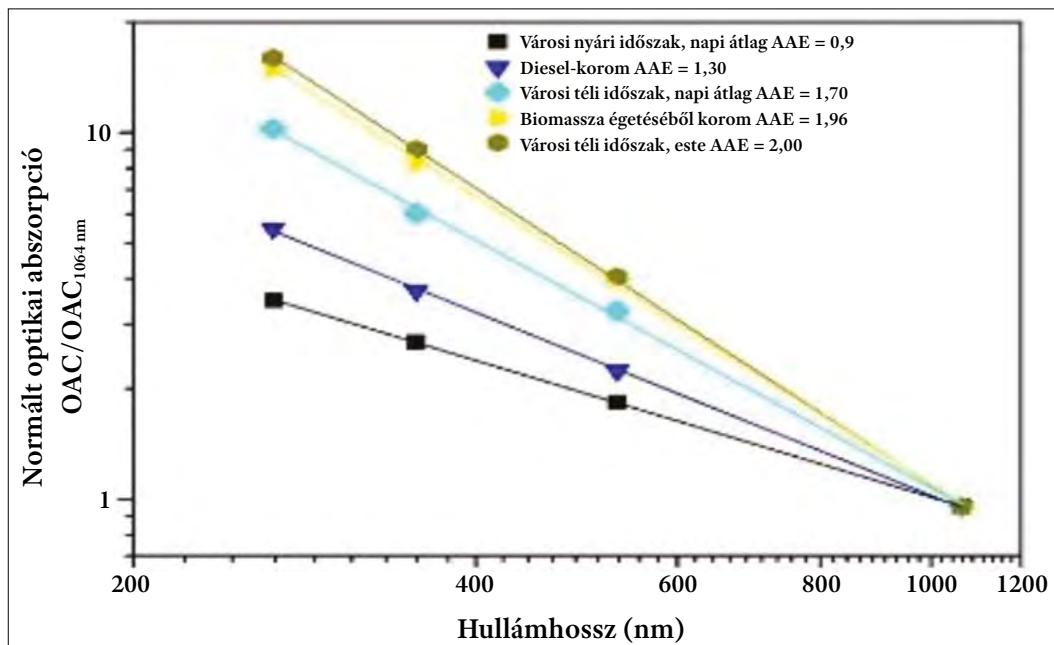
## A jó, a rossz és a csúf aeroszol, avagy az aeroszokok sötét és világos oldala a lézerek fényében

Az emberi tevékenység következtében, döntően a fosszilis energiahordozók használatának melléktermékeként számos forrásból és nagy mennyiségben kerül a légkörbe kisméretű ( $<1\ \mu\text{m}$ ), változatos összetételű és morfológiájú széntartalmú ún. koromaeroszol (1. ábra).



1. ábra. Tipikus koromaeroszol TEM-képe

A koromaeroszol a rá eső elektromágneses sugárzás egy jelentős részét elnyeli, ezáltal fűti a légkört. Mindemellett a felhőképződésben is fontos szerepet játszik. Mai ismereteink szerint a koromaeroszol sugárzási kényszere meghaladja az egyik legfontosabb üvegházhatású gáz a metán sugárzási kényszerét. Az éghajlatváltozásban betöltött szerepe mellett a koromaeroszol emberi egészségre gyakorolt káros hatása is jelentős. Kis méretük révén ezek a viszonylagosan nagy felületű és toxikus molekulákra erősen adszorptív részecskék a tüdő mélyebb üregeibe, majd közvetlenül a véráramba is bejuthatnak. A légköri koromaeroszol nagy mennyiségben tartalmaz a kibocsátó forrásra jellemző szerves összetevőket, amik jelentősen befolyásolják a fénnyelölő tulajdonságait. Mivel a koromaeroszol abszorpciós spektruma az egyetlen olyan valós időben is mérhető

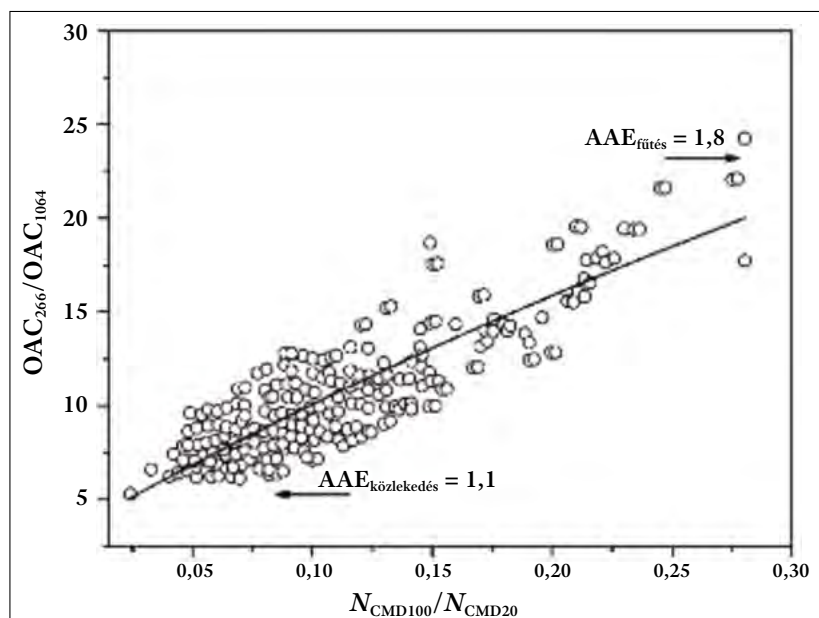


2. ábra. Dízel, biomassza égetéséből származó és eltérő légköri körülmények között mért koromaeroszlok normált abszorpciós spektruma és AAE-értékei

fizikai mennyiség, amely a kémiai összetételről és így a kibocsátó forrásról és az élettani hatásáról is hordoz, hordozhat információt, pontos és megbízható mérése és az abszorpciós spektrumban rejlő információk feltárása kiemelt jelentőségű célkitűzés nemcsak a sugárzási egyensúlyban betöltött szerepének mélyebb megértéséhez, hanem a kibocsátó források azonosítása és a levegőtisztaság vizsgálata szempontjából is. A különböző forrásból származó koromaeroszlok vizsgálata és az eltérő helyszíneken és meteorológiai körülmények között

végzett terepi mérési eredményeink igazolták, hogy az abszorpciós spektrum kvantitatív jellemzésére használt ún. abszorpciós Ångström-együttható (AAE) – az abszorpciós spektrum log-log skálán ábrázolt meredeksége – a megfelelő hullámhosszú gerjesztő lézertífnyforrások alkalmazása esetén forrásspecifikus jellemző (2. ábra).

A városi környezetben, ahol a koromaeroszol forrása jellemzően a közlekedés és a fűtés, a hatékony méréshez felhasználjuk azt az általunk feltárt összefüggést, hogy a forrásspecifikus AAE-értékek a légköri aeroszol-méreteloszlás spektrumának mérésével párhuzamosan meghatározhatóak. Ehhez első lépésben független mérésekkel igazoltuk, hogy az adott mérési helyszínen mért méreteloszlási spektrum egyértelműen felbontható két független aeroszohalmazra (módusra) és hogy az egyes módusokba eső részecskék darabszám-koncentráció arányának ( $N_{\text{CMD100}}/N_{\text{CMD20}}$ ) időfüggése a kibocsátó források intenzitásában bekövetkező változásával hozható összefüggésbe. Ha ezt az összefüggést felhasználjuk, és egymás függvényében ábrázoljuk az egyes módusokba eső aeroszoldarabszám-koncentrációk és a két hullámhosszon mért optikai abszorpciós koefficiensek (OAC) arányait, a forrásspecifikus AAE-értékek a megfelelően illesztett görbe szélsőértékeiként már meghatározhatóvá válnak (3. ábra).



3. ábra. Az  $\text{OAC}(266\text{ nm})/\text{OAC}(1064\text{ nm})$  és az  $N_{\text{CMD100}}/N_{\text{CMD20}}$  mennyiségek közötti összefüggés és az illesztett aszimptotikus görbe a forrásspecifikus AAE-értékek meghatározásához

A forrásspecifikus AAE-értékek ismeretében a kibocsátó források járuléka az egyes hullámhosszakon mért OAC-adatokhoz az AAE definíciójának ismeretében és a két forrás kizárólagosságának feltételezésével a következő összefüggések felhasználásával egyértelműen meghatározható:

$$\frac{OAC(\lambda_1)}{OAC(\lambda_2)} = \left[ \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right]^{AEE},$$

$$OAC_{\text{mért}}(\lambda) = OAC_{\text{közeledés}} + OAC_{\text{fítés}}.$$

Ez egyes források fajlagos abszorpciós együtthatói ( $\sigma_{\text{absz}}$ ) és az abszorpciós járulékaik ismeretében a kibocsátó források adott időponthoz rendelhető tömegkoncentrációja (TC) a következő összefüggés alapján határozható meg:

$$TC = OAC \cdot \sigma_{\text{absz}}.$$

Az általunk kifejlesztett mérési módszer alapján a légköri koromaeroszol kibocsátó forrásainak mibenléte így egy megfelelő hullámhosszpárú lézeres gerjesztéssel valós időben is mérhetővé vált. Az AAE és a koromaeroszol kémiai összetétele közötti összefüggések feltárásával igazoltuk továbbá, hogy a valós időben is mérhető légköri abszorpciós spektrum a levegőminőség monitorozására is alkalmas paraméter. Az aeroszolkötöt oldalra így új megvilágításba került.

A légköri koromaeroszol gyorsan változó biológiai, élettani hatásáért nem elsősorban a koromaeroszol maga, hanem a felületére adszorbeálódott toxikus molekulák a felelősek. Az, hogy ezek a részecskék a tüdő mélyebb rétegeibe és vagy akár a véráramba is bejuthatnak a koromaeroszol kis méretével magyarázható. Ezt azonban célként is megjelölhetjük, hogy hasznos mikro- és nanorészecskéket, például gyógyszer-hatóanyagokat juttassunk a tüdő mélyebb rétegeibe és akár noninvazív módon a véráramba. Ilyen kis méretű gyógyszerhatóanyag-részecskéket lézeres gerjesztéssel is előállíthatunk.

A kis méretnek számos előnyös tulajdonsága van a gyógyszerhatóanyagok szervezetben történő hasznosulása terén. A forgalmazott gyógyszerhatóanyagok körülbelül 40%-a, míg a fejlesztés alatt állók 90%-a tartozik a vízben rosszul oldódó vegyületek közé. Ez a hatóanyag-fejlesztésben tapasztalható trend kihívást jelent a gyógyszeriparnak, hiszen a gyenge oldhatóság a legtöbb esetben korlátozza a biológiai hasznosíthatóságot is. A megoldási opciók közül igen elterjedtek a különféle részecskeméret-csökkentő eljárások. A szemcseméret redukálásával megnő az aktív felület, aminek köszönhetően általában javul az oldódási arány és a transzportkarakterisztika, így az emberi sejtek gyorsabban, hatékonyabban fel tudják venni az adott hatóanyagot.

Az impulzuslézeres abláció alkalmas arra, hogy tömbi anyagból mikro- és nanométeres méretű részecskéket

állítsunk elő. A lézerparaméterek és a kísérleti körülmények megfelelő megválasztásával szerves és szervetlen részecskék előállítására egyaránt találhatunk példákat. Kutatásaink során vízben rosszul oldódó nem szteroid alapú gyulladáscsökkentő, fájdalomcsillapító hatóanyagok (ibuprofén és meloxicám) nanoszekundumos és femtoszekundumos impulzuslézeres ablációja során keltett részecskéket vizsgáltunk. Ablációs fényforrásként nanoszekundumos Nd:YAG ( $\lambda = 1064$  és  $532$  nm, FWHM =  $8$  ns,  $f = 20$  Hz) lézert és femtoszekundumos Ti:zafir ( $\lambda = 800$  nm, FWHM =  $135$  fs,  $10$  Hz) lézert alkalmaztunk. FTIR (Fourier-transzformált infravörös) és Raman-spektroszkópiával igazoltuk, hogy mindhárom esetben az eredeti anyagával azonos kémiai összetételű részecskéket sikerült előállítanunk. A részecskék méreteloszlását megmérve azt tapasztaltuk, hogy polidiszperz, a méreteloszlásuk módusza  $300$  nm alatti.

A kereskedelembe kapható hatóanyagpor-részecskék átlagos mérete  $20$  és  $30$  mikrométer közötti. Időfelbontásos vizsgálataink igazolták, hogy a részecskenanonizálási folyamatban az abláció során bekövetkező fotomechanikai effektusok játsszák a főszerepet. Az oldódási sebesség mérésénél azt határoztuk meg, hogy a  $0$ -tól  $60$  percig terjedő intervallumban az ablációval előállított részecskék hány százaléka oldódik fel az adott pH-jú közegben. Az oldódási sebesség mindkét hatóanyag esetében növekedett. Az ibuprofénrészecskék esetén az oldódási telítési értékben  $10$ – $20\%$ -os növekedést figyeltünk meg, míg a meloxicámrészecskék telítési értéke kétszerese lett az eredeti gyógyszerformulához tartozó értéknek. Mindez azt bizonyítja, hogy a lézeres ablációs aprítás elérte célját.

A toxicitási méréseket A-549 jelű sejtekből előállított tenyészeteken végeztük el. Ennek során azt a legnagyobb koncentrációt kerestük meg, amely még nem okozott toxikus jelenségeket a sejtekben. A vizsgálatok kimutatták, hogy az auferált (ablációval szétört) meloxicámból négyszer, ibuprofénből kétszer akkora koncentráció szükséges a toxikus hatás eléréséhez, mint a referenciaanyagok esetén. Ez jelentős előrelépésnek és igen ritka jelenségnek számít a gyógyszerfejlesztési eljárásoknál.

## Jegyzetek

- 1) Advanced Optical Imaging Kutatócsoport: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~adoptim/>
- 2) Orvosi Fizikai és Orvosi Informatikai Intézet: <http://www2.szote.u-szeged.hu/dmi/>
- 3) Nagy Intenzitású Lézer Laboratórium: <http://exp.physx.u-szeged.hu/hill/>
- 4) Fotoakusztikus Kutatócsoport: <https://www.physx.u-szeged.hu/fotoakusztika/>
- 5) Tewati Labor: <https://www.physx.u-szeged.hu/tewati/welcome>
- 6) Kooperatív Technológiák Nemzeti Laboratórium: <https://www.ktnl.hu>
- 7) Nano- és Mikromegmunkálás Kutatócsoport: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~namilab/>
- 8) Nanoplaszmonika Kutatócsoport: <http://titan.physx.u-szeged.hu/~nanoplasmonics/nanofotonikai>

# AZ ELI ALPS LÉZERES KUTATÓINTÉZET

Varjú Katalin<sup>1,2,\*</sup>, Dombi Péter<sup>1,3</sup>, Börzsönyi Ádám<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet, Szeged

<sup>2</sup>Szegedi Tudományegyetem, Szeged

<sup>3</sup>HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

\*E-mail: info@eli-alps.hu

Az ELI (Extreme Light Infrastructure) lézeralapú alap- és alkalmazott kutatások végzésére, három telephelyen megvalósított egységes irányítású szervezetként működik. Az ELI Attosecond Light Pulse Source (ALPS, Attoszekundumos Fényimpulzusforrás) létesítmény Szegeden, az ELI Beamlines a Cseh Köztársaságban, a Prága melletti Dolní Břežanyban található, illetve az ELI Nuclear Physics a romániai Bukarest melletti Măgureleben épült fel. Az ELI sajátos jellemzője és potenciális erőssége a létesítmények komplementaritása, amely lehetővé teszi a tudományterületek különösen széles skálájának támogatását, továbbá új technológiák együttes kifejlesztését – például a lézertechnológia, a diagnosztika vagy a céltárgyak előállítása tekintetében. A három ELI-létesítmény 2022 óta szakértői értékelés alapján, nyílt pályázati felhívásokon keresztül érhető el a nemzetközi tudományos közösség felhasználói számára. Eddig az ELI-létesítmények 27 országból vonzották a kutatókat, akik 30 különböző eszközhöz nyertek hozzáférést fizikai, biológiai, kémiai, anyagtudományi és multidiszciplináris projektjeik elvégzéséhez.

Az ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet fő küldetése a rendkívül gyors dinamikájú folyamatok tanulmányozása. A legkorszerűbb lézerek, fejlett másodlagos források és egyedülálló kísérleti munkaállomások megléte egyedülálló időfelbontású vizsgálati lehetőségeket kínál a fény és anyag nemrelativisztikus és relativisztikus kölcsönhatásainak vizsgálatához.

A lézeralapú alap- és alkalmazott kutatások széles skálájának támogatására kutatóintézetünk tizenkét speciális, kevés ciklusú, kimagasló átlag- és csúcsteljesítményű lézerrendszerrel rendelkezik (100 W átlagteljesítményt meghaladva a közeli és a közép-infravörös tartományban, 10 Hz-től 100 kHz-ig terjedő ismétlési frekvenciával). Már a lézerrendszerek tervezése során szem előtt tartottuk a rendkívüli igénybevételt, ami így paradigmaváltáshoz vezetett a modern ultragyors lézer-

technológia terén. Az addig elterjedt, de gyakran szervizigényes Kerr-lencsés módusszinkronizált titán-zafír oszcillátorok szerepét átvették az ipari alkalmazások terén bizonyított Yb-alapú impulzusforrások. Fehér-fény-keltéssel viszonylag könnyen előállítható a kevés ciklusú impulzusidőt biztosító spektrális szélesség; a különbségi frekvencia keltésével pedig inherens módon elérhető a vivő-burkoló fázis stabilitása.

A diódapumpált lézertechnológia fejlődése lehetővé tette a rendkívül stabil és kimagasló nyalábminőségű pumpalézerek használatát, melyek optikai parametrikus erősítőfokozatokat hajtanak meg. Ez utóbbi technológia kifejezetten előnyös nagy átlagteljesítmények eléréséhez, hiszen gyakorlatilag alig jelentkezik hőterhelés, illetve az ezzel együtt járó termikus lencsehatás. A kevés ciklusú impulzusidő elérését vékony üveglemezben történő spektrális szélesítéssel oldjuk meg. Ezeket a technológiai áttöréseket alkalmaztuk az 1 kHz-es SYLOS [1], MIR-HE és a 100 kHz-es MIR [2] rendszerek esetében. Egy másik megközelítés a nagy átlagteljesítményű, kevés ciklusú és nagy ismétlési frekvenciájú (HR, high-repetition) fényforrások előállításához a szállézeres technológia. A párhuzamosan elrendezett optikai szálerősítők nyalábjainak koherens kombinációval való egyesítése után a 300 fs körüli tartományból két posztkompressziós lépésen többutas gázcellák alkalmazásával 6 fs-os impulzusidőt érünk el a 100 kHz-es HR lézerrendszerek esetében [3].



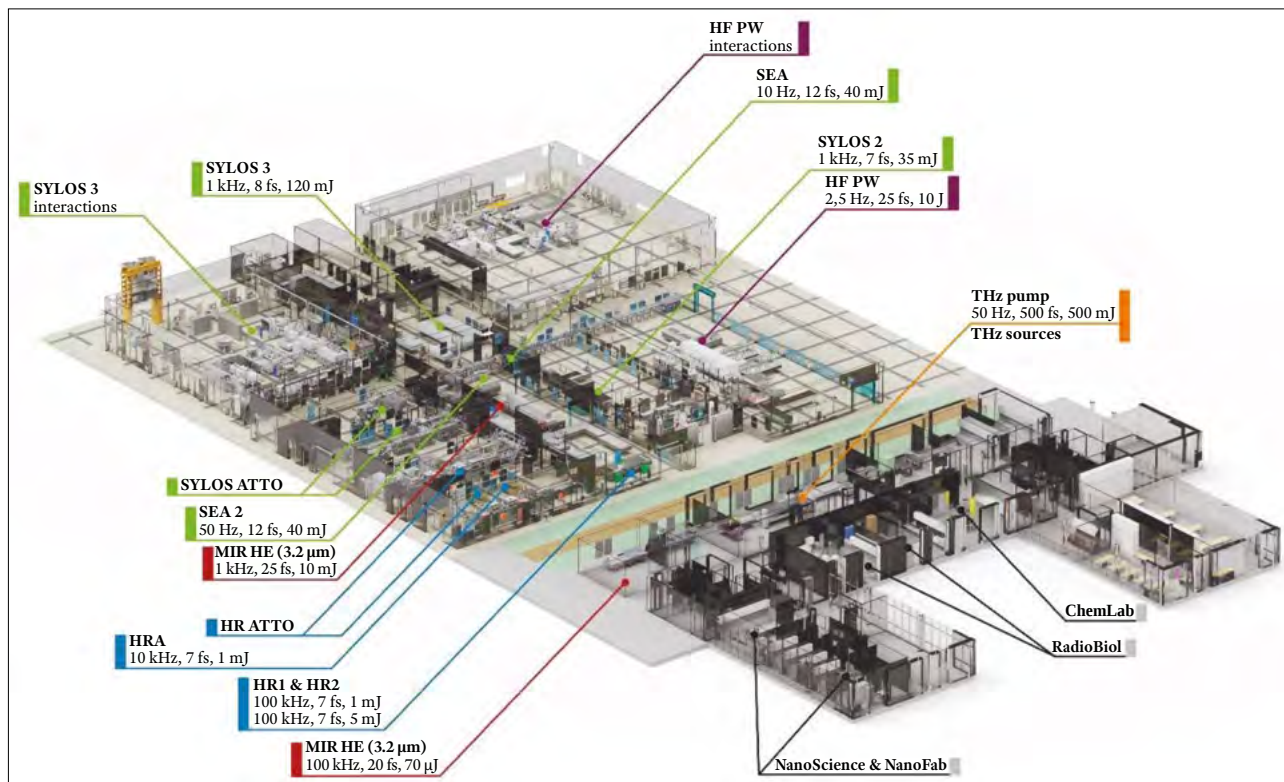
Dombi Péter, az MTA doktora, az MTA Lézerfizikai Bizottságának elnöke, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Lendület-csoportvezetője, a szegedi ELI ALPS lézerközpont osztályvezetője. Kutatási területei a lézerfizika, a nanooptika és az ultragyors fény-anyag kölcsönhatási folyamatok vizsgálata.



Varjú Katalin PhD, az ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet tudományos igazgatója, a Szegedi Tudományegyetem Optikai és Kvantumelektronikai Tanszékének docense. Kutatási területe az attoszekundumos impulzusok keltése és alkalmazásai.



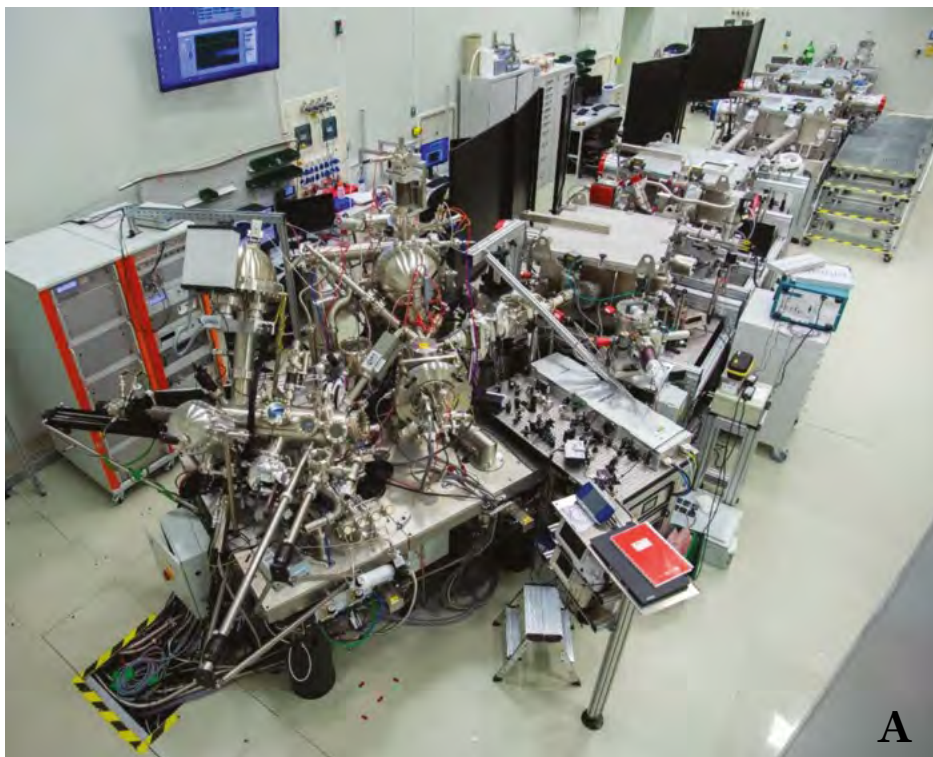
Börzsönyi Ádám PhD, az ELI ALPS tudományos főmunkatársa, a Lézerforrások Osztályának vezetője. Doktori fokozatát 2013-ban szerezte a Szegedi Tudományegyetemen. Kutatási területei a nagy átlagteljesítményű ultrarövid lézerrendszerek fejlesztése, posztkompressziós eljárások kutatása és új lézerdiagnosztikai módszerek kidolgozása.



1. ábra. Kutatási berendezések – lézerek, másodlagos források és kísérleti állomások – elhelyezkedése az ELI ALPS-ban

A nagy csúcsteljesítményű, petawattos technológia terén megfelelő méretű erősítőkristályok híján továbbra is a titán-zafír technológia a domináns az OPCPA-val (optical parametric chirped pulse amplification, optikai parametrikus erősítés) szemben. Az

erősítőkristályok hűtésének speciális megoldásaival itt is több száz watt átlagteljesítményt értünk el 10 Hz-es ismétlési frekvencián, ami a legmagasabb eddig elért ismétlési frekvencia a petawattos lézerek tekintetében [4].



A



2. ábra. Két példa az ELI ALPS laboratóriumai közül: **A** – NanoESCA, illetve **B** – a közép-infravörös lézertlabor

A lézerimpulzusok tizenkét különböző másodlagos forrást hajtanak meg nemlineáris frekvenciakonverzió, illetve részecskegyorsítási folyamatok révén. Az attoszekundumos másodlagos források a magasrendű harmonikusok fejtett technikáin alapulnak (optikailag ionizált gázokban vagy oszcilláló felületi plazmában) [5–7]. További másodlagos források THz-es sugárzást (optikai egyenirányítással) vagy elektronnyalábot biztosítanak spektroszkópiai és szerkezeti vizsgálatokhoz, plazmafizikához vagy sugárbiológiához.

A speciális kísérleti állomások lehetővé teszik az elsődleges (lézer-) és a másodlagos források alkalmazását különböző vizsgálati technikákban: például az ún. reakciómikroszkóp lehetővé teszi fotofragmentált molekulák folyamatainak feltérképezését. A nagy intenzitású lézerimpulzusok segítségével erősterfizikai kísérletek, illetve radiobiológiai minták részecskebesugárzása történik. Az intézet profiljához tartoznak továbbá fotokémiai vizsgálatok és intenzív THz-es impulzusokkal folytatott kísérletek.

A szilárdtestek és topologikus anyagok időbontott felületfizikai és felületi kémiai vizsgálatait, a sáv szerkezetek feltérképezését a NanoESCA berendezéssel valósítjuk meg [8]. Ezzel a berendezéssel mind fotoelektron-emissziós mikroszkópiai (PEEM), mind k-térbeli (sáv szerkezeti) felvételeket tudunk készíteni különböző felületekről. Világszinten is egyedülálló kombinációként a berendezést femto- és attoszekundumos impulzusokkal is ki tudjuk világítani, így az előbb említett kísérleteket időbontott mérésenként is meg tudjuk valósítani.

Az ELI ALPS fejlett nanofabrikációs labort is üzemeltet elektronsugaras litográfiával és fókuszált ionsugaras berendezéssel, ahol nemcsak külső felhasználóknak készítünk mintákat [9], hanem az itt dolgozó kollégáink magas szintű mérés technikai fejlesztéseket

is végeznek. Ez utóbbira jó példa az ún. forró elektronok detektálására kifejlesztett ellipszometriai mérő módszerünk [10].

A kutatási technológia telepítése 2017-ben kezdődött, amikor elkészültek a speciálisan tervezett épületek (beleértve a 4000 m<sup>2</sup>-nyi tisztateres, rezgésmentes labor területet hőmérséklet- és páratartalom-szabályozással, sugárvédelemmel). 2023-ban lezárult az ELI ALPS beruházási fázisa, így jelenleg a fő tevékenység a berendezések folyamatos üzemeltetése, fejlesztése és a tudományos közösség által benyújtott felhasználói pályázatok megvalósítása. Az elsődleges (lézer-) és másodlagos források a kísérleti munkaállomásokkal és mérőberendezésekkel, a diagnosztikai eszközök széles választékával a nemzetközi kutatóközösség rendelkezésére állnak atomok, molekulák, kondenzált anyagok és a lézerek által kelthető plazma attoszekundumos és femtoszekundumos időskálán zajló dinamikus folyamatainak tanulmányozására. Az ELI ALPS nem csupán nyálábódott, de technikai és tudományos támogatást is biztosít hazai és nemzetközi felhasználói kísérletekhez. Az érdeklődők további részletes információt az erre szolgáló honlapon találhatnak [11].

## Irodalom

1. Tóth S., et al.: *J. Phys. Phot.* 2 (2020) 045003.
2. Thiré N., et al.: *Opt. Express* 26 (2018) 26907–26915.
3. Hädrich S., et al.: *Opt. Lett.* 47 (2022) 1537–1540.
4. Nagymihály R. S., et al.: *Opt. Express* 31 (2023) 44160.
5. Reduzzi M., et al.: *J. El. Spectr. Rel. Phen.* 204 (2015) 257–268.
6. Kühn S., et al.: *J. Phys. B* 50 (2017) 132002.
7. Shirozhan M., et al.: *Ultrafast Science* (2024) – nyomdában.
8. Halasi G., et al.: *npj 2D Mat. Appl.* 8 (2024) 48.
9. Komatsu K., et al.: *Nano Lett.* 24 (2024) 2637–2642.
10. Budai J., et al.: *Nature Comm.* 13 (2022) 6695.
11. <https://up.eli-laser.eu/>

# FEMTOSZEKUNDUMOS LÉZERALKALMAZÁSOK A HUN-REN WIGNER FIZIKAI KUTATÓKÖZPONTBAN

Dombi Péter<sup>®</sup>, Kroó Norbert, Szipócs Róbert, Veres Miklós  
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest  
<sup>®</sup>E-mail: dombi.peter@wigner.hun-ren.hu

A csillebérci lézeres hagyományokra építve immár több mint 60 éve zajlanak lézeres kutatások a KFKI-ban és utódintézményeiben. Csillebérc volt a helyszíne a magyar lézeres „first light”-nak, vagyis itt lépett működésbe az első magyar lézerberendezés 1963-ban, nem sokkal lemaradva az 1960-ban megépített amerikai lézerektől. Az azóta eltelt hatvan évben a csillebérci kutatások jól követik a nemzetközi fejlődési irányokat: a Q-kapcsolt nanoszekundumos lézerektől kezdve a pikoszekundumos erősítőrendszereken át a legkorszerűbb femtoszekundumos titán-zafír lézerekig az impulzuslézerek teljes spektrumát felvonultatták az itteni kutatások. A kapcsolódó tudománytörténeti aspektusokat egy másik cikkben mutatjuk be ebben a lapszámban. Ebben a publikációban kizárólag az aktuális lézeralapú kutatásokra koncentrálunk, melyeket a kutatóközpont 6–7 kutatócsoportja túlnyomórészt a femtoszekundumos lézertechnológia legmodernebb eszközeivel végez. Az alábbiakban ezekből a kutatásokból adunk ízelítőt.

## Ultragyors nanooptika

A kutatóközpont femtoszekundumos nanooptikai kutatásai 2006–2007-ben kezdődtek egy hosszú rezonátoros titán-zafír lézerezszcillátor megépítésével. Ezzel a lézerrel sikerült a későbbiekben olyan sikeres és kiemelkedő



1. ábra. A Wigner FK plazmonos pumpa-próba kísérletének illusztrációja a Nano Letters folyóiratban [5]

en idézett budapesti kísérleti eredményeket elérni, melyeknek legelső példája az ún. erősítés-fotoemisszió plazmonikus nanorészecskékről történő kimutatása [1].



Dombi Péter, az MTA doktora, az MTA Lézerfizikai Bizottságának elnöke. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Lendület-csoportvezetője, a szegedi ELI ALPS lézerközpont osztályvezetője. Kutatási területei a lézerfizika, a nanooptika és az ultragyors fény-anyag kölcsönhatási folyamatok vizsgálata.



Szipócs Róbert PhD, okleveles villamosmérnök (BME), lézerfizikus (SZTE, PhD), a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, az R&D Ultrafast Lasers Kft. ügyvezetője. Kutatási területei a speciális diszperziós tulajdonságokkal rendelkező optikai vékonyrétegek, optikai szálak tervezése, minősítése és alkalmazása femtoszekundumos lézerekben, valamint ultragyors (fs-os és ps-os) lézerek és optikai parametrikus oszcillátorok fejlesztése és alkalmazása a nemlineáris mikroszkópiában. Az ultragyors lézertechnológia területén elért eredményeiért számos díjjal tüntették ki.



Kroó Norbert, az MTA rendes tagja, az MTA korábbi főtitkára és alelnöke. Az ELFT korábbi elnöke. Jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont kutatóprofesszor emeritusa. Fő kutatási területei a szilárdtestfizika, az optika és a neutronfizika. Ezen belül a felületi plazmonok, a nanofizika és a nanotechnológia egyes kérdéseivel foglalkozik. Kutatásaihoz a neutronszerelés, a lézerspektroszkópia, a repülésiidő-mérési technika és az alagútmikroszkópia módszereit alkalmazta.



Veres Miklós, az MTA doktora, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének tudományos tanácsadója. Fő kutatási területei a szén alapú nanokompozitok, nanogyémánt, amorf szén, kalkogenidek és más nanoszerkezetek előállítása és tulajdonságainak vizsgálata, valamint az optikai spektroszkópia, ezen belül is a Raman-spektroszkópia, a felületerősített Raman-szórás és a stimulált Raman-spektroszkópia.

A lézerfény által kiváltott elektronok alagutazással történő kilépése az atomok esetében ismert jelenség, azonban sokkal érdekesebb a folyamat, ha fém nanorészecskékről történik a fotoelektron-emisszió. A plazmonikus nanorészecskék sarkainál ugyanis jelentős nanooptikai térnövekményt tudunk létrehozni: a megvilágító lézerfény térerősségének akár százszorosát (egyes források szerint ezerszeresét) is el lehet érni nanométeres térrészben. Az első, nagy visszhangot kiváltó kísérletben azt mutattuk ki, hogy erős lézerterek és nanorészecskék kombinációjával erősen lokalizált nanoemittereket tudunk létrehozni [1].

Az elmúlt 10 évben megvalósult laborfejlesztéseknek köszönhetően további femtoszekundumos erősítőrendszerekkel és elektronspektroszkópiai eszközökkel gazdagodott a nanooptikai laboratórium. Ezek további fontos kísérleteket tettek lehetővé, például új eljárást tudunk kifejleszteni a már említett plazmonos térnövekmény fotoelektronok segítségével történő meghatározására [2]. A csoport új kutatásokat kezdett dielektrikumok ultrarövid (5–6 fs-os) lézerimpulzusokkal történő vezetővé tételével kapcsolatban [3], illetve részben az ELI ALPS Lézeres Kutatóintézetrel együttműködésben ún. forró elektronok detektálására fejlesztettünk ki több, radikálisan új módszert is [4, 5].

A csillebérci kutatások kézzelfogható eredménye egy olyan új optikai chip kifejlesztése is, mellyel ultrarövid lézerimpulzusok fázisát lehet megmérni [3]. Ez az eszköz már az első használatakor meglepő eredményeket hozott: a már 130 éve ismert Gouy-féle fázistolástól való eltérést tudtunk kimutatni vele. A Gouy-féle fázistolás minden fókuszált mechanikai, akusztikus vagy optikai hullámnál fellép: a fókuszon áthaladó hullám egy extra  $\pi$  fázistolást szenved el a vele azonosan haladó síkhullámhoz képest. Ultrarövid lézerimpulzusok esetén az új optikai chip segítségével azonban jelentős eltéréseket fedeztünk fel a Gouy-fázistolástól, ezt a jelenséget leginkább a vizsgált rövid impulzusok extrém széles, 200–250 nm-t lefedő spektruma okozza [3].

A legújabb kísérleteink pedig a lézerfény részecskehullám kettősségére mutattak szép példát [6]. Fotoelektronok kibocsátásakor találtunk ugyanis egy olyan lézerintenzitás-tartományt, ahol az elektronok egyrészt a lézerimpulzus fotonjaival kölcsönhatva, ún. sokfotonos fotoemisszióval lépnek ki, másrészt ugyanekkor a lézerfény elektromágneses tere által befolyásolva, alagutazással és a tér által gyorsítva hagyják el a fémfelületet [6].

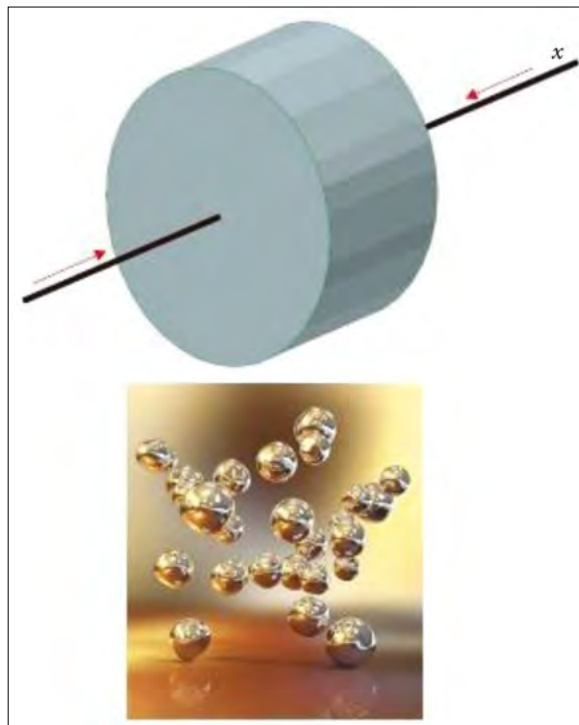
A kapcsolódó jelenségekről, a nanooptika új kutatási területeiről részletes összefoglaló cikket is közzeltünk a *Reviews of Modern Physics* folyóiratban [7].

## Lézeres fúzió

A könnyű atomok magfúziós folyamatának energiatermelési hasznosítása talán a leggazdaságosabb technológia lehetne, és már több évtizede óriási erőfeszítésekkel

próbálják megoldani az ehhez kapcsolódó problémákat, azonban mindeddig csak részsikerekkel. Forró, százmillió fokos hőmérsékleteken, akár csak a Napban olyan nagy sebességűek például a hidrogénatomok, hogy a pozitív töltésű ionok közötti taszítóerőt legyőzve fuzionálhatnak; ennek eredménye pedig jelentős energiafelszabadulás. Ezen folyamat elősegítésébe a lézeres technológiák is beléptek. A legismertebb berendezés ezen a területen a kaliforniai National Ignition Facility (NIF), amelyben 192 lézernyaláb egyenletesen elosztott irányokból világít meg egy aprócska bonyolult céltárgyat. Ennek belsejében egy deutérium-trícium (D-T) jéggömböcske van, melyet egy nehéz atomokból álló köpeny fed. A lézerimpulzusok elpárologtatják ezt a köpenyt, az ellenerő pedig a gömböcskét összenyomva, azt a kívánt hőmérsékletre hevítve beindítja a D-T fúziós folyamatot. Így már másfélszer annyi fúziós energiát sikerült termelniük, mint amennyi a lézerek impulzusából a mintára jutott. A berendezés többmilliárd dolláros beruházást igényelt, a lézerimpulzusok néhányszor tíz ns-osak és összesen 2 MJ energiával bombázzák a céltárgyat. A gömböcske összenyomása lassú, és ez instabilitásokat eredményez.

Van azonban néhány eltérő módszer is, amelyek reményt adhatnak a problémák elkerülésére – egy ilyen az általunk választott módszer is. A magfúziós folyamatot nanotechnológiás alkalmazással próbáljuk elősegíteni, konkrétan úgynevezett lokalizált felületi plazmonok segítségével. Ezeket nanoméretű, például arany nanorészecskéken lézerek segítségével rezonáns módon lehet gerjeszteni még extrém nagy lézerintenzitások esetén is. Előnyös tulajdonságaik: az elektromágneses energia kis



2. ábra. Kétoldalú besugárzás a nanorészecskés sík mintára

térfogatba való összegyűjtése és a pozitív töltésű ionok, például protonok közötti taszítóerő leárnýékolása, továbbá a közeli térrészben lévők gyorsítása. A plazmonok élettartama néhányszor 10 fs, ebben az időtartományban pedig már kiváló impulzusüzemű lézereink vannak. A NIF-lézerekénél milliószor rövidebb impulzusú lézerekkel pedig könnyebb extrém nagy intenzitásokat elérni, ami fontos a fúziós folyamatok beindításánál. Ráadásul nemegyensúlyi folyamatokat indíthatunk el, ahol a NIF esetében tapasztalt instabilitások is elkerülhetők. 192 lézernyalábra sincs szükség, elegendő kettő (2. ábra).

Egy, a Wigner Fizikai Kutatóközpontban működő, 25 mJ energiájú, néhányszor 10 femtoszekundumos impulzusokat kibocsátó titán-zafír lézererősítőnkkel egy sok hidrogénatomos molekulákból álló polimerbe már egyetlen irányból való besugárással a besugárzott impulzusenergiánál minimum hatszor több energiát is sikerült generálnunk rezonáns arany nanorészecskék segítségével. Optikai spektroszkópiai módszerek bevetésével pedig kimutattuk, hogy a keletkezett többletenergia forrása a hidrogénatomok egy részének deutériumatomokká történő fúziója lehet.

A folyamat magfizikai részleteinek tisztázása, optimalizálása, az ehhez szükséges kétoldali besugárással megvalósítása még előttünk álló feladat. Ugyancsak a közeljövő feladata ebben a szegedi ELI ALPS lézerközpont nagyobb intenzitású impulzusokat szolgáltató lézereinek kihasználása is.

## Lézerek a mikroszkópiában

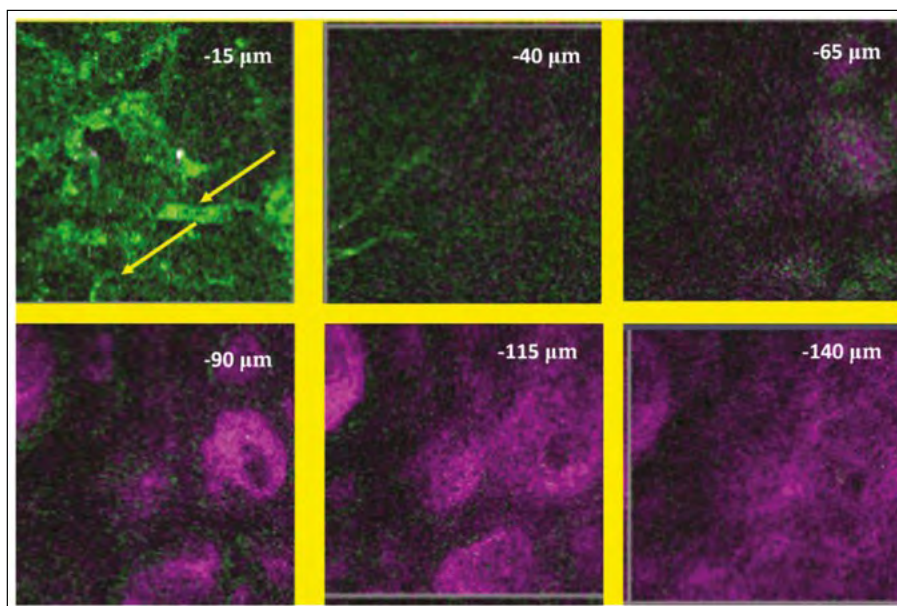
Az „Ultragyors lézerek a nemlineáris mikroszkópiában” kutatócsoport elsősorban olyan pikoszekundumos és femtoszekundumos szilárdtestlézerek és optikai

szállézer kutatásával és fejlesztésével foglalkozik, amelyek az *in vivo* 3D nemlineáris mikroszkópiában (2PEF, SHG, CARS, FLIM stb.) hozhatnak jelentős előrelépést. Ez megnyilvánulhat a képalkotás minőségében (pl. szövettani relevancia, a képalkotás mélysége, felbontása), információtartalmában (pl. a fluorofórok fluoreszcencia-élettartama), a képalkotó rendszer kezelhetőségében (pl. kézben tarthatóság, szálintegráltság) vagy a biztonságos, termikus és fotokémiai hatásoktól mentes működés területén.

Az utóbbi évek eredményei közül érdemes kiemelni azt a szálcsatolt, ~22 MHz ismétlési frekvencián működő hosszú rezonátoros, hangolható, szubpikoszekundumos titán-zafír lézerünket, amelyet egy saját fejlesztésű, kézben tartható, pásztázó nemlineáris mikroszkóphoz [8] fejlesztettünk ki, és eredményesen használtunk különböző daganatos elváltozások diagnosztikájához, illetve a tumorhatárok képi meghatározásához [9] (3. ábra).

Ebben az évben többek között egy olyan erbiummal adalékolt, ~100 fs-os lézerimpulzusokat előállító szál-lézeres erősítőrendszer tesztelésén és optimalizálásán dolgozunk, melynek frekvenciakétszerezésével kiválthatók azok a 760–780 nm-es tartományban (is) működő titán-zafír lézeroszillátorok, amelyeket jelenleg a sejtek metabolikus állapotának jellemzésére használt FLIM (fluorescence-lifetime imaging microscopy, fluoreszcencia-élettartamon alapuló mikroszkópia) módszerrel alkalmaznak a sejtekben szabad, illetve kötött állapotban a NADH molekulák fluoreszcenciájának kétfotonos gerjesztésére.

Ezekben a kutatásokban a csoport partnerei a Semmelweis Egyetem Bőr-, Nemikórtani és Bőronkológiai Klinikája, a Testnevelési Egyetem (a sejtek metabolikus állapotának jellemzése terén), és a Szegedi Tudományegyetem agykutatói.



3. ábra. Egy hemangiómás bőrbioptziáról különböző mélységeken készült femtoszekundumos nemlineáris mikroszkópiás képek (zöld: autofluoreszcencia, lila: a kollagén másodharmonikus jele). Sárga nyílal a hajszálereket jelöltük

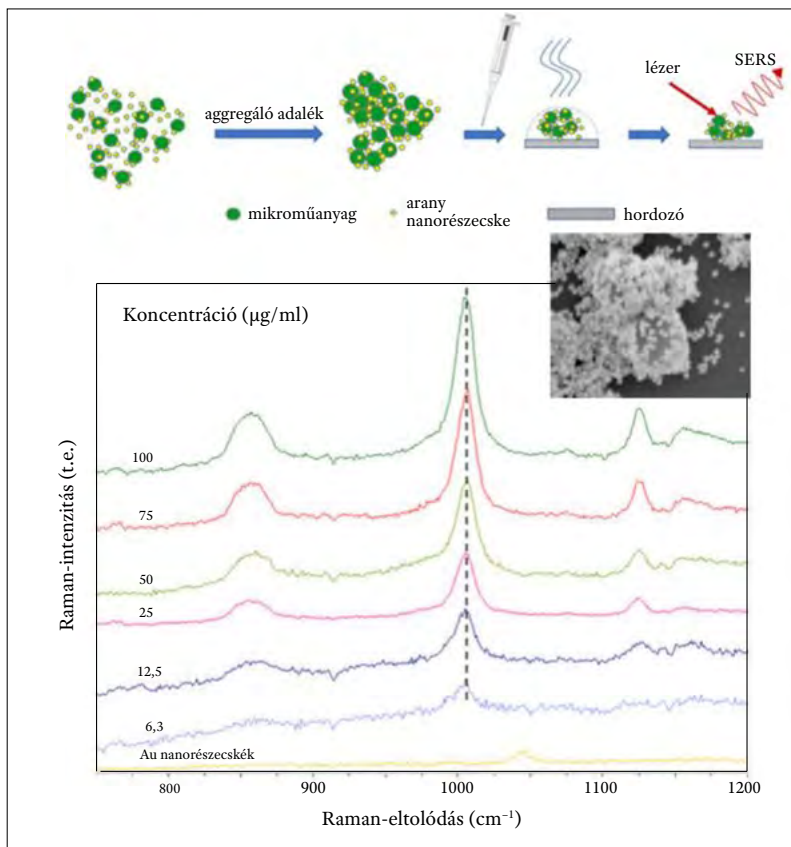
## Spektroszkópai alkalmazások

A Raman-szórás egy rugalmatlan fény-szórási folyamat, melynél – a közeg karakterisztikus rezgésével való kölcsönhatás miatt – a beeső és a szórt foton energiája különbözik. Attól függően, hogy a kölcsönhatás során egy rezgés gerjesztése vagy megsemmisülése történik, a beesőhöz képest a szórt foton energiája kisebb (Stokes–Raman-szórás) vagy nagyobb (anti-Stokes–Raman-szórás) lesz. A Raman-spektroszkópia egy lézer rugalmatlanul szórt fénye spektrumának mérésével a közeg (rendezett és rendezetlen szilárd anyagok, folyadékok és gázok, molekulák) rezgéseinek vizsgálatát teszi lehetővé, amiből következtetni lehet annak összetételére, topológiájára, izotópok jelenlétére, a kristályokban található fononokra, de akár a karakterisztikus rezgéseket befolyásoló fizikai paraméterekre is, mint például a hőmérséklet vagy a belső feszültség.

Csillebércen több évtizede foglalkozunk Raman-spektroszkópiával. Az első mikroszkóppal integrált Raman-spektrométer a kétezres évek elején került az intézetbe, és néhány év alatt szinte folyamatosan maximális kihasználtsággal üzemelő berendezéssé vált. Ugyanez igaz a néhány éve beszerzett utódjára is, amelyet több mint tíz hazai és nemzetközi kutatócsoport használ rendszeresen.

A Raman-spektroszkópia egyik fő alkalmazási területe a rendezett és rendezetlen szénszerkezetek, például az amorf szén vagy a nanokristályos gyémánt szerkezetvizsgálata. A módszer segítségével részletesen jellemeztük ezen anyagok növekedési folyamatát, továbbá az emissziós centrumként működő szerkezeti hibákat tartalmazó mikro- és nanokristályos gyémántszerkezeteket [10]. Kimutattuk, hogy a gamma-sugárzással való polimerizáció során hogyan függ egyes metakrilátalapú polimerek konverziója az alkalmazott oldószertől és a dózistól, és hogyan változik ezek kötésszerkezete és polimerizációjának mértéke nagyenergiás ultrarövid impulzusokkal való kölcsönhatás során. Biofotonikai kutatásaink részeként különböző szöveteken végeztünk Raman-spektroszkópiás vizsgálatokat. A szövetek optikai átlátszóságát növelő adalékok alkalmazásával többszörösére növeltük a Raman-szórás gerjesztési mértékét a bőr, agyhártya és a tüdő esetében, továbbá meghatároztuk ezen szövetek Raman-gerjesztésének optimális feltételeit.

A felületerősített Raman-szórás (SERS) plazmonikus tulajdonságokkal rendelkező fém nanoszerkezeteket vagy nanostrukturált felületeket alkalmaz, melyek közvetlen környezetében a Raman-jel több nagyság-



4. ábra. A mikroműanyagok detektálására szolgáló eljárás lépései (fent) és különböző koncentrációjú polisztirol mikrogömbök felületerősített Raman-spektruma. A fotón egy polisztirol mikrorészecske pástázó elektronmikroszkópos képe látható a felületére aggregálódott arany nanorészecskékkal [11]

rendnyi erősítése lép fel a gerjesztő vagy a szórt fény lokalizált felületi plazmonokkal való rezonáns kölcsönhatása következtében. Az utóbbi években számos különböző, fotolitográfiával előállított strukturált, valamint különböző alakú és méretű arany és ezüst nanorészecskéken alapuló SERS-hordozót fejlesztettünk és jellemeztünk. Meghatároztuk ezek méreteloszlását, plazmonrezonancia-hullámhosszát, és optimális SERS-mérési paramétereit. Az így kapott SERS-hordozókat sikeresen alkalmaztuk mikroműanyagok [11] (4. ábra), glifozát, hisztidin, DNS és más anyagok kis koncentrációban történő detektálására és kimutatására.

Elsősorban biológiai mintákon végzett rezgési spektroszkópiás képalkotás céljából fejlesztettünk ki egy a stimulált Raman-szórás (SRS) és a kétfotonos gerjesztésű fotolumineszcenciát kombináló pástázó lézeres képalkotó mikroszkópot [12]. Ebben egy fix 1040 nm-es és egy hangolható kimenttel rendelkező, femtoszekundumos impulzuslézer szolgál gerjesztő fényforrásként. A két kimenetet az idő- és térbeli szinkronizálás után egy Femtonics mikroszkóp juttatja a mintára. A rendszer az 1600–3500  $\text{cm}^{-1}$  hullámszám-tartományban képes SRS-spektrumok rögzítésére és rezgési spektroszkópiás képalkotásra. Fő újdonsága a spektrális fókuszálás és a differenciális detektálás kombinálása. Előbbi a két gerjesztőnyaláb fs-os impulzusainak azonos csörppara-

méterrel való ps-os impulzusokká nyújtását, utóbbi pedig a zajcsökkentés érdekében az egyik nyaláb impulzusából az SRS-kölcsönhatásból kimaradó, referenciaként használható replikák létrehozását jelenti. A csörpölés révén a rendszer kb.  $100\text{ cm}^{-1}$  hullámszám-tartományban képes a lézer hangolása nélkül, csak a két nyaláb egymáshoz képesti késleltetésének változtatásával SRS-spektrumot felvenni, az SRS-jel jel-zaj aránya pedig megközelíti a sörétzaj szintjét. A kifejlesztett SRS-rendszerből a sajátunk mellett további hármat építettünk a Max Planck Neurobiológiai Intézet, a Birminghami Egyetem és a Pécsi Tudományegyetem számára, ahol elsősorban neurobiológiai és orvosi diagnosztikai kutatásokhoz használják azokat.

#### Köszönetnyilvánítás

A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont munkatársai köszönetet mondanak az NKFIH támogatásáért (TKP2021-NVA-04 és KKP137373 projektek).

#### Irodalom

1. Dombi P., et al.: *Nano Lett.* 13 (2013) 674–678.
2. Rácz P., et al.: *Nano Lett.* 17 (2017) 1181–1186.
3. Hanus V., Fehér B., et al.: *Nature Commun.* 14 (2023) 5068.
4. Budai J., Pápa Z., Petrik P., Dombi P.: *Nature Commun.* 13 (2022) 6695.
5. Sándor P., Lovász B., Budai J., Pápa Z., Dombi P.: *Nano Lett.* 26 (2024) 8024.
6. Bánhegyi B., Kiss G. Z., Pápa Z., Sándor P., Tóth L., Péter L., Rácz P., Dombi P.: *Phys. Rev. Lett.* 133 (2024) 033801.
7. Dombi P., et al.: *Rev. Mod. Phys.* 92 (2020) 025003.
8. Krolopp A., Csákányi A., Haluszka D., Csáti D., Vass L., Kolonics A., Wikonkál N., Szipőcs R.: *Biomed. Opt. Express* 7 (2016) 3531–3542.
9. Krolopp A., Fésűs L., Szipőcs G., Wikonkál N., Szipőcs R.: *LIFE-BASEL* 14 (2024) 231.
10. Himics L., Gál D., Csíkvári P., Holomb R., Koós M., Sulyok A., Pécz B., Veres M.: *Vacuum* 216 (2016) 112493.
11. Mikac L., Rigó I., Himics L., Tolić A., Ivanda M., Veres M.: *Appl. Surf. Sci.* 608 (2023) 155239.
12. Váczai T., Himics L., Bruzzzone M., Veres M., dal Maschio M.: In: *All-Optical Methods to Study Neuronal Function*. Ed.: Papagiakoumou E., Humana Press (2023) pp. 393–416.

## NAGY ENERGIÁJÚ TERAHERTZES KUTATÁSOK A PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEMEN

Krizsán Gergő<sup>1,2,3</sup>, Turnár Szabolcs<sup>1,2</sup>, Polónyi Gyula<sup>1,2,3</sup>, Almási Gábor<sup>1</sup>, Tóth György<sup>1,3,\*</sup>

<sup>1</sup>PTE-TTK Fizikai Intézet, Pécs

<sup>2</sup>HUN-REN–PTE Nagy Intenzitású Terahertzes Kutatócsoport, Pécs

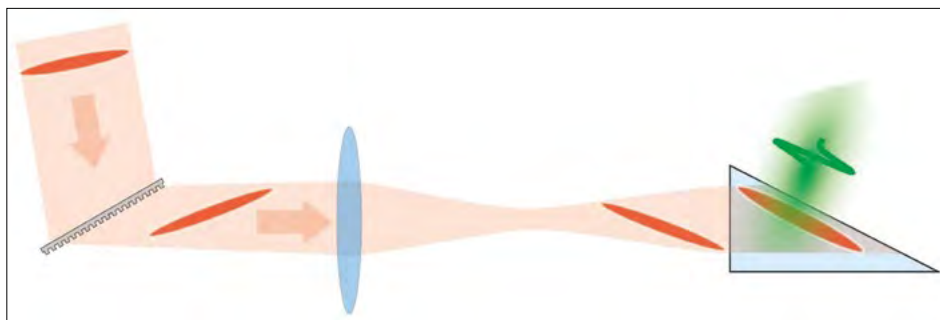
<sup>3</sup>PTE-Szentágotthai János Kutatóközpont, Pécs

\*E-mail: tothgy@fizika.ttk.pte.hu

Terahertzes impulzusoknak nevezzük azokat az elektromágneses impulzusokat, melyeknek központi hullámhossza tipikusan 0,01 és 10 mm közé esik. Az ilyen típusú fényimpulzusok hatékony előállítása hosszú ideig nehezen volt megoldható; a szakirodalom emiatt ezt a spektrális tartományt „THz gap”-nek (THz-es szakadásnak) nevezte. Terahertzes impulzusokat kezdetben fotovezető antennákkal vagy félvezető kristályban való optikai egyenirányítással hozták létre. Az optikai egyenirányítás egy másodrendű nemlineáris optikai effektus,

melynek során egy tipikusan 30–500 fs időtartamú ultrarövid lézerimpulzus halad keresztül a nemlineáris kristályon és ennek következtében THz-es sugárzás keletkezik. A hatékony THz-es sugárzáskeltés feltétele, hogy a pumáló impulzus csoportsebessége megegyezzen a keletkező THz-es sugárzás fázissebességével. Ez a sebességillesztési feltétel néhány félvezető kristály esetén fennáll olyan pumáló lézerhullámhosszak esetén, melyek viszonylag széles körben elérhetőek (Ti:zafír, vagy Yb-lézerekkel). A THz-es sugárzás keltésének hatásfoka azonban ezekben az esetekben esetekben mindössze  $10^{-6}$  nagyságrendű [1].

Jelentős áttörést jelentett, amikor 2002-ben Hebling János megvalósította ötletét, a döntött impulzusfrontú gerjesztést, mely lehetővé tette más kristályok – például a rendkívül nagy nemlineáris együtthatóval rendelkező lítium-niobát (LN) – felhasználását is, melynek segítségével közel tízezerszeresre növelte



1. ábra. Lítium-niobátban történő THz-es sugárzáskeltés sematikus ábrája a pumpa (rózsaszín) és a keletkező THz-es (zöld) impulzusok útjával. A döntött impulzusfrontot ez esetben egy rács segítségével hozzuk létre; a lencsével pedig a rács képét képezzük le a nemlineáris kristályba

a THz-es sugárzaskeltés hatásfokát [2]. Az eljárás során a pumpálás intenzitásfrontját úgy döntjük meg, hogy a pumpa kristályban való terjedési sebességének az intenzitásfrontra merőleges vetülete megegyezzen a keletkező THz-es sugárzás sebességével. Ennek eredményeként a frontra merőleges irányba terjedő THz-es sugárzás együtt halad a kristályban a keltő térrel, vagyis létrejön a sebességillesztés. Az elrendezés sematikus rajzát az 1. ábra mutatja. Azért van szükség prizma alakú LN kristály alkalmazására, hogy a pumpaimpulzus merőlegesen tudjon belépni, a keltett THz-es tér pedig merőlegesen tudjon kilépni a kristályból. A sebességillesztés megvalósításához LN esetén 63°-os döntési szögre van szükség.

A jelen közlemény azon túlmenően, hogy bemutatja a néhány éve a *Fizikai Szemlé*ben megjelent [3] cikken túli eredményeket, kitekintést tesz a Pécsi Tudományegyetemen (PTE-n) zajló aktuális kutatásokról, azok perspektíváiról és jövőképeiről.

## Alkalmazások

Nagy energiájú THz-es impulzusokat ma már rutinszerűen alkalmaznak nemlineáris THz-es spektroszkópiai vizsgálatoknál, melyekkel elsősorban a szabad töltéshordozók nagyfrekvenciás vezetőképességét, a kötött töltések dielektromos hatását, illetve töltéstranszportfolyamatokat vizsgálnak nagy (szubpikoszekundumos) időfelbontással, olyan kvázirészecskék mellett, mint a fononok, polaronok, excitonok és magnonok [4]. A THz-es impulzus alkalmazásának a nagy előnye ezekben a vizsgálatokban az, hogy a vizsgált anyag tiltott sávjánál kisebb fotonenergiával gerjeszt, így például tanulmányozható a forró töltéshordozók dinamikája (hot-carrier dynamics) anélkül, hogy újabb elektron-lyuk pár keletkezne közvetlen belső fotoemisszióval, leegyszerűsítve ezzel a mérések értelmezését.

Csoportunk indium-antimonidban (InSb) lejátszódó impaktionizációt vizsgált, ami töltéstöbbszöröződéshez és az abszorpció megnövekedéséhez vezetett [5]. Vizsgáltuk n-típusú szilícium, gallium-arsenid (GaAs), és germánium mintákban a szabad töltéshordozók nagyenergiájú THz-es impulzusokkal létrehozott nemegyensúlyi eloszlásának az ultragyors dinamikáját. Megfigyelve a szabad töltéshordozók abszorpciójának időbeli változását, követni tudtuk a szabad elektronok nagyobb effektív tömegű völgyekbe szóródását, majd ezt követően a visszaszóródását [6]. Ezekhez a mérésekhez világviszonylatban először alkalmaztunk THz-es pumpálásal és THz-es méréssel (THz pump / THz probe) végzett nemlineáris spektroszkópiai mérőmódszert. Ennek során nagy térerősségű THz-es impulzussal (pumpa) gerjesztjük a mintát, majd egy kis térerősségű THz-es impulzussal (próba) letapogatjuk a mintát a pumpaimpulzustól való különböző időbeli késések mellett. A próbaimpulzusban létrejövő változásokat elektrooptikai mintavételezéssel vizsgáljuk. Így egyszerre tudjuk mérni a THz-es abszorpció és a törésmutató változását is. Kifejlesztettünk és 2019-ben leszállítottunk egy nemlineáris THz-es spektroszkópiai berendezést a szegedi ELI ALPS számára. Ez 10  $\mu\text{J}$  impulzusenergiával és 450 kV/cm-es térerősségű THz-es impulzusokkal a 0,1–1,5 THz-es tartományon képes mérések elvégzésére. Ebben



*Polónyi Gyula az HUN-REN-PTE Nagy Intenzitású Terahertzes Kutatócsoport tagja. Érdeklődési területe a nagy térerősségű terahertzes impulzusok előállítása félvezetőkben és lítium-niobátban, illetve gyenge THz-es jelek detektálása fényhasznosító biológiai rendszerekben.*



*Krizsán Gergő 2024-ben szerezte meg doktori fokozatát a PTE TTK Fizika Doktori Iskolájában. Fő kutatási területe a hatékony és skálázható THz-es impulzusforrások tervezése és megvalósítása, mely területen végzett munkájáért 2023-ban Junior Szentágothai-díjban részesült. Rendszeresen tart laborbemutatókat, tudománypopularizáló előadásokat, és rendszeresen készít fel középiskolás és egyetemi diákokat a TUDOK vagy TDK-versenyekre. A Magyar Fizikushallgatók Egyesülete Pécsi Helyi Bizottságának egyik alapító tagja.*



*Almási Gábor egyetemi tanár, a PTE Fizikai Intézet igazgatója. Fizikusdiplomáját 1984-ben a József Attila Tudományegyetemen, doktori fokozatát 2000-ben a Szegedi Tudományegyetemen szerezte. Kutatási tevékenysége a nagy impulzusenergiájú, közel egyciklusú terahertzes impulzusok keltésére, illetve azok alkalmazásainak számítógépes modellezésére irányul. Az új típusú terahertzes források felületének ultraprecíziós megmunkálását koordinálja. Több nemzetközi és tudományszervezési tevékenységben vesz részt.*



*Turnár Szabolcs tudományos segédmunkatárs, a HUN-REN-PTE Nagy Intenzitású Terahertzes Kutatócsoport munkatársa, 2017-ben fizikusdiplomát, 2022-ben doktori fokozatot szerzett a Pécsi Tudományegyetemen. Fő kutatási területe a töltött részecskék lézermimpulzusokkal történő gyorsításának és manipulációjának vizsgálata, továbbá asztali méretű részecskegyorsító berendezések tervezése és optimalizálása. A Horizon Europe Marie Skłodowska-Curie Actions Doktori Hálózat (MSCA-DN) keretein belül létrehozott EuPRAXIA Doktori Hálózat (EuPRAXIA-DN) egyik témavezetője.*



*Tóth György egyetemi docens, a PTE Fizikai Intézet igazgatóhelyettese. A PTE fizika BSc-képzésének szakfelelőse. 2012-ben fizika-matematika tanári szakos diplomát, 2016-ban fizikusdiplomát szerzett a PTE-n. Bolyai-ösztöndíjas. A Fialat Kutatók Akadémiájának tagja. Kutatásai elsősorban a nemlineáris optika és a nagy energiájú terahertzes impulzusok előállítására irányulnak.*

a berendezésben mind a pumpa, mind a próba THz-es impulzusait LN prizmában állítjuk elő döntött impulzusfrontú gerjesztéssel.

A nemlineáris spektroszkópiai alkalmazásokon túl jelentős potenciállal bír az elektromosan töltött részecskék (elektronok, ionok) THz-es impulzusokkal történő gyorsítása is. Az első lézeres elektrongyorsítást már az 1970-es évek végén megvalósították [7], ám mindmáig erre a célra főként a közeli infravörös tartományon működő lézereket használják. Az elmúlt időszakban azonban a THz-es impulzusok csúcsterősségében bekövetkezett robbanásszerű növekedés lehetővé tette, hogy – az infravörsnél nagyságrendekkel rövidebb hullámhosszú – THz-es impulzusokat is felhasználjunk elektrongyorsításra. Ennek a hullámhosszbeli növekedésnek az eredménye, hogy a tipikusan pikocoulombos elektroncsomagok helyett akár nanocoulombos elektroncsomagok is gyorsíthatók.

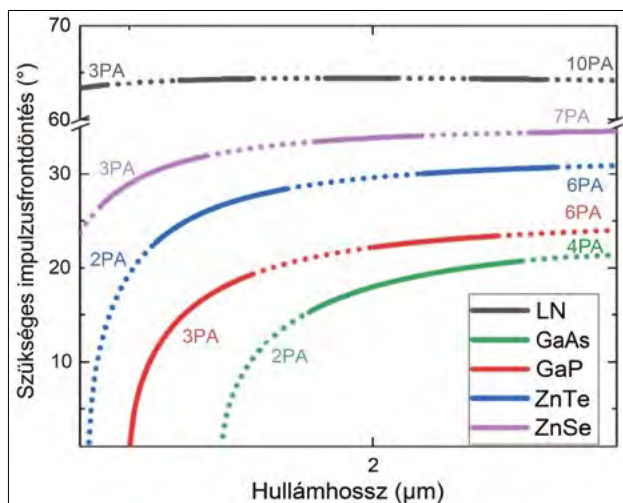
A három éve a *Fizikai Szemlé*ben megjelent [8], THz-es részecskegyorsításról szóló közleményben részletesen bemutattuk a PTE-n végzett kutatásokat a THz-es részecskegyorsítás területén: bemutattuk az általunk javasolt asztali méretű terahertzes részecskegyorsítót, a hullámvezetőben való gyorsítási technológiát, valamint a Coulomb-robbanáson alapuló protongyorsítás módszerét. Így most csak két témát emelünk ki az elmúlt időszakban e területen végzett kutatásainkból.

Vizsgálataink szerint, az ionok gyorsításának hatékony módszere a Coulomb-robbanás jelenségének alkalmazása, amely lehetővé teszi nagy energiájú ionok előállítását. A protonok vagy deuteronok terahertzes impulzusokkal történő gyorsításának folyamatakor az erős elektromos mező hatására a gázplazmában lévő elektronok gyorsan elszakadnak az ionoktól, megtörténik a töltésszeparáció. Ezt követően a visszamaradó pozitív töltésű ioncsomagban az ionok között nagy taszítóerő lép fel. Ez a taszítóerő az ionokat nagy sebességre gyorsítja – ezt a folyamatot nevezzük Coulomb-robbanásnak. Szimulációk segítségével megmutattuk, hogy az elektron- és iongyorsítás hatékonyságára és minőségére jelentős hatással van a kezdeti ionizált plazma alakja. Vizsgáltuk azt a lehetőséget is, amikor a könnyű ionok (proton vagy deuteron) mellett nehezebb ionok is jelen vannak a kezdeti plazmában, például nehézvíz gőzének ionizálása révén. A szimulációk szerint ilyenkor a Coulomb-robbanással keltett ioncsomag keskeny energiaeloszlással rendelkezik. Kétszer kettő egymással páronként szemben haladó, fókuszált THz-es nyalábot alkalmazva az egyenként 25 MV/cm térerősség helyett 100 MV/cm térerősséget lehet előállítani. Ilyen esetben például deutériumgázból keltett plazma esetén Coulomb-robbanással 12,5 nC össztöltésű, 0,22 MeV átlagos (és 0,48 MeV maximális) energiájú, széles (0–0,48 MeV) energiaeloszlású deuteroncsomag kelthető. Nehézvízgőzből keltett plazma esetén viszont 6,25 nC össztöltésű, 0,35 MeV átlagenergiájú keskeny (0,32–0,38 MeV) energiaeloszlású deuteroncsomag kelthető [9].

Ismert, hogy a 0,1 MeV nagyságrendű energiával rendelkező deuteronok alkalmasak deuteron–deuteron ütközéssel történő neutronkeltésre. Megvizsgáltuk a neutronkeltés hatásfokát abban az esetben, amikor a THz-es impulzusok segítségével keltett Coulomb-robbanásból származó, a fenti paraméterekkel rendelkező ioncsomagokat használtuk. A neutronkeltés, vagyis a neutronok előállítása deuteronból többféleképpen történhet, de az egyik leggyakoribb módszer az úgynevezett deuteron–deuteron reakció (D-D reakció). A D-D reakció során két deuteron (D) ütközik egymással nagy energián. Ennek a reakciónak többféle kimenetele lehet, de az egyik lehetőség, hogy egy hélium-3 izotóp és egy neutron keletkezik. Számításaink szerint a neutronkeltés hatásfoka (a keltett neutronok száma osztva a deuteronok számával) nagyobb lehet, mint  $10^{-6}$ .

## Régi-új anyagok THz-es impulzusok keltéséhez

Általában, ha nagy energiájú THz-es impulzusra van szükség, azt jelenleg világszerte az 1. ábrához hasonló elrendezéssel egy prizmaalakú lítium-niobát kristályban állítják elő döntött impulzusfrontú gerjesztéssel. Korábban, az 1990-es években főként félvezető kristályokat használtak THz-es impulzusok keltésére. A keltési hatásfok azonban nagyon korlátozott volt, mivel már viszonylag alacsony ( $1\text{--}2\text{ GW/cm}^2$ ) pumpáló intenzitás mellett is jelentős volt a kristályok két-, vagy háromfotonos abszorpciója. Elsősorban nem a pumpáló impulzus energiájának csökkenése, hanem az abszorpció során keletkező nagy számú szabad töltéshordozó okoz jelentős negatív hatást a THz-es sugárzaskeltés folyamatában: elég itt a Drude-modellre gondolni, a szabad töltések jelentős abszorpciót okoznak az alacsony frekvenciatartományon, így a keletkező THz-es sugárzás is elnyelődik.



2. ábra. A LN (fekete), GaAs (zöld), GaP (piros), ZnTe (kék), cink-sze-lenid (ZnSe, lila) impulzusfrontdöntési szöge a pumpáló hullámhossz függvényében. A folytonos és pontozott vonal váltakozása a többfotonos abszorpció rendjében való változást fejezi ki

A többfotonos abszorpciót jelentősen mérsékelhetjük, ha olyan hosszú pumpáló hullámhosszt használunk, ahol már csak magasabb rendben valósulhat meg többfotonos abszorpció [1]. Ezen hullámhosszak esetén azonban a félvezetőknek kisebb az optikai, mint a THz-es törésmutatója, és emiatt nem teljesül a sebességillesztés feltétele, így döntött impulzusfrontú gerjesztést kell alkalmazni. A 2. ábra mutatja a lítium-niobát és néhány félvezető anyag esetén, hogy mely hullámhosszak esetén milyen rendű többfotonos abszorpció valósul meg, valamint, hogy mekkora impulzusfront-döntést kell alkalmazni az adott hullámhosszon a sebességillesztéshez, ha a cél 1 THz-es sugárzás létrehozása.

Megmutattuk, hogy ZnTe kristály esetén 1,45  $\mu\text{m}$ -es pumpálással 6 GW/cm<sup>2</sup>, 1,7  $\mu\text{m}$ -es pumpálással pedig 16 GW/cm<sup>2</sup> intenzitásnál lesz a THz-es sugárzaskeltés hatásfoka maximális [10]. Utóbbi esetben már csak a négyfotonos abszorpció valósul meg, és 0,7%-os hatásfokkal tudtunk THz-es impulzusokat kelteni. Ez több mint két nagyságrenddel nagyobb, mint a korábban publikált legmagasabb érték.

Amennyiben még hosszabb hullámhosszal pumpálunk, számításaink szerint még nagyobb hatásfok érhető el félvezető kristályokban [11]. Fontos szempont azonban, hogy a 2  $\mu\text{m}$  feletti hullámhosszú pumpáló impulzusokat tipikusan optikai parametrikus erősítés (OPA) révén állítják elő, és minél hosszabb a hullámhossz, annál kisebb a konverziós hatásfok. Modellszámításaink alapján, ha a THz-es sugárzaskeltés hatásfokánál számolunk az OPA hatásfokával is, a félvezető kristály anyagától függően 2–4  $\mu\text{m}$ -nél hosszabb pumpáló impulzus fölé már nem érdemes menni, amennyiben az alaplézerünk 1  $\mu\text{m}$  körüli hullámhosszon működik. Természetesen egy másik lehetőség a hatékonyság növelésére, ha eleve olyan lézerünk van, ami hosszú hullámhosszon működik.

Az utóbbi években olyan szén-dioxid-lézer (CO<sub>2</sub>-lézer) fejlesztettek ki, mellyel 2 ps-nál rövidebb impulzusokat lehet előállítani [12]. Szemben a tipikusan ns-os CO<sub>2</sub>-lézerimpulzusokkal, a ps-os impulzusok már alkalmasak félvezető kristályokban (GaAs, ZnTe, ZnSe) történő THz-es impulzusok keltésére. Megmutattuk, hogy ilyen impulzusokat felhasználva akár 1% feletti hatásfokkal lehet THz-es impulzusokat előállítani [13]. Egy CO<sub>2</sub>-lézerből és félvezető THz forrásból álló rendszer hatásfoka kiemelkedő lehet, hiszen nincs szükség semmilyen frekvenciakonverzióra a hosszú pumpáló hullámhossz előállítása végett.

A LN és félvezető kristályok mellett igen perspektivikusnak tűnik a szerves kristályokkal történő THz-es sugárzaskeltés is. Szemben a szerves nemlineáris kristályokkal, mint amilyen a LN is, a szerves kristályoknál nem ionos vagy kovalens kötés tartja össze a kristályt, hanem a  $\pi$ -kötések delokalizált elektronjai, amelyek könnyebben polarizálhatóak, emiatt nagyobb lesz ezen anyagok nemlineáris válasza is. Ez eredményezi, hogy THz-es frekvenciával oszcilláló MV/cm-es térerősségek és 1%-ot meghaladó hatásfokok érhetőek

el rutinszerűen szerves kristályokban (pl. DAST-ban, vagy OH1-ben) kollineáris fázisillesztéssel, amennyiben megfelelő a pumpáló lézer hullámhossza. Hátrányuk, hogy a megadott hullámhosszon szükséges őket pumpálni (jellemzően 1250 és 1500 nm között), továbbá, hogy alacsony a roncsolási küszöbük, és alacsony frekvenciákon fononabszorpciós csúcsok torzítják az előállítható THz-es spektrumot. Ugyanakkor, mivel a LN és félvezető anyagoknál kisebb a diszperziójuk, jóval nagyobb, lényegében csak a pumpáló impulzushossz által limitált THz-es sávzélességet állíthatunk elő velük.

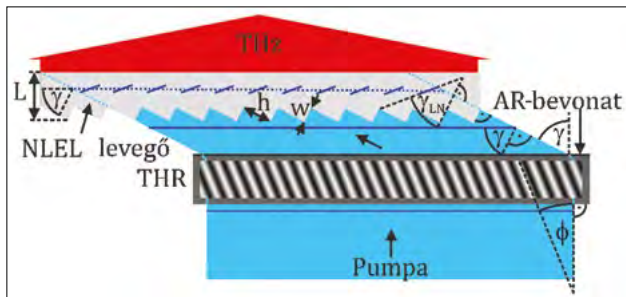
Legfrissebb kutatási eredményeink szerint [14], ha döntött impulzusfronttal pumpáljuk őket, új szabadsági fokot vihetünk a pumpálási feltételek közé, lehetővé téve, hogy a pumpáló lézer kiválasztásánál ne a hullámhossz, hanem a lézer hatásfoka, kényelmes használhatósága, ára, stb. legyen a fő szempont. Előzetes számolásaink szerint, pumpáló lézerként az elterjedt holmiumlézert használva döntött impulzusfrontú pumpálással bizonyos kristályokban akár hatszoros hatásfoknövekedést is elérhetünk. A döntött impulzusfrontú pumpálást pedig létrehozhatjuk térfogati holografikus rácsokkal (THR, részletesen ld. később), így az alkalmazások szempontjából ideális kollineáris elrendezés megőrizhető [14].

## Új típusú THz-es sugárzaskeltési technikák

Kutatócsoportunk nem csupán a nemlineáris kristályok és a pumpaforrások tekintetében tár fel új lehetőségeket, de a döntött impulzusfrontú technika továbbfejlesztésével is jelentős előrelépéseket tett a nagy energiájú THz-es impulzusok előállítása érdekében. Az 1. ábrán bemutatott elrendezés sokat változott a megjelenése óta. Ma már tudjuk például, hogy a lencse helyett teleszkópot használva a leképezéshez jelentősen javíthatunk a leképezési hibákon [15], és így mind a THz-es nyaláb minőségén, mind annak előállítási hatékonyságán. Sőt, ahogy azt korábbi közleményünkben bemutattuk [3], akár teljesen elkerülhetjük a leképezési hibákat, vagy elkerülhetjük azokat a hibákat, melyeket a kristályprizma alakja okoz.

Az elmúlt években kutatócsoportunk jelentős erőfeszítéseket tett annak érdekében, hogy olyan THz-es forrásokat javasoljon, melyeknél mind a leképezési, mind a kristályprizma alakjából adódó korlátozó tényezők megszűnnek. A forrás leképezésmentes, a használt kristály pedig prizma helyett sík-párhuzamos. Ezáltal méretében és az előállított THz-es energiában is korlátozó tényező nélkül skálázható új típusú THz-es forrásokat javasoltunk és vizsgáltunk kísérleti úton, melyek közül néhányat már a [3] közleményben is bemutattunk.

A 3. ábrán látható elrendezés esetén a pumpa merőlegesen esik a térfogati holografikus rács (THR) felületére, melyről hatékonyan szóródik egy rendbe [16]. A merőleges beesés következtében az impulzusfront dőlésszöge megegyezik a diffrakció szögével. A nemlineáris

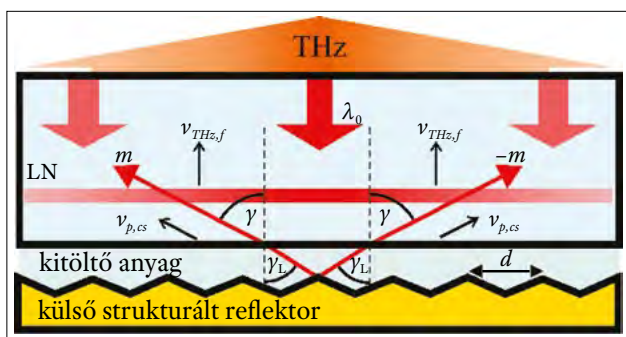


3. ábra. Térfogati holografikus rácsot és mikromegmunkált sík-párhuzamos LN-ot tartalmazó THz-es forrás

kristály mikrostrukturált felületét elérve a pumpa folytonos impulzusfrontja szegmentálttá válik (kék vonalak a kristály belsejében), de az átlagos impulzusfront (szaggatott vonal) dőlése nem változik meg. A THz-es sugárzás az átlagos impulzusfrontra merőlegesen keletkezik és lép ki a kristály hátoldalán.

Az első, egyelőre kicsi pumpaenergia és foltméret mellett megvalósított kísérlet megmutatta, hogy az elrendezéssel jó minőségű THz-es nyaláb állítható elő, és a keltési hatások megközelítette a hagyományos elrendezéssel elérhető hatásfokot. A mikrostrukturált felület minőségének javításával várható, hogy a forrás keltési hatásfoka túllépi majd a konvencionális elrendezését.

A 4. ábra egy másik lehetséges elrendezést mutat [17]. A forrás mindössze három részből áll. A THz-es sugárzás keltésére szolgáló sík-párhuzamos nemlineáris kristályból, a külső strukturált reflektorból, mely létrehozza az impulzusfront dőlést, valamint egy kitöltő anyagból, mely hatékony becsatolást tesz lehetővé az első kettő között.



4. ábra. Külső strukturált reflektort tartalmazó, reflexiós üzemmódban működő THz-es elrendezés

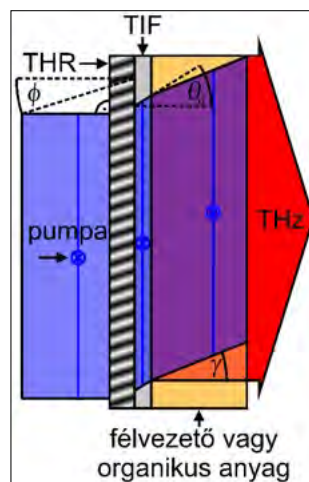
A pumpanyaláb merőlegesen esik a kristályra és sebességillesztés hiányában az ábrán fentről lefelé haladva nem kelt THz-es sugárzást amíg a hátoldalig terjed a kristályban. Itt kilép a kristályból és a külső strukturált reflektorról  $\pm m$  rendekben szóródik, majd visszalép a kristályba, ahol létrejön a szükséges impulzusfrontdöntés. Egyszerű geometriai megfontolással belátható, hogy az impulzusfront dőlésszöge meg fog egyezni a kristályban való  $\gamma$  terjedési szöggel. A döntött impulzusfrontra (víz-

szintes piros vonal) merőlegesen terjedő THz-es sugárzás keletkezik, mely merőlegesen lép ki a sík-párhuzamos nemlineáris kristályból (felfelé).

A külső strukturált reflektor használatát az indokolja, hogy a nemlineáris anyag felülete (ellentétben a fém felületekkel) jelenleg még csak nehézkesen, nem elég precízen és jó minőségben munkálható meg. Előnye továbbá, hogy megfelelően nagy törésmutatójú kitöltő anyag használata esetén a diffrakció szöge  $\leq 60^\circ$ , ami esetén a szórt nyaláb nem ütközik a reflektor szomszédos periódusába, így növekedhet a diffrakciós hatásfok.

Kitöltő anyagként használható nagy törésmutatójú folyadék, amit nanopor folyadékban való diszpergálásával lehet elérni. Kalkogenidüvegek is megfelelőek lehetnek erre a célra alacsony olvadáspontjuknak és megfelelően nagy törésmutatójuknak köszönhetően. Utóbbi esetben akár a nemlineáris anyag felületére felvitt kalkogenidüveg közvetlen mikrostrukturálása is lehetséges.

Amennyiben az impulzusfront szükséges dőlési szöge (és a nemlineáris anyag törésmutatója) nem túl nagy, mindösszesen egy THR is elég annak létrehozására. Ez az eset – ahogy azt korábban láttuk – fennáll félvezető (lásd 2. ábra) és szerves kristályok használata esetén [14, 18]. Ilyenkor nem szükséges a mikrostrukturáló megmunkálás, és az elrendezés csak két optikai elemet tartalmaz, a rácsot, illetve a sík-párhuzamos félvezető vagy organikus nemlineáris kristályt. A kettő között itt is szükséges egy kitöltő anyag használata, de ebben az esetben megfelelő a kommersziális törésmutató-illesztő folyadékok vagy UV-re keményedő optikai ragasztók használata. Ilyen elrendezést mutat az 5. ábra. A pumpanyaláb ezen elrendezés esetében a THR-re esik merőlegesen, melyről egy rendbe szóródik hatékonyan. Általában a kitöltő és a nemlineáris anyag határán is megtörik a fény, és a nemlineáris anyagban a sebességillesztéshez megfelelő impulzusfront-dőlés jön létre. A THz-es sugárzás a döntött impulzusfrontra merőlegesen terjed és lép ki a nemlineáris anyagból.



5. ábra. Térfogati holografikus rácson keresztül pumpált sík-párhuzamos félvezető vagy organikus kristályt tartalmazó THz-es elrendezés

# Többciklusú terahertzes impulzusok előállítása

Számos alkalmazás esetén a rövid impulzusokkal szemben előtérbe kerülnek a keskeny sávzélességű, többciklusú THz-es impulzusok. Ilyen impulzusokat elsősorban periodikusan polarizált LN kristályban állítanak elő. Mivel a periódus – az előállítani kívánt frekvenciától függően – tipikusan a 100–600  $\mu\text{m}$ -es tartományba esik, nem feltétlenül szükséges a kristályt hagyományos módon, nagy térerősségű elektromos térrel polarizálni, helyette vékony kristálylapokat (wafereket) tehetünk egymás mellé ellentétes irányú polarizációval és anti-reflexiós réteggel ellátva.

Egy 0,15 THz-es többciklusú THz-es impulzus előállításához a lapkák vastagsága kissé több mint 0,3 mm. Egy tíz lapkából álló (5 ciklusú) struktúra 100  $\text{GW}/\text{cm}^2$ -es intenzitású pumpálás esetén 0,1%-os hatásfokkal állít elő 5 ciklusú THz-es impulzust. Megmutattuk, hogy a THz-es sugárzaskeltés hatásfoka jelentősen növelhető, ha a pumpáláshoz nem egy impulzust, hanem impulzussorozatot használunk [19]. Egy öt impulzusból álló impulzussorozattal, ahol az impulzusok egymást 1/0,15 THz = 6,6 ps-onként követik, a keltési hatások már megközelítik a 0,4%-ot. A keletkező impulzus pedig 9 ciklusú lesz.

## Zárszó

A kutatócsoport aktivitását jól tükrözi, hogy jelenleg egy OTKA és két Európai Unió által támogatott projekt megvalósításán dolgozik. Az OTKA-pályázat kimondottan félvezetőalapú THz-es forrásokra koncentrál. A Horizon Europea EIC Pathfinder Open TWAC (Terahertz Wave Accelerating Cavity) projekt célja egy terahertzes sugárzással hajtott kompakt és nagy hatékonyságú részecskegyorsító fejlesztése. E projektben elsősorban a többciklusú terahertzes impulzusforrás fejlesztése a feladatunk. A harmadik projekt pedig az 5 GeV energiájú elektronnyaláb lézeres gyorsítóval történő előállítását célzó EuPRAXIA projekt. Ehhez kapcsolódik még az a Marie Skłodowska-Curie Actions Doktori Hálózat, amelynek keretében összesen 12 EU-ösztöndíjas PhD-hallgató közül egynek a képzése az intézetünkben valósul meg. Az ő doktori témájának a középpontjában egy terahertzes sugárzással hajtott dielektrikus gyorsító megvalósítása és paramétereinek optimalizálása áll.

## Köszönetnyilvánítás

A munkát az OTKA-K-147409 számú „Félvezetőalapú terahertzes impulzusforrások energiájának növelése” c. OTKA-pályázat támogatja.

## Hivatkozások

1. Tóth Gy., Polónyi Gy., Hebling J.: Tilted pulse front pumping techniques for efficient terahertz pulse generation. *Light: Science & Applications* 12 (2023) 256.
2. Hebling J., Almási G., Kozma I. Z., Kuhl J.: Velocity matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation. *Opt. Express* 10 (2002) 1161–1166.
3. Pálfalvi L., Fülöp J. A., Tóth Gy., Almási G., Hebling J.: Extrém nagy térerősségű terahertzes impulzusok előállítása lítium-niobátban. *Fizikai Szemle* 69/7–8 (2019) 255–259.
4. Salén P., Basini M., Bonetti S., Hebling J., Krasilnikov M., Nikitin Y. A., Shamuilov G., Tibai Z., Zhaunerchyk V., Goryashko V.: Matter manipulation with extreme terahertz light: Progress in the enabling THz technology. *Physics Reports* 836–837 (2019) 1–74.
5. Hoffmann M. C., Hebling J., Hwang H. Y., Yeh K. L., Nelson K. A.: THz-pump/THz-probe spectroscopy of semiconductors at high field strengths. *J. Opt. Soc. Am. B* 26 (2009) A29–A34.
6. Hebling J., Hoffmann M. C., Hwang H. Y., Yeh K. L., Nelson K. A.: Observation of nonequilibrium carrier distribution in Ge, Si, and GaAs by terahertz pump-terahertz probe measurements. *Phys. Rev. B* 81 (2010) 035201.
7. Tajima T., Dawson J. M.: Laser electron accelerator. *Phys. Rev. Lett.*, 43 (1979) 267.
8. Tibai Z., Turnár Sz., Kovács B., Pálfalvi L., Almási G., Hebling J.: Részecskegyorsítás extrém nagy térerősségű terahertzes impulzusokkal. *Fizikai Szemle* 71/2 (2021) 47–52.
9. Turnár Sz., Tibai Z., Pálfalvi L., Korpa Cs., Almási G., Hebling J.: Charge separation for particle acceleration by strongly focused single-cycle terahertz pulse. Előkészítés alatt.
10. Polónyi Gy., Monoszalai B., Gaumann G., Rohwer E. J., Andriukaitis G., Balciunas T., Pugzlys A., Baltuska A., Feurer T., Hebling J., Fülöp A. J.: High-energy terahertz pulses from semiconductors pumped beyond the three-photon absorption edge. *Opt. Express* 24 (2016) 23872–23882.
11. Mbithi M. N., Tóth Gy., Tibai Z., Benabdelghani I., Nasi L., Krizsán G., Hebling J., Polónyi Gy.: Investigation of terahertz pulse generation in semiconductors pumped at long infrared wavelengths. *J. Opt. Soc. Am. B* 39 (2022) 2684–2691.
12. Polyanskiy M. N., Pogorelsky I. V., Babzien M., Palmer M. A.: Demonstration of 2 ps, 5 TW peak power, long-wave infrared laser based on chirped-pulse amplification with mixed-isotope CO<sub>2</sub> amplifiers. *OSA Contin.* 3 (2020) 459–472.
13. Tóth Gy., Illés G., Nazymbekov G., Mbithi N., Almási G., Hebling J.: Possibility of CO<sub>2</sub> laser-pumped multi-millijoule-level ultrafast pulse terahertz sources. *Sci. Rep.* 14 (2024) 999.
14. Polónyi Gy., Tibai Z., Tóth Gy., Krizsán G., Hebling J.: Numerical study on the potential enhancement of organic terahertz sources through tilted pulse front pumping. Beküldve.
15. Tokodi L., Hebling J., Pálfalvi L.: Optimization of the tilted-pulse-front terahertz excitation setup containing telescope. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves* 38 (2018) 22–32.
16. Krizsán G., Tibai Z., Tóth Gy., Nugraha S. P., Almási G., Hebling J., Fülöp J. A.: Uniformly scalable lithium niobate THz pulse source in transmission geometry. *Opt. Express* 30 (2022) 4434–4443.
17. Krizsán G., Tibai Z., Hebling J., Pálfalvi L., Almási G., Tóth Gy.: Lithium niobate and lithium tantalate based scalable terahertz pulse sources in reflection geometry. *Opt. Express* 28 (2020) 34320–34327.
18. Krizsán G., Tibai Z., Tóth Gy., Hebling J., Pálfalvi L.: Easily variable and scalable terahertz pulse source based on tilted-pulse-front pumped semiconductors. *Opt. Express* 32 (2024) 18909–18915.
19. Nasi L., Illés G., Hebling J., Tóth Gy.: Comparative analysis of optical rectification-based multicycle terahertz generation techniques. Előkészítés alatt.

**fizikaiszemle.elft.hu**

A honlapon megtalálhatja régebbi és új lapszámainkat, valamint számos mellékletet!

# LÉZERES KUTATÁSOK A BME TTK FIZIKAI INTÉZETÉBEN

Barócsi Attila<sup>1</sup>, Bokor Nándor<sup>2</sup>, Bordács Sándor<sup>2</sup>, Erdei Gábor<sup>1</sup>, Gádoros Patrik<sup>1</sup>, Holló Csaba<sup>1</sup>, Koppa Pál<sup>1</sup>, Kornis János<sup>2</sup>, Lenk Sándor<sup>1</sup>, Maák Pál<sup>1</sup>, Papp Zsolt<sup>2</sup>, Sarkadi Tamás<sup>1</sup>, Simon Ferenc<sup>2,\*</sup>

BME Fizikai Intézet, <sup>1</sup>Atomfizika Tanszék, <sup>2</sup>Fizika Tanszék, Budapest

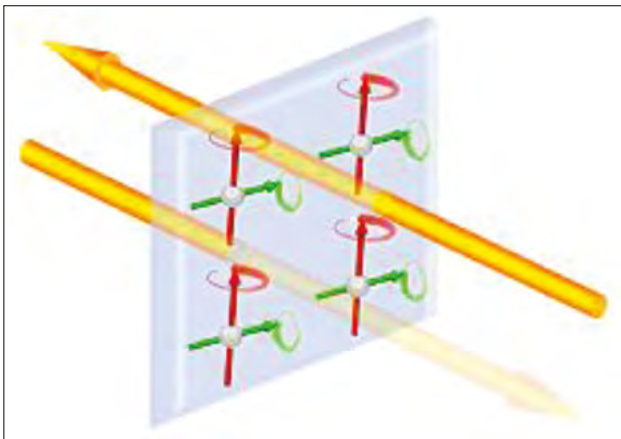
\*E-mail: simon.ferenc@ttk.bme.hu

## Bevezetés

A BME Fizikai Intézete évtizedek óta aktív kutatásokat végez a lézerek fejlesztése és alkalmazása területén. Az egyik fontosabb mérföldkőként ez a tudományos műhely volt Krausz Ferenc Nobel-díjas fizikus első munkahelye 1985-től, ahol megismerkedett a lézerek fejlesztésével Bakos József csoportjában az akkori Kísérleti Fizika Tanszéken – amely mára a Fizika Tanszékkel egybeolvadt. Az intézet jelenlegi három tanszéke közül kettő foglalkozik lézeres kutatással és fejlesztéssel.

## Magnetooptikai kutatócsoport

A Bordács Sándor, Kézmárki István és Szaller Dávid részvételével működő *Magnetooptikai Spektroszkópia Kutatócsoport* különleges mágneses anyagok vizsgálatát végzi ultragyors lézerek segítségével előállított THz-es sugárzás felhasználásával. A módszer lényege, hogy az



1. ábra. Az irányfüggő kettőtörés jelenségét szemléltető ábra. A két különböző irányban haladó fényre a transzmisszió nagysága eltérő, ezáltal optikai egyenirányítás hozható létre. *Forrás:* [1]

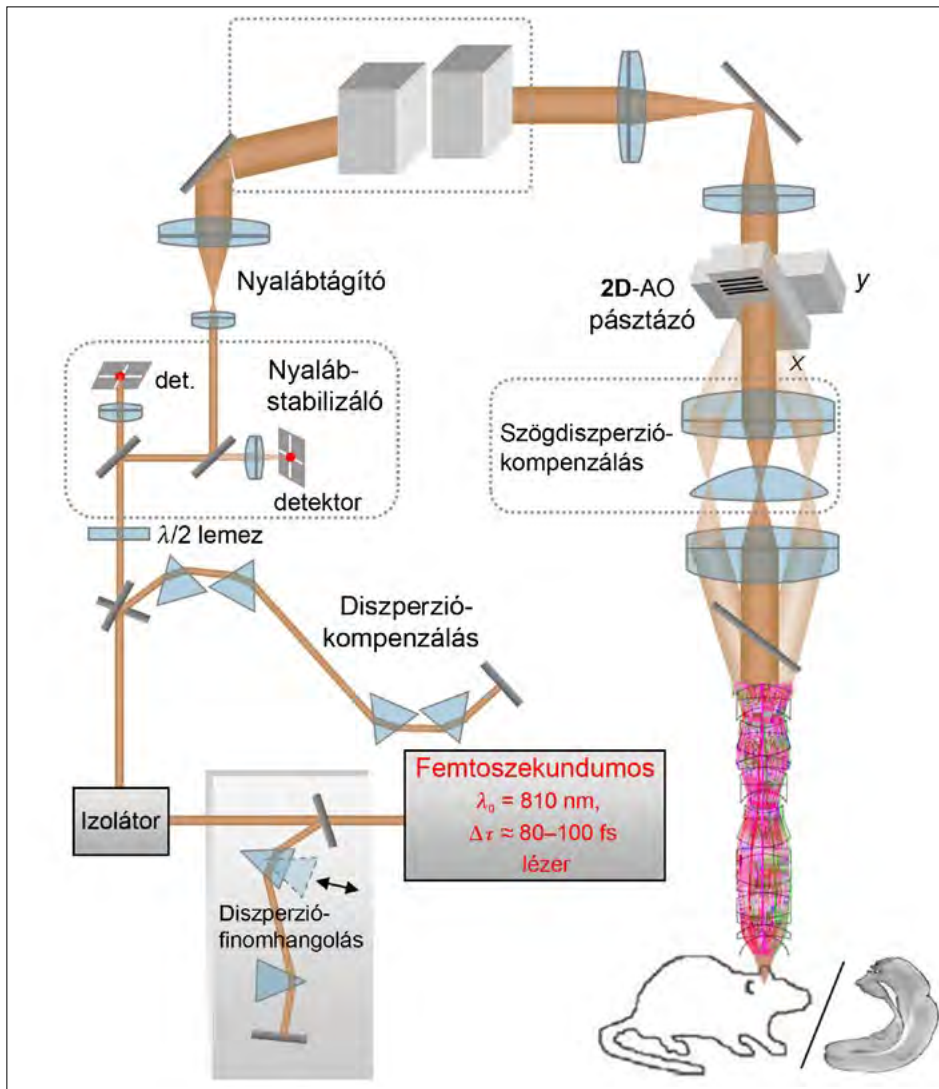
ultragyors, femtoszekundumos lézerimpulzusok egy félvezetőben töltéshordozókat keltenek, melyek a kibocsátó antenna két elektródájára kapcsolt feszültség terében gyorsulnak, és a 100 GHz – 7 THz tartományban elektromágneses sugárzást bocsátanak ki. Más intenzitásmérésen alapuló spektroszkópai módszerekkel szemben a THz-es spektroszkópia előnye, hogy egy másik antenna segítségével közvetlenül a fény elektromos terének időbeli változását detektálja. A vizsgált anyagok köre kiterjed a multiferroikus kristályokra, a magneto-elektromos anyagokra és olyan különleges anyagokra, melyekben mágneses örvények (ún. skyrmionok) jelennek meg. A multiferroikus anyagokban a szokásos ferro-elektromos (ahol a mikroszkopikus elektromos dipólusmomentumok rendeződnek) és ferromágneses (ahol a mágneses dipólusmomentumok rendeződnek) jelenségek szimultán, és egymáshoz csatolódva jelennek meg. Ennek a magneto-elektromos csatolódásnak az egyik megnyilvánulása az ún. irányfüggő kettőtörés.

A hagyományos lineáris kettőtörésnél az anyag főirányaiban polarizált fény törésmutatója eltérő, míg ennél a jelenségnél a törésmutató (és az abszorpciók együttható) a fény terjedési irányának megfordítására változik meg [2]. Az irányfüggő kettőtörésnek a jövőbeni szilárdtest-alapú optoelektronikai eszközökben várható jelentős alkalmazása, ami a hagyományos elektronikai eszközöket forradalmasíthatja.

## Ultragyors lézeres kutatócsoport

Maák Pál és Barócsi Attila az ultragyors lézerek fejlesztésében és alkalmazásában aktív. A Femtonics Kft.-vel együttműködve ún. kétfotonos mikroszkópiát fejlesztettek idegtudományi kutatásokhoz. A kétfoton-mikroszkópia egy fejlett képalkotási technika, amely lehetővé teszi a biológiai szövetek mélyén történő nem invazív vizsgálatot. A módszer lényege, hogy a biológiai

Barócsi Attila, PhD, egyetemi docens, tanszékvezető-helyettes. Kutatási témái a kvantumoptika, a fluoreszcencia és alkalmazott optika. Bokor Nándor, PhD, egyetemi docens. Érdeklődési területei a holográfia, a kvantumoptikai és az optikai népszerűsítő oktatása. Bordács Sándor, PhD, egyetemi docens. A BME magneto-optikai csoportjának vezetője, érdeklődése az új anyagok nemlineáris optikai tulajdonságainak vizsgálata. Erdei Gábor, PhD, egyetemi docens. Kutatási témái a kvantumoptika, a fotonika, és az alkalmazott optika. Gádoros Patrik, tudományos segédmunkatárs. Kutatási témája a lézerindukált letörési spektroszkópia. Holló Csaba, PhD-hallgató. Disszertációjának témája az alkalmazott kvantumoptika és új eszközök fejlesztése. Koppa Pál, az MTA doktora, egyetemi tanár, tanszékvezető. Gábor Dénes-díjas, kutatási témái a kvantumoptika, a fotonika és az alkalmazott optika. Kornis János, PhD, egyetemi docens. Kutatási témái a holográfia, illetve a szálak és szabadterű kvantumkulcs-megosztásos optikai rendszerek fejlesztése. Lenk Sándor, PhD, egyetemi docens. Kutatási témája a biológiai és félvezetős rendszerek fluorimetriája. Az ELFT Budó Ágoston-díjának 2020-as díjazottja. Maák Pál, PhD, egyetemi docens. Érdeklődési területe az ultragyors lézerek alkalmazása, a kétfoton mikroszkópia fejlesztése biológiai rendszerek vizsgálata számára. Az ELFT Budó Ágoston-díjának 2017-es díjazottja. Papp Zsolt, PhD, egyetemi adjunktus. Kutatási témái a holográfia, illetve a szálak és szabadterű kvantumkulcs-megosztásos optikai rendszerek fejlesztése. Sarkadi Tamás, PhD, egyetemi docens. Kutatási témái a kvantumoptika és az alkalmazott optika. Simon Ferenc, az MTA doktora, egyetemi tanár. Érdeklődési területe a kombinált optikai-mágneses rezonancia spektroszkópai módszerek fejlesztése.



2. ábra. Az akusztooptikai pásztázó kétfoton-mikroszkóp felépítése

szövetek a közeli infravörös tartományban átlátszóbbak, mint láthatóban. Ezáltal a közeli infravörös fotonok bejuthatnak például az agyfelület felszínébe (akár 1 mm mélységig); majd ott a nagy impulzusenergia miatt nemlineáris effektusok révén látható tartományban történik fénykibocsátás ún. kétfoton-abszorpciós fluoreszcencia révén. Ennek az eljárásnak számos előnye van az egyfoton-mikroszkópiával szemben, beleértve a mélyebb szövetpenetrációt és a csökkentett fotokárosodást, illetve a nagyobb optikai felbontást és kontrasztot, mivel a gerjesztés csak a fókuszpontban történik, így minimális a nem kívánatos fotokémiai hatás a minta többi részén.

Ez a technika különösen hasznos az élő szövetek, például agyszövetek *in vivo* vizsgálatában, ahol lehetőség nyílik a sejtek dinamikus folyamatainak nagy felbontású megfigyelésére anélkül, hogy károsítanánk az élő szervezetet. A kétfoton-mikroszkópia alkalmazása forradalmasította a neurobiológiai kutatásokat és más biológiai tudományágakat, mivel lehetővé teszi a sejtek és szubcelluláris struktúrák háromdimenziós képalkotását élő rendszerekben. A kétfoton-mikrosz-

kóp egyik kritikus eleme a lézernyaláb igen gyors és torzításmentes pásztázását lehetővé tevő pásztázó (szkennelő) rendszer. Ezt lehetséges elvben optikai elemek mechanikai mozgatásával is elérni, azonban a csoport ún. akusztooptikai pásztázót fejlesztett és szabadalmaztatott erre a célra [3]. Az akusztooptikai pásztázók lényege, hogy piezokristályok segítségével egy hanghullámot hoznak létre a kristályban, ahol a hanghullám csomópontjainak megfelelő periodikus törésmutató-eloszlás jön létre, és ez a fényt optikai rácsként elhajlítja, ezáltal a fény elektronikus úton történő pásztázása lehetővé válik.

## Kvantumoptika és fotonika kutatócsoport

Holló Csaba, Erdei Gábor, Barócsi Attila, Sarkadi Tamás és Koppa Pál részvételével kvantumoptikai kuta-

tások kezdődtek meg néhány éve a HunQuTech pályázat és a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium program keretében. Az optikai kvantuminformációs rendszerek alapvető eszközei a kvantumos tartományban működő fényforrások és az egyfoton-detektálásra alkalmas eszközök. A kutatás célja a források és detektorrendszerek fejlesztése és alkalmazása a kvantumkommunikáció és -érzékelés területén. A csoport kifejlesztett egy moduláris, robusztus, hordozható, üvegszáliba csatolt összefonódott fotonokat keltő fotonpárforrást, amely a szabadtéri kommunikációban használatos 810 nm-es hullámhosszon működik, és alkalmas kvantumos titkosítási protokollok megvalósítására [4, 5]. A forrás jelenleg a BME VIK Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékén üzemel egy szabadtéri kvantumkommunikációs kísérlet részeként. A csoport emellett aktívan részt vesz a regionális és európai szintű optikai szál kvantumhálózat kialakításában, többek között a telekommunikációs hullámhossz-tartományban működő fotonpárforrás fejlesztésével is.

A fejlesztéshez szükséges a források karakterizálása, melyhez a csoport sok esetben saját mérőberendezéseket



3. ábra. A csoport által fejlesztett polarizációban összefonódott fotonpárforrás működés közben a BME Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszékén

is készít. Az összefonódás tényének megállapításához, illetve mértékének jellemzéséhez polarizációsállapot-tomográfiát használnak. A hagyományos tomográfia alkalmazása mellett a csoportban egy saját fejlesztésű kétfotonos polarizációsállapot-tomográf is készül. A források fotonstatisztikájának vizsgálatához Hanbury-Brown-Twiss-féle (HBT) intenzitásinterferométert is építettek. A HBT-interferométer kulcsfontosságú eszköz a kvantumoptikában, amely a fényforrásból érkező foton-beütésszámok autokorrelációját méri, ezáltal képes annak megállapításra, hogy egy forrás valódi egyfotonforrásként viselkedik-e, illetve fotonpárforrások esetén tekinthető-e előrejelzett egyfotonforrásnak. A fényforrások spektrális tulajdonságainak vizsgálatához alacsony fotonszám mérésre alkalmas, az optikai szálak bemenet-

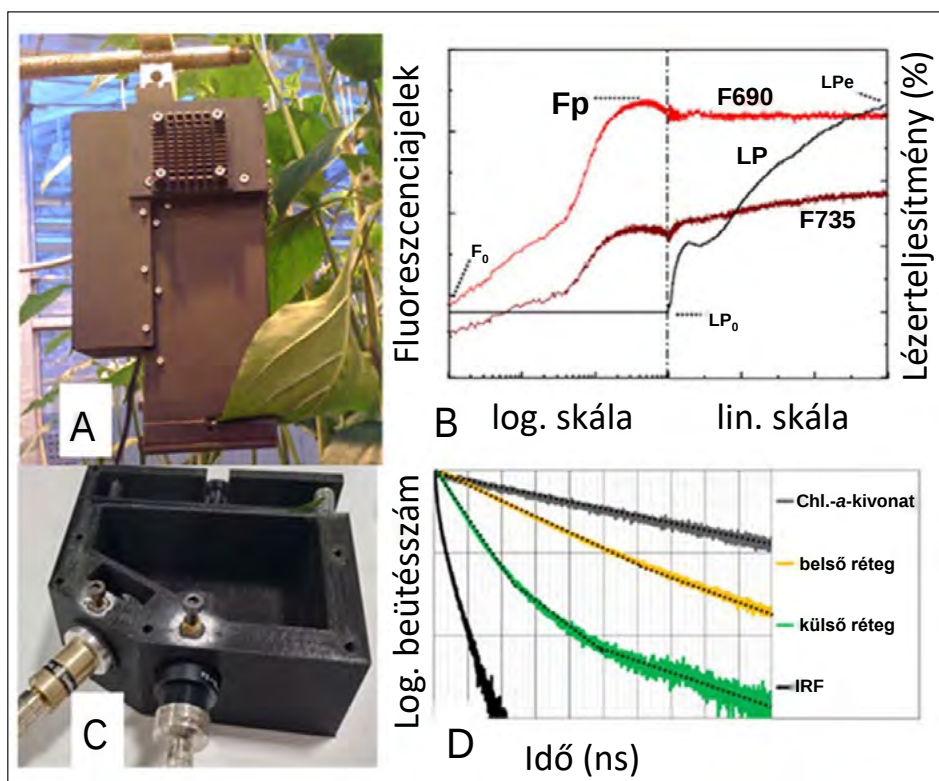
tel kompatibilis spektrométert is fejlesztenek.

## Fluorimetria kutatócsoport

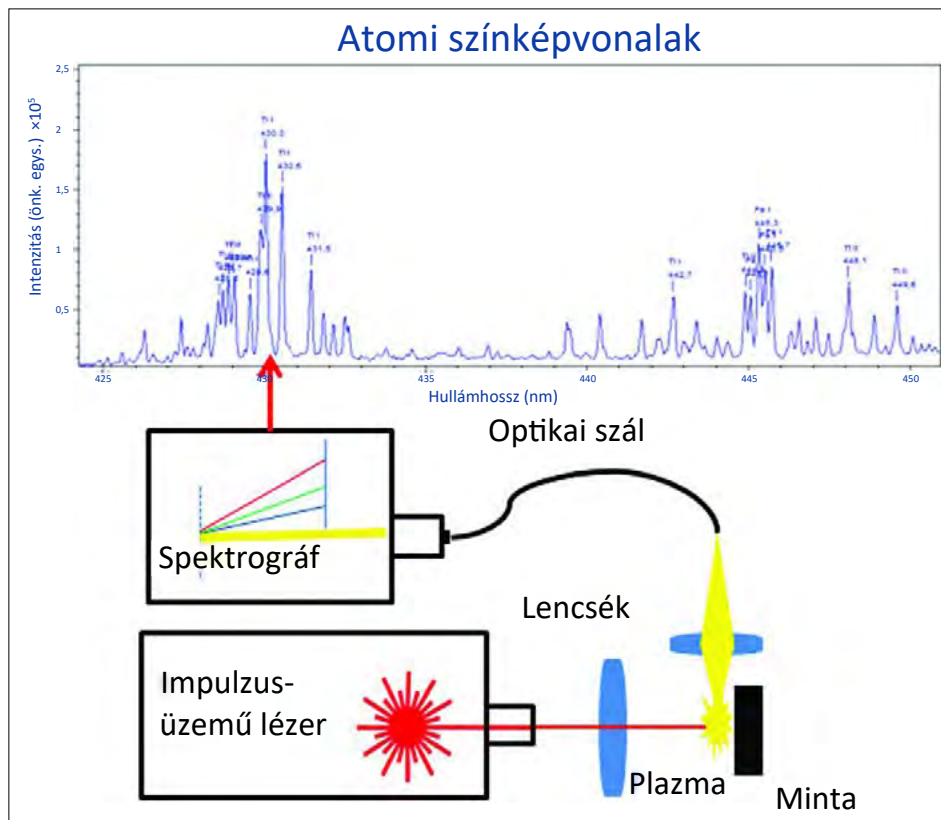
A BME Atomfizika Tanszékén évtizedek óta foglalkozunk növényi fluoreszcenciajel vizsgálatával, amely kutatásokat jelenleg *Barócsi Attila*, *Kocsányi László* és

*Lenk Sándor* vezetik. A módszer azon alapul, hogy a fotoszintézis során elnyelt fényenergia egy részét a klorofill-*a* molekulák fluoreszcens fény formájában visszasugározzák. A klorofilok fluoreszcensfény-kibocsátása így a fotoszintetikus működés egyik komplementer folyamata. Ügyesen megválasztott gerjesztési és detektálási eljárások segítségével a fluoreszcenciajelből a fotoszintetikus folyamatok hatásfokára adhatunk becslést.

Az első ilyen készülék kifejlesztését a Fekete-erdőben zajló erdőpusztulás okainak helyszíni kivizsgálása motiválta az 1990-es évek elején. A Karlsruhei Egyetem Botanika 2 Intézetével közösen egy 633 nm-es, 5 mW-os He-Ne lézerrel gerjesztő, optikai szűrőkkel bontó, valamint Si detektorok segítségével detektáló mérőberendezést alkottunk. Később a hordozható eszköze-



4. ábra. (A) Saját fejlesztésű üvegházi, szenzorserű mérőműszer. (B) Példa egy speciális, a fluoreszcenciajelre visszacsatolt mérési eljárásra. (C) Növényi minták mérésére megvalósított mérőfej a fluoreszcencia-élettartamot mérő berendezésben. (D) Kelkáposztalevelek fluoreszcenciaélettartam-mérési eredményei, összevetve a készülék-válaszidővel (IRF) és egy acetonnal oldott klorofillkivonattal



5. ábra. A LIBS-vizsgálat elvi elrendezése és az általa szolgáltatott spektrum

inket miniatürizáltuk (pl. lézerdiodák, optikai szálak és beágyazott számítógép alkalmazásával): a felgyorsított és intelligens kommunikációval ellátott megoldásokkal terepen hordozható vagy üvegházakban autonóm módon működő készülékeket hoztunk létre. A mérési módszertanban egyre összetettebb megvilágítási és detektálási megoldásokat használunk, és a fotoszintetikus működésre a különböző intenzitású gerjesztésekre adott fluoreszcencia-válaszjel időbeli változásának időfelbontásából következtetünk [6, 7]. A megvalósított készülékek robusztusságát igazolja, hogy szerte a világban több helyszínen bevetettük őket: legutóbb 2023 nyarán Brazíliában egy eukaliptusz-ültetvény monitorozására használtuk.

Az utóbbi években az érdeklődésünk a fluoreszcencia-élettartamok (azaz a gerjesztett állapotból az

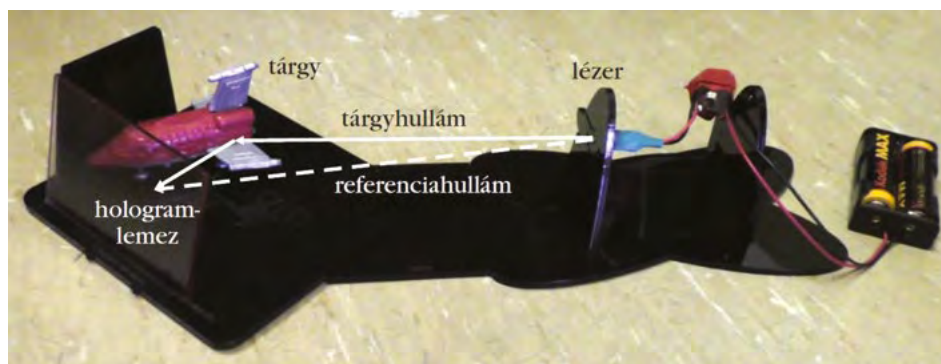
sára is alkalmazni kezdtük. Ezen kutatásainkhoz több, egyedileg optimalizált mérőfejet fejlesztettünk ki.

## LIBS-kutatócsoport

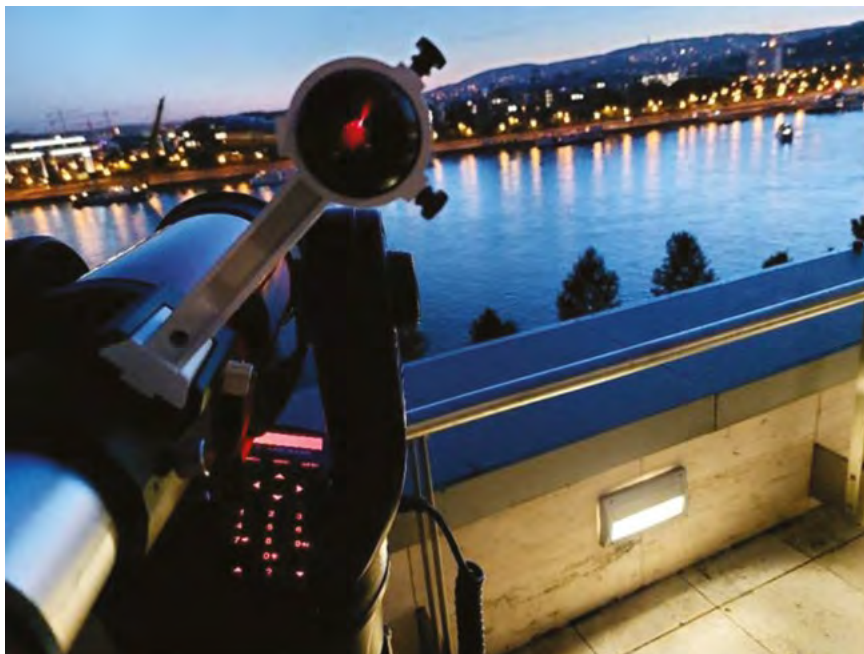
A lézerindukált letörési spektroszkópia (laser-induced breakdown spectroscopy, LIBS) egy népszerű és sokat kutatott anyagvizsgálati módszer, mely vizsgálatok a BME Atomfizika Tanszékén *Gádos Patrik* és *Kocsányi László* vezetésével zajlanak. A LIBS-vizsgálatoknál egy nagy energiájú, rövid (ns, vagy rövidebb) lézerimpulzust sugároznak a minta anyagára, ami általában részben elpárolog, majd plazmává alakul [9]. Ezen plazma az ultraibolya, a látható és az infravörös tartományokban jól

alapállapotba történő visszatérés időállandójának) meghatározása felé fordult. A növényi mintáinknál bebizonyítottuk, hogy a kifejezetten fényhiányban nevelkedett, etioplasztisztartalmú levélszövetek esetében hosszabb fluoreszcencia-élettartamok mérhetőek, illetve más növényi stresszkitettségek is a fluoreszcencia-élettartam változását vonhatják maguk után [8]. Fejlesztéseinknél itt is egyre gyorsabb és érzékenyebb eszközökkel dolgozunk (pikuszekundumos lézerdiodák, egyfotondetektorok, időbélyegző elektronika), ám ezt a rendszert ma már nemcsak a növényeknél használjuk, hanem több más anyag (perovszkit kristályszerkezetű és szerves félvezető anyagok, algák, festékek stb.) kutatására is alkalmazni kezdtük.

érzékelhetően sugároz, és ez a szélessávú színekép a spektroszkópia hagyományos elvén működő, de annak modern eszközeivel, pl. képerősített kamerával (intensified charge-coupled device, ICCD) ellátott Echelle-spektrográffal detektálható. Az emissziós színeképből megállapítható a plazma elemi összetétele, a plazma hőmérséklete és sűrűsége. Keskenyebb



6. ábra. Transzmissziós hologram felvételéhez készült elrendezés. Átvéve: [12]



7. ábra. Szabadtéri (free-space) jelátviteli kísérlet a Duna két partja között. (Közös optikai tengely beállítás: az adóoldali keresőtávcsőben látszik a vevőoldali távcső optikájáról visszavert jelölő lézer fénye)

spektrális tartományok analízisére alkalmasak a modern, száloptikás spektrométerek is.

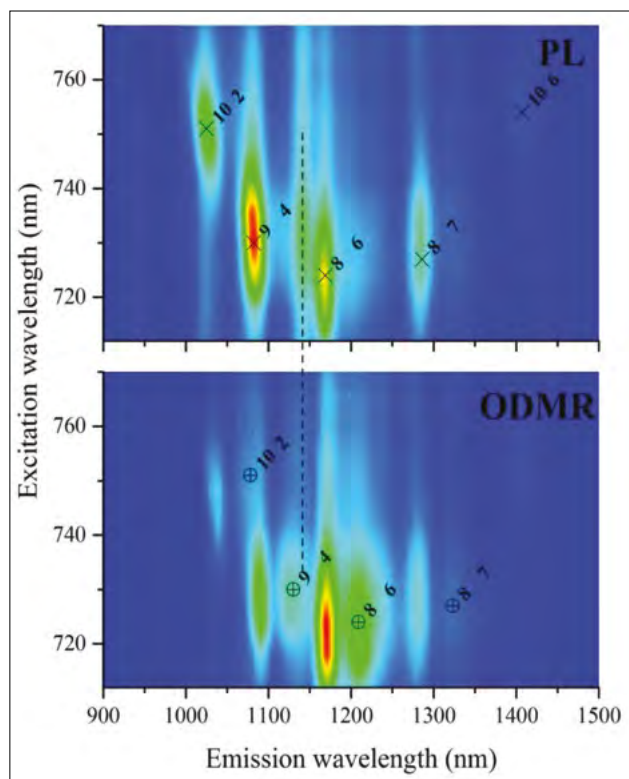
A LIBS technika számtalan gyakorlati előnnyel rendelkezik. Ezek közül kiemelendő a gyorsasága – a vizs-

gálat után gyakorlatilag azonnal eredményt ad –, valamint rugalmassága és könnyű alkalmazhatósága – nem igényel különösebb mintaelőkészítést, sem jól szabályozott, laboratóriumi körülményeket, és bármilyen elemet képes kimutatni. A szükséges berendezések viszonylag egyszerűen kezelhetők és kedvező áron beszerezhetők. A gyorsaság és technikai egyszerűség vonzóvá teszik ipari és in situ terepi alkalmazások számára is. További előny, hogy a LIBS-vizsgálat jól kombinálható más lézeres technikákkal, kiemelten a lézeres tisztítással, az anyagmegmunkálással és a Raman-spektroszkópiával.

## Holográfia és kvantumkulcsmegosztás

Bokor Nándor, Kornis János és Papp Zsolt a holográfia alkalmazási lehetőségeit vizsgálja, többek között anyagok és szerkezetek deformációinak és hibáinak kimutatására. A hagyományosan fotolemezre rögzített holográfia mellett a csoport az ún. digitális holográfia alkalmazásait és fejlesztését is vizsgálja. A csoport a holográfia tudománynépszerűsítő jelleggel történő bemutatásában is igen aktív, szerepet vállaltak többek között a BME-n 2021-ben megrendezett Gábor Dénes Nap lebonyolításában, ami Gábor Dénes Nobel-díjának 50. évfordulóját ünnepelte meg, és ahol az érdeklődő látogatók saját hologramot készíthettek. A munka egyik fő eleme, hogy a diákokhoz hogyan lehet a hologramkészítést közel hozni, egyben olcsó és könnyen kezelhető diódalézereket alkalmazni erre a célra – szemben a hagyományos nagy koherenciahosszúságú gázlázerek alkalmazásával.

A csoport szerepet vállal az ún. kvantumkulcsmegosztáshoz szükséges optikai szálak és szabadterű optikai



8. ábra. Fotolumineszcencia (PL) és optikailag detektált mágneses rezonancia (ODMR) alapján felvett térképek egyfálú szén nanocsöveken. Ezek a gerjesztési hullámhossz hangolható lézeres állításával és a kibocsátott fény analízisével készülnek. Forrás: [11]

megoldások tervezésében és kivitelezésében a BME Vilamosmérnöki és Informatikai Karával közösen a Kvantuminformatika Nemzeti Labor keretében [10]. A kvantumkulcsmegosztás (quantum key distribution, QKD) egy biztonsági technológia, amely kvantummechanikai elveket használ a titkos kulcsok biztonságos megosztására két fél között. A QKD legfontosabb jellemzője, hogy a kvantummechanika törvényei alapján bármilyen lehallgatási kísérletet észlelni lehet, így garantálva a kulcsok biztonságát. A QKD során kvantumállapotok – általában fotonok – használatosak az információ kódolására. Ezek a kvantumbitek vagy qubitek lehetnek különböző polarizációjú fotonok. Az egyik legalapvetőbb, az ún. BB84 protokoll négy különböző polarizációt használ a qubitek kódolására, és a kvantumállapotok véletlenszerű elosztásával biztosítja a kulcsok biztonságát. Az adó és a vevő a kulcs generálása során különböző polarizációkat használnak, majd nyilvánosan összehasonlítják a mérési bázisokat anélkül, hogy felfednék a tényleges mérési eredményeket. A módszer egyik fontos eleme az ún. kvantumcsatorna, ahol is a lehető legkisebb veszteséggel (lényegében veszteség nélkül) kell az optikai fotonokat továbbítani, és ezek kvantumállapotát detektálni. Ez a csatorna lehet optikai szál vagy szabadterű optika.

## Mágnesesrezonancia- és spintronikai kutatócsoport

Az új, nanoszerkezetű anyagok és a fény egyedi kölcsönhatását vizsgálja a *Simon Ferenc* vezette kutatócsoport. A szilárdtestbeli ponthibák (mint pl. a nitrogén-vakancia centrum a gyémántban) egyedi molekuláris fotolumineszcencia-tulajdonságot mutatnak, míg az egyfalú szén nanocsövek, bár makromolekulák, mégis erősen lokalizált optikai gerjesztéseket, ún. excitonokat (egy elektron-lyuk pár erősen kötött állapota) mutatnak. Ezeknek a rendszereknek a megértése fontos a kvantuminformáció tárolása, valamint az anyagok optoelektronikai és fotovoltaiikus eszközökben való felhasználása szempontjából. Egy példát említve, egy eszközbe injektált elektron-lyuk pár csak akkor tud fény kibocsátásával rekombinálódni (azaz LED-ként működni) amennyiben a kialakuló kétrészecske-hullámfüggvény a szinglett állapotba kerül. Az egyfalú szén nanocsövekre jellemző, hogy az átmérőjük (pontosabban a szénatomok pontos geometriai elhelyezkedése) határozza meg a kvantumbezártság jelenségén keresztül az optikai átmeneteik energiájának pontos értékét. A kvázi-egydimenziós szerkezetük nagyon éles, molekulyszerű optikai átmeneteket eredményez. Ennek az a következménye, hogy a szén nanocsövek fotolumineszcens tulajdonságainak vizsgálatához hullámhossz-szelektív besugárzás és a kibocsátott fény hasonlóan hullámhossz-felbontott vizsgálata szükséges. Ezt hagyományosan optikai ráccsal monokromatizált hőmérsékleti sugárzás fényforrásokkal érik el, azonban a csoport egy egyedi lézerrendszert fejlesztett, ami

különböző festékanyagokat használó festéklézerből és titán-zafír lézerből áll, ami lehetővé teszi az 550 nm – 800 nm-es tartomány lefedését. A rendszer segítségével fel tudták tárni a szén nanocsövek triplett optikai gerjesztéseinek energiaszerkezetét, és első ízben figyelték meg az ezen állapotokból származó fluoreszcens kibocsátást [11].

## Köszönetnyilvánítás

A BME Fizikai Intézetének munkatársai köszönetet mondanak a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Hivatalnak a TKP2021-EGA-02, és TKP2021-NVA-02 projektek, valamint a Kulturális és Innovációs Minisztériumnak a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium projekt (2022-2.1.1-NL-2022-00004) keretében nyújtott támogatásért.

## Irodalom

1. Kézsmárki I., Nagel U., Bordács S., Fishman R. S., Lee J. H., Hee, Taek Yi, Cheong S.-W., Ródm T.: Optical diode effect at spin-wave excitations of the room-temperature multiferroic BiFeO<sub>3</sub>. *Physical Review Letters* 115:12 (2015) Paper: 127203
2. Bordács S., Kézsmárki I., Szaller D., Demkó L., Kida N., Murakawa H., Onose Y., Shimano R., Ródm T., Nagel U., Miyahara S., Furukawa N., Tokura Y.: *Nat. Phys.* 8 (2012) 734.
3. Maák P., Barócsi A., Fehér A., Veress M., Mihajlik G., Rózsa B., Koppa P.: Acousto-optic deflector configurations optimized for multiphoton scanning microscopy. *Optics Communications* 530 (2023) Paper: 129213.
4. Holló Cs. T., Sarkadi T., Galambos M., Bíró D., Barócsi A., Koppa P., Erdei G.: Compact, single-mode fiber-coupled, correlated photon pair source based on type-I beta-barium borate crystal. *Optical Engineering* 61:2 (2022) Paper: 025101.
5. Holló Cs. T., Sarkadi T., Galambos M., Barócsi A., Koppa P., Hanyecz V., Erdei G.: Conversion of transverse momentum correlation of photon pairs into polarization entanglement by using wavefront-splitting interference. *Physical Review A* 106 (2022) Paper: 063710.
6. Barócsi A., Lenk S., Kocsányi L., Buschmann C.: Excitation kinetics during induction of chlorophyll a fluorescence. *Photosynthetica* 47:1 (2009) 104–111.
7. Lenk S., Dieleman J. A., Lefebvre V., Heuvelink E., Magan J. J., Palloix A., Van Eeuwijk F. A., Barócsi A.: Phenotyping with fast fluorescence sensors approximates yield component measurements in pepper (*Capsicum annuum* L.). *Photosynthetica* 58:SI (2020) 622–637.
8. Illés L., Sági-Kazár M., Steinbach F., Hembrom R., Mihailova G., Georgieva K., Solymosi K., Barócsi A., Solti Á., Lenk S.: Fluorescence lifetime of plant leaves with sub-nanosecond resolution. *Measurement Science & Technology* 35:8 (2024) Paper: 085206.
9. Gáboros P., Vácsi T., Himics L., Holomb R., Bolla R., Veres M., Kocsányi L.: Comparative analysis of lithiated silica glasses by laser-induced breakdown spectroscopy and Raman spectroscopy. *Journal Non-Crystalline Solids*, 553:1 (2021) Paper: 120472.
10. Galambos M., Czermann M., Jánosi G., Kornis J., Papp Zs., Koller I., Holló Cs., Sarkadi T., Erdei G., Barócsi A., Kis Zs., Koppa P., Imre S., Bacsárdi L.: Report on the first Hungarian short range free space QKD link. In: *Proceedings of the 74th International Astronautical Congress* (IAC 2023), International Astronautical Federation (IAF) (2023) Paper: IAC-23,B2,8-GTS.3,5,x76996
11. Palotas J., Negyedi M., Kollarics S., Bojtór A., Rohringer P., Pichler Th., Simon F.: Incidence of quantum confinement on dark triplet excitons in carbon nanotubes. *ACS Nano* 14 (2020) 11254.
12. Gombkötő B., Bokor N.: Holográfia a tanteremben. *Fizikai Szemle* 2018/2, 56.

# LÉZERFEJLESZTÉSEK ÉS ALKALMAZÁSOK A KFKI-BAN ÉS ANNAK UTÓDINTÉZETEIBEN

Czitrovsky Aladár<sup>@</sup>, Veres Miklós, Nagy Attila Tibor  
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest  
<sup>@</sup>E-mail: czitrovsky.aladar@wigner.hun-ren.hu

## Előzmények

A Központi Fizikai Kutatóintézet 1950-es megalakulása után az optikai kutatások fejlődését serkentette, hogy 1959-ben a KFKI-ban megalakult az Optikai Osztály, amely optikai mérés technikai csoportból, fény-anyag kölcsönhatást, koherenciát és fluktuációkat tanulmányozó részlegekből, valamint spektroszkópiai csoportból állt. Nem véletlen, hogy az első hazai lézer – egy hélium-neon (He-Ne) gázlézer – 1963-ban, kb. három évvel a világ első lézerének megalkotása után, a KFKI-ban készült el. Ehhez rendelkezésre állt egy jól felkészült optikai és spektroszkópiai csapat (*Bakos József, Csillag László, Farkas Győző, Jánossy Mihály, Kántor Károly, Náray Zsolt, Salamon Tamás, Varga Péter*), egy univerzális üvegtechnikai és vákuumtechnikai laboratórium (*Sárközi Elek*) és egy elektronikai csoport (*Pálmai Imre*). Ezeket egészítette ki egy jól felszerelt gépészeti és mechanikai műhely, amelynek *Tóth József* volt az „aranykezü” műszerésze. Az első lézerek kifejlesztése és megépítése után az intézetben, majd annak jogutódaiban szerteágazó kutatómunka folyt és folyik az elméleti és alkalmazott optika, a spektroszkópia, a kvantumoptika és a lézeral alkalmazások területén.

A jelen írás ezekről kíván egy rövid áttekintést adni, felvázolva néhány jelentősebb eredményt és eseményt, amelyek ma már tudománytörténeti mérföldkövek lehetnek a természettudományok hazai fejlődésében. Egyes dokumentumok felkutatásán és rendszerezésén kívül a cikk megírásában az is segített, hogy az egyik szerzőnek lehetősége volt a hetvenes évektől napjainkig együtt dolgozni a kutatásokban, fejlesztésekben és felfedezésekben fontos szerepet játszó kollégákkal. Ők céltudatos, gyakran megszállott munkájukkal hozzájárultak ahhoz, hogy az intézmény, amely már az V. EU-keretprogramban elnyerte a Centre of Excellence of EU címet, jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont egyik kutató-

intézeteként nemzetközileg ismert és elismert, élvonalbeli kutatóműhellyé váljon. Mivel a területi korlátok miatt nem tudunk kitérni minden új eredményre, itt csak röviden foglaljuk össze a fontosabb mérföldköveket az első lézerek megépítésétől, azok egyes alkalmazásán keresztül a jelenleg is folyó kvantumoptikai és lézerfizikai kutatásokig és különböző alkalmazásokig. Megjegyezzük, hogy a *Domokos Péter* által vezetett kvantumoptikai kutatásokról kevesebb szó esik, mivel azokról részletes cikkeket olvashattunk a *Fizikai Szemle* áprilisi tematikus számában.

## Koherens fényforrások kutatása és fejlesztése

A KFKI-ban az egyik első, optikával kapcsolatos tudományos kérdés az 50-es évek elején arra irányult, hogy a fényt leíró, egyrészt az elektromágneses mező hullámainak fogalmával, másrészt a fotonokkal operáló elmélet nem valamilyen, csak nagy fotonszámok esetén érvényes átlagot ír-e le (statistikailag írja le a jelenségeket, és azok csak nagy számoknál érvényesek). *Jánossy Lajos* először 1952-ben kezdeményezte, hogy az erre irányuló gondolat kísérleteket valósítsák meg, ezt követték azok a kutatások, amelyek kis fényáramoknál és nagy fényintenzitásoknál vizsgálták az interferenciát és a koincidenáciát.



*Veres Miklós*, fizikai tudományok, DSc. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének tudományos tanácsadója. Fő kutatási területei a szén alapú nanokompozitok, nanogyémánt, amorf szén, kalkogenidek és más nanoszerkezetek előállítása és tulajdonságainak vizsgálata, valamint az optikai spektroszkópia, ezen belül is a Raman-spektroszkópia, a felületerősített Raman-szórás és a stimulált Raman-spektroszkópia.



*Czitrovsky Aladár*, kísérleti fizikus, DSc. A Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének nyugalmazott igazgatója, professzor emeritusa, a Mémokadémia tagja. A KFKI-ban 1978-ban kezdte kutatói tevékenységét. Szakterülete az alkalmazott és nemlineáris optika (akusztooptika, elektrooptika), lézerfizika és lézeral alkalmazások, az aeroszolok optikai mérés technikája, környezetvédelmi és légkör fizikai jelenségek tanulmányozása. Foglalkozott fotonstatistikával, a fény nemklasszikus állapotaival (squeezing, entanglement), optoelektronikai műszerfejlesztéssel, több mint 223 tudományos publikáció társszerzője, 13 szabadalom hasznosult.



*Nagy Attila Tibor*, kísérleti fizikus, DSc. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetének tudományos tanácsadója. Fő kutatási területe a lézerek optikai mérés technika, a fényszórás elméleti és kísérleti tanulmányozása, gyakorlati alkalmazása az aeroszolok vizsgálatára, környezetvédelmi kutatások a légkör szennyezettségének meghatározására, szoftveres és hardveres műszerfejlesztés.

Az interferenciakísérletet *Náray Zsolt*, a koincidenziakísérletet *Ádám András* és *Varga Péter* végezte el. Az előbbinél két különböző tükrőtávolságot használtak egy Michelson-interferométerben, és vizsgálták, hogy nagy és kis fotonmennyiségek esetén található-e különbség az interferenciaképekben. Nagy energiáknál egy időpillanatban jóval több mint egy foton energiájának megfelelő fotonszám volt az interferométeren belül, kis energiáknál pedig jóval kevesebb volt az energia átlagértéke, mint egy foton energiája. A mérések azt mutatták, hogy az eredmény egyik kísérletsorozatban sem függött az energia átlagától.

A koincidenziakísérlet eredménye, amelyet egy félígáteresztő tükrön végeztek el, szintén negatív volt. Pontosabban – mivel egy fizikai mennyiség nemlétét nem lehet kimutatni – a konklúzió az lett, hogy annak a valószínűsége, hogy a két fotonszámoló egyidejűleg megszólaljon, a hibahatáron belüli hat ezrelék alatti.

A két kísérlet bebizonyította az elmélet várakozását, hogy a fény mindkét reprezentáció esetén ugyanúgy viselkedik kis energiáknál, mint nagyoknál és itt is létezik a kettősség (ezt egyesek úgy interpretálták, hogy a foton önmagával is tud interferálni).

Az első hazai lézert – egy He-Ne gázlézert – 1963-ban, kb. három évvel a világ első lézerének megalkotása után *Bakos József*, *Csillag László*, *Kántor Károly* és *Varga Péter* építette meg a KFKI-ban [1]. Ez annyiban jelentett előrelépést *Ali Javan* lézeréhez képest, hogy a tükrök a vákuumrendszeren kívülre kerültek. A másik különbség, hogy a tükrök anyaga nem dielektrikum, hanem ezüst-réteg volt, ezért a lézer több hullámhosszon is működött – 1,15, 2,39 és 3,39 mikrométeren. A kilépő teljesítmény az először detektált 1,15  $\mu\text{m}$ -es vonal esetében 2,5 mW volt.

A következő évben (1964) ugyanitt készült el az első hazai rubinlézer (*Farkas Győző*, *Náray Zsolt* és *Varga Péter*), 1965-ben pedig a látható hullámhosszon – 0,63 mikronon – működő He-Ne lézer (*Bakos József*, *Csillag László*, *Kántor Károly* és *Salamon Tamás*) [2]. 1970-ben megépült az első He-Cd<sup>+</sup> lézer (*Csillag László*, *Jánossy Mihály*, *Kántor Károly*, *Rózsa Károly*), 1972-ben pedig az első hazai Nd-YAG lézer (*Czigány Imre* és *Kertész Iván*) [2].

Jelentős előrelépés volt az első elosztott visszacsatolású (DFB) festéklézer megépítése 1974-ben (*Bakos József*, *Füzessy Zoltán*, *Sörlei Zsuzsa* és *Szigeti János*). A festéklézerben oldott szerves festékanyag szolgál lézereközegként. A festékmolekulák széles abszorpciós és fluoreszcenciaspektrummal rendelkeznek, igen erősen elnyelik a fényt, ugyanakkor jól is fluoreszkálnak. Az alkalmazható festékek száma több százra tehető, melyekkel az egész látható és közeli infravörös tartományt le lehet fedni. Mivel az abszorpciós és fluoreszcenciasávjuk viszonylag széles, egy adott festékkoldatot tar-



1. ábra. Az első hazai 633 nm-es He-Ne lézer (balra), hordozható foszfátüveg minilézer (középen) és szemészeti műtétekhez használt hazai impulzusüzemű hordozható szilárdtestlézer (jobbra). A He-Ne lézerek a MOM-nak lettek átadva sorozatgyártásra, a szilárdtestlézereket később a Technoorg Kft. gyártotta

talmazó festéklézer hullámhossza hangolható, ami – a rövid impulzushossz mellett – számos alkalmazásban előnyt jelent.

Ezt követte a világviszonylatban is újdonságnak számító első He-Kr<sup>+</sup> és He-Cu<sup>+</sup> üreges katódú lézerek megalkotása. Az újfajta lézerek közül itt épült az első hordozható Nd-foszfátüveg minilézer – a LINDA (1981, *Czigány Imre* és *Kertész Iván*), amely néhány gyufaskatulya méretű volt, és külső hűtés nélkül, telepről is üzemelt (később ezeket a lézereket távcsövekkel összeépítve a 70-es években Ausztriában gyártott optikai távolságmérőkben – angol nevükön range finderekben – alkalmazták) [2].

Több új lézer az 1960-as években megalakult Lézeralkalmazási osztályon hasznosult (például a Nd-YAG lézer, a Nd-foszfátüveg lézer) ipari, orvosi (főleg sebészeti) és mérés technikai alkalmazásokban. Mivel az intézetben belül nem volt gyártókapacitás, az első prototípusok megépítése után az orvosi és sebészeti alkalmazásokat később a LASRAM Kft. fejlesztette. Az ipari alkalmazások terén a REMIX Rádiótechnikai Vállalattal volt együttműködés (pl. ellenállás-trimmelés lézergravírozással). A lézeres mérés technika a csepeli Szerszámgépipari Műveknél (SZIM) és a Szerszámgépipari Fejlesztő Intézetnél (SZIMFI) hasznosult – ide készültek az első nagy pontosságú lézeres mérőinterferométerek, amelyekkel golyósorsók menetemelkedésének linearitását lehetett szubmikronos pontossággal hitelesíteni; később ezeket nanotechnológiai célokra is hasznosították.

A Lézerfizikai Osztályon készült az első hazai hologram (*Jánossy Mihály*, *Füzessy Zoltán*), később pedig a világon elsőként *Horváth Zoltán György* által megalkotott glórialezer, amely a *Laser Focus* című folyóirat címlapján is szerepelt [3]. Megjegyezzük, hogy *Horváth Zoltán*nak később a lézerek orvosi alkalmazására irányuló tevékenysége is igen jelentős volt.

A lézerek fejlesztése gyakran összekapcsolódott a spektroszkópiai kutatásokkal, hiszen az alkalmazás szempontjából is fontos volt meghatározni a lézerek hullámhosszát, sávszélességét, hullámhossz-, illetve frekvenciastabilitását. Kezdetben erre saját fejlesztésű interferometrikus spektroszkópiai műszereket fejlesztettek, később tértek rá a nagyobb felbontású kalibrált Jobin Yvon-féle pásztázó Fabry–Perot-spektrométerekre, illetve interferométerekre.

A 60-as évek közepétől a fény-anyag kölcsönhatás kutatása a kvantumelektrodinamika (QED) linearitá-

sának kérdéseire irányult, például a foton-elektron kölcsönhatás tanulmányozására alacsonyabb fényintenzitások (akár egyetlen foton) esetén. A QED azonban nagy fényintenzitásoknál előre jelezte az addig ismeretlen nemlineáris jelenségeket is.

Az ilyen jelenségek vizsgálata céljából a KFKI munkatársai (Farkas Győző, Horváth Zoltán György, Kertész Iván, Kőházy-Kis Ambrus, Náray Zsolt, Tóth Csaba, Varga Péter) egyre nagyobb teljesítményű impulzusüzemű szilárdtestlézereket építettek; az első ilyen egy 0,69 mikron hullámhosszon működő „óriás impulzusú” rubinlézer volt, amelynek csúcsteljesítménye elérte az 100 MW-ot. E lézerimpulzusok alkalmazásával tárták fel a világon elsőként a fémek felületén a QED által előrejelzett sokfotonos fotoeffektust.

Nagyobb lézerintenzitások esetén a 10 ns-os impulzusoknál termikus elektronemisszió lépett fel, mely eltakarta a fotoeffektust, ezért olyan módusszinkronizált (mode-locked) rubin- és neodímiumlézereket építettek, melyek jóval rövidebb, 1 ps hosszúságú, GW teljesítményű lézerimpulzusokat generáltak. Ilyen ultrarövid impulzusokat alkalmazva elsőként írták le, hogy a rövid kölcsönhatási idő következtében külön elektron-, illetve ionhőmérséklet lép fel, és elnyomhatóvá válik a termikus emisszió, valamint a megnövekedett intenzitás kimutathatóvá tette az „optikai tunnelemmissziót”; ez volt a Keldis-elmélet első igazolása. E kísérleti eredmények lényegében igazolták, hogy az extrém kis intenzitásoknál érvényes egyfotonos perturbációs kölcsönhatás az intenzitás növelésével sokfotonos kölcsönhatásba, majd még további növelés esetén a perturbációs küszöb átlépésével az ún. „optikai tunnelemmissziós” kölcsönhatásba megy át.

Ugyanez a kutatócsoport – külföldi kollégákkal együttműködve – elsőként mutatta meg, hogy a módusszinkronizált lézerimpulzusok vonulatából izolált egyetlen hangolható pikoszekundumos impulzust használva a szabad elektrongáz elektronjai csak egész számú lézerfotont nyelnek el. E kísérlet volt a megalapozója az ún. küszöb feletti ionizáció (above threshold ionization, ATI) jelenségnek, melynél az atomok, illetve fémek fotoelektronjainak kinetikus energiája mindig csak egymást  $h\nu$  fotonenergiával követő energiaértékekből álló diszkrét vonalas spektrum alakjában jelenik meg. Ezt fémkatódok esetén elsőként igazolták. Ezen elektronok, valamint szabad elektronok esetére kidolgozták a rönt-

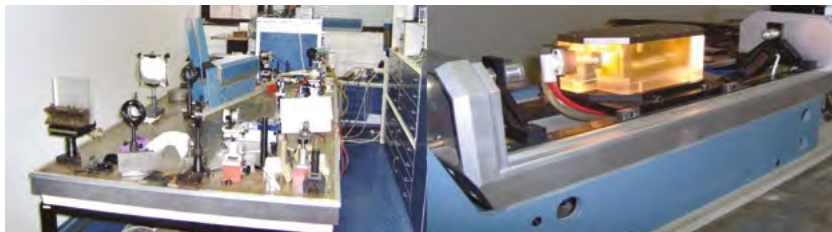
genemisszió, valamint a lézeres elektrongyorsító új elvét.

A Lézerfizikai Osztályon az 1970-es években fontos szerepet kapott a fűtött fémionlézerek kutatása. Ilyen típusú lézerre példa a kék ( $\lambda = 441,6$  nm) fényt sugárzó He-Cd<sup>+</sup> lézer, amely a gázkisülés pozitív oszloptérrészében működik. Itt a lézerátmenet szelektív gerjesztésének mechanizmusa a  $\text{He}^{\text{m}+}\text{Cd} \rightarrow \text{He}^+\text{Cd}^+$  Penning-ionizációs folyamat – ahol a  $\text{He}^{\text{m}+}$  metastabil (gerjesztett) állapotú héliumiont jelöl. A szükséges kadmiumgőzkonzentrációt egy, az anód környékén elhelyezkedő, kadmiumot tartalmazó kályha biztosította. A héliumgázzal töltött kisülési csőbe jutva a Cd-atomok az alacsony ionizációs potenciál miatt könnyen ionizálódtak, és a pozitív oszlopú plazmában (azaz a lézer aktív közegében) a katód felé haladva a kisülésben egyenletes fémgőzsűrűséget alakítottak ki.

A 80-as évektől kezdődően a gázlézerkutatások egyik témája az SZFKI-ban az üreges katódú lézerek fejlesztése volt, ahol aktív közegként a ködfénykisülés negatív térrészét használták fel. Az üreges katódokban egymással szemben álló katódfelületek találhatók, és olyan járulékos folyamatok léphetnek fel, amelyek jelentősen módosíthatják a kisülés tulajdonságait. A legfontosabb folyamat a gyors elektronok oszcilláló mozgása a szemben elhelyezkedő katódfelületek között kialakuló potenciálvölgyben, ami az ionizáció nagymértékű növekedéséhez vezet. Ennek tudható be, hogy üreges katódú kisülésekben elsősorban olyan lézerátmeneteket lehet előnyösen működtetni, amelyek gerjesztési mechanizmusában az ionok szerepe meghatározó.

Az üreges katódú lézerek esetében két területen, a nemesgázkeverék-lézereknél és a fémionlézereknél folytak kutatások. Előbbiekre példaként a He-Kr<sup>+</sup> valamint a He-Ne-Xe<sup>+</sup> lézerek említhetők. Az üreges katódú fémionlézereket a legtöbb esetben nemesgázionok és fématomok közötti töltéscsere előtti ütközések gerjesztik. Ilyen például a  $\text{He}^+ + \text{Cu} \rightarrow \text{He} + \text{Cu}^+$  folyamat, amelynek során a rézatom egy lépésben ionizálódik és gerjesztődik. A fémionlézerek hatékony gerjesztéséhez fontos, hogy az aktív közegben (jelen esetben az üreges katódú kisülésben) nemesgázionok és fématomok nagy sűrűsége álljon elő. A fématomok számottevő koncentrációjának elérésére (tipikusan néhány száz  $10^{13} \text{ cm}^{-3}$  sűrűségre van szükség) két lehetőség adódik. Az első esetben a már említett pozitív oszlopú fűtött kadmiumion-lézerhez hasonlóan a fémet termális úton, egy oldalkályhából lehet a kisülési térfogatba párologtatni. Fontos előrelépésnek számított, amikor az SZFKI-ban felismerték, hogy az üreges katódú kisülésekben katódporlasztással szobahőmérsékleten is elérhető megfelelő fémgőz-koncentráció (Rózsa Károly és Donkó Zoltán).

Az alapkutatási programok egyik, új tudományágat elindító eredménye



2. ábra. A szilárdtestlézer-laboratórium a 80-as években, benne az első (ma is működő) hazai 120 W-os, folyamatos üzemű szilárdtestlézerrel (balra) és a szilárdtestlézer rezonátorával (jobbra). Ennek minden részegysége (a mechanika, az optika és az elektronika) a KFKI-ban készült



3. ábra. A Balzers párologtató berendezés, amelyen Ferencz Kárpát, Szipőcs Róbert, Kőházy-Kis Ambrus és kollégái kifejlesztették az első csörpölt lézertükröket. A berendezésnél Kaspari Jánosné

az attoszekundumos fényimpulzusok ( $1 \text{ as} = 10^{-18} \text{ s}$ ) keltésének felismerése. (Az ilyen rövid impulzusok időtartamának szemléltetése: a Bohr-modellben az elektron a hidrogénatom Bohr-pályáján 140 attoszekundum alatt tesz meg egy fordulatot, vagyis  $1 \text{ as} = 1/140$  Bohr-körülfordulási idő, ami ha a fény terjedését vesszük figyelembe a térben, 0,3 nanométer úthossznak felel meg.) Így az attofizika találkozott a nanofizikával – új kísérleti eszköz

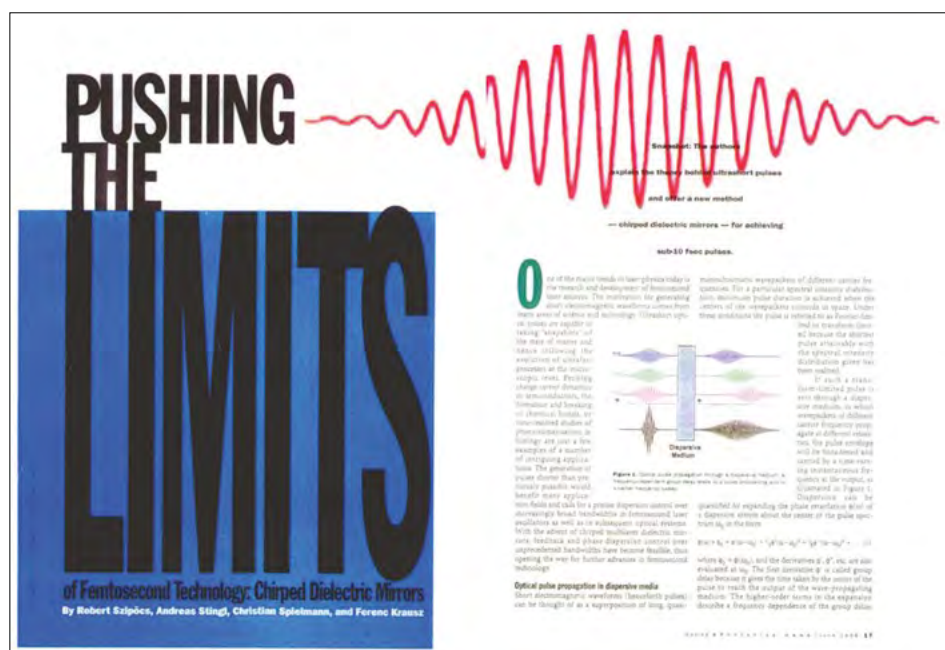
született az atomok belső dinamikájának attoszekundumos időbeli, illetve nanométeres térbeli skálán történő vizsgálatához. Ilyen vizsgálatokat (az Auger-effektus dinamikája, a szabad elektronok dinamikája stb.) a rohamosan fejlődő attofizikai kutatóközpontokban ma már sikeresen és rutinszerűen végeznek. Ezt a kutatási területet később Krausz Ferencék vitték sikerre először a Bécsi Műszaki Egyetemen, majd a garchingi Kvantumoptikai Max Planck Intézetben, és ezek alapozták meg Krausz Ferenc 2023-as Nobel-díját [4].

Közben az SZFKI-ban – ugyancsak elsőként – egymást  $h\nu$  fotonenergiával követő, magasrendű harmonikusok keltését (HHG) írták le fémfelületeken. A fotoeffektus során nyert, rendkívül nagy áramsűrűségű, igen rövid elektronimpulzusokat a hivatkozások szerint a nagy elektrongyorsítók, továbbá a szabadelektronlézerek katódjaiban használják. Ugyancsak fontos eredmény, hogy a fotoeffektust külső elektrosztatikus térben keltve erős UV- és röntgenemissziót lehetett detektálni.

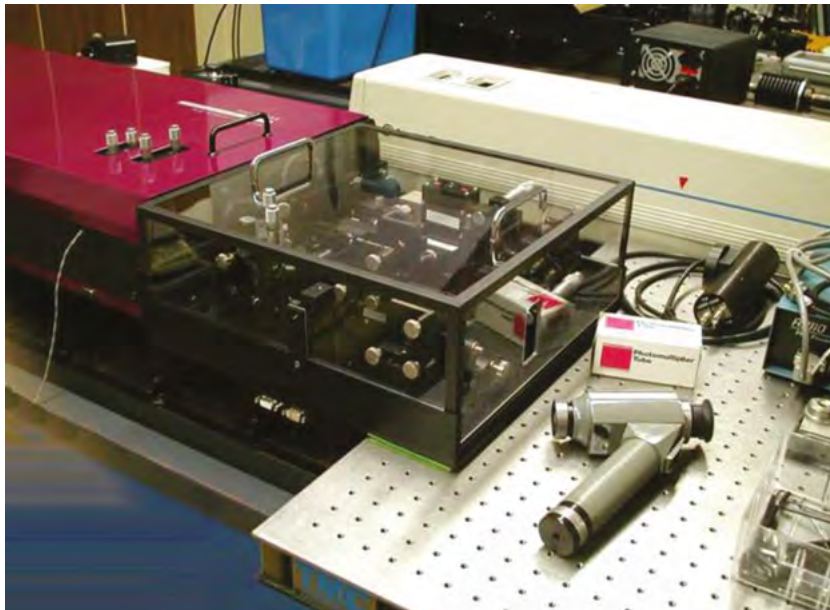
A vékonyréteg-technológia megalapozásában sokat segített az optikai vékonyréteg-laboratórium (Bakos József és Szigeti János), ahol a magas szintű szakértelem és a jó műszaki háttér lehetővé tették gyakorlatilag bármilyen optikai réteg (lézertükrök, interferenciaszűrők, polarizációs osztótükrök, antireflexiós rétegek, felületi hullámvezetők) előállítását. Ezt a tevékenységet a 70-es években Lutter András és Ferencz Kárpát folytatta, akik élvonalbeli optikai vékonyréteg-technológiát valósítottak meg az intézetben (Ferencz Kárpát alapította meg a ma is prosperáló OPTILAB Kft. spin-off vállalkozást, amely a világ 3 kontinensére exportál egyedülálló termékeket). Itt készült az első rezgőkvarcos rétegvastagság-mérő berendezés. A Lézeralkalmazási Osztályon a 90-es években kezdődött a femtoszekundumos lézerek létrehozása

és alkalmazása, melyeket az új diszperziókompenzált (csörpölt) lézertükrök megalkotása tett lehetővé. [5] Ezt a témát Krausz Ferencékkel együttműködve Ferencz Kárpáték és Szipőcs Róberték művelték, akik szabadalmaztatták is a csörpölt lézertükröket. Ebben a kutatásban részt vett még Kőházy-Kis Ambrus is, aki a Covid következtében 3 éve hagyott itt minket.

A csörpölt lézertükrökkel sikerült 1997-ben kb. 4 femtoszekundumos, világcsúcsot jelentő rövid lézerimpulzusokat létrehozni (Szipőcs Róbert, Ferencz Kárpát és Krausz Ferenc – az ezzel kapcsolatos publi-



4. ábra. A csörpölt lézertükrökkel kapott legrövidebb impulzusok és azok alkalmazása több szaklap címlapján is megjelent [6]

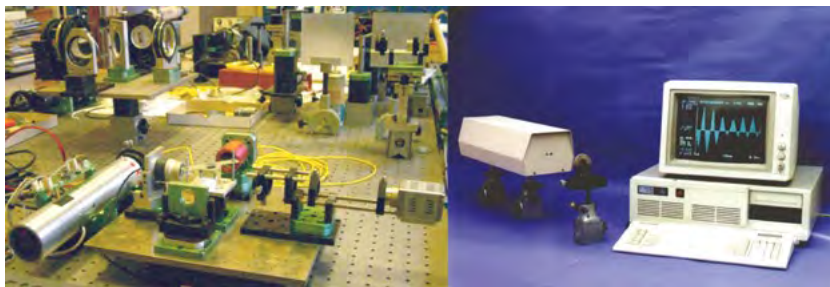


5. ábra. Hangolható 100 fs-os Ti-zafír lézer a pumpa-próba egységgel (Szipőcs Róbert)

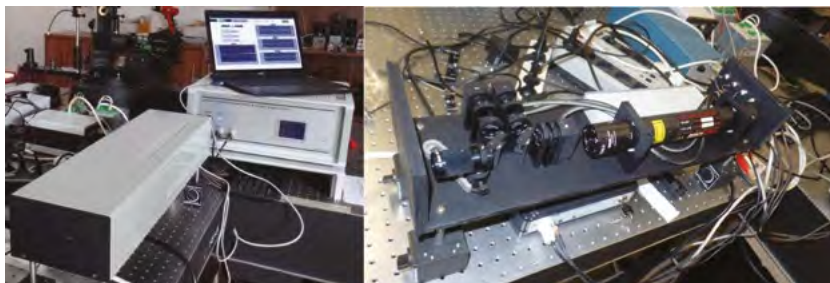
kációk több szaklap címlapjára is felkerültek [6]). Ezek az eredmények is meg vannak említve Krausz Ferenc Nobel-díjának indoklásában.

Az utóbbi években itt fejlesztették ki a genomikában és a klónozási technológiában alkalmazható speciális interferenciaszűrőket, amelyeket génátültetésben is használnak.

A csörpölt tükrökre épülő rövid impulzusú lézerek fejlesztése és gyártása a Szipőcs Róbert nevéhez fűződő Lézeralkalmazási Csoporthoz, illetve az általa alapított Ultrafast R&D Kft.-hez fűződik. Ennek eredménye pl. a pumpa-próba mérésekhez is használt, hangolható 100 fs-os Ti-zafír lézer.



6. ábra. A KFKI-ban kifejlesztett, szabadalmaztatott interferometriás spektrumanalizátor laboratóriumi bemérése (balra) és prototípusa (jobbra). A berendezés szubmikronos pontossággal mérte a mechanikai rezgések frekvencia szerinti amplitúdóeloszlását



7. ábra. A lézerinterferometriás mozgásanalizátor (balra) és belső felépítése (jobbra)

A fenti kutatásokat nagyban elősegítette a lézerplazmában lezajló folyamatok modellezése, ahol Donkó Zoltán kutatócsoportjának munkatársai értek el nemzetközileg elismert eredményeket.

## A lézerek hasznosítása és egyes lézeralkalmazások

A 60-as években kifejlesztett lézerek hasznosítása és széles körű alkalmazása a 70-es években kezdődött. Ebben nagy előnyt jelentett, hogy az intézetben a mechanikai tervezéstől a vákuum- és üvegtechnikán, az optikai alkatrészek és vékonyrétegek fejlesztésén és gyártásán keresztül az elektronikai egységek építéséig minden rendelkezésre állt. A mérés-

technikai feladatokhoz szükség volt a nagy koherenciahosszal rendelkező gázlézerek frekvenciastabilitására, amely pl. a mérőinterferométereknél volt különösen fontos, mivel ott az elmozdulást és annak időbeli deriváltjait (a sebességet és a gyorsulást, ezeken keresztül a vibrációkat) a hullámhossz alapján határozzuk meg. Ezért a Lézeralkalmazási Osztályon ezek előzményeként stabil gázlézerek fejlesztése kezdődött. A hullámhossz-, illetve frekvenciastabilitást egy ismert hullámhosszú stabilizált lézerrel történő összelebegtetéssel vizsgálták, együttműködve a Mérésügyi Hivatallal, ahol egy Hewlett-Packard típusú etalonlézerrel történt az összemérés.

Először a gázlézerek erősítési görbéjének maximuma körül megjelenő lokális minimumra (angolul „Lamb dip”-re), később a két módus intenzitásának különbségére stabilizált lézerek relatív frekvenciastabilitása elérte a  $\Delta\nu/\nu = 10^{-9}$  értéket. Később különböző interferométerek a Miskolci Egyetem számára is készültek, valamint ezeket plazmadiagnosztikára is alkalmazták.

A 80-as években sikeres lézeralkalmazás volt a LIRITA – LézerIonizációs RepülésiIdő-TömegAnalizátor (spektrométer) kifejlesztése, amely az AEKI-vel közösen történt. Ebben a berendezésben egy saját fejlesztésű impulzusüzemű Ni:YAG lézer volt az ionizáló fényforrás, amely az analizálandó minta felületét meglöve ionfelhőt hozott létre. Az ionfelhőt egy gyűrűelektróda után egy reflektornba vezették, ahol a töltés-tömeg arány szerint szeparálódtak az ionok [7–10].



8. ábra. A LézerIonizációs RepülésIdő-TömegAnalizátor (spektróméter), a LIRITA (balra) és annak optikai rendszere (jobbra)



9. ábra. A spektrális mérésekre kifejlesztett korrelációs fényszórásmérő berendezés a 80-as évekből

Fontos megjegyezni, hogy a berendezés vákuumrendszere, optikai egységei, elektronikája, mechanikája, szoftvere is (egy OMFB-szerződés támogatásával) a nyolcvanas években az intézetben készült.

A fotonszámoláson alapuló fotonstatisztikai mérések, az elektronikai eszközök időbeli felbontásának javulása és az érzékenység növelése tették lehetővé egy új spektroszkópiai módszer kidolgozását, amely nagyságrendekkel megnövelte a felbontást, és akár 1 Hz-es frekvenciakülönbség meghatározását is lehetővé tette. A korrelációs technikát először a radarjelek feldolgozá-

sában kezdték el alkalmazni a malverni Royal Signals and Radar Establishmentben, később ez az optikai jelek spektrumának feldolgozásában is sikeresé vált. Az eljárás lényege, hogy a korrelációs függvényből a Wiener-tétel alapján visszaállítható a spektrum [11], azaz az egyik ismeretében a másik meghatározható (ha arra gondolunk, hogy az autokorrelációs függvényt úgy is megkaphatjuk, hogy egy  $v(t)$  jelet egy  $h(t) = v(-t)$  súlyfüggvényű hálózaton visszük keresztül – a konvolúciót frekvenciartományú szorzással helyettesítve közvetlenül jutunk az energiaspektrumhoz, vagyis a Wiener-tétel felismeréséhez).

A korrelációs technikát az intézetben először a moszkvai Fizikai Intézet (FIAN) együttműködve kezdték el alkalmazni a fázisátmenetek strukturális változásainak tanulmányozására, amelyet a fényszórás statisztikai tulajdonságainak vizsgálatával végeztek. Fotonszámolási módszerrel mérve a szórt fényt, az autokorrelációs függvényből meghatározták a diffúziós állandó és a korrelációs rádiusz változását is a kritikus hőmérséklet közelében [12, 13]. Ezt a nagyfelbontású korrelációs spektroszkópiát, amelyhez egy sor új technikai eljárást kellett megvalósítani, később más területen is lehetett alkalmazni – pl. a különösen érzékeny lézeres Doppler-mérőrendszerekben [14]. De ezt alkalmazták a légkörben lebegő szubmikronos részecs-

kék sebességének és méretének kontaktusmentes meghatározására is. A berendezés fontosabb részegységei a valós idejű fotonkorrelátor, a stabilizált lézerefényforrás, a száloptikás levilágító és detektáló optika, valamint az adatgyűjtő és feldolgozó elektronika. Megállapítottuk, hogy az általunk alkalmazott fotonkorrelációs eljárással a ~50 nanométeres részecskék sebessége és mérete egyidejűleg regisztrálható.

A fény statisztikai tulajdonságainak tanulmányozása terén fontos eredmény volt a nem klasszikus fény (squeezed light) generálása és annak alkalmazása az abszolút kvantumhatásfok etalon nélküli meghatározására [15, 16], valamint fontosak voltak a Kroó Norbert vezetésével történt plazmonos fotonstatisztikai vizsgálatok.

A mikroelektronikai gyártósor azonban, amit a COCOM-listát megkerülve vásároltak meg nyugatról (egy harmadik ország beiktatásával), rögtön a telepítés után leégett, ezzel a mikroelektronikai program sorsa is



10. ábra. Az első hazai mikroprocesszoros pormérő berendezés a 80-as évekből (balra) és a környezetvédelmi mérésekre kifejlesztett lézeres berendezések prototípusai (jobbra)



11. ábra. Az SZFKI lézeres berendezései a Hannoveri Ipari Vásáron

megpecsételődött [17], ugyanakkor az erre a célra kifejlesztett műszerek egy része máshol hasznosult. Ilyen volt a levegő porkoncentrációjának mérésére kifejlesztett műszer család is, amelyet eredetileg alacsony koncentrációk monitorozására fejlesztettek, de továbbfejlesztve később magas koncentrációknak, és ezzel a nagyvárosok levegőjének mérésére is alkalmassá vált. Ezeket a műszereket később kültéri és beltéri aeroszolmérésekre is felkészítették, így ipari környezetben is lehetett alkalmazni őket egészségvédelmi és környezetvédelmi monitorozásra [14].

A fenti fejlesztésekhez hozzájárult az elektronikai osztály, ahol a lézertápegységektől a mérésautomatizálásig gyakorlatilag minden felmerülő feladatot meg tudtak oldani.

A 90-es évektől kezdve a lézerek fontos alkalmazási területe lett a környezetvédelem – a levegőszennyezettség mérése optikai módszerekkel – pl. lézerefényszórással, illetve a fény statisztikai tulajdonságainak vizsgálatával. Ez a téma eredetileg a tiszta terek monitorozására alkalmas műszerek fejlesztésével indult, amelyek az ak-

kor induló magyarországi mikroelektromechanikai programhoz voltak szükségesek.

A 90-es évektől sikeres fejlesztések folytak a lézeres Doppler-anemometria területén is (*Jani Péter*), amelyeket később az ellenséges katonai távolságmérő (range finder) berendezések érzékelésére és lokalizálására fejlesztettek tovább.

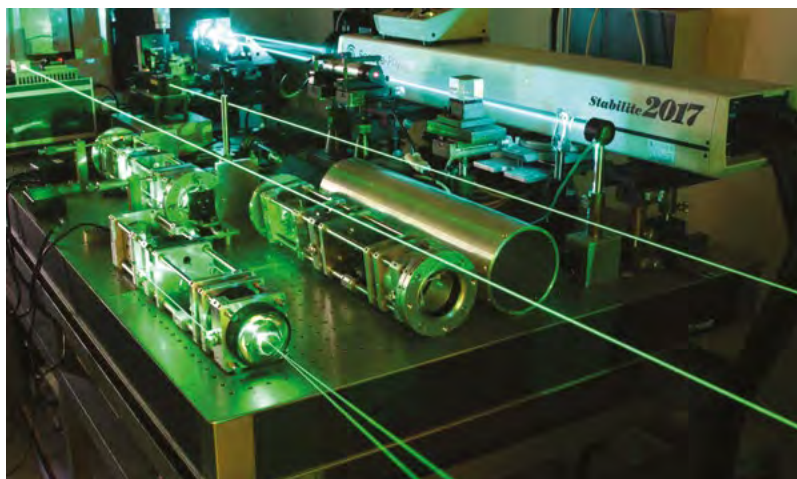
A 2000-es években sikeres fejlesztés volt a BME-vel közösen létrehozott kiterjesztett látószögű digitális holografikus berendezés (DIADEM) létrehozása is *Füzessy Zoltán* vezetésével

Az új eredmények hasznosításában segítséget nyújtottak az intézetből kinőtt vállalkozások (például az Optilab Kft., a Technoorg-Linda Kft., az R&D Ultrafast Kft., az Envi-Tech Kft.), valamint az együttműködő ipari partnerek (régében a MOM, Gamma, KUTESZ, REMIX, BIOINNO-

IKORD, MMG, FORTE (Vác), később a GE, SIEMENS, Kőbányai Gyógyszergyár, PARMA Kft., KTV, Viscosa Rt., ma a LASRAM, Videoton, HOYA, Műszerautomatika és mások). Ezekben a cégekben, illetve rajtuk keresztül számos új eredmény, berendezés, új mérési módszer és eljárás hasznosult különféle ipari területeken – mind Magyarországon, mind külföldön.

A gázlézerek és a szilárdtestlézerek kutatásán, fejlesztésén és alkalmazásán kívül a KFKI egyik utódintézetében (a Műszaki Fizikai Kutatóintézet fuzionálása után a KFKI Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézetben, azaz az MFA-ban) félvezetőlézerek fejlesztése és alkalmazása is folyt *Serényi Miklós* vezetésével; ezek főleg a méréstechnika egyes területein hasznosultak. Ezeket a III-V típusú félvezetőkön végzett kutatásokat főleg a gyorsan fejlődő fénytávközlésben és a szelektív spektroszkópiában alkalmazott félvezető fényforrások iránt jelentkező igény motiválta. Továbbfejlesztett és szabadalmaztatott, kis küszöbáramú és a nagy hatásfokú, folytonos üzemben működő lézerdiódák előállítására szolgáló, csak egyetlen fázisú epitaxiális

lépést tartalmazó módszerük egyidejűleg hozta létre a keskeny aktív réteget és a laterális áramsztérfolyást hatékonyan akadályozó záróstruktúra is. A nagyobb teljesítményű eszközök fejlesztése során a fénykibocsátó kristálylapka felületére többféle dielektromos rétegekből álló, reflexiócsökkentő bevonatot leválasztva sikerült növelniük a kilépő fénytelsítményt. Az in situ monitorozással készülő antireflexiós bevonatok lehetővé tették a lézerdiódák külső rezonátorhoz való csatlakoztatását, és így hullámhossz szerint hangolható lézerek építését. Ezek fejlesztése során az MFA együttműködést épített ki a müncheni székhelyű TOPTICA ipar-



12. ábra. Az SZFKI-ban kifejlesztett lézeres Doppler-anemométer laboratóriumi változata



13. ábra. A BME-vel közösen létrehozott DIADDEM holografikus berendezés laboratóriumi változatának részegységei

vállalattal, melynek eredményeként több mint egy tucat, az iparban is hasznosult eszközt építettek.

## Összefoglalás

A szerzők a teljesség igénye nélkül igyekeztek röviden áttekinteni a lézeres kutatások, fejlesztések és alkalmazások egyes fejezeteit és mérföldköveit a KFKI-ban és annak jogutódjaiban a 2000-es évekig, vállalva azon kollégák jogos kritikáját, akiknek az eredményeiket nem sikerült kellő súllyal és terjedelemben bemutatni. A modern lézeres kutatások és alkalmazások ebben a számban, más cikkekben vannak bemutatva. Az intézmény átalakulásai miatt a kutatás ezeken a területeken nem mindig volt zökkenőmentes, és a különböző szakterületek egyensúlyának megteremtése és megtartása is néha nehézségekbe ütközött. Ezzel együtt talán hasznos fel-eleveníteni és felsorolni azokat az eredményeket, amelyek a fizika mellett más tudományterületeken, iparágakban, berendezésekben és eszközökben hasznosultak – az attoszekundumos kvantumkémiaiól vagy a CD-lejátszótól kezdve a lézernyomtatón vagy a vonalkódeolvasón, telekommunikáción, nagyfelbontású optikai mérés technikán keresztül a lézermutatóig –, ezzel serkentve a tudományos, technológiai, ipari és gazdasági fejlődést.

Talán azt is sikerült bemutatni, hogy a KFKI és annak utódintézményei a lézerek felfedezése, fejlesztése és alkalmazása területén nemcsak Magyarországon, de nemzetközi szinten is a világ vezető kutatóintézetei közé tartoztak és tartoznak ma is, és az ott született számos kimagasló eredmény megalapozta Gerard Mourou 2018-as

és Krausz Ferenc 2023-as Nobel-díjának odaítélését.

## Köszönetnyilvánítás

A szerzők köszönik azok segítségét, akik személyes visszaemlékezésekkel, fényképekkel, dokumentumokkal hozzájárultak a cikk tartalmához. Kiemelten köszönetet mondanak Horváth Zoltán Györgynek, Konczos Gézának, Kroó Norbertnek, Plósz Bélának, Csillag Lászlónak a rendelkezésre bocsátott dokumentumokért és a személyes visszaemlékezésekért. Hálával és tisztelettel emlékeznek Farkas Győzőre, Varga Péterre, Kőházi-Kis Ambrusra, Janszky József, Czigány Imrere, Hartmann Ervinre, Szentirmay Zsoltra, Kertész Ivánra, Matus Lajosra, Ticska Kálmánra, Cséri Hubára, Watterich Andreára, Kiss Árpádra, Nemes Tiborra, Pócsik Istvánra, Rózsa Károlyra, Szigethy

Jánosra, akik már eltávoztak közülünk, de áldozatos munkájukkal nagyban hozzájárultak ahhoz, hogy a lézerfizika, a lézeral alkalmazások, a spektroszkópia és az optika területén az intézeteinkben kimagasló eredmények szülessenek.

## Irodalom

1. Bakos J., Csillag L., Kántor K., Varga P.: *KFKI Közl.* 13 (1965) 195–197.
2. Csillag L.: *Fizikai Szemle* 63 (2013) 197–200.
3. Horváth Z. Gy.: *Laser Focus* 16 (1980) 32.
4. Krausz Ferenc Nobel-díja, *Fizikai Szemle* 74 (2024).
5. Szipőcs R.: *Fizikai Szemle* 74 (2024) 7–8.
6. Szipőcs R., Stingl A., Spielmann C., Krausz F.: *Optics and Photonics News* 6 (1995) 16.
7. Vértes Á., Juhász P., Jani P., Czitrovsky A.: *International Journal of Mass Spectrometry* 82 (1988) 45–70.
8. Czitrovsky A., Frecska J., Jani P., Matus L., Nagy A.: *Journal of Aerosol Science* 27S (1996) 467–468.
9. Czitrovsky A., Jani P., Maróti L., Matus L., Windberg P.: *Journal of Aerosol Science* 29S1 (1998) 471–472.
10. Czitrovsky A., Jani P., Maróti L., Matus L., Pintér A., Windberg P.: *Journal of Aerosol Science* 29S1 (1998) 469–470.
11. Zaitsev V. P., Fabelinski I. L., Czitrovsky A., Chaikov L. L., Jani P.: *JETP Letters* 43 (1986) 112–116.
12. Chaikov L. L., Fabelinski I. L., Krivokhizha S. V., Lugovaia O., Czitrovsky A., Jani P.: *Journal of Raman Spectroscopy* 25 (1994) 463–468.
13. Krivokhizha S. V., Lugovaia O., Fabelinski I. L., Chaikov L. L., Czitrovsky A., Jani P.: *JETP* 103 (1993) 115–124.
14. Czitrovsky A. In: Czitrovsky A. (ed.) *Trends in Laser Development, Application and Technologies*. Technoorg-Linda Ltd., Budapest (1997).
15. Czitrovsky A., Sergienko A., Jani P., Nagy A.: *Laser Physics* 10 (2000) 86–89.
16. Czitrovsky A., Sergienko A., Jani P., Nagy A.: *Metrologia* 37 (2000) 617–620.
17. Borvendég Zs.: Az „impexek” kora. *NEB*, 2017.

# KÖZVETLENÜL IS IGAZOLTÁK WIGNER JENŐ 90 ÉVES FELTEVÉSÉT, WIGNER-KRISTÁLYT FIGYELTEK MEG ELEKTRONMIKROSKÓPPAL

Újfalussy Balázs

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Az 1930-as évek közepe táján Wigner Jenő és PhD-hallgatója, Frederick Seitz a fémek kötési energiájának problémáján kezdett dolgozni. Wigner elég hamar felvetette azt a kérdést, hogy a fémes kötést adó elektronfolyadék-állapot fennmarad-e nagyon kis sűrűségű elektronrendszerben, amikor az elektronok kinetikus energiájához képest az elektronok közötti Coulomb-taszítás válik dominánssá. Hiszen ilyenkor rögzített sűrűség mellett energetikaikag kedvezőbb lehet az az állapot, amelyben az elektronok szabályos kristályszerkezetet alkotnak.

Wigner megmutatta, hogy a Coulomb-energia és a kinetikus energia hányadosaként definiált  $\Gamma$  paraméter értékétől függően megváltozik a rendszer viselkedése. Ha  $\Gamma$  értéke 1-nél jóval kisebb, az elektronok közötti korreláció is kicsi lesz a kinetikus energiához képest, és ezért az elektronok majdnem szabadon mozognak, a rendszer fémes tulajdonságokkal rendelkezik. Az ellenkező esetben viszont, amikor a Coulomb-taszításból adódó potenciális energia dominál a kinetikus energiával szemben ( $\Gamma$  jóval nagyobb 1-nél), az elektronok kristályrácsba lokalizálódnak, a rendszer szigetelővé válik. Ezt nevezik azóta Wigner-kristálynak.

Wigner maga mutatott rá arra, hogy az elektronok lokalizációja olyan extrém alacsony sűrűségeknél következne be, ami valószínűtlenné teszi annak megvalósulását. Kiderült azonban, hogy mégis van lehetőség nagy  $\Gamma$  értékek elérésére, ha nem háromdimenziós, hanem kétdimenziós elektronrendszert tanulmányozunk, mivel a Coulomb-energiának és a kinetikus energiának a sűrűségtől való függése függ a rendszer dimenziójától.

$$\Gamma = \left( \frac{E_{\text{pot}}}{E_{\text{kin}}} \right) \sim n_e^{1/D},$$

ahol  $D$  a dimenzió (2 vagy 3),  $n_e$  pedig az elektronsűrűség. Az egydimenziós elektrongáz még jobb lehetne, de tudjuk, hogy igazi egydimenziós rendszerben stabilis szimmetriasértő fázis nem alakulhat ki.

Wigner ötletének megszületése után több mint 40 év telt el, mire először közvetett módon megfigyelték a kétdimenziós elektronrendszernek ezt a különleges állapotát hélium felületére juttatott elektronok rendszerében. Majd a múlt század végétől kezdve egyre több kísérletet végeztek félvezető heteroszerkezeteken, grafénon. Ezekről Solyom Jenőnek, a Wigner Fizikai Kutatóköz-

pont emeritus professzorának cikkében találunk rövid ismertetést [1]. Ezek a mérések azonban csak közvetett bizonyítékkal tudtak szolgálni a Wigner-kristály létezésének alátámasztására. Nem tették lehetővé, hogy megkülönböztessük a kristály formálódását a rendezetlenség okozta elektronlokalizációtól, vagy hogy megfigyeljük a Wigner-kristály szimmetriáit, rácsállandóját.

Az elmúlt években két olyan munka is született, amelyekben közvetlen bizonyítékot kaptunk a kétdimenziós Wigner-kristály létezésére. 2021-ben Crommie és munkatársai [2]  $\text{WSe}_2/\text{WS}_2$  moiré-heteroszerkezetben, majd legújabban Yazdani és munkatársai [3] nagy mágneses térbe helyezett grafénrétegek között figyeltek meg kétdimenziós Wigner-kristályt, pásztázó alagútmikroszkóppal (STM) készítve közvetlenül képet a kialakult kristályos szerkezetről.

A közvetlen megfigyelés nehézsége abból ered, hogy egyszerre van szükség extrém nagy felbontásra, extrém nagy érzékenységre és minimális befolyásoló hatásra, hogy a mérés maga ne tegye tönkre a Wigner-kristály érzékeny rendjét. Ez utóbbi kettő nyilván ellentmondó követelmény, a nagy érzékenység erős kölcsönhatást, míg a kis perturbáció gyenge kölcsönhatást szokott jelenteni. Az alkalmazott pásztázó alagútmikroszkópos technológia például nagy felbontású és rendkívül érzékeny a töltéssűrűség kis változásaira, de fennáll a veszélye annak, hogy az STM-tű elektromos tere befolyásolja a Wigner-kristályt, tönkretéve annak érzékeny szerkezetét. A technika mostanra fejlődött oda, hogy – legyőzve az említett nehézségeket – a kutatók a legújabb publikációban beszámolhattak a kétdimenziós Wigner-kristályos állapot közvetlen megfigyeléséről, nagyjából 90 évvel az eredeti felvetés után.

Fontos megjegyezni, hogy a Wigner-kristályok kutatásában úttörő szerepet játszott a Wigner Fizikai Kutatóközpont kutatója, Legeza Örs, illetve a BME Fizikai Intézetének munkatársa, Zaránd Gergely. Mint említettük, igazi egydimenziós rendszerekben stabilis szimmetriasértő fázis nem alakulhat ki. Szén nanocsövekben azonban a töltések periodikus szerkezetet alakíthatnak ki. 2019-ben ezt figyelték meg a Weizmann Intézet munkatársai. Legeza Örs és Zaránd Gergely a kísérlet magyarázatához szükséges egyedülálló számítások kidolgozásában vett részt [4, 5].

1. Sólyom J.: Wigner crystals: New realizations of an old idea. *EPJ Web of Conferences* 78 (2014) 01009. DOI: 10.1051/epj-conf/20147801009
2. Li H., Li S., Regan E. C., et al.: Imaging two-dimensional generalized Wigner crystals. *Nature* 597 (2021) 650–654. <https://www.nature.com/articles/s41586-021-03874-9>
3. Tsui Y. C., He M., Hu Y., et al.: Direct observation of a magnetic-field-induced Wigner crystal. *Nature* 628 (2024) 287–292. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07212-7>
4. Shapir I., Hamo A., Pecker S., Moca C. P., Legeza Ö., Zarand G., Ilani S.: Imaging the electronic Wigner crystal in one dimension. *Science* 364 (2019) 870. DOI: 10.1126/science.aat0905
5. Az eredményről akkoriban az Index is beszámolt: [https://index.hu/techtud/2019/07/08/nanocsoben\\_lattak\\_meg\\_a\\_kulonleges\\_kvantumkristalyt/](https://index.hu/techtud/2019/07/08/nanocsoben_lattak_meg_a_kulonleges_kvantumkristalyt/)

## HÍREK, ESEMÉNYEK

# STAAR GYULA, A TERMÉSZET VILÁGA EGYKORI FŐSZERKESZTŐJE 80 ÉVES

Németh Géza,  
a *Természet Világa* volt szerkesztője



Staar Gyula

*Jelen írással a 80. születésnapja alkalmából köszöntöm Staar Gyulát, akinek a Természet Világa – Természettudományi Közlöny folyóirat szerkesztőjeként, majd főszerkesztőjeként, valamint fizikusokkal és matematikusokkal készített interjúi révén sok évtizedes élévülhetetlen érdemei vannak a fizikai és matematikai ismeretek terjesztésében.*

1841 tavaszán Pest-Budán Bugát Pál orvos, akadémikus kezdeményezésére 134 magyar tudós aláírásával megalakult a Királyi Magyar Természettudományi Társulat, melynek az alapító okirata szerinti célja: „*hazánkat természettudományilag megismerni, ennek rejtett kincseire honosinkat s illetőleg a külföldet figyelmeztetni, a külföldön virágzó természeti tudományokat honunkba átültetni, azokat a tanodák szűk falai közül az élet tág mezejére átvinni, az élethez közelebb eső egyesületeknek segédkezeket nyújtani, az alsóbb, vagy is népi és felsőbb, az az tudományos nevelésre közvetve befolyván honunkban a természeti tudományokat terjeszteni.*” E terjesztéshez azonban alkalmas médium is kellett, s itt lépett be a történetbe Szily Kálmán fizikus, nyelvész, akadémikus, műegyetemi tanár, aki mint a társulat főtítkára 1869 januárjában útjára indította a *Természettudományi Közlöny*

című, havonta megjelenő tudományos ismeretterjesztő folyóiratot. Szily akkor még nem öszülő szakállú bácsi volt, ahogy a későbbi fényképéről ismerjük, hanem csupán 32 éves fiatalember. A lap – gyakorlatilag változatlan profillal – egészen a második világháború végéig folyamatosan megjelent, benne a hazai tudomány legjobbjai publikáltak, de átvették neves külföldi tudósok magyarra fordított cikkeit is.

A háború után évekig a kor ideológiájának szolgálatába állították, így az 1956-os forradalmat követően afféle új alapítóra volt szükség, hogy korábbi szellemiségét helyreállítsák. E szerep Dala László matematika-fizika szakos tanárnak jutott. A lap nevét 1968-ban változtatták *Természet Világára*, de alapításától máig őrzi alcímében a *Természettudományi Közlöny* nevet is. Dala László hívasára érkezett a folyóirathoz 1974-ben Staar Gyula.

Gyula 1944-ben Lajosmizsén született, és évtizedeken át ott tanító édesanyja nyomdokain ő is matematika-fizika szakon szerzett diplomát az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, nővére pedig fizikus lett. Néhány évig tanított is, majd az ELTE TTK Dékáni Hivatalának munkatársa lett. Innen csábította át Dala László a laphoz, ahol a végzettségének megfelelő szakterületek cikkeinek gondozása volt a feladata. Az évek során maga köré gyűjtötte a hazai matematika és fizika legkiválóbb művelőit, és a tőlük beszerzett cikkek szerkesztése mellett megkezdte a hazai ismeretterjesztésben páratlan tudósinterjúk készítését, elsőként mindjárt a Nobel-díjas Paul Dirac fizikussal, amit idővel még több mint száz követett. Ezek a beszélgetések, másokkal kiegészülve, öt interjúkötetben is megjelentek. Kerekasztal-beszélgetéseket szervezett, és éveken át szerkesztette a Természettudományos Ismeretterjesztő Társulat Budapesti Szervezete által kiadott időszakos folyóiratot, a *Kilátót*. Mindemellett hosz-

szü éveken át versenyszerűen sakkozott az első osztályban játszó BEAC csapattagjaként.

Nehéz időszakot éltünk át a 80-as években, ez is sarkallta új kihívásra, és másfél éven át az *Élet és Tudomány* főszerkesztő-helyettese volt. A rendszerváltozással Staar Gyula és a *Természet Világa* életében is új fejezet nyílt. 1990 végétől kinevezték a folyóirat főszerkesztőjének. Ahogy egyik neves akadémikusunk fogalmazott, ezzel kezdetét vette a *Természet Világa* – *Természettudományi Közöny* újabb aranykora. Nehéz körülmények között kellett neki és kollégáinak a pangás évei után új életet lehelni a lapba, de mint igazi csapatépítőnek ez sikerült. Sok új szerző és támogató került be a lap szellemi körébe itthonról és a határokon túlról.

Ezekben az években indult nagy sikerrel a középiskolások számára kiírt Természet-Tudomány Diákpályázat, amihez kapcsolódva neves tudósokkal kiegészülve jártuk a hazai és környező országokbeli iskolákat, intézményeket. Staar Gyula vezetése alatt részesült a folyóirat Magyar Örökség Díjban, őt magát is számos díjjal ismerték el – egyebek között MÚOSZ-nívódíjjal (1988, 1990), Akadémiai Újságírói Díjjal (1991), Prométheusz-érem-

mel (1991), Hevesi Endre-díjjal (1995), Táncsics Mihály-díjjal (1999), a Magyar Köztársasági Érdemrend Lovagkeresztjével (2005), Aranytoll-életműdíjjal (2015), a Magyar Érdemrend tisztikeresztjével (2017), Az Év Ismeretterjesztő Tudósa (honoris causa) díjjal (2019), a Tudományos Újságírók Klubjának Enciklopédia Díjával (2019), és a Magyar Természettudományi Társulat Xantus-díjával.

Staar Gyula és ugyancsak matematika-fizika szakos tanár felesége két gyermeket neveltek fel és segítették őket diplomához. Bár 60 éves korában nyugdíjba ment, főszerkesztői feladatait az egyre fojtogatóbb kiadói légkör ellenére 2017 júniusáig legjobb tudása szerint, néha erején felül, lelkiismeretesen ellátta. A Természettudományi Társulat szellemiségének jegyében ismeretterjesztői munkásságával méltó örökösevé vált egykori nagyjaink, Kitaibel Pál, Bugát Pál, Szily Kálmán és mások tevékenységének.

A *Fizikai Szemle* hasábjairól Staar Gyulának jó egészséget és még sok, szellemiekben gazdag nyugdíjasévet kívánok a 80. születésnapja alkalmából.

### Staar Gyula fizikusokkal kapcsolatos fontosabb közleményei, interjúi

- *Mit jelent ma számunkra Albert Einstein?* (Abonyi Ivánnal) TIT Budapesti Szervezete 1979/80
- *Fénnyel szőtt halhatatlanság – Beszélgetés Bay Zoltánnal.* Újhold-Évkönyv 1981/1
- *Iszonyú rendet vágtam – Beszélgetés Simonyi Károly Kossuth- és Állami díjas professzorral.* Forrás 1987. 10. sz.
- *Megszállottak.* Typotex, 1991 (Interjú magyar fizikusokkal: Simonyi Károly, Bay Zoltán, Vermes Miklós, Balázs Nándor, Gyarmati István)
- *De mi az igazság... – Beszélgetések Simonyi Károllyal.* Közöny- és Lapkiadó, Budapest, 1996 (6 interjú 1979 és 1996 között)
- *Bolyai-emléksám.* Természet Világa, 2003
- *Neumann-emléksám.* (Kovács Győzővel) Természet Világa, 2003
- *Bolyai-emlékkönyv.* (Prékopa Andrással, Kiss Elemérrel, Szenthe Jánossal) Vince Kiadó, 2004
- *Ember az erőterekben – Beszélgetés Nagy Károly akadémikussal.* Forrás 2004. 10. sz.
- *A székelylek fizikusa – Beszélgetés Toró Tiborral, Akadémiánk külső tagjával.* Tiszatáj 2005. 10. sz.
- *Vermes Miklós és a Természettudományi Közöny.* Fizikai Szemle 2005/5. 168. o.
- *Fizikusok az aranykorból – Beszélgetések.* Vince Kiadó, Budapest, 2006 (Paul Dirac, Tisza László, Bay Zoltán, Kovács István, Simonyi Károly, Vermes Miklós, Kunfalvi Rezső, Gábos Zoltán, Toró Tibor, Carlo Rubbia, Gyarmati István, Balázs Nándor, Csonka Pál, Nagy Károly, Kroó Norbert)
- *A fizika százada.* (Silberer Verával) Természet Világa, 2006
- *Tudóssors Közép-Európában – Beszélgetés Cornides István fizikussal.* Valóság 2007. 10–11. sz.
- *Mindhalálíg sugározta tudását. Emlékképek Simonyi Károlyról.* Forrás 2010. 12. sz.
- *Simonyi Károly veszt.* Forrás 2013. 11. sz.
- *Folytonos küzdelem a véges világgal – Beszélgetés Lovász László Abel-díjas matematikussal.* Forrás, 2022. 10. sz.
- *Két végtelen között az ember – Beszélgetés Patkós András akadémikussal.* (megjelenés alatt)

# Újra Kutatók Éjszakája az Ericsson Házban!



Öveges Tanár úr utódai - Fizikai kísérletek nem csak tudósoknak

**2024. szeptember 27. 15:50 - 22:30**

**Ericsson Ház, 1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 11.**

| <b>Időpont</b> | <b>Előadás címe</b>                                     | <b>Előadó neve</b>                                                                                                        |
|----------------|---------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15:50 - 16:00  | Megnyitó – program felvezetése                          | Dr. Jarosievitz Beáta & Dr. Sükösd Csaba                                                                                  |
| 16:00 - 16:40  | Csodák Tanodája - Teszünk néhány kört Arkhimédész körül | Hasznosi Tamásné, Sashalmi Tanoda Általános Iskola, Budapest Győri Mobilis Kísérlet Bazar versenyén különdíjas            |
| 16:50 - 17:30  | Ezt te is meg tudod csinálni!                           | Dr. Újvári Sándor, Lánczos Kornél Gimnázium, Székesfehérvár Ericsson-díj 2018                                             |
| 17:40 - 18:20  | Kedvenc hőtani kísérleteink                             | Dr. Jarosievitz Beáta, Budapest XIV. Kerületi Teleki Blanka Gimnázium Ericsson-díj 2010                                   |
| 18:30 - 19:10  | Hangos kísérletek                                       | Szabó László, Csongrádi Batsányi János Gimnázium és Kollégium, Csongrád Ericsson-díj 2020                                 |
| 19:20 - 20:00  | Erőhatások - Kísérletek saját készítésű eszközökkel     | Filep Doina Otília, Megyaszói Mészáros Lőrinc Körzeti Általános Iskola, Megyaszó Ericsson-díj 2018                        |
| 20:10 - 20:50  | Kísérletek tűzön vízen át                               | Udvardi Imre, Újpesti Könyves Kálmán Gimnázium, Budapest Ericsson-díj 2018                                                |
| 21:00 - 21:40  | Egyszerű, de nagyszerű                                  | Dr. Schramek Anikó, Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium Ericsson-díj 2021                     |
| 21:50 - 22:30  | Megrázó élmények                                        | Dr. Gärtner István és diákjai, Óbudai Árpád Gimnázium, Budapest Igniting Sparks Award díj, MTA Pedagógus Kutatói Pályadíj |

Műsorvezetők, programgazdák: Dr. Jarosievitz Beáta és Dr. Sükösd Csaba - Lesz online közvetítés!  
További információ és részletes program: [www.kutatokejszakaja.hu](http://www.kutatokejszakaja.hu)

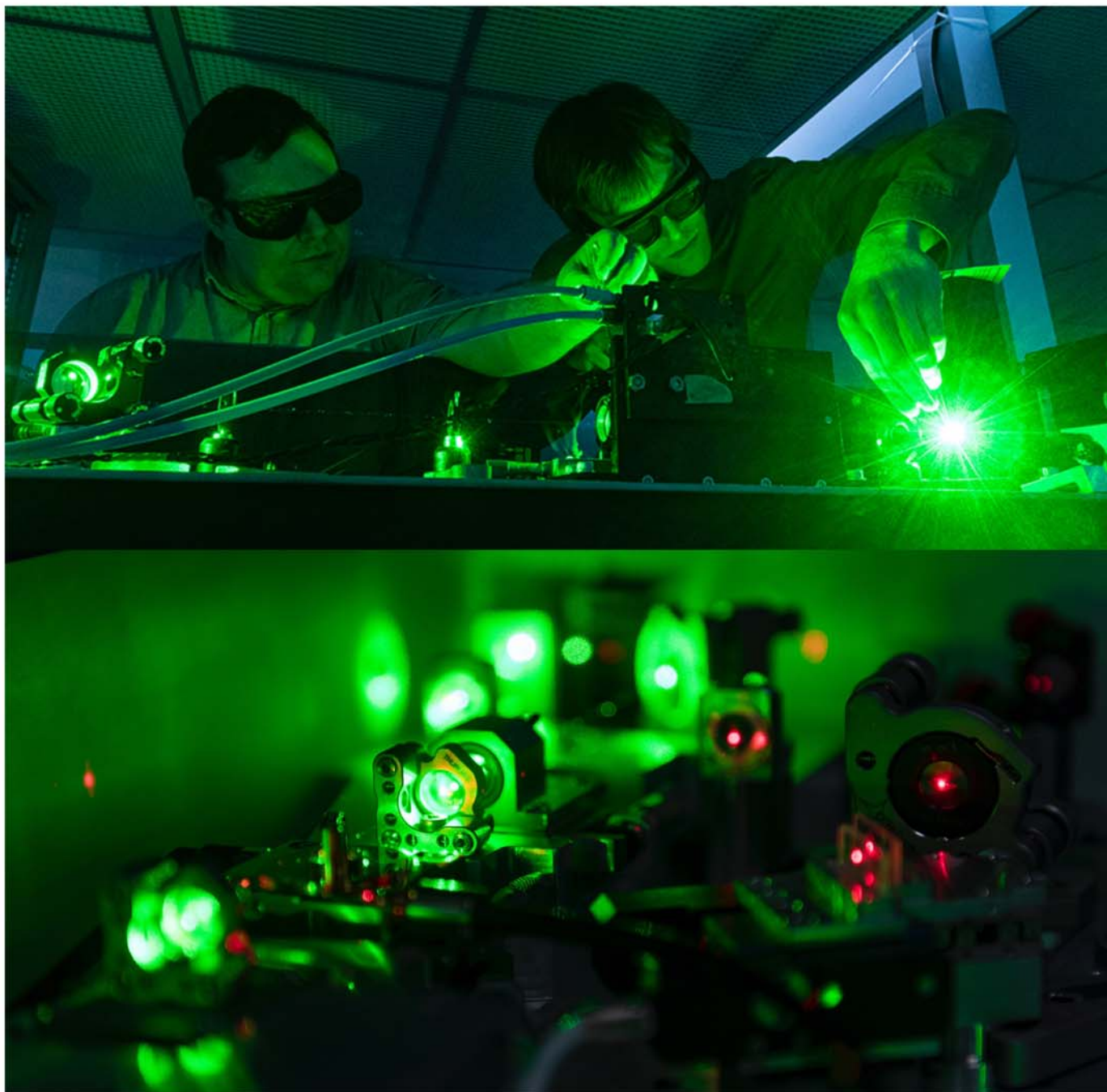
A lapszám színes megjelenésének támogatója:

**HUN  
REN**

**WIGNER**



**Wigner Ultragyors  
Nanooptika Labor**



Információk, álláslehetőségek: [femtolab.hu](http://femtolab.hu)

Támogatók



NEMZETI KUTATÁSI, FEJLESZTÉSI  
ÉS INNOVÁCIÓS HIVATAL



**HORIZON**  
**2020** SHAPING  
EUROPE'S  
FUTURE

