

fizikai szemle

A photograph of a laser laboratory setup. In the foreground, there are several optical components, including mirrors and lenses, arranged on a table. A bright red laser beam is visible, reflecting off the surfaces of the components. The background is dark, with some blurred lights and equipment, suggesting a complex experimental environment.

LÉZEREK ÉS FOTONIKA

Fotoakusztika

Terahertzes impulzusok

A lítium-niobát

2026/6

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

Felelős szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő
Olasószerkesztő: Bodrog Zoltán
Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Asbóth János, Bíró László Péter, Csengeri Kamilla, Czitrovsky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Járai-Szabó Ferenc, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Pásztor Gabriella, Sándor Bulcsú, Simon Ferenc, Simon Péter, Sódor Ádám, Sükösd Csaba, 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
Felelős kiadó: Újfalussy Balázs főtítkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:
<http://fizikaiszemle.elft.hu>,
e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztője e-mail címe:
fsz_szerkesztok@elft.hu. A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük. Kéziratokat nem örzünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató. Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszerűsített számlán. Az egyes számok ára: 2000,- Ft (a dupla számoké 4000,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)
HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

Wigner FK Ultragyors Nanooptikai Laboratórium,
femtosekundumos lézerrendszer (Fotó: Rácz Péter)

TARTALOM

FOTONIKA – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztő: Dombi Péter

- Dombi Péter:* Fénysebességgel a jövőbe – Válogatás a legújabb hazai lézeres és fotonikai kutatásokból 181
- Bozóki Zoltán:* Fotoakusztikus gáz- és aeroszoldetekálás – A fizikai alapoktól a gyakorlati alkalmazásokig 182
A hosszú távon üzembiztosan működő, robusztus felépítésű fotoakusztikus mérőrendszerek számos alkalmazásban kulcsfontosságúak.
- Tóth György, Krizsán Gergő, Pálfalvi László:* Nagy energiájú egy- és többciklusú terahertz impulzusok előállítása a Pécsi Tudományegyetemen 187
A THz-es impulzusok sokoldalúan alkalmazhatók az anyagszerkezeti vizsgálatoktól kezdve az ultragyors folyamatok tanulmányozásán át a stratégiai fontosságú részecskegyorsításig.
- Corradi Gábor, Kovács László, Lengyel Krisztián:* Hogyan működik a lítium-niobát, a fotonika igáslova? Fejezetek a Kristályfizikai Kutatócsoport történetéből 191
A lítium-niobát számos ipari és kutatási alkalmazásban kulcsszerepet játszik, ám komplexitása miatt felhasználása magas szintű szakértelmet igényel.
- Rácz Péter, Sándor Péter, Hanus Václav, Dombi Péter:* A femtoszekundumos nanooptikai kutatások legújabb eredményei 197
Három jelentős femtoszekundumos kutatási eredményt mutat be a cikk: az optikai chipek építését, a forró elektronok dinamikáját és a fotoelektron-újraszóródás új tulajdonságait.

TANULMÁNY

- Lévay Péter:* A téridő mint hologram 1. 199
A három részből álló cikksorozat első része ismeretterjesztő szinten áttekinti a klasszikus és kvantumtérelméletek fogalmait és szimmetriáit, különös tekintettel a konform térelméletekre.
- Király Beáta, Angeli István:* Versailles-tól Versailles-ig – Debrecen érintésével – Az SI mértérendszer reformja – 2. rész 204
A szerzők az SI mértérendszer 2019-es reformja kapcsán közreadott cikkük második részében áttekintik a méter mérésügyi történetét és kiderül, mi köze van mindehhez Debrecennek.

A FIZIKA TANÍTÁSA

- Wiedemann László, Bodrog Zoltán:* A függőleges tengely körül forgatott rugalmas szál deformációja 208
A címben leírt probléma esetén a szerzők meghatározzák a szál hosszmenti anyageloszlás-függvényét.
- Herendi Borbála, Vitkóczy Fanni:* Beszámoló a 66. Országos Fizikatanári Ankétról és Eszközbeutatóról 209
- Horváth Zoltán, Bérczi Szaniszló:* Napelemes építőjáték alkalmazása a középiskolai fizikaoktatásban és azon túl – A mechanikától az űrkutatásig 212
Az egyik szerző egy, a Giga Solar Energy játék alapján épített autót odaadott egy szakkörös kis csapatnak, akik ezzel a marsjáró-mechanika és -meghajtás témakörébe tartozó feladatokat, problémákat oldottak meg.

MEGEMLÉKEZÉS

- Bakonyi Imre:* Lovas Antal (1938–2026) B3

PHOTONICS – THEMATIC BLOCK

- P. Dombi:* At the speed of light into the future – A selection of recent Hungarian laser and photonics research
- Z. Bozóki:* Photoacoustic gas and aerosol detection – From physical foundations to practical applications
- Gy. Tóth, G. Krizsán, L. Pálfalvi:* Generation of high-energy single- and multi-cycle terahertz pulses at the University of Pécs
- G. Corradi, L. Kovács, K. Lengyel:* How does lithium niobate, the workhorse of photonics work? Chapters from the history of the Crystal Physics Research Group
- P. Rácz, P. Sándor, V. Hanus, P. Dombi:* Latest results in femtosecond nanooptics research
- ### STUDY
- P. Lévay:* Spacetime as a hologram 1.
- B. Király, I. Angeli:* From Versailles to Versailles – with a stop in Debrecen – The reform of the SI system of measurements

TEACHING PHYSICS

COMMEMORATION

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



FÉNYSEBESSÉGGEL A JÖVŐBE – VÁLOGATÁS A LEGÚJABB HAZAI LÉZERES ÉS FOTONIKAI KUTATÁSOKBÓL

Dombi Péter

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
E-mail: dombi.peter@wigner.hun-ren.hu

A modern lézerfizika, optika és fotonika napjainkban egyre több alap- és alkalmazott kutatási területet hódít meg – számos konkrét, az emberek mindennapjait szolgáló hasznosítási eredménnyel. Ehhez elég csak arra gondolnunk, ahogy a rövid impulzusú lézerek betörték a molekuláris szintű orvosi diagnosztika világába *Krausz Ferenc* legújabb, hazánkban immár hat éve folyó kutatásainak köszönhetően. Így hát nem véletlen, hogy a lézeres és fotonikai témájú előadások kiemelten szerepeltek a hazai fizikusközösség legnagyobb tudományos seregszemléje, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat által a Pécsi Tudományegyetemen megrendezett 2025-ös Magyar Fizikus Vándorgyűlés előadásai között.

A konferencián elhangzott előadások egyike a lézerfényvel keltett hang: a fotoakusztika alkalmazásait, azon belül is a fotoakusztikus gáz- és aeroszoldetektlást mutatta be, amely a fizikai alapoktól eljutva mára a környezetvédelem és a diagnosztika nélkülözhetetlen, nagy érzékenységgel mérési módszerévé vált. Ebben a folyamatban játszott úttörő szerepet a Szegedi Tudományegyetemen *Szabó Gábor* által kezdeményezett kutatási irány.

Ezzel párhuzamosan az ultrarövid és intenzív fényimpulzusok világa is forradalmi változásokon megy keresztül: a házigazda Pécsi Tudományegyetem kutatói nemzetközi szinten is meghatározó szerepet játszanak a nagy energiájú, egy- és többciklusú terahertzes impulzusok előállításában, és a terahertzes impulzusokkal történő részecskegyorsítás koncepcióinak kidolgozásában *Hebling János* iskolateremtő munkásságának köszönhetően.

Ezek a csúcstechnológiás áttörések azonban elképzelhetetlenek lennének a megfelelő anyagszerkezeti háttér és a mikroszkopikus folyamatok megértése nélkül.

A Wigner Fizikai Kutatóközpont Kristályfizikai Kutatócsoportjának története és eredményei hűen tükrözik, miként vált a lítium-niobát a „fotonika igáslovává”.

A tudományos és technológiai fejlődés legújabb horizontját a Wigner Fizikai Kutatóközpont Ultragyors Nanooptika „Lendület” Kutatócsoportjának femtoszekundumos nanooptikai kutatásai jelentik, melyek a klasszikus optikától kezdve a fény-anyag kölcsönhatási folyamaton át az elektronok dinamikájának kutatásáig számos kiemelt nemzetközi publikációt eredményeztek. Ennek köszönhetően a csoport immár a második fiatal poszt-doktort tudta „leigazolni” a Bécsei Műszaki Egyetemtől – igazolva a hazai kutatási környezet nemzetközi vonzerjét.

A nanooptika és az ultrarövid lézerimpulzusok találkozására ráadásul egy másik érdekes kérdésre a lézeres fúzió megvalósíthatóságára is választ adhat, amelyek *Króó Norbert* kutatásainak a fókuszában állnak. Ez az előadás kimondottan élénk érdeklődést váltott ki a Vándorgyűlésen, ám mivel a *Fizikai Szemle* 2025. szeptemberi száma cikket közölt a témáról, az érdeklődő olvasókat annak tanulmányozására buzdítjuk.

A 2025-ös pécsi Fizikus Vándorgyűlés programja egyértelművé tette, hogy a hazai kutatóintézetek és egyetemek nemcsak követik, hanem alakítják is a globális tudományos trendeket. A lézeres és fotonikai alapkutatásokból kibontakozó eredmények mára közvetlen utakat keresnek a jövő orvostechonikai, környezetvédelmi és energetikai alkalmazásai felé. A bemutatott válogatás hűen dokumentálja ezt a lenyűgöző folyamatot, inspirációt nyújtva a kutatók következő generációjának, és megerősítve Magyarország helyét a modern optikai tudományok világvonalában.



Dombi Péter az MTA doktora, az MTA Lézerfizikai Bizottságának elnöke. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Ultragyors Nanooptika „Lendület” Kutatócsoportjának vezetője. 2010-től vezető szerepet játszott a szegedi ELI Lézerközpont felépítésében és – alapító osztályvezetőként – a létesítmény kutatási profiljának kialakításában. Kutatási területei a lézerfizika, a nanooptika, a femtoszekundumos technológia és az ultragyors fény-anyag kölcsönhatási folyamatok vizsgálata.

FOTOAKUSZTIKUS GÁZ- ÉS AEROSZOLDETEKTÁLÁS – A FIZIKAI ALAPOKTÓL A GYAKORLATI ALKALMAZÁSOKIG

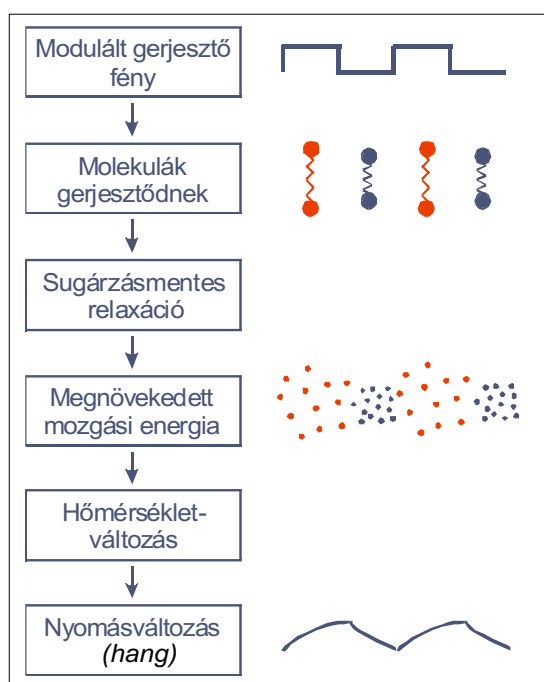
Bozóki Zoltán

Szegedi Tudományegyetem, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szeged

E-mail: zbozoki@physx.u-szeged.hu

Háttér és motiváció

A fotoakusztikus (PA) gáz- és aeroszoldetektálás a fény és az anyag kölcsönhatásán alapuló mérési módszer (1. ábra), amelyben az elnyelt elektromágneses sugárzás hatására a közeg lokálisan felmelegszik, majd ennek következtében periodikus nyomásváltozás, azaz hanghullám keletkezik. Ez az akusztikus jel megfelelő érzékenységgű detektorral mérhető, és amplitúdója közvetlen kapcsolatban áll az abszorbeált energia mennyiségével, így a vizsgált gáz koncentrációjával. A módszer fizikai alapja tehát viszonylag egyszerű, ugyanakkor a gyakorlati megvalósítás során számos olyan tényező lép fel, amely a mérés pontosságát, megbízhatóságát befolyásolja.



1. ábra. Fotoakusztikus jelkeltés



Bozóki Zoltán fizikus, a Szegedi Tudományegyetem professzora, a fotoakusztikus gázdetektálás nemzetközileg elismert kutatója. Kutatásai a lézeres spektroszkópia és a környezeti mérés technika határterületére esnek. Munkássága jelentősen hozzájárult a fotoakusztikus módszer gyakorlati alkalmazásainak fejlesztéséhez, különösen ipari és környezeti mérőrendszerek területén. Számos nemzetközi publikáció és szabadalom fűződik a nevéhez.

A múlt század hetvenes és nyolcvanas éveiben a fotoakusztikus mérés technika világszerte rendkívül nagy figyelmet kapott, mivel különböző laboratóriumi kísérletekben egyedülállóan nagy érzékenységet értek el a módszerrel. Ezek a „világ bajnok” rendszerek jellemzően nagyméretű laboratóriumi szén-dioxid- vagy szén-monoxid-lézereken alapultak, és lehetővé tették igen kis, akár ppb vagy ppt nagyságrendű koncentrációk kimutatását is. Tudományos szempontból ezek az eredmények valóban kiemelkedő jelentőségűek voltak, ugyanakkor ezeknek a kezdeti fotoakusztikus rendszereknek a mérete, bonyolultsága és működtetési igénye jelentősen korlátozta a lehetséges gyakorlati alkalmazhatóságukat. Éppen ezért ezeket a berendezéseket jellemzően nagyméretű, nehezen mozgatható platformokra (pl. teherautókra) telepítették, és folyamatos szakértői felügyelet mellett működtették.

Amikor a múlt század kilencvenes éveiben Szegeden fotoakusztikus mérésekkel kezdtünk el foglalkozni, a tudományos közösségben már egyértelművé vált, hogy a módszer szélesebb körű alkalmazásának nem az érzékenység hiánya, hanem a gyakorlati használhatóság korlátjai szabnak határt. Ez a felismerés alapvetően meghatározta kutatási stratégiánkat. A cél nem az volt, hogy a már így is rendkívül alacsony kimutatási határokat tovább javítsuk, hanem hogy olyan mérőrendszereket fejlesszünk, amelyek hosszú távon stabilan, megbízhatóan és minimális beavatkozással működnek.

Ennek megfelelően a fejlesztések során a robusztus felépítésre és az üzembiztos működésre helyeztük a hangsúlyt, ami viszont szükségszerűen együtt járt a legkisebb kimutatható koncentráció bizonyos mértékű romlásával, ami jellemzően a ppm vagy jobb esetben a szub-ppm. tartományba került. A gyakorlati alkalmazások szempontjából azonban ez a kompromisszum elfogadhatónak, sőt sok esetben optimálisnak bizonyult, mivel a mérési stabilitás és a reprodukálhatóság jellemzően sokkal fontosabb tényező, mint az érzékenység további növelése.

A fotoakusztikus rendszerek egyik alapvető technikai kihívása a rendkívül gyenge (gyakran az emberi hallásküszöb alatti) akusztikus jelek érzékelése, feldolgozása. Ráadásul ezek a jelek gyakran jelentős háttérzajban jelennek meg, amely származhat mechanikai rezgésekből, áramlási jelenségekből vagy akár a mérőrendszer elektronikus zajából is. Emiatt elengedhetetlen a fázisérzékeny (lock-in) alapú jelfeldolgozás alkalmazása, amely egyrészt lehetővé teszi a hasznos jel kiemelését a zajból, másrészt



2. ábra. Az általunk fejlesztett műszerek különböző robbanásbiztos változatai az olaj- és gázipar számára

ről ez a megoldás, valamint a szükséges lézervezérlés és jelfeldolgozó elektronika jelentősen megnöveli a fotoakusztikus műszer árát és összetettségét. A módszer költségvonzata különösen akkor válik hangsúlyossá, amikor egyszerűbb alkalmazások esetén más mérési technikák is rendelkezésre állnak, és árban jóval versenyképesebbek, mint a fotoakusztika. Ilyen esetekben a fotoakusztika nem feltétlenül jelent gazdaságos megoldást. Ugyanakkor számos olyan alkalmazás létezik, ahol a módszer egyedi előnyökkel rendelkezik; pl. a fotoakusztika különösen jól alkalmazható összetett, változó összetételű gázkeverékek vizsgálatára, ahol a hagyományos optikai vagy kémiai módszerek pontossága és megbízhatósága korlátozott. Ez a felismerés kutatásainkat olyan alkalmazási területek felé terelte, ahol a robusztus működés és a szelektív kimutatás kulcsfontosságú. Ilyenek például a földgáz összetételének a vizsgálata, illetve a belső égésű motorok kipufogógázának mérése, ahol a gázkeverék összetétele és a környezeti feltételek egyaránt gyorsan változhatnak. Ezekben az esetekben a mérési módszer megbízhatósága gyakran fontosabb, mint a maximális érzékenység.

A gyakorlati alkalmazások során további problémák is felmerültek, amelyek új műszaki megoldásokat igényeltek. Ilyen például a lézer hullámhosszának stabilitása, amely a fotoakusztikus mérés pontossága szempontjából kritikus tényező. Ennek biztosítására speciális stabilizációs eljárásokat kellett kidolgozni. Hasonló kihívást jelentett az is, hogy a gázösszetétel változása befolyásolja a fotoakusztikus cella akusztikus rezonanciafrekvenciáját, ami a mérési jel amplitúdójának változásához vezethet. Ennek kezelésére valós idejű rezonanciakövető módszereket fejlesztettünk ki.

Ezek a példák jól szemléltetik, hogy a gyakorlati alkalmazások felé történő elmozdulás nem csupán mérnöki feladat, hanem új fizikai problémák megoldását is megköveteli. *A fotoakusztikus technika fejlődése ezért szoros kölcsönhatásban áll az alapkutatással:* az alkalmazási igények új kérdéseket vetnek fel, amelyek megválaszolása a fizikai folyamatok mélyebb megértését igényli, míg az

elméleti eredmények új lehetőségeket nyitnak a mérési technika továbbfejlesztésére.

Fotoakusztikus rendszerek az olaj- és gázipar számára

Fotoakusztikus fejlesztéseink egyik korai és meghatározó alkalmazási területe az olaj- és gázipar volt. A H_2S (hidrogén-szulfid) koncentrációjának mérése különösen fontos, mivel ez a gáz már kis koncentrációban is mérgező, és jelenléte jelentős biztonsági kockázatot jelent az ipari folyamatok során.

Korai munkánk során olyan fotoakusztikus mérőrendszert fejlesztettünk ki, amely képes volt a H_2S koncentrációjának folyamatos, valós idejű meghatározására földgázban [1]. Ez több szempontból is újszerű megközelítést jelentett. Egyrészt a fotoakusztikus módszert korábban nem alkalmazták robbanásveszélyes környezetben, másrészt a rendszernek szigorú ipari követelményeknek kellett megfelelnie, beleértve a robbanásbiztos kivitel biztosítását is (2. ábra).

A fejlesztés során nemcsak a mérési elv működőképességét kellett igazolni, hanem a teljes rendszer megbízhatóságát is. Ipari környezetben a mérőműszereknek hosszú időn keresztül, folyamatos működés mellett is stabilan kell működniük, miközben a környezeti feltételek – például hőmérséklet, a nyomás vagy a gázösszetétel – jelentősen változhatnak. A fotoakusztikus módszer robusztussága ebben az esetben kulcsfontosságú előnyt jelentett.

A fotoakusztikus fejlesztéseinkkel egyidőben egy másik mérési elv, azaz az optikai abszorpciós spektroszkópia is megjelent a földgázipar és általában a gázdetektálás területén, és rövid idő alatt a fotoakusztika komoly versenytársává vált. Szerencsénkre a 2001-ben a Rice Egyetemen (Houston, Texas) elvégzett összehasonlító vizsgálataink bebizonyították, hogy a fotoakusztikus módszer egyértelmű előnyökkel rendelkezik az optikai abszorpcióhoz képest [2]. Ezen előnyök

ellenére a módszer ipari bevezetése nem volt azonnali: több év fejlesztési munka és optimalizálás volt szükséges ahhoz, hogy a rendszer elérje a kívánt megbízhatósági szintet.

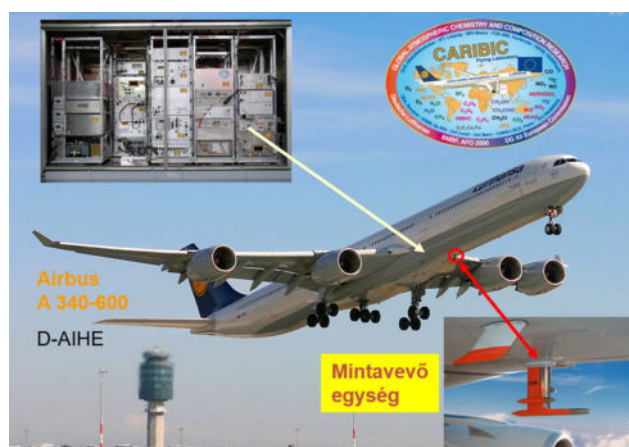
Ez a folyamat jól mutatja, hogy egy fizikai mérési elv ipari alkalmazása nemcsak tudományos kérdés, hanem hosszú fejlesztési és mérnöki munka eredménye is.

Repülőgépre telepített fotoakusztikus rendszer

A fotoakusztikus mérési módszer gyakorlati alkalmazhatóságát jól szemlélteti egy különösen szigorú követelményeket támasztó mérési feladat: a légköri vízgőz és a teljes víztartalom (azaz vízgőz plusz felhőcseppek, esőcseppek, jégcseppek) repülőgépes mérése. A vízgőz a légkör egyik legfontosabb összetevője, mivel közvetlenül befolyásolja a Föld sugárzási mérlegét, valamint közvetett módon, a felhőképződésen keresztül is hatással van az éghajlati rendszerre, továbbá a légkörkémiaili folyamatok is különböznek aszerint, hogy felhőkben vagy felhőmentes környezetben játszódnak le. Különösen fontos a megfelelő mérések végrehajtása a felső troposzféra és az alsó sztratoszféra tartományában, ahol a vízgőz koncentrációja kicsi, ugyanakkor a cirrusfelhők keletkezésében és fejlődésében meghatározó szerepet játszik.

Ezen a területen a mérési feladat rendkívül összetett. A műszernek kis koncentrációkat kell nagy megbízhatósággal mérnie alacsony nyomáson és alacsony hőmérsékleten, miközben egy utasszállító repülőgép csomagterébe telepített másfél tonnás környezetmegfigyelési állomás részeként működik. A repülőgépes környezetben a műszer erős mechanikai és akusztikai zajnak, változó nyomás- és hőmérsékleti viszonyoknak, valamint korlátozott karbantartási lehetőségeknek van kitéve. Ezért ebben az alkalmazásban nem elegendő az, hogy a fotoakusztikus mérési elv laboratóriumi körülmények között érzékeny legyen: a műszernek hosszú időn keresztül, automatikusan és megbízhatóan kell működnie.

Az általunk kifejlesztett WaSul-Hygro műszer ilyen célra készült [3]. A rendszer a CARIBIC kutatási program



3. ábra. Az általunk fejlesztett WaSul-Hygro műszer működési környezete

(<https://www.caribic-atmospheric.com/>) keretében egy kereskedelmi repülőgép csomagterében működik 2002 óta (azaz lassan 25 éve!), és teljes 10–12 órás repülési útvonalakon végez vízgőz- és teljesvíztartalom-méréseket. A műszer alapja egy telekommunikációs típusú diódalézer, amely 1371 nm hullámhosszon működik. Ez a lézertípus kisméretű, hosszú élettartamú, megbízhatóan és automatikus módon üzemeltethető (3. ábra).

A WaSul-Hygro egyik fontos sajátossága a kétcsatornás fotoakusztikus felépítés. A repülőgép orra alá szerelt egyedi mintavételezési rendszer kétféle mintavételezési egységgel rendelkezik: az egyik (amelyik merőleges a repülőgép hossz tengelyére) a vízgőz mérésére, a másik (amely párhuzamos a repülőgép hossz tengelyével) a teljes víztartalomnak – vagyis a vízgőz és a felhőcseppekben, illetve jégkristályokban lévő víz együttes mennyiségének – meghatározására szolgál. A mintavételi egység és a műszerkonténer közötti mintavételezési gázvezeték fűtött, így a felhőrészesecskék víztartalma a mérőcellába jutás előtt elpárolog, és így a mérés végül mindkét fotoakusztikus kamrában a gázfázisban történik. Derült, felhőmentes körülmények között a két mérőkamra azonos vízgőz-koncentrációt mér. Felhőben repülve viszont a teljes víztartalom mérésére szolgáló csatorna nagyobb jelet ad, és a két mérés különbségéből meghatározható a felhővíz vagy felhőjég mennyisége.

A fotoakusztikus módszer egyik alapvető előnyét, azaz a szelektivitást jól mutatták azok az összehasonlító vizsgálatok is, amelyekben a fotoakusztikus vízgőzmérőt harmatponti higrométerrel vetették össze. A fotoakusztikus módszer előnye különösen akkor jelentkezett, amikor a vízgőz mellett más, zavaró komponensek – például salétromsavgőz – is jelen voltak. Mivel ezek a zavaró komponensek a fotoakusztikus mérések hullámhosszán egyáltalán nem nyelnek el, a fotoakusztikus mérés vízgőzre szelektív maradt, míg a hagyományosabb mérési elvű műszereket megzavarta az interferáló komponensek jelenléte.

A műszer másik lényeges tulajdonsága a gyors válaszidő. A fotoakusztikus cellák kis térfogata és a megfelelő térfogatáram lehetővé teszi, hogy a cellában lévő levegőminta körülbelül egy másodperc alatt kicserélődjön. Egy utasszállító repülőgép körülbelül 250 m/s sebessége mellett ez néhány száz méteres térbeli felbontásnak felel meg. Ez különösen fontos a felső troposzféra és alsó sztratoszféra erősen változó szerkezetének vizsgálatakor, ahol a vízgőz-koncentráció és a felhőképződési folyamatok térben gyorsan változhatnak.

A hosszú távú repülőgépes működés egyik tanulsága az volt, hogy a műszernek önellenőrző és önkorrekciós eljárásokra is szüksége van. A repülőgép fedélzetén nincs lehetőség napi laboratóriumi beállításra vagy karbantartásra, ezért a rendszernek automatikusan kell felismernie és korrigálnia bizonyos változásokat. Ilyen probléma lehet például a diódalézer hullámhosszának lassú eltolódása, amely a vízgőz abszorpciók vonaláról való lehanglódást okozhatja. Ezt a problémát úgy kezeltük, hogy

egy harmadik fotoakusztikus kamrával (úgynevezett referencia-kamrával) egészítettük ki a rendszert, amely nedves levegőt tartalmaz, és így a lézer hullámhossza ráhangolható a vízgőz elnyelési vonalának maximumára. Ugyancsak fontos volt a mérőrendszer nyomás- és koncentrációfüggő érzékenységének kalibrálása, amely nélkül a mérési eredményekben szisztematikus eltérések jelentkezhettek volna.

A WaSul-Hygro műszer fejlesztése jól mutatja, hogy a fotoakusztikus módszer gyakorlati alkalmazása nem egyszerűen egy laboratóriumi mérési elv „kihelyezése” terepi környezetbe. A repülőgépes alkalmazás során a teljes mérőrendszert újra kellett gondolni: a mintavételt, a kamrageometriát, a lézermodulációt, a zajszűrést, a kalibrációt és az automatikus működést egyaránt a különleges környezeti feltételekhez kellett igazítani. Ez a fejlesztési folyamat ugyanakkor azt is bizonyítja, hogy a fotoakusztikus spektroszkópia nemcsak érzékeny laboratóriumi módszer, hanem megfelelő mérnöki és fizikai optimalizálással hosszú távon működő, repülőgépes légkörkutató mérőrendszer alapja is lehet.

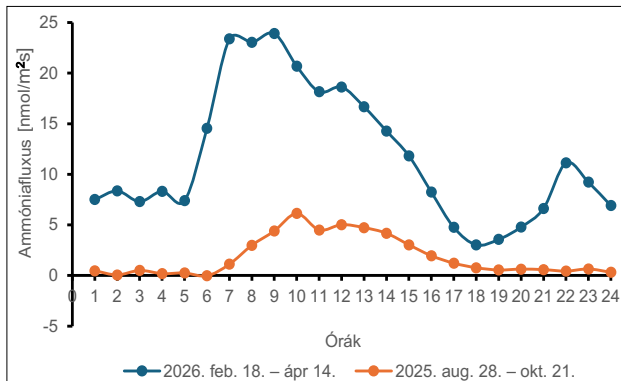
A repülőgépes vízgőzmérés ezért különösen jó példája annak az általános tanulságnak, amely a fotoakusztikus fejlesztések több területén is megjelenik: a gyakorlati alkalmazhatóságot nem pusztán a kimutatási határ határozza meg. Legalább ilyen fontos a szelektivitás, a válaszidő, a teljes mérési tartomány, a robusztuság, az automatikus működés és a hosszú távú stabilitás. A WaSul-Hygro esetében ezek a szempontok együtt tették lehetővé, hogy a fotoakusztikus módszer egy nagy nemzetközi légkörkutató programban, kereskedelmi repülőgép fedélzetén is alkalmazhatóvá váljon.

Terepi alkalmazás ammóniaemisszió mérésére mezőgazdasági környezetben

A fotoakusztika egy másik ígéretes alkalmazási területe a mezőgazdasági és a biológiai rendszerek vizsgálata. A talajból származó gázkibocsátások, a növényi anyagcsere folyamatai, illetve az evapotranszpiráció során keletkező nyomgázok mérése fontos információkat szolgáltat a szén- és nitrogénkörforgás megértéséhez. Ezek a folyamatok nemcsak alapvető tudományos szempontból érdekesek, hanem a fenntartható mezőgazdasági gyakorlatok kialakításában is szerepet játszanak.

A fotoakusztikus detektálás egyik fontos, az utóbbi években egyre nagyobb figyelmet kapó alkalmazási területe a mezőgazdasági eredetű gázkibocsátások vizsgálata. A műtrágyázás következtében a talajból jelentős mennyiségű ammónia (NH_3) kerülhet a légkörbe, amely egyrészt a tápanyag-hasznosulás szempontjából veszteséget jelent, másrészt a légkörkémiailag folyamatokban is szerepet játszik, káros környezeti hatásokkal párosulva.

Terepi méréseink során fotoakusztikus elven működő, lézeres spektroszkópiailag módszert alkalmaztunk az ammónia koncentrációjának folyamatos nyomon követésére egy műtrágyázott repecultúra felett. A mérő-



4. ábra. Az ammóniafluxus napi menete műtrágyázást követően

rendszer robusztus kialakítása lehetővé tette a több héten keresztül történő, megszakítás nélküli működést valós környezeti feltételek mellett. A koncentrációméréseket mikrometeorológiai módszerekkel kombinálva meghatározhatóvá vált az ammónia talaj és légkör közötti fluxusa is (4. ábra).

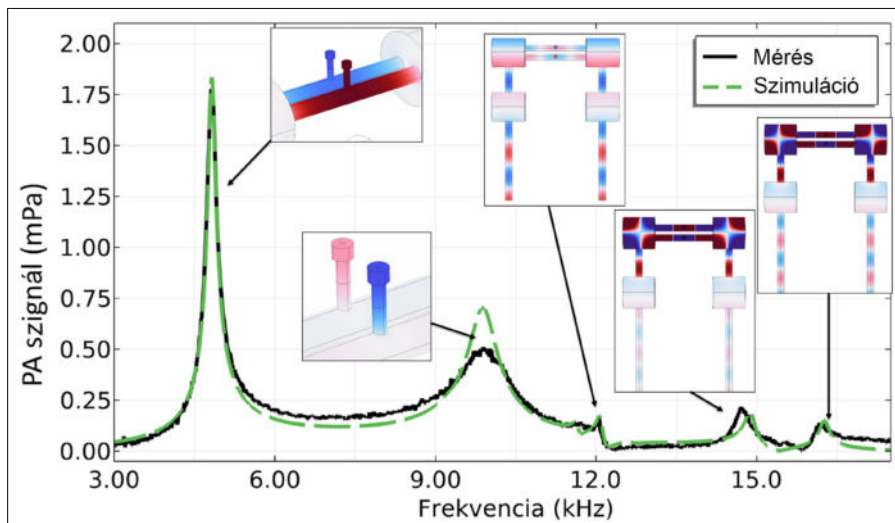
A mérések egyik jellegzetes eredménye az ammónia-emisszió markáns napi menete volt. A fluxus értéke éjszaka alacsony, közel állandó szinten maradt, míg nappal jelentősen megnövekedett. A maximum jellemzően a délelőtti órákban jelentkezett, amit egy kisebb visszaesés követett a kora délutáni időszakban. Ez a viselkedés jól tükrözi a turbulens keveredés, a besugárzás és a felszíni folyamatok napi változását.

A napi ciklus alakulását több tényező együttes hatása szabja meg. Nappal a megnövekedett napsugárzás és a felmelegedő felszín fokozza a turbulens anyagcserét, ami elősegíti az ammónia légkörbe jutását. Ezzel szemben éjszaka a légköri rétegződés stabilabbá válik, a keveredés csökken, és a fluxus nagysága is mérséklődik. A mérések azt is megmutatták, hogy az emisszió időbeli lefolyása szorosan kapcsolódik a műtrágyázást követő napokhoz: kezdetben magasabb értékek jelentkeznek, majd az idő előrehaladtával fokozatos csökkenés figyelhető meg.

Az ilyen típusú terepi vizsgálatok jól példázzák, hogy a fotoakusztikus technika nemcsak laboratóriumi körülmények között alkalmazható nagy érzékenységgel, hanem komplex, változó környezeti rendszerekben is megbízható mérési eszközt jelent. A módszer különösen alkalmas olyan folyamatok vizsgálatára, ahol a koncentrációk és fluxusok időben gyorsan változnak, és ahol a folyamatos, hosszú távú mérés elengedhetetlen.

Egyéb alkalmazások

Az olaj- és gáziparon és a mezőgazdaságon túl a fotoakusztikus detektálás számos más területen is sikeresen alkalmazható. Kiemelkedő jelentőségű a környezeti mérések területe, ahol a különböző nyomgázok – például a metán (CH_4), a dinitrogén-oxid (N_2O), vagy a vízgőz – kimutatása fontos szerepet játszik a légköri folyamatok és a klímaváltozás vizsgálatában.



5. ábra. A fotoakusztikus mérőkamra végesselelemes szimulációjának eredményei

A módszer különösen előnyös olyan környezetekben, ahol a gázösszetétel gyorsan változik, vagy ahol több komponens egyidejű jelenléte bonyolítja a mérést. Ilyen esetekben a fotoakusztika szelektivitása és robusztussága jelentős előnyt képvisel más mérési technikákkal szemben.

A fotoakusztikus detektálást ipari folyamatok monitorozásában is alkalmazzák, például égési folyamatok diagnosztikájában vagy emissziómérésekben. Az ilyen alkalmazások során gyakran szélsőséges körülmények – magas hőmérséklet, változó gázösszetétel, mechanikai rezgések – mellett kell megbízható mérést végezni, ami különösen nagy kihívást jelent.

Az utóbbi években új kutatási irányként jelentek meg a több hullámhosszú fotoakusztikus rendszerek, amelyek aeroszolok vizsgálatára és optikai tulajdonságaik meghatározására is alkalmasak. Ez tovább bővíti a módszer alkalmazási körét, és új lehetőségeket nyit meg mind az alap kutatás, mind az alkalmazások területén.

Numerikus szimulációk

A fotoakusztikus rendszerek fejlesztésében a numerikus szimulációk kiemelt szerepet játszanak. A mérőrendszer működése több fizikai folyamat együttes eredménye: az optikai abszorpció, a hőátadás, az akusztikai rezonancia és az áramlási viszonyok egyaránt befolyásolják a mérhető jelet. Ezek együttes vizsgálata analitikus módszerekkel nehéz, ezért a numerikus modellezés elengedhetetlen eszközzé vált. A numerikus szimulációk segítségével optimalizálható a fotoakusztikus cella geometriai kialakítása, meghatározhatók a rezonanciafrekvenciák, valamint előrejelezhető a jel amplitúdója különböző körülmények között. Emellett lehetőség nyílik annak vizsgálatára is, hogy a gázösszetétel, a nyomás vagy az áramlási viszonyok változása hogyan hat a mérési eredményre (5. ábra).

A numerikus modellezés nemcsak a tervezést segíti, hanem a mérések értelmezésében is fontos szerepet játszik. A valós rendszerek gyakran eltérnek az ideális modellektől, és a szimulációk segítségével feltárhatók ezek

az eltérések, valamint azonosíthatók a mérési bizonytalanság forrásai.

Különösen fontos szerepe van a szimulációknak az önellenőrző és önkorrekciós algoritmusok fejlesztésében. Ezek az algoritmusok lehetővé teszik, hogy a mérőrendszer automatikusan alkalmazkodjon a változó környezeti feltételekhez, például a rezonanciafrekvencia eltolódásához vagy a jel amplitúdójának változásához.

Összességében a numerikus szimulációk hidat képeznek az elméleti fizikai megértés és a gyakorlati mérőrendszerek fejlesztése között, és kulcsszerepet játszanak a fotoakusztikus technika továbbfejlesztésében.

Összefoglalás

A cikkben áttekintést adtam a fotoakusztikus gáزدetektálás fizikai alapjairól és fejlődéséről, különös tekintettel a gyakorlati alkalmazások irányába történő elmozdulásra. Bemutattam, hogyan vált a rendkívül érzékeny, de bonyolult laboratóriumi módszer robusztus, ipari és környezeti mérésekben is alkalmazható technikává. Ismertettem a legfontosabb alkalmazási területeket, valamint a mérőrendszerek fejlesztésében kulcsszerepet játszó numerikus szimulációk jelentőségét. A bemutatott példák jól szemléltetik az alap kutatás és az alkalmazásorientált fejlesztés szoros kapcsolatát.

Irodalom

1. Varga A., Bozóki Z., Szakáll M., Szabó G. (2006): Photoacoustic system for on-line process monitoring of hydrogen sulfide (H_2S) concentration in natural gas streams. *Applied Physics B*, 85, 315–321.
2. Bozóki Z., Mohácsi Á., Szabó G., Bor Z., Erdélyi M., Chen W., Tittel F. K. (2002): Near-infrared diode laser based spectroscopic detection of ammonia: A comparative study of photoacoustic and direct optical absorption methods. *Applied Spectroscopy*, 56(6), 715–719.
3. Szakáll M., Mohácsi Á., Tátrai D., Szabó A., Huszár H., Ajtai T., Szabó G., Bozóki Z. (2020): Twenty years of airborne water vapor and total water measurements of a diode laser based photoacoustic instruments. *Frontiers in Physics*, 8(1), article 384.

NAGY ENERGIÁJÚ EGY- ÉS TÖBBCIKLUSÚ TERAHERTZES IMPULZUSOK ELŐÁLLÍTÁSA A PÉCSI TUDOMÁNY-EGYETEMEN

Tóth György^{1,2,*}, Krizsán Gergő^{2,3}, Pálfalvi László^{1,3}

¹PTE-TTK Fizikai Intézet, Pécs

²PTE-Szentágothai János Kutatóközpont, Pécs

³HUN-REN-PTE Nagy Intenzitású Terahertzes Kutatóközpont, Pécs

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

Az elektromágneses spektrum mikrohullámú és infravörös tartománya közt elhelyezkedő terahertzes (THz-es) frekvenciatartomány az elmúlt két évtizedben a kutatási érdeklődés homlokterébe került. Ennek oka, hogy a THz-es impulzusok egyedülálló módon képesek összekapcsolni a fotonikus és az elektronikus rendszerek időskáláit, így hidat képeznek a klasszikus rádiófrekvenciás és az optikai technológiák között. A THz-es sugárzás alkalmas anyagszerkezeti vizsgálatokra, spektroszkópiára, képkalkotásra, valamint különböző dinamikus, nemlineáris folyamatok időfelbontott tanulmányozására is. Az utóbbi években ugyanakkor egy új, stratégiai jelentőségű alkalmazási irány körvonalazódott: a nagy intenzitású THz-es terek használata töltött részecskék gyorsítására.

A THz-es impulzusok jellemzően két nagy csoportba sorolhatók: egyciklusú és többciklusú (multiciklusú) jelalakokba. Az *egyciklusú* impulzusok szélessávúak, időtartamuk a pikoszekundumos tartományba esik. E rövid impulzusok különlegessége, hogy elektromos térerősségük akár a több MV/cm-es értéket is elérheti. Ilyen tulajdonságok különösen alkalmassá teszik őket ultragyors folyamatok – például félvezetőben vagy plazmában lejátszódó töltésszétválás, kvantumkoherens gerjesztések – vizsgálatára, illetve töltött részecskék rendkívül rövid térszakaszon történő, precíziós gyorsítására. A THz-es részecskegyorsítási kísérletekben az egyciklusú impulzusok kulcsszerepe abban rejlik, hogy szinkronban képesek kölcsönhatni az elektronsomaggal, miközben a gyorsító tér praktikusán nem tartalmaz ellenfázisú komponenseket, így a gyorsítás nagy határfokkal valósítható meg.

A *többciklusú* THz-es impulzusok ezzel szemben keskenyebb sávzélességűek, periodikus szerkezetűek, és elsősorban rezonáns kölcsönhatásokhoz biztosítanak előnyt. Ezek a források különösen hasznosak olyan al-

kalmazásokban, ahol stabil, kvázifolytonos THz-es térre van szükség – például dielektromos és plazmatöltések gerjesztésében, anyagvizsgálati spektroszkópiában vagy terahertzes antennák tesztelésében. Többciklusú tereknél a fókuszált tér profilja és homogenitása döntően befolyásolja a kölcsönhatás minőségét, ezért a fejlesztések egyik célja e források nyalábminőségének és ismétlési stabilitásának javítása.

A közös cél mindkét impulzustípus esetében, hogy a THz-es térerősség a lehető legnagyobb, a nyalábprofil pedig a lehető leghomogénebb legyen. Ez különösen fontos a részecskegyorsítás területén, ahol a keresztmetszete mentén homogén gyorsító tér biztosítja a részecskenyaláb stabilitását és energiaszórásának minimalizálását, ami olyan kiemelt fontosságú alkalmazások esetén követelmény, mint például a hadronterápia. Kutatócsoportunk – a Pécsi Tudományegyetem Fizikai Intézetének *Nagyintenzitású Terahertzes Kutatócsoportja* – e célkitűzések mentén kompakt, asztali méretű THz-es impulzusforrások fejlesztésén dolgozik, amelyek a nagy lézerlaboratóriumok infrastruktúrájától függetlenül is alkalmazhatók.

A következőkben bemutatjuk a legújabb koncepcionális fejlesztéseinket és kísérleti eredményeinket: egyrészt az egyciklusú impulzusok extrém nagy térerősségű



Tóth György egyetemi docens, a PTE Fizikai Intézet igazgatója. A PTE fizika BSc-képzésének szakfelelőse. 2012-ben fizika-matematika tanári szakos diplomát, 2016-ban doktori fokozatot szerzett fizikából. 2021-ben habilitált. Bolyai-ösztöndíjas. A Fialat Kutatók Akadémiájának alumnusa. Kutatásai elsősorban a nemlineáris optika és a nagy energiájú terahertzes impulzusok előállítására és alkalmazására irányulnak.



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, tudománynépszerűsítő előadásokat, és rendszeresen készít fel középiskolás és egyetemi diákokat a Tudok- vagy TDK-versenyekre.



Pálfalvi László az MTA doktora, a Pécsi Tudományegyetem (PTE) Kísérleti Fizika Tanszékének tanszékvezető egyetemi tanára, a PTE Fizika Doktori Iskola vezetője. Legjelentősebb tudományos eredményeit a nagy energiájú távoli infravörös (THz-es) impulzusforrások elvi fejlesztése, illetve a THz-es impulzusokkal történő részecskegyorsítási alkalmazások kidolgozásához kapcsolódóan érte el.

előállítására, másrészt a többciklusú THz-es források hatékony, homogén nyalábprofilú megvalósítására irányuló munkánkat.

Egyciklusú THz-es forrásfejlesztés

A töltött részecskék manipulációjára és gyorsítására legjobban használható alacsony THz-es frekvenciákon (<2 THz) a legnagyobb impulzusenergiát és legnagyobb elektromos térerősséget a hagyományos, döntött impulzusfronttal gerjesztett lítium-niobát- (LN-) alapú források állították elő (1. ábra). Az eljárás során a keltő lézertér (pumpálás) intenzitásfrontját úgy döntjük meg, hogy a pumpa kristálybeli terjedési sebességének az intenzitásfrontra merőleges vetülete megegyezzen a keletkező THz-es sugárzás sebességével. Ennek eredményeként a frontra merőleges irányban terjedő THz-es sugárzás együtt halad a kristályban a keltő térrel, vagyis létrejön a sebességillesztés. Az impulzusfront döntését egy optikai rács hozza létre. Ezután a szögdiszperzió következtében az impulzushossz gyorsan növekszik, és így az intenzitás csökken. Ahhoz, hogy a kristályban rekonstruáljuk a rövid impulzushosszt és a hatékony keltéshez elengedhetetlen nagy intenzitást, leképezéssel létrehozzuk a kristályban a rács képét. Ennek érdekében, hogy a pumpaimpulzus merőlegesen tudjon belépni a kristályba, a keltett THz-es tér pedig merőlegesen tudjon kilépni abból, prizma alakú LN kristályt alkalmazunk. A sebességillesztés megvalósításához LN esetén 63° -os döntési szögre van szükség.

Ezt a megoldást, mellyel mára 0,7%-os hatásfokkal 1 mJ-t meghaladó impulzusenergiát és több MV/cm-es elektromos térerősséget tudtak előállítani [1], Hebling János javasolta 2002-ben [2]. A hatásfok, az impulzusenergia, illetve az elektromos térerősség további növekedésének viszont jelentős korlátozó tényezői vannak: i) korlátozott kölcsönhatási hossz az impluszfront dőléshez szükséges nagy szögdiszperzió miatt, ii) a leképezési hibák és a szögdiszperzió együttes jelenléte miatti impulzushossz-növekedés, iii) prizma alakú LN kristály nagy ékszöggel, mely miatt a THz-es impulzus időbeli alakja (hullámformája) különböző lesz a THz-es nyaláb adott keresztmetszetének különböző pontjaiban.

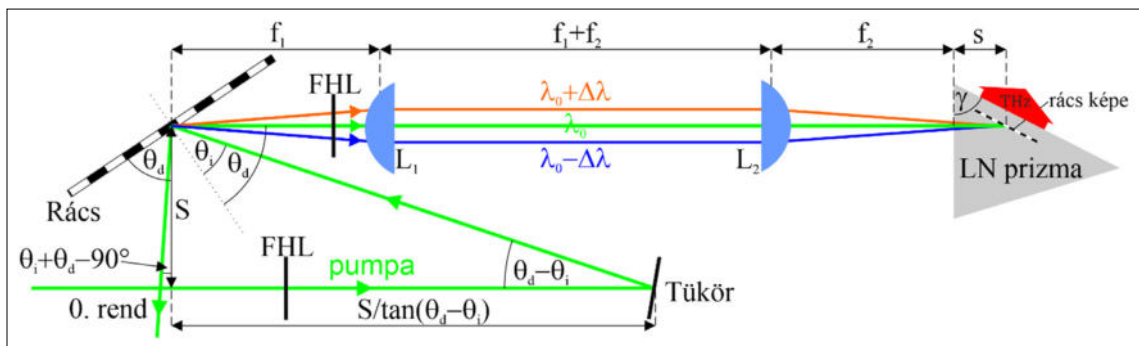
Az elmúlt években kutatócsoportunk jelentős erőfeszítéseket tett annak érdekében, hogy olyan THz-es

forrásokat javasoljon, melyeknél az előbb említett korlátozó tényezők i) csökkenthetők vagy ii)–iii) akár teljesen megszüntethetők. Ezen források közül néhányat már bemutatunk [3] közleményünkben: az egyik legperspektivikusabb a térfogati holografikus rácson (THR) keresztül pumpált nemlineáris echelonlap (NLEL), melynek kísérleti megvalósításában jelentős előrelépéseket értünk el.

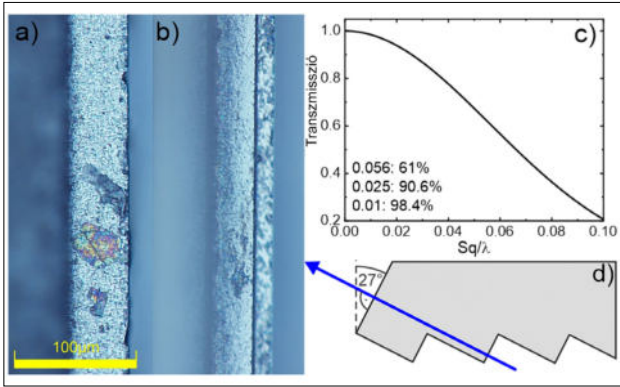
Korábban egy kisméretű (5×8 mm felületű és 3 mm vastagságú), mikrostrukturált sík-párhuzamos LN lapot alakítottunk ki, mellyel a forrás működését demonstráltuk [4]. Nemrégiben egy jóval nagyobb, 20×30 mm felületű NLEL-t alakítottunk ki, melynek kezdeti vastagsága 6 mm volt. Ezt fokozatosan 1,5 mm-re lecsiszolva a vastagságfüggő keltési hatásfokot tudtuk meghatározni. Ezzel megállapítottuk, hogy az optimális kristályvastagság 1,5 és 2 mm között van 1030 nm-es központi hullámhosszú és 200 fs-os transzformációlimitált impulzushossz esetén. 100 GW/cm² csúcsintenzitású pumpálás esetén a keltési hatásfok elérte a 0,085%-ot. Ez 2,8-szoros az első kisméretű NLEL-lel elért értéknek.

A 2a., b. ábrán optikai mikroszkóppal készült képek láthatók a nagyméretű és a kisméretű NLEL-ok mikrostrukturált felületéről. Mint az az ábrákon látható, a megmunkált felületek minősége nem tökéletes. A felületi érdesség meghatározása érdekében a nagyméretű NLEL oldalát 27° -ban lecsiszoltattuk, hogy a mikrostrukturált felületet közvetlenül megvilágítva, a lézernyalábot merőlegesen csatolhassuk ki (2d. ábra). A transzmittált energia 1,7-szer kisebb volt, mint azt a tökéletes mikrostrukturált felület diffrakciójától elvárhattuk volna. Ebből megállapítottuk, hogy az S_q felületi érdesség négyzetes középértéke 60 nm. Ezt 25 nm-re csökkentve már 1,55-szor nagyobb transzmisszót jelenthet (2c. ábra), amely jelentősen növelheti a THz-es keltési hatásokat.

Összeségében elmondható, hogy jobb minőségű mikrostrukturált felület esetén jelentős keltési hatásfok-növekedés várható, mely így jelentősen meghaladhatja a hagyományos forrásét. Már korábban is megmutattuk, hogy az elrendezés által közel tökéletes egyciklusú THz-es impulzusok kelthetők, melyek jól fókuszálhatók, így a forrás által keltett impulzusok kifejezetten alkalmasak lehetnek a nagy térerősséget igénylő alkalmazásokhoz.



1. ábra. Hagományos döntött impulzusfrontú forrás sematikus rajza



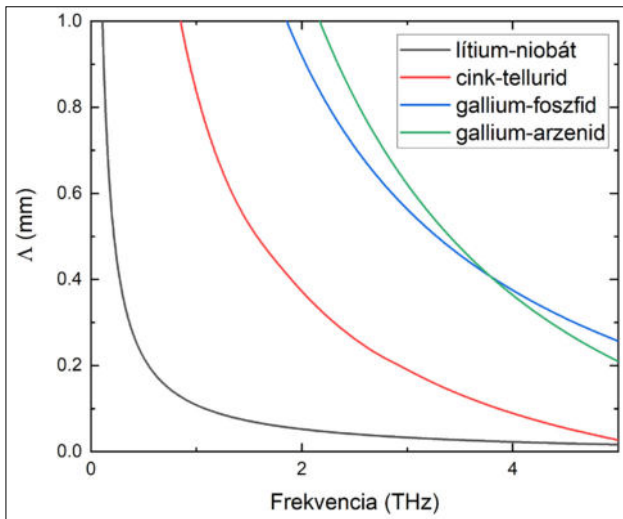
2. ábra. a) és b) Optikamikroszkóp-felvételek a nagy- és kisméretű nemlineáris echelonlap mikrostrukturált felületéről. c) A transzmisszió függése S_q -tól, hullámhosszal normalizálva. d) A NLEL polírozott szélének sematikus ábrázolása felületi érdességméréshez

Többciklusú THz-es forrásfejlesztés

Többciklusú THz-es impulzusok optikai egyenirányításon alapuló előállításának módja rendszerint periodikusan polarizált kristálystruktúrához kötött. A kristálystruktúra periódusa és az előállítandó THz-es sugárzás frekvenciája közti összefüggést a

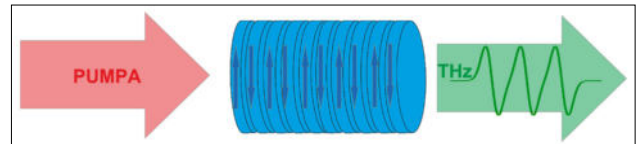
$$\Lambda = \frac{c}{\nu_0 (n_{\text{THz}}^{\text{fázis}} - n_p^{\text{csoport}})} \quad (1)$$

írja le, ahol Λ a kristálystruktúra periódusának hossza (az egymást követő ellentétes polaritású tartományok hossza ennek megfelelően $\Lambda/2$), c a vákuumbeli fénysebesség, ν_0 a THz-es frekvencia, $n_{\text{THz}}^{\text{fázis}}$ a keletkező THz-es sugárzásra vonatkozó fázis-törésmutató, n_p^{csoport} pedig a keltő térre (pumpaimpulzusra) vonatkozó csoport-törésmutató. A 3. ábra mutatja, hogy lítium-niobát esetén 1,03 μm , félvezető kristályok esetén 1,7 μm pumpálási hullámhossz esetén mekkora periódusok szükségesek az (1) sebességillesztési feltétel megvalósításához.



3. ábra. Különböző THz-es keltésre alkalmas kristályok periódushossza az előállítani kívánt THz-es frekvencia függvényében

Az ábráról leolvasható, hogy a közeli infravörös tartományon jól ismert nemlineáris frekvenciakonverziókra gyakran alkalmazott kvázi-fázisillesztés esetén használt periódushosszknál legalább egy nagyságrenddel hosszabb periódusokról van szó. Ebből adódóan az előállításnál nem minden esetben szükséges periodikusan polarizált kristályt alkalmazni, lehetőség van nagyon vékony kristályrétegek, *ostyák* egymás utáni szoros sorrendben történő elhelyezésére úgy, hogy az egymást követő kristályostyák polarizációja ellentétes (4. ábra) [5]. Mivel az ostyák közötti rés vastagsága nagyságrendekkel kisebb, mint a THz-es tér hullámhossza, a rétegek közti áthaladás jó közelítéssel veszteségmentesnek tekinthető. Ez természetesen nem igaz a pumpaimpulzusra, ezért az egyes ostyákat a pumpára vonatkozóan antireflexiók réteggel kell ellátni.



4. ábra. Többciklusú THz-es impulzus ostyastruktúrában való keltésének szemléltetése. Az egyes ostyaszeletek egymástól függetlenül is alkalmazhatók, az összeillesztésnél ügyelni kell az egymás után következő ostyák polarizációs irányaira

A keltési folyamat során kritikus paraméter a keltő tér impulzushossza. Az optikai egyenirányítás legegyszerűbb leírásában, amikor a nemlineáris tagon kívüli hatásokat elhanyagoljuk, a keletkező THz-es tér arányos az öt létrehozó pumpaimpulzus időbeli intenzitásburkolójának deriváltjával: Gauss-pumpaimpulzus esetén a keletkező THz-es tér olyan bipoláris jel, mely jellegében hasonlít a szinuszfüggvény egyetlen periódusához. A kristályban azonban a pumpaimpulzus és a keletkező THz-es tér eltérő sebességgel terjed, ezért az egymást követő helyeken keletkező THz-komponensek fázisa fokozatosan elcsúszik. Egy bizonyos terjedési hossz után az újonnan keltett tér már nem erősítené, hanem kioltaná a korábban létrejött THz-es teret. A periodikus polaritásváltás szerepe éppen az, hogy ezen a helyen megváltoztassa a polarizáció előjelét, és a további THz-es keltés ismét konstruktívan járjon hozzá a már jelen lévő THz-es térhez. Az (1) feltétel lényegében az ehhez szükséges térbeli periodicitást adja meg. Mivel az egyes periódusokon belül létrejövő THz-es hozzájárulás alakját a pumpaimpulzus időtartama határozza meg, a pumpáló impulzus hossza közvetlenül befolyásolja mind a keletkező THz-es tér alakját, mind a THz-es keltés határfokát. Numerikus számításokkal megmutattuk [6], hogy a THz-es keltés határfoka akkor lesz maximális, ha a keltésre használt impulzus hossza

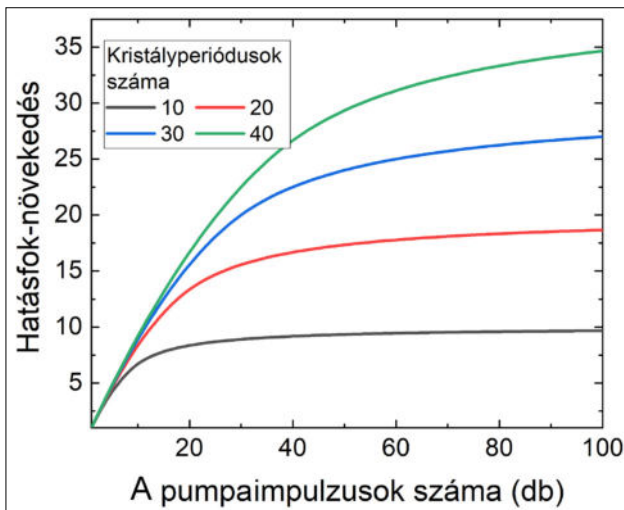
$$\Delta t = 0,245/\nu_0. \quad (2)$$

Amikor egyetlen impulzussal keltünk többciklusú THz-es impulzust egy periodikusan polarizált kristályban, a keletkező THz-es sugárzás minden egyes ciklusa pusztán egyetlen kristályperióduson keresztül erősö-

dik. Ha azonban nem egy, hanem több pumpáló impulzust használunk a keltéshez, elérhető, hogy periódusról periódusra újabb és újabb pumpaimpulzusok erősítsék tovább a kialakult teret. Ennek feltétele, hogy az egyes pumpaimpulzusok a THz-es tér frekvenciájának megfelelően kövessék egymást. Megmutattuk, hogy N_k periódusból álló kristály esetén N_p számú egymáshoz szinkronizált pumpaimpulzust használva a keltés hatásfoka az

$$N \approx \begin{cases} \frac{3N_k N_p - N_p^2 + 1}{3N_k}, & \text{ha } N_p \leq N_k, \\ \frac{3N_k N_p - N_p^2 + 1}{3N_p}, & \text{ha } N_p \geq N_k \end{cases}$$

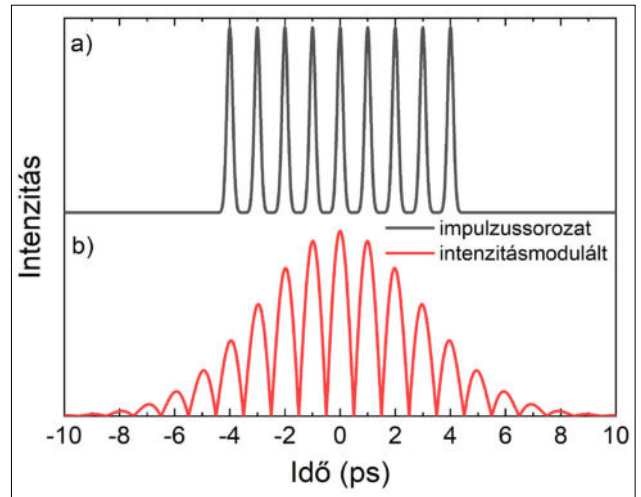
faktorral szorozódik ahhoz képest, mintha csak egyetlen pumpaimpulussal keltenénk a teret [6]. A képlet eredményeit a 5. ábra szemlélteti négy különböző számú periódusból álló kristály esetén 1–100 pumpaimpulzus-szám mellett. Jól látszik, hogy a hatásfok közel lineárisan nő mindaddig, míg a pumpáló impulzusok száma el nem éri a kristályperiódusok számát. Ezt követően egy lassú telítődés alakul ki.



5. ábra. A különböző periódusszámú kristályokkal elérhető hatásfok-növekedés a pumpáló impulzusok számának függvényében

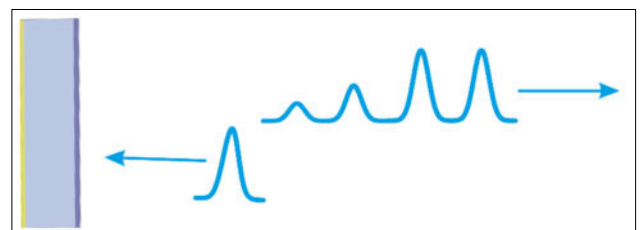
Egy impulzussorozat előállítására alapvetően két fő irány létezik: az egyik irány szerint egymástól időben és térben ténylegesen elkülönülő impulzussorozatot állítunk elő (6a. ábra). A másik – és gyakrabban alkalmazott technika – esetében egy hosszú impulzusban alakítunk ki periodikus modulációt (6b. ábra). Utóbbit elsősorban az úgynevezett chirp & delay technikával állítják elő, melynek alapötlete a következő: egy rövid Fourier-limitált impulzust lineárisan csörpölünk. A nyújtott impulzusban a pillanatnyi frekvencia az idővel lineárisan változik. Egy ilyen impulzust egy nyalábosztó segítségével két részre osztunk, majd a két impulzust különböző hosszúságú utak megtételét követően (késleltetve egyiket a másikhoz képest) újra egyesítünk. Az interferáló, csörpölt

impulzusok eredményeként az egyesített impulzus intenzitásburkolójában olyan állandó periódusú moduláció jelenik meg, amelynek frekvenciája az impulzusok közötti késleltetéssel szabályozható.



6. ábra. (a) Többes impulzusok a THz-es keltés szempontjából optimális impulzushosszal. (b) Intenzitásmodulált impulzus. A THz-es keltés frekvenciája mindkét esetben 1 THz

Fontos azonban megemlíteni, hogy ilyen intenzitásmodulált pumpaimpulzusok esetén az egyes modulációs intenzitás szakaszok szélessége több mint kétszerese a (2) összefüggés alapján meghatározott optimális impulzushossznak; és ez számításaink szerint közel 40%-os hatásfok-csökkenést eredményez ahhoz képest, mintha ezek hossza az optimálisnak megfelelő lenne. Ezért, ha nincs szükség nagy számú pumpaimpulzusra, előnyösebb lehet valódi, egymástól időben elkülönülő impulzussorozatot előállítani. Erre egyszerű és kompakt megoldást kínál a Gires–Tornois-interferométer [7], melynek működési elvét és impulzussorozat-előállításra vonatkozó használatát a 7. ábra szemlélteti. Az interferométer esetünkben egy vékony üveglap, melynek hátoldala 100%-ban reflektáló, míg előoldalának reflexióját egy vékony réteg határozza meg. Az üveglaphoz érkező fény egy része tehát közvetlenül visszaverődik, másik része pedig behatol az üvegbe, eljut a hátoldalig, ott visszaverődik, majd ismét az előlaphoz érve részben kilép az üvegből. A további belső visszaverődések következtében egymást követő, időben késleltetett impulzusok sorozata alakul ki. Merőleges beesés esetén ez az időbeli késés $2dn_p^{\text{csoport}}/c$, ahol d az interferométer vastagsága.



7. ábra. A Gires–Tournois-interferométer sematikus ábrája az impulzusalakkal az interferométer előtt és után

Megmutattuk, hogy az így előállított impulzussorozattal a THz-es keltés határfoka akkor maximális, ha az előlap reflexiója 38%. Ekkor az interferométerből kilépő impulzussorozat első két csúcsa azonos intenzitású, ahogy azt a 7. ábra is mutatja. Egyetlen ilyen eszköz alkalmazásával a THz-es keltés határfoka közel 120%-kal növelhető.

Összegzés

A Pécsi Tudományegyetemen olyan nagy intenzitású, kompakt, egy- és többciklusú THz-es impulzusforrások fejlesztése zajlik, melyek mind határfok, mind nyalábminőség, mind pedig skálázhatóság szempontjából előrelépést jelentenek a hagyományos döntött impulzusfrontú technikához képest. Ezen eredmények a jövőben a nemlineáris THz-es spektroszkópai vizsgálatok mellett jó alapját képezik a THz-es impulzusok részecskegyorsításra történő felhasználásának.

Köszönetnyilvánítás

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

Irodalom

1. Zhang B., Ma Z., Ma J., Wu X., Ouyang C., Kong D., Hong T., Wang X., Yang P., Chen L., Li Y., Zhang J. (2021): 1.4-mJ high energy terahertz radiation from lithium niobates. *Laser & Photonics Reviews*, 15, 2000295.
2. Hebling J., Almási G., Kozma I. Z., Kuhl J. (2002): Velocity-matching by pulse front tilting for large-area THz-pulse generation. *Opt. Express*, 10, 1161–1166.
3. Krizsán Gergő, Turnár Szabolcs, Polónyi Gyula, Almási Gábor, Tóth György (2024): Nagy energiájú terahertzes kutatások a Pécsi Tudományegyetemen. *Fizikai Szemle*, 9, 306–311.
4. Krizsán G., Tibai Z., Tóth Gy., Nugraha P. S., Almási G., Hebling J., Fülöp J. A. (2022): Uniformly scalable lithium niobate THz pulse source in transmission geometry. *Opt. Express*, 30, 4434–4443.
5. Lemery F., Vinatier T., Mayet F., Assmann R., Baynard E., Demailly J., Dorda U., Lucas B., Pandey A.-K., Pittman M. (2020): Highly scalable multicycle THz production with a homemade periodically poled macrocrystal. *Commun. Phys.*, 3, 150.
6. Nasi L., Illés G., Hebling J., Tóth Gy. (2025): Comparative analysis of optical rectification-based multicycle terahertz pulse generation techniques. *Optics Continuum*, 4, 2176–2192.
7. Tóth Gy., Nasi L., Turnár Sz., Kiss M., Pálfalvi L., Kedves M. Á., Aladi M., Hebling J. (2026): Generation of pump pulse trains by Gires-Tournous etalons for efficient multicycle terahertz generation. *Opt. Express*, bekioldva.

HOGYAN MŰKÖDIK A LÍTIUM-NIOBÁT, A FOTONIKA IGÁSLOVA? – FEJEZETEK A KRISTÁLYFIZIKAI KUTATÓ-CSOPORT TÖRTÉNETÉBŐL

Corradi Gábor, Kovács László[®], Lengyel Krisztián

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest

[®]E-mail: kovacs.laszlo@wigner.hun-ren.hu

A könyvtárnyi irodalommal rendelkező lítium-niobát (LiNbO₃, LN) a szoros illeszkedésű hexagonális oxigénalrácsra épülő kettős oxidok családjába tartozik, melyben az oktaéderes rács helyek egy-egy harmadát lítium és nióbbium foglalja el, harmada pedig üresen marad, és ez a sorrend az optikai főtengely irányában ismétlődik (1. ábra). Először 1928-ban állították elő polikristályos változatban, de jó minőségű egykristályokat csak a hatvanas évek végére sikerült növesztetni, kongruens, Li/Nb = 0,946 összetételű olvadékból, Czochralski-módszerrel. Létrehozza a két nagyon különböző kation választásától (ionos Li⁺ és kovalens Nb⁵⁺) egzotikus fizikai tulajdonságok megjelenését remélték, és ebben nem is csalódtak: az optikai főtengely irányában a szimmetrikus pozíciókból jelentősen kimozdult kationok felhúzott nemlineáris rugóként viselkednek, emiatt a rácsban ébredő feszültségeket igen nagy lokális elektromos terek kompenzálják, és mindezek meredek hőmérsékletfüggést is mutatnak. Ez erős csatolást hoz létre a mechanikai, elektromos, optikai és termikus hatások között, bármilyen párosításban, de közülük is kiemelkedik az elektrooptikai csatolás.

A kongruens LN körülbelül 1150 °C-ig ferroelektromos, csaknem a kb. 1250 °C-os olvadáspontjáig, és kiemelkedő opto-akusztó-piezo-termoelektronikai, valamint nemlineáris optikai (a THz-estől a távoli UV tartományig terjedő) képességeket mutat, ezenkívül töltésmozgással járó fotorefraktív-holografikus alkalmazásokkal is rendelkezik. Használatában az első ipari méretű áttörést a színes tévékben és később a mobil eszközökben is használatos felületihullám-frekvenciaszűrők jelentették. Jelenleg nagy felfutást mutat az LN integrált optikai felhasználása, például szigetelő szubsztráton előállított vékony LN filmekben (ez az LNOI, LN on insulator technológia kvantumfotonikai alkalmazásokhoz). Mostanra az optikai jelfeldolgozás céljára előállított LN eszközök termelése is ipari méreteket öltött, és komoly versenytársává vált a fotonika másik technológiájának, mely az LN-nál sokkal passzívabb félvezetőkön alapul, amelyekben töltéshordozók injektálásával lehet az optikai abszorpciót vagy törésmutatót változtatni. Azonban a rengeteg lehetséges effektus miatt ez az ígés egyúttal állatorvosi ló is, melynek alkalmazása nagy háttértudást és körültekintést követel.

Az LN előállításába és vizsgálatába az 1970-es évek végén kapcsolódtunk be, miután csoportunk az MTA Természettudományi Kutatólaboratóriumainak egyikeként a Budaörsi úti kutatóházba költözött, és már 1989-ben kristályadatokat szolgáltatunk az *EMIS Datareview*-ba [1]. A vizsgálatok kiszélesítése érdekében nemzetközi együttműködések alakítottunk ki, melynek során később az *European Science Foundation* támogatásával és 15 ország 20 intézetének részvételével megalapítottuk az *Oxide Crystal Network*-öt, mely 1994–1997 között állt fenn Corradi Gábor elnökletével. Az LN alap kutatásának és alkalmazásainak 2015-ös seregszemléje az a hat főtágó tanulmány, mely az *Applied Physics Reviews* felkérésére született, melyek közül az elsőt – *Growth, defect structure, and THz application of stoichiometric lithium niobate* címmel – a mi csoportunk írta, pécsi közreműködéssel [2]. Ezt követte 2018–2021-ben három, részben általunk írt és szerkesztett tematikus kötet a *Crystals* folyóiratban [3] és 2020-ban egy tematikus összefoglaló az excitonok folyamatokról a *J. Phys.: Condens. Matter*-ben [4]. Laboratóriumaink 1998 óta Csillebércen vannak (KFKI), és most is jelentős hazai és nemzetközi kutatás-fejlesztési keresletet elégítenek ki. A továbbiakban számba vesszük az LN alap kutatásának egyes jelentősebb eredményeit saját, válogatott, nagy visszhangot kiváltó publikációink tükrében, kiemelve azokat a témákat, melyek nem szerepelnek Kovács László korábbi ismertetőiben (*Fizikai Szemle* 2013/1 és 2014/10).

Az LN hibaszerkezete

A kongruens összetételt biztosító hibaszerkezet felderítésében sűrűségmérésekkel vettünk részt. Az LN ebből a szempontból a legtöbb nem sztöchiometrikus oxidtól eltérő viselkedést mutat, mert nem oxigén hiányhelyeket tartalmaz, hanem Li-rácshelyre beépülő Nb_{Li}^{5+} ionokat és az ezek többlettöltését kompenzáló Li-hiányhelyeket (kongruens esetben $\approx 1\%$ Nb_{Li}^{5+} és $\approx 4\%$ V_{Li}). Az oxigén-rács stabilitásának döntő bizonyítékait évtizedeken át sokan figyelmen kívül hagyták, ennek vetett véget kritikai összefoglalónk [3], mely alapesetben az eredményeket kizárólag a kationok átrendeződésével magyarázta, de magas hőmérsékleten redukáló atmoszférában kezelt kristályok esetében megengedte töltéskompenzált Li_2O hiányhely-asszociátumok keletkezését is.

A Li^+ -ionok mozgékonyságához (melyet lítium-tetraborátban is megfigyeltünk) hasonló viselkedést mutat a



Corradi Gábor fizikus az MTA doktora, a Wigner FK Kristályfizikai Kutatócsoportjának és jogelődjeinek 2003 óta tudományos tanácsadója. Nemzetközi kapcsolatait évekre kiterjedő kijevi, paderborni és osnabrücki tanulmányutak és további német, francia, amerikai, angliai, lett és észt intézetekben végzett kutatómunka jellemzik. A lítium-niobátban kívül többek között lítium-tetraborát doziméterek, lítium-ittrium-borát lézerekristályok és röntgenképtároló bárium-halid kristályok hibaszerkezetével is foglalkozott.

hidrogén is: mindkét atom diffúziója közel azonos aktívációs energiával ($\approx 1,2$ eV) történik. A hidrogén természetes módon a növesztés során is beépül a kristályba és többnyire egyetlen oxigén rácsatommal társulva OH^- csoportot alkot, mely stabil komplexeket hozhat létre más rács hibákkal. Ez az OH^- molekulaion nyújtási rezgési spektrumában jól követhető, jellegzetes változásokat okoz [2, 5, 6]. A Li és a H diffúziója döntő szerepet játszik az LN leglassabb relaxációs folyamataiban és a hologramok termikus rögzítésében, törlésében.

A kristály sztöchiometriájának javításával, melynek rekordját $Li/Nb = 1,000 \pm 0,001$ aránnyal a HTSSG növesztési technikával értük el [2, 7, 8], a rendezetlenség nagymértékben csökkenthető, mely a legtöbb fizikai tulajdonságra kihatással van, és szinte minden esetben a spektrumvonalak jelszerűségének drámai keskenyedéséhez vezet [9], ami általában az alkalmazások esetében is rendkívüli előnnyel jár.

Az adalékolás különböző céljai és a beépülés rács helyei

Az LN adalékolása lézeraktívátornak szánt átmenetifém- és ritkaföldfém-ionokkal kezdődött, de a Nb_{Li}^{5+} rács hibák jelenléte miatt stabil lézerműködés helyett inkább tartós fényszórás – fotorefraktív effektus – lépett fel. Ez mint „optikai károsodás” már az adalékolatlan kongruens LN-ban is jelentősen korlátozta a nemlineáris optikai alkalmazásokat, és a többféle vegyértékkel is beépülő adalékok hatására jelentősen fel is erősödött. Ugyanakkor a fotorefraktív effektus holográfiai és hullámvezető alkalmazásokhoz is vezetett. Az adalékok beépülésének rács helyével és a lokális rend módosulásaival kapcsolatban folytatott kutatásokban jelentős eredményeket értünk el [2]. Ezek a kutatások igazolták, hogy a 2–4 vegyértékű kationadalékok is Li-rács helyre épülnek be, de a töltéstöbbletet közeli Li-hiányhelyek kompenzál-



Kovács László fizikus, az MTA doktora, tudományos tanácsadó. Kutatásait részben külföldön, a Madridi Autonoma Egyetemen, illetve a Sussexi, a Pármai és az Osnabrücki Egyetemen végezte, majd közel 20 évig a Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézet, majd a Wigner Fizikai Kutatóközpont Kristályfizikai csoportját vezette. Fő kutatási területe az optikai kristályok hibaszerkezetének vizsgálata volt elsősorban optikai spektroszkópiai módszerekkel.



Lengyel Krisztián fizikus, a Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa, valamint a Kristályfizikai Kutatócsoport jelenlegi vezetője. Kutatási tevékenysége az egykristályokba beépülő adalékanyagok klasszikus és lézerspektroszkópiai módszerekkel történő vizsgálatára, továbbá a hibaszerkezetek számítógépes modellezésére terjed ki.

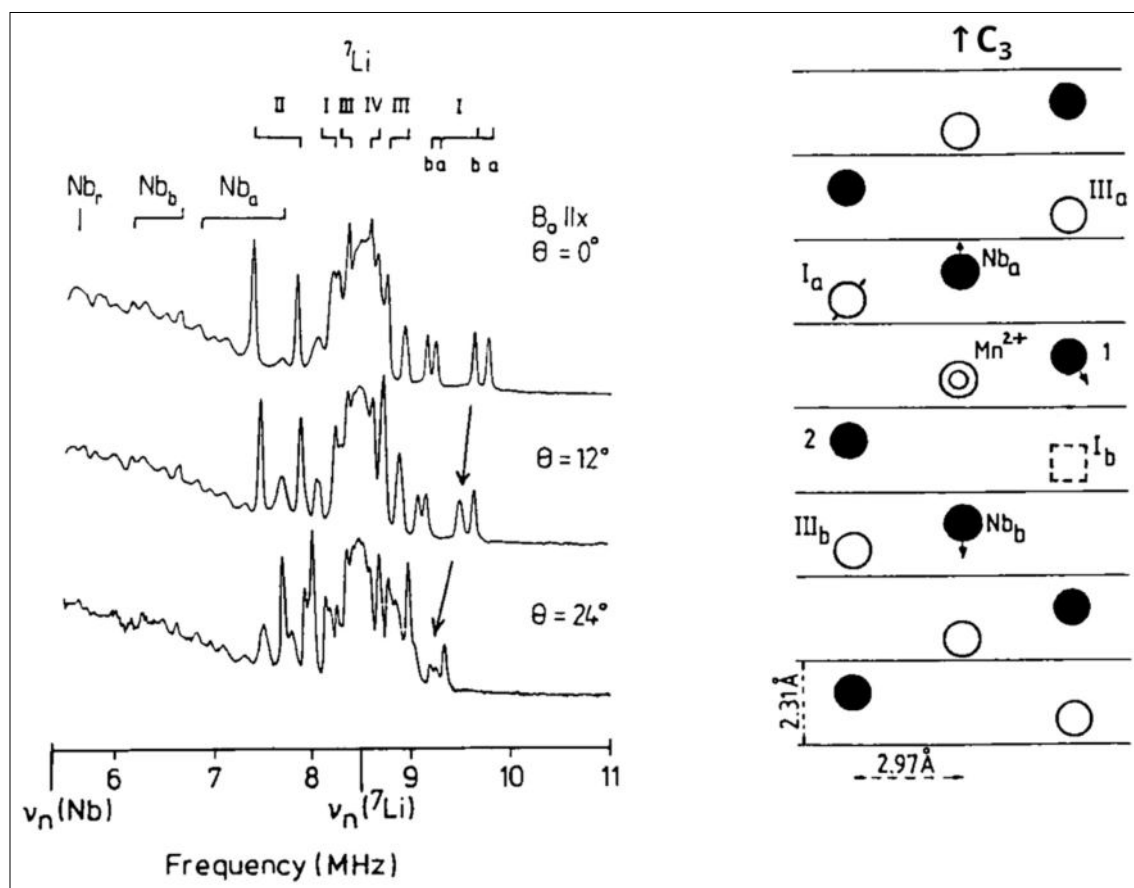
ják, helyi rendezetlenséget okozva. A paramágneses Ni⁺, Cu²⁺, Mn²⁺, Cr³⁺ és Ti³⁺-ionok esetében elsősorban elektronspin-rezonancia- (ESR-) módszerek – beleértve kettősrezonancia- és impulzus-telítési vagy optikailag detektált technikákat is – vezettek eredményre [10–12]. A Mn²⁺ és Cr³⁺ esetében a Paderbornban hozzáférhető elektron-mag kettősrezonancia- (ENDOR-) vizsgálat is alkalmazható volt, melynél a közeli magok spinátmeneteit az ESR-jel telítettségének megváltozása révén detektáljuk. Ennek megbízhatósága messze meghaladta a röntgenabszorpciós finomszerkezeti (EXAFS) és más módszerekkel mások és általunk is végzett párhuzamos vizsgálatok pontosságát, mert lehetővé tette a beépült ion kationkörnyezetének feltérképezését. Számos Li-szomszéd (sztöchiometrikus LN:Mn esetében 24, az adalék elektronspinjével kölcsönható ⁷Li magspin) teljes helyvektorát, míg a legközelebbi Nb-magoknak inkább csak az irányát szolgáltatta; mindezt nagy pontossággal és redundanciával, a legközelebbi Li-rácshelyek betöltöttségére pedig a jelfelhasadásból, illetve a jelszélességek szögfüggéséből lehetett következtetni (1. ábra).

A már említett optikai károsodás Mg-adalékolással gyakorlatilag teljesen megszüntethető, amennyiben a be-

vitt Mg-ionok száma eléri a mindenkori hiányzó Li-ionok számát [2]. Hasonló kompenzáció más, az LN-ban stabil vegyértékű, passzív kationadalékokkal (Zn²⁺, Sc³⁺, In³⁺, Zr⁴⁺, Sn⁴⁺, Hf⁴⁺) is elérhető [2, 6]. Ezek az optikai károsodást csökkentő adalékok a Nb_{Li}⁵⁺ rácshibákon kívül az aktív adalékokat is kiszorítják a Li-rácshelyekről, általában Nb-rácshelyre, amire az első perdöntő bizonyítékot a Mg + Cr adalékpáros esetében szolgáltatottuk [11]. Kis koncentrációnál ez alig módosítja, majd küszöbszerűen megváltoztatja – az optikai sérülékenységgel együtt – a kristály szinte minden más tulajdonságát is [2], és ezzel rendkívüli lehetőségeket teremt a kristály alkalmazásainak további hangolásra és optimalására.

Töltéshordozók keltése és azok társulásai

Az LN-ban egyes aktív adalékok optikai gerjesztésével vagy ionizáló sugárzásokkal szubpikuszekundumos skálán kis polaronok kelthetők (lásd [3, 4], ahol a polaronok keltésével, szerkezetével és bomlásával kapcsolatos, kijevi, rigai és osnabrückeri együttműködésben végzett kutatásaink is nyomon követhetők). Ezek jelentős lokális rácstorzulás által stabilizált elektronok, illetve lyukak,



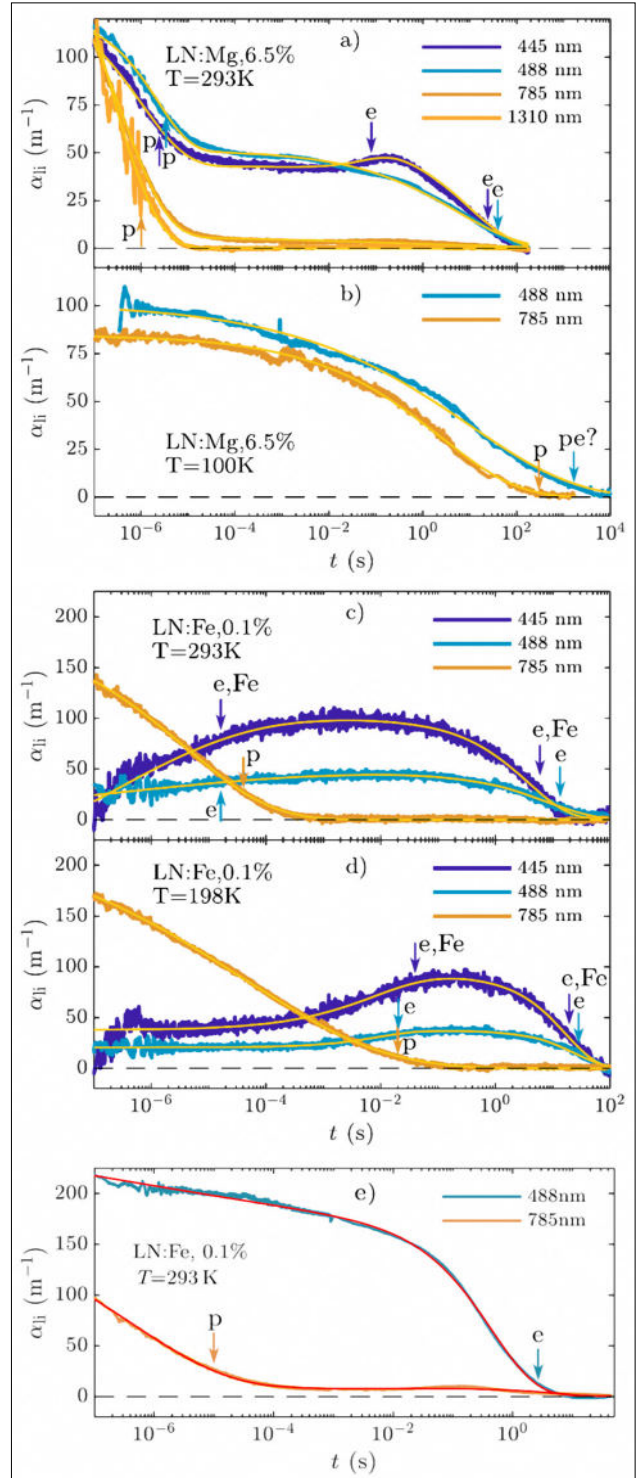
1. ábra. a) A sztöchiometrikus LiNbO₃:Mn ENDOR-spektruma a B₀ mágneses tér három, a háromfogású (C₃) optikai főtengelyre merőleges irányában [10]. A kationszomszédok magspin-átmeneteit (Nb esetében a felhasadt kvadrupólionettek közepét) kationszférák szerint csoportosítva jelöljük, ν_n az egyes magizotópok Larmor-frekvenciáit jelöli. b) Kristályszerkezet az LN yz csúszó szimmetriásíkjában, melyben a legközelebbi szomszédok kísérletileg becsült elmozdulása, illetve az I_b szférában egy Li hiánya is látható. Az utóbbira utal a bal oldalt nyilakkal jelzett jelfelhasadás, ugyanis az adott ⁷Li-mag spinátmenete szempontjából általános orientáció esetén nem mindegy, hogy két szféraszomszédja közül melyik hiányzik. Az üres körök Li-ot, a telt körök Nb-ot, a vízszintes vonalak oxigénsíkokat jelölnek

melyek Nb^{4+} -, illetve O^- -centrumoknak tekinthetők, bár az utóbbi esetben a néhány oxigénre kiterjedő, háromfogatú szimetriával rendelkező, nagyobb mozgékony-ságot feltételező modellek nincsenek kizárva [4]. A *kis* jelző arra utal, hogy a rácstorzulás gyakorlatilag az első szomszédokra korlátozódik, ellentétben a félvezetőkben megfigyelhető nagykiterjedésű polaronokkal. Az LN-ban szobahőmérsékleten a kis polaronok atomról atomra ugrálva mozoghatnak, és megfelelő adalékcspadák (lásd pl. [4, 10, 12]) hiányában ellenrácshelyű Nb_{Li}^{4+} -ionokként, illetve $O^-(V_{Li})$ centrumokként Li -hiányhelyeken fogódhatnak be, jellegzetes ESR-spektrumokat és széles abszorpciós sávot adva a közeli infravörös, illetve a kék tartományban. Azonban ezek a saját hibahelyeken csapdázott polaronok is csak ≈ 150 K alatt, illetve legfeljebb szobahőmérsékletig stabilak [3, 4].

Termokémiai redukció vagy nanokristályok őrlése [13] esetén döntően elektronpolaronok keletkeznek, melyek az erős kicserélődési kölcsönhatás miatt stabil párokat, bipolaronokat alkothatnak, a kristályok elfeketedését okozva. LN:Ti és LN:Ti,Mg kristályokban kimutattuk hasonló Ti_{Li}^{3+} , illetve Ti_{Nb}^{3+} polaronok létét, melyekben a Nb szerepét a Ti-adalék vette át, és szennyező típusú $Ti_{Li}^{3+}-Ti_{Nb}^{3+}$ bipolaronok léte is feltételezhető [2, 12]. Az elektron- és lyukpolaronok egymással is alkothatnak metastabil $Nb^{4+}-O^-$ párokat, egymást elsőszomszédpozícióban csapdázva (angol nevén self-trapped exciton, STE), ezeket azonban korábban csak az UV-lumineszcencia értelmezésénél vették figyelembe. Az öncsapdázott exciton az LN-ban szintén erősen lokalizált állapot, ellentétben a más, gyengébb elektron-fonon csatolással rendelkező kondenzált anyagokban ismert kisenergiájú excitongerjesztésekkel. A $Nb^{4+}-O^-$ excitonok LN-ban ezenkívül jelentős elektromos dipólmomentum-járu-lékkal is rendelkeznek, mely alkalmassá teszi őket az általában szintén dipólustermetű ponthibákhoz való kapcsolódásra. Az utóbbiak szerepét, azaz a ponthibák töltéskompensációjának jelentőségét korábban szintén alábecsülték [3, 4].

Excitonszenáriók a fotoindukált folyamatokban

Az osnabrücki együttműködésben Fe- vagy Mg-adalékat tartalmazó LN kristályokon végzett időfelbontott transziens abszorpciós és lumineszcenciavizsgálatok megmutatták, hogy a besugárzás során nemcsak rövid életű polaronok, hanem excitonok is keletkeznek (2. ábra, [4]). Az öncsapdázott exciton az izolált kis polaronokhoz hasonlóan szintén képes ugráló mozgásra, és ennek aktivációs energiája – mintegy 0,18 eV – szignifikánsan kisebb az elektronpolaronok esetében mért $\approx 0,26$ eV-nál [4]. Ez érthető, mert az STE nem szállít töltést, csak energiát, így itt kisebb a szomszédos ionok relaxációja, továbbá feltételezhető, hogy a társult O^- lyukpolaron a mozgást nem vagy csak alig akadályozza az oxigénrác szoros illeszkedése miatt.



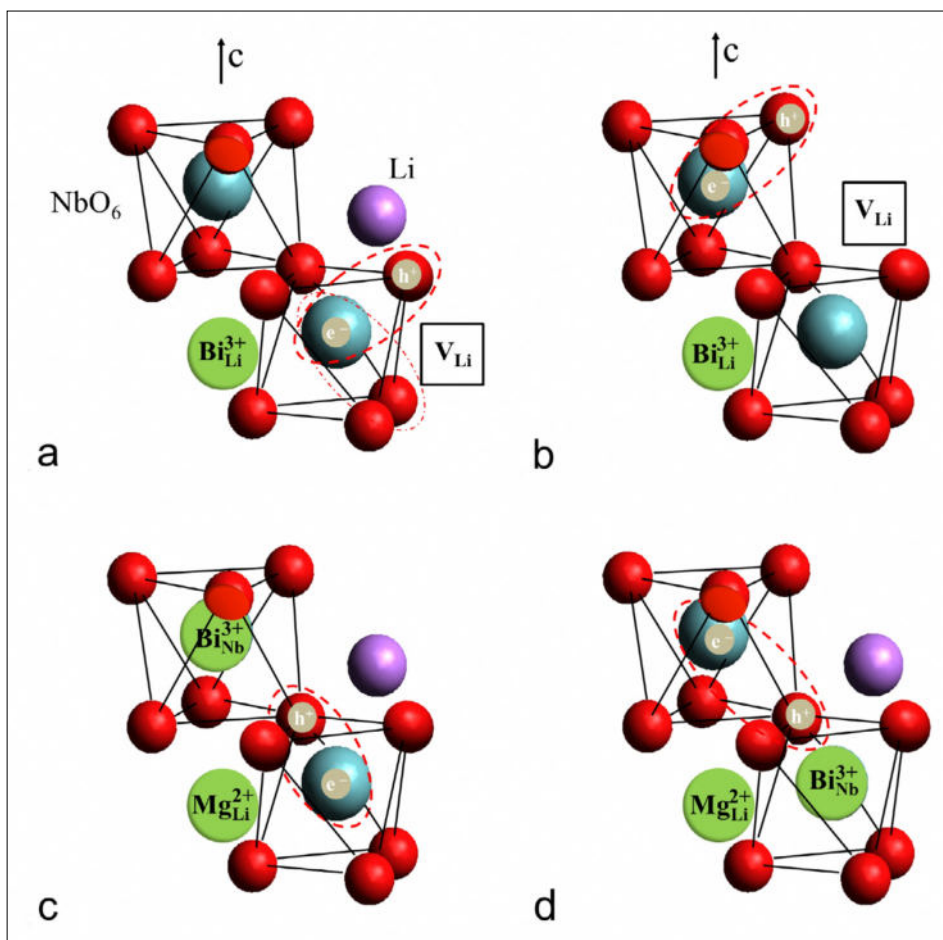
2. ábra. Ionizációt előidéző lézermimpulzus által keltett transziens abszorpció időfüggése kongruens LN:Mg (a, b) és LN:Fe (c, d) kristályokban, szoba-, illetve alacsonyabb hőmérsékleten. Ugyanez csak excitonokat keltő UV-impulzus hatására, LN:Fe kristályban (e) [4]. A választott próba-hullámhosszak a szabad (Nb_{Nb}^{4+} , 1310 nm) és ellenrácshelyű polaronok (Nb_{Li}^{4+} , 785 nm), a lyukpolaronok ($O^-(V_{Li})$, 488 nm), és az Fe^{2+} centrumokként befogott elektronok (445 nm) abszorpciós sávmaximumai közelében vannak, azonban a kék hullámhosszak egyúttal az adalék-centrumon befogódott excitonok hosszabb életű sávjait is jellemzik. A kísérleti pontokhoz a polaronok (p) leépülését és a befogódott excitonok (e) fel- és leépülését leíró modellfüggvények összegét illesztettük (folytonos vonalak), a nyilak pozíciója az egyes komponensek átlagos élettartamát jellemzi

Az öncspadázott excitonok tehát annihiláció nélkül megérhetik, hogy befogódnak egy erre alkalmas pont-hibán, például töltéskompenzátorral társult adalékionokon, melyhez dipól-dipól kölcsönhatással kötődhetnek, hosszú életű komplexeket alkotva (Bi^{3+} -adalék esetén lásd 3. ábra). A $\text{Nb}^{4+}-\text{O}^-$ excitonok, illetve befogott állapotaik szerepe akkor válik dominánssá, ha a besugárzásra használt fotonok energiája már nem elég a teljes ionizáláshoz, de még összemérhető a tiltott sáv szélességével (2e. ábra, [4]). Ekkor a hosszú életű kötött állapotok közvetlenül is létrejöhetnek.

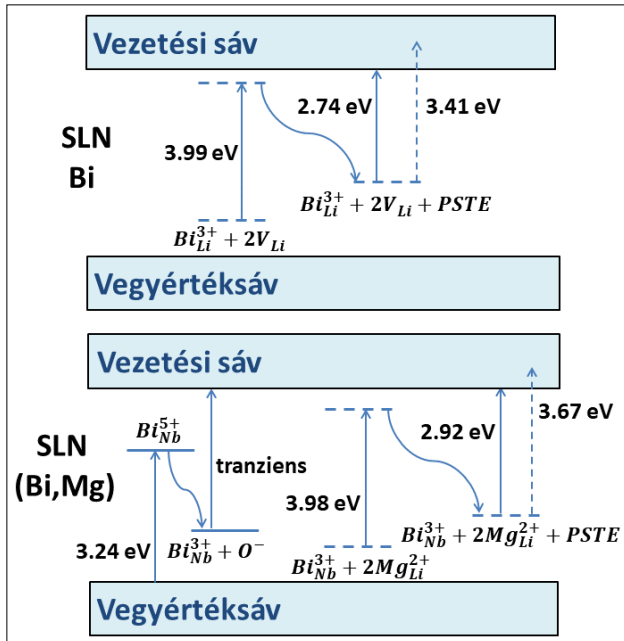
Az excitongerjesztési scenáriók bevonásával lényegesen kiterjesztettük a fotoindukált folyamatok korábban csak szabad töltéshordozókra korlátozott értelmezését. A kísérletek kvantitatív magyarázata csak a párhuzamos polaron- és excitonscenáriók megkülönböztetésével, minden esetben a hibahelyek nem egyenletes, véletlenszerű térbeli eloszlásának figyelembevételével volt lehetséges [4]. Az utóbbi a centrumkoncentrációk időfejlődését leíró $N(t) = N_0 \exp\{-(t/\tau)^\beta\}$ típusú exponenciális modell-függvényekben egy β nyújtási faktor bevezetését kívánja meg, mely a reálisnak bizonyult $\beta < 1$ értékek esetében az átlagos élettartam meghosszabbodását jelenti a τ időállandónál hosszabb idők felé. A fotolumneszcencia-kísérletek kvantitatív értelmezéséhez ezenkívül az excitonannihiláció sugárzásos és sugárzásmentes alternatíváit is el kellett különíteni.

Újabbban részletesen vizsgáltuk az UV fény hatását Bi-tal vagy Bi+Mg-mal adalékolt LN-ban, ahol kínai szerzők valós idejű hologrammózi megvalósításáról számoltak be, azonban kongruens helyett mi sztöchiometrikus összetételű kristályokat használtunk [14]. A kis polaronoknak tulajdonítható gyors lefutású fotorefrakciós folyamatok mellett több hónapos (!) lecsengésű abszorpciós sávokat is találtunk a kék és a közeli UV tartományban, amit a töltéskompenzált $\text{Bi}_{\text{Li}}^{3+}$ -, illetve $\text{Bi}_{\text{Nb}}^{3+}$ -ionok közvetlen szomszédságában létrehozott $\text{Nb}^{4+}-\text{O}^-$ excitonokhoz rendeltünk (3. ábra). Ezek megfelelnek az LN:Fe esetében a 2e. ábrán bemutatott néhány másodperces lecsengésű, a kék tartományban

megfigyelt abszorpciónak. A Bi-adalékkal végzett részletes, kvázistatikus mérések lehetővé tették az excitonos folyamatok sávszerkezeti modellezését is (4. ábra). A Bi- és a Fe-adalék esete csak abban különbözik, hogy a Bi-centrumokon sokkal hosszabb a cspadázott STE élettartama, mint a Fe^{3+} (és Mg^{2+}) esetében, mert a Bi^{3+} -ionok elektronszerkezetét stabilizálja a 6. héjban magányos párt alkotó két elektron közti erős kicserélődési kölcsönhatás, míg a Fe^{3+} - és Mg^{2+} -ionok töltésállapota átmenetileg megváltozhat, utat nyitva a rekombinációnak. A döntően csak gyors, polaronos folyamatokban résztvevő Bi^{5+} -ionok aránya növelhető a különböző adalékkoncentrációk és a sztöchiometria alkalmas megválasztásával, másrészt a magányospár-típusú kölcsönhatás szerepe a Bi^{3+} -ionokon – mely a bizmutvegyületek kémiaiáját is meghatározza – csökkenthető a pumpáló impulzus fotonenergiájának és intenzitásának növelésével, ami a magányos pár kötését fel tudja szakítani, illetve mindkét elektront egyidejűleg gerjeszteni tudja. Hosszú életű holográfiai alkalmazások céljára viszont a paramétereket ezzel ellentétesen kell megválasztani. Kísérleteink ezúttal is rámutattak a különböző scenáriók, a lokális relaxáció és a rendezetlenség – beleértve az adalékionok különböző töltéskompenzációs lehetőségeit – más és más, de egyaránt fontos



3. ábra. $\text{Bi}_{\text{Li}}^{3+}-\text{V}_{\text{Li}}$ (a, b) és $\text{Bi}_{\text{Nb}}^{3+}-\text{Mg}_{\text{Li}}^{2+}$ (c, d) hibahelyek és az általuk csapdába ejtett excitonok (szaggatott ellipszisek). További töltéskompenzátorok nincsenek feltüntetve. A kék, lila, piros és zöld golyók nióbbium-, lítium-, oxigén- és adalékatomokat jelölnek [14]



4. ábra. Bizmutcentrumok lokalizált állapotai és fotoindukált átalakulásuk sztöchiometrikus LN-ban Bi- (fent) és Bi,Mg-adalékolás (lent) esetén a mért abszorpciós átmenetek alapján [14]. A szaggatott nyívek lokalizált sávállapotok hozzákeveredését, a hullámvonalak helyi relaxációt, a PSTE (pinned self-trapped exciton) a hosszú életű csapdázott excitont jelöli

szerepére. Az ok-okozati kapcsolatok felismerése lehetőséget ad a különböző időskálákon működő folyamatok, illetve alkalmazások gyakorlati szétválasztásához.

Összefoglalóan megállapítható, hogy a fenti eredmények lényegesen hozzájárultak ahhoz, hogy az LN-alkalmazások működése atomi szinten is egyre érthetőbbé vált. Kutatásaink konkrét javaslatokhoz is vezettek a technológia javítására, utat mutatva az alkalmazások optimalizálásához és újabbak megvalósításához.

Irodalom

- Péter Á., Fries E. (1989): Yield stress of lithium niobate; Kovács L., Polgár K. (1989): Electrical conductivity of lithium niobate; Kovács L., Földvári I. (1989): IR spectra of OH in lithium niobate. *EMIS Datareviews Series No. 5, INSPEC, IEE London and NY*, pp. 40–43.; 109–114; 189–199.
- Lengyel K., Péter Á., Kovács L., Corradi G., Pálfalvi L., Hebling J., Unferdorben M., Dravec G., Hajdara I., Szaller Zs., Polgár K. (2015): Growth, defect structure, and THz application of

stoichiometric lithium niobate. *Applied Physics Reviews*, 2, 040601. <http://doi.org/10.1063/1.4929917>

- Corradi G., Kovács L. (1990): ‘Horror vacui’ in the oxygen sublattice of lithium niobate made affordable by cationic flexibility. In: Special Issue “New Trends in Lithium Niobate: From Bulk to Nanocrystals”, (eds. Kovács L., Corradi G.). *Crystals*, 11, 764. <https://doi.org/10.3390/cryst11070764>
- Corradi G., Krampf A., Messerschmidt S., Vittadello L., Imlau M. (2020): Excitonic hopping-pinning scenarios in lithium niobate based on atomistic models: Different kinds of stretched exponential kinetics in the same system, *J. Phys.: Condens. Matter*, 32, 413005. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/ab9c5b>
- Freytag F., Corradi G., Imlau M. (2016): Atomic insight to lattice distortions caused by carrier self-trapping in oxide materials. *Scientific Reports*, 6, 36929. <https://doi.org/10.1038/srep36929>
- Kovács L., Kocsor L., Tichy-Rács É., Lengyel K., Bencs L., Corradi G. (2019): Hydroxyl ions probing transition metal dopants occupying Nb sites in stoichiometric LiNbO₃. *Optical Materials Express*, 9(12), 4506–4516. <https://doi.org/10.1364/OME.9.004506>
- Polgár K., Péter Á., Kovács L., Corradi G., Szaller Zs. (1997): Growth of stoichiometric LiNbO₃ single crystals by top seeded solution growth method. *J. Cryst. Growth*, 177, 211. [https://doi.org/10.1016/S0022-0248\(96\)01098-6](https://doi.org/10.1016/S0022-0248(96)01098-6)
- Kovács L., Ruschhaupt G., Polgár K., Corradi G., Wöhlecke M. (1997): Composition dependence of the UV absorption edge in lithium niobate. *Appl. Phys. Lett.*, 70, 2801–2803. <https://doi.org/10.1063/1.119056>
- Wöhlecke M., Corradi G., Betzler K. (1996): Optical methods to characterise the composition and homogeneity of LiNbO₃ single crystals. *Appl. Phys. B*, 63, 323–330. <https://doi.org/10.1007/BF01828734>
- Corradi G., Söthe H., Spaeth J.-M., Polgár K. (1990): Mn²⁺ defects in LiNbO₃ (1990): An electron nuclear double resonance (ENDOR) investigation of the Mn²⁺ site and the local disorder. *J. Phys. Condens. Matter*, 2, 6603–66018. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/2/31/013>
- Corradi G., Söthe H., Spaeth J.-M., Polgár K. (1991): Electron spin resonance and electron nuclear double-resonance investigation of a new Cr³⁺ defect on a Nb site in LiNbO₃:Mg:Cr. *J. Phys. Condens. Matter* 3, 1901–1908. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/3/12/020>
- Corradi G., Zaritskii I. M., Hofstaetter A., Polgár K., Rakitina L. G. (1998): Ti³⁺ on Nb site: A paramagnetic Jahn–Teller center in vacuum-reduced LiNbO₃:Mg:Ti single crystals. *Phys. Rev. B* 58, 8329–8337. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.58.8329>
- Kocsor L., Péter L., Corradi G., Kis Zs., Gubicza J., Kovács L. (2019): Mechanochemical reactions of lithium niobate induced by high-energy ball-milling. *Crystals*, 9, 334. <https://doi.org/10.3390/cryst9070334>
- Kovács L., Corradi G., Szaller Zs., Bencs L., Mandula G., Lengyel K. (2024): Lone-pair-delayed persistent excitonic UV photochromism and charge transfer in Bi-doped and (Bi,Mg)-codoped stoichiometric lithium niobate single crystals. *Physical Review B* 109, 214105. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.109.214105>

Támogassa az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot adománytárgyak vásárlásával!



Klasszikus ELFT-s bevásárlótáska



Krémszínű kerámiabögre



ELFT-kitűző



Kék kerámiabögre



Modern mintás bevásárlótáska

Az adománytárgyak egyenként és csomagban is megvásárolhatók, különböző támogatási összegekért cserébe. Valamennyi termék egyedileg készült a társulatunk számára, és kizárólag nálunk lehet hozzájutni (<https://elft.hu/adomanygyujtes/>).

A FEMTOSZEKUNDUMOS NANOOPTIKAI KUTATÁSOK LEGÚJABB EREDMÉNYEI

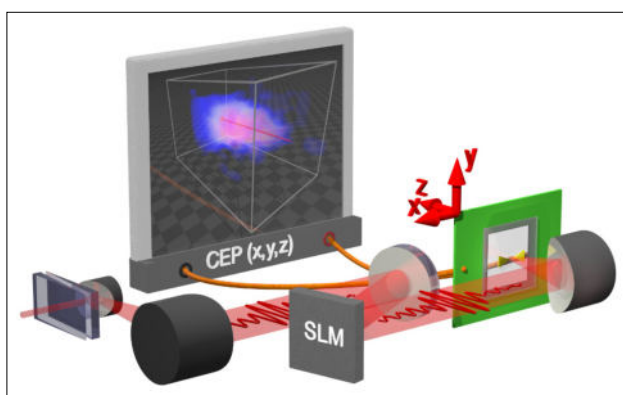
Rácz Péter, Sándor Péter, Hanus Václav, Dombi Péter®
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
®E-mail: dombi.peter@wigner.hun-ren.hu

A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Ultragyors Nanooptika Kutatócsoportjában a közelmúltban több kutatási területen is születtek fontos új alapkutatói eredmények. Ezek közül mutatunk be hármat a femtoszekundumos fizika világából, amelyek érdekes alkalmazási potenciállal is kecsegtetnek.

Optikai chip fázisszkennelésre és a nevezetes Gouy-fázis

A fémekben az elektromos áramot jellemzően külső feszültség alkalmazásával hozzuk létre. Bár az elektronok attoszekundumos időskálán reagálnak az elektromos terekre, a hagyományos elektronikai eszközök ezt a bennük rejlő potenciált ritkán használják ki. Ezzel szemben a kontrollált hullámformával rendelkező ultrarövid lézerimpulzusok – amelyek elektromos tere petahertzes ütemben vált irányt – lehetőséget adnak arra, hogy az áramokat a fémekben közvetlenül fényrel irányítsuk. Ultrarövid lézerimpulzusokkal keltett áramot már többféle anyagban is demonstráltunk, például dielektrikumokban, félvezetőkben [1], míg mások topológikus szigetelőkben is. A *Science Advances*-ben megjelent legfrissebb munkánkban megmutatjuk, hogy a fémekben nagyságrendekkel több töltés mozgatható és manipulálható kis energiájú (pJ-os) impulzusokkal [2], ami ultragyors kapcsolást tesz lehetővé.

A lézerimpulzussal keltett és az impulzusok vivő-burkoló fázisával irányított áram mérésére optikai chipet építettünk [1] (1. ábra). Egy ultrarövid, kevés elektromágneses oszcillációt tartalmazó lézerimpulzusnál ugyanis fontos paraméter a vivőhullám és az impulzus burkolójának relatív fázisa. Ezt a paramétert tudtuk kimérni egy igen egyszerű optikai chippel a világon elsőként. Az eszközünk 3D fázisszkennelést is lehetővé tesz.



1. ábra. Ultrarövid lézerimpulzusok vivő-burkoló fázisának detektálására, szkennelésére szolgáló optikai chip, mellyel 500 nm felbontású 3D fázisszkennelést tudunk megvalósítani. CEP: 3D fázistérkép a mérési adatfelhővel. SLM: térbeli fénymodulátor

Ismert, hogy egy fókuszált hullám a fókuszfolt közelében a terjedési irány mentén extra fázistolást szenved,



Rácz Péter a BME-n végzett mérnök-fizikusként, majd a PhD-fokozatot szintén ugyanott szerezte 2012-ben. Jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. Kutatási területei az ultragyors lézerfizika, a nanooptika és plazmonika, valamint a nagy intenzitású fény-anyag kölcsönhatások.



Hanus Václav 2019-ben szerzett PhD-fokozatot a Bécsi Műszaki Egyetemen. 2024-ben elnyerte az Optica társulat Couillaud-díját az ultrarövid impulzusú lézerek és a vivő-burkoló fázis kutatásában elért eredményeiért. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban dolgozik; 2026 és 2029 között NKFIH NKKP Starting pályázati támogatásában részesül, melynek során új anyagokat vizsgál PHZ-es elektronikai alkalmazásokhoz korszerű ultragyors spektroszkópiai módszerekkel. Fő kutatási területei: a femtoszekundumos lézerfizika, a vivő-burkoló fázis detektálása és szabályozása, a nemlineáris optika, valamint az erőstér-fizikai alkalmazások.

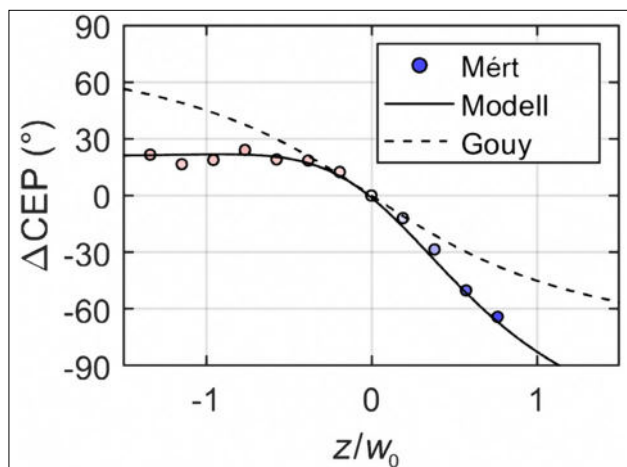


Sándor Péter a BME-n végzett mérnök-fizikusként, majd 2016-ban PhD-fokozatot szerzett a New York állambeli Stony Brook Egyetemen. Ezután a Virginiai Egyetemen dolgozott posztdoktor kutatóként. Jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. Kutatási területei az atom- és molekulafizika, a nanooptika és plazmonika, valamint a nagy intenzitású fény-anyag kölcsönhatások.



Dombi Péter az MTA doktora, az MTA Lézerfizikai Bizottságának elnöke. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Ultragyors Nanooptika „Lendület” Kutatócsoportjának vezetője. 2010-től vezető szerepet játszott a szegedi ELI Lézerközpont felépítésében és – alapító osztályvezetőként – a létesítmény kutatási profiljának kialakításában. Kutatási területei a lézerfizika, a nanooptika, a femtoszekundumos technológia és az ultragyors fény-anyag kölcsönhatási folyamatok vizsgálata.

melynek mértéke π , profilja pedig arctan függvény szerinti. Ezt a nemcsak az elektromágneses, hanem pl. mechanikai hullámokra is igaz összefüggést Louis Georges Gouy publikálta 1890-ben. Optikai chipünk segítségével ennek a szép klasszikus optikai jelenségnek tudtuk egy új arcát bemutatni: egy ultrarövid impulzus extrém széles spektruma miatt jelentős eltérések mutatkoznak a Gouy-fázistoláshoz képest, sőt az 1. ábrán bemutatott SLM modulátor segítségével azt is el tudjuk érni, hogy a fázist egy adott térrészben „befagyasszuk”.



2. ábra. A klasszikus Gouy-fázistolás arctan profilja a fókusz közelében az optikai tengely (z) mentén szaggatott vonallal. Fázisszkennerünkkel a várt arctan profilhoz képest jelentős eltéréseket mérhetünk, sőt akár egy bizonyos tartományban „be tudjuk fagyasztani” az impulzus vivő-burkoló fázisát az optikai tengely mentén: az ábrán a fókusz előtti térrészben

Áttörés a forró elektronok dinamikájának megismerésében

A legkorszerűbb femtoszekundumos lézertechnológia alkalmazásával új távlatokat nyitottunk a forró elektronok – a fémekben fény hatására gerjesztett, nemegyensúlyi állapotú töltéshordozók – viselkedésének megértésében. A kutatás elsődleges célja ezen ultragyors folyamatok pontos feltérképezése volt, ami kulcsfontosságú a jövő napelemeinek határfoknöveléséhez és a fotokatalitikus eljárások tökéletesítéséhez is. Saját fejlesztésű, úttörő kísérleti elrendezésünkkel minden eddignél részletesebb információkat nyertünk a forró elektronok lokalizációjáról és az ilyen elektronpopuláció dinamikájáról.

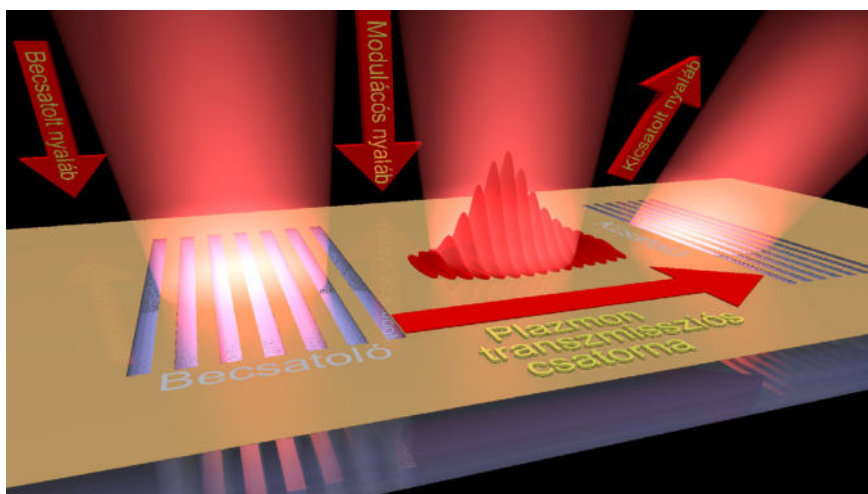
A kísérlet során két, precízen, 40 fs-os időfelbontással készletetett, ún. pumpa- és próbaimpulzussal világítottuk meg a mintát (3. ábra). A 800 nm középhullámhosszú próbaimpulzus felületi plazmon-hala-

dóhullámot keltett egy rácsos becsatoló segítségével, melynek terjedésére erős hatással volt az útjába kerülő aranyréteg elektronállapota. Ezt az elektronállapotot módosította a pumpaimpulzus, az ún. forró elektronok gerjesztése révén. Ezek az elektronok olyan nemegyensúlyi állapotban lévő elektronok, melyek eloszlása rövid időre eltér az adott hőmérsékletre jellemző Fermi-Dirac-eloszlástól. Egy hangolható lézer segítségével sikerült elkülönítenünk és önállóan vizsgálnunk a fémek sávon belüli (800 nm-es pumpanyaláb) és sávok közötti (480 nm-es pumpanyaláb) átmeneteinek dinamikáját [3]. Az eredmények pontosan illeszkedtek az elektrongáz háromhőmérséklet-modelljére [4], igazolva a forró elektronok és a kristályrács közötti energiaátadási folyamatok elméleti hátterét.

A forró elektronok viselkedésének mélyebb megismerése mellett jelentős eredmény az is, hogy sávon belüli gerjesztés esetén a plazmontranszmissziós csatornán (3. ábra) haladó optikai hullámcsomagnál 40%-os moduláció volt tapasztalható, mely ebben az esetben a plazmontranszmisszió átmeneti csökkenésének mértékét jelenti [3]. Ez a jelentős mértékű változás közvetlen bizonyítékot szolgáltatott arra, hogy egy ultragyors nanooptikai tranzisztor működése elképzelhető a forró elektronok dinamikájának tudatos manipulálása révén [3].

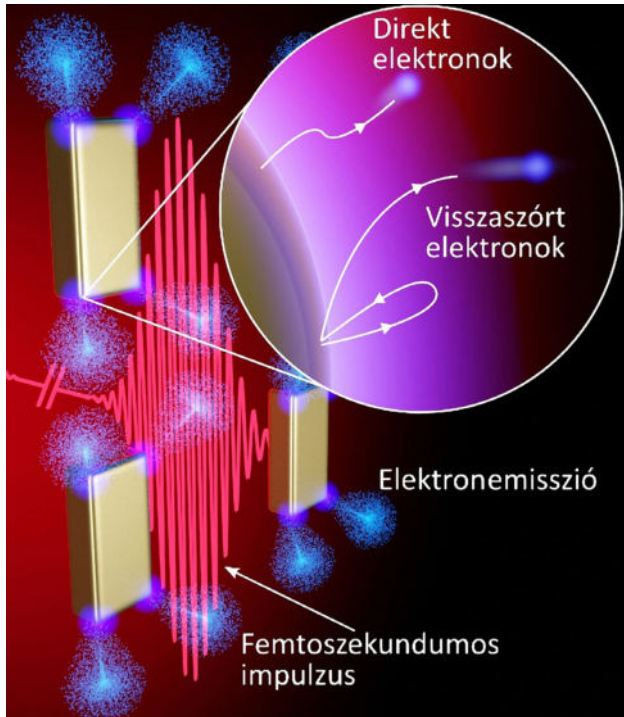
A fotoelektron-újraszóródás érdekes jelensége

A fém nanostruktúrák közelében kialakuló, nanométeres skálán lokalizált elektromágneses terek (ún. lokalizált felületi plazmonok) lehetővé teszik a fotoemisszió határeseiteinek vizsgálatát. Különösen fontos a többfotonos és az alagútjellegű „erőtér-fotoemisszió” közötti átmenet megértése. Alacsonyabb intenzitásoknál a fotoáram a fényintenzitás hatványfüggvényeként növekszik, ahol a hatványkitevőt a kilépési munkához szükséges fotonok



3. ábra. Forró elektronok szondázása optikai pumpa-, és plazmonikus próbaimpulzusokkal. A plazmonterjedés a bal oldali becsatoló rácsstruktúra felől a jobb oldali kicsatoló felé történik; a kettő közötti aranyrétegben történik a forró elektronok keltése a pumpaimpulzusok révén. A bemutatott elrendezés ultragyors, fényrel vezérelt modulátorként is működtethető

száma adja meg. Az intenzitás növelésével azonban a felületközeli elektromos tér torzítani kezdi a potenciálját az alagutazás valószínűségét növelve, és az emisszió fokozatosan az „erőtér-tartományba” léphet át.



4. ábra. Plazmonikus nanorészecskéről femtoszekundumos impulzusok hatására bekövetkező fotoemisszió, a betéttábrán az újraszórt és a direkt elektronokkal

Nagy intenzitásoknál a fotoelektron-spektrumot a felülettel újraütköző, ún. újraszórt elektronok határozzák meg. Ilyenkor az elektron először kilép a fém-

felületről, majd a lézertér visszatéríti a felület közelébe, ahol újraszóródva további energiát nyerhet. Az így elérhető maximális kinetikus energia rendszerint a direkt (újraütközést el nem szenvedő) elektronok energiájának a sokszorososa is lehet.

Kimutattuk [5, 6], hogy infravörös lézerforrások és plazmonikus nanoemitterek kombinálásával a nagy energiájú újraszórt elektronok már a többfotonos emissziós tartományban is megfigyelhetők (4. ábra). Ezt a felfedezést az infravörös impulzusok alkalmazásán túl az a tette lehetővé, hogy a nanoemittereinknek az atomokhoz képest jóval nagyobb mérete nagyságrendekkel növeli az újraszórási jelenség valószínűségét.

A kísérleti eredményeink jó egyezést mutattak az időfüggő Schrödinger-egyenleten alapuló modellel [5, 6], és az elektronok ultragyors dinamikájának egy új, eddig nem ismert aspektusát tárták fel. Eredményeink új irányokat jelölhetnek ki a lézerimpulzusokkal vezérelt nanoemitterek tervezésében, valamint további nanoelektronikai koncepciók fejlesztésében.

Irodalom

- Hanus V., Fehér B., Csajbók V., Sándor P., Pápa Zs., Budai J., Wang Z., Paul P., Szeghalmi A., Dombi P. (2023): *Nature Commun.*, 14, 5068.
- Fehér B., Hanus V., Li W., Pápa Zs., Budai J., Paul P., Szeghalmi A., Wang Z., Kling M., Dombi P. (2025): *Science Adv.*, 11, eadv5406.
- Sándor P., Lovász B., Budai J., Pápa Z., Dombi P. (2024): *Nano Lett.*, 24, 8024.
- Budai J., Pápa Z., Petrik P., Dombi P. (2022): *Nature Commun.*, 13, 6695.
- Lovász B., Sándor P., Kiss G. Z., Bánhegyi B., Rácz P., Pápa Z., Budai J., Prietl C., Krenn J., Dombi P. (2022): *Nano Lett.*, 22, 2303.
- Bánhegyi B., Kiss G. Zs., Pápa Zs., Sándor P., Tóth L., Péter L., Rácz P., Dombi P. (2024): *Phys. Rev. Lett.*, 133, 033801.

TANULMÁNY

A TÉRIDŐ MINT HOLOGRAM 1.

Lévay Péter
Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Fizikai Intézet, Elméleti Fizika Tanszék, Budapest
E-mail: leway.peter@ttk.bme.hu

Az utóbbi évek kutatásai során felmerült az a lehetőség, hogy az eddig alapvetőnek tekintett téridőstruktúrákat kvantum-információelméleti fogalmakból származtassuk. A cikk kísérletet tesz arra, hogy a történeti előzmények bemutatása után a hazai kutatás egyik eredményének ismertetésével feltárja bizonyos téridőstruktúrák kvantum-információelméleti eredetét. A három részből álló cikksorozat első részében

ismeretterjesztő szinten áttekintjük a klasszikus és kvantumtérelméletek fogalmait és szimmetriáit, különös tekintettel a konform térelméletekre. Az első részt a holografikus elv és a vákuum-összefonódottság elemi tárgyalásával zárjuk.

„Letrokként tér és idő keresztjére vagyunk verve mi, emberek.”
Simone Weil

1. Tér és idő. „It from Qubit”

A tér és az idő fogalmainak értelmezése elválaszthatatlan a világ fizikai jelenségeitől. Voltak napóráink, homokóráink, kakukkos óráink, majd atomóráink. Ezek szerkezete tükrözi azt, ahogy akkoriban a világról gondolkodtunk. Nemrég a métert a Föld egyik délkörének negyvenmilli-

omod részeként adták meg. Aztán később bizonyos fajta atomok által kibocsátott fény hullámhosszának többszöröseként. Az értelmezések változása elválaszthatatlan a világról alkotott magyarázataink fejlődésétől.

Eltelt egy óra. Ezalatt Nap körüli pályáján a Föld nagyjából százezer kilométer távolságot tett meg. Ha valaki kijelentené, hogy a pálya százezer kilométert kitevő

hossza valószínűleg egy kvantum-információelméleti fogalommal áll kapcsolatban, ugyancsak meghökken-
nénk. Azért, mert sokak számára a kvantuminformáció
fogalma semmit sem jelent. De egyébként miért is ne
állhatna fenn egy ilyen meghökkentő kapcsolat? Elvégre
a méternek egy földi délkör hosszával való összekapcso-
lása a Lapos Föld Társaság tagjainak is megrázkódtatás
okozott volna. Többek között azért, mert számukra már
a délkör fogalma is értelmezhetetlen lett volna. De most
a viccet félretéve: valóban van értelme annak, hogy egy
tér-időtartomány méretét egy információelméleti meny-
nyiséggel kapcsoljuk össze? Vagy még általánosabban:
van értelme az Univerzum tér-időszerkezetét informá-
cióból eredeztetni?

Poétikus és szimbolikus értelemben nyilván van. Ve-
gyük például az alábbi idézetet: „Kezdetben volt az Ige,
és az Ige Istennél volt, és az Ige Isten volt. Ő kezdetben
Istennél volt. Minden általa lett, és nélküle semmi sem
lett, ami létrejött” [1]. Vagy máshol azt olvashatjuk: „Hit
által érthetjük meg, hogy a világ Isten beszéde által te-
remtetett, hogy a mi látható, a láthatatlanból állott elő”
[2]. Itt az „ige” vagy a „beszéd” szót szakrális értelemben
vett információnak, a „látható” testet pedig az Univer-
zum szövetének felfogva már készen is vagyunk. Nincsen
új a Nap alatt!

De ez csak képes beszéd. A szimbólumok és a költői ké-
pek nem segítenek bennünket hozzá ahhoz, hogy válaszol-
junk az alábbi kérdésre: Hogyan is lett az ige testté? Ennek
a kérdésnek a boncolgatásában lehet, hogy nemcsak a hit,
hanem a modern fizika is illetékes? Úgy tűnik: igen.

Sőt, elképzelhető, hogy a válasz keresése során meg-
lepő új összefüggésekre is bukkanunk? Valóban: az el-
múlt két évtizedben kiderült, hogy a kérdésre adott vá-
laszok mindegyike automatikusan összekapcsolódik egy
a gravitációval és a téridővel kapcsolatos új vélekedéssel.
Eszert a gravitáció: kvantuminformáció. A téridő pe-
dig egy hologram. Ezen cikk célja az, hogy a fenti monda-
tok értelmét, a hazai kutatás egyik eredményének bemu-
tatásán keresztül, az Olvasó számára feltárjuk.

Az „It from bit” kifejezés John Wheelertől ered, aki
az Univerzum („It”) információelméleti alapokon („Bit”)
vett megértésének lehetőségét először felvetette [3]. Az-
óta teret hódított az az elképzelés, hogy az Univerzum
tér-időszerkezete kvantum eredetű. Így lett az informá-
cióból kvantuminformáció, s a bitből „qubit”, azaz kvan-
tumbit.



Lévay Péter okleveles fizikus az MTA doktora. 1986-ban végzett az ELTE-n. Munkáját a BME Kvantumelméleti Kutatócsoportjában és a bristoli HH Wills Physics Laboratoryban kezdte, majd a BME Fizikai Intézete Elméleti Fizika Tanszékének tudományos főmunkatársaként folytatta. Jelenleg is itt tanít és kutatómunkát végez. Kutatási területe a kvantumelmélet geometriai vonatkozásainak vizsgálata.

2. Erőterek

Erőterek vesznek körül bennünket. Okostelefonjaink
elektromágneses erőterbe ágyazva biztosítják azt, hogy
akár az utcán gyalogolva, bármilyen információhoz hoz-
záférjünk. Eközben vigyáznunk kell, nehogy orra buk-
junk. Mert közben testünkre egy másik erőter is hat. A
gravitációs erőter. Az elektromágneses erőter elméletét
már több mint 150 éve ismerjük. Ez a Maxwell-féle elekt-
rodinamika. A gravitációs erőter modern elmélete, Ein-
stein általános relativitáselmélete is már több mint száz
éves. Mindkettő egy klasszikus térelmélet.

A térelméletek főszereplői az erőterek. Változásuk
törvényszerűségeit a téregyenletek rögzítik: a Maxwell-
illetve Einstein-egyenletek. Einstein térelmélete azonban
alapvetően különbözik Maxwellétől. Einsteinnél a gravi-
tációs erőter fogalma összekapcsolódik a téridő geomet-
riájával. Ahogy egy túlsúlyos ember alatt behorpad az
ágy, és az ágy szélén lévő almák az ágy görbületét követve
az ember mellé gurulnak, úgy csoportosulnak a Naprend-
szerbe tévedt égitestek a túlsúlyos Nap mellé. A behorpadt
ágyfelület szerepét itt a téridő szövege veszi át. S ahogy az
ágyon az almák sem azért gurulnak emberünkhöz, mert
ő vonzza azokat, a gravitációs erő is csak illúzió. Az erő
newtoni fogalmán alapuló megértést a téridő horpadási
geometriáján alapuló einsteini megértés váltja fel.

Persze az ágyas hasonlattal a tér behorpadását köny-
nyű elképzelni. Csakhogy most a téridőről van szó! Fel-
merül tehát itt az a kérdés is, hogy hogyan „horpad be
az idő”? Mivel időérzékelő szervünk nincs, erről a horpa-
dásról csak közvetve, az óráink (lehetnek biológiai órák
is) segítségével szerezhethünk tudomást. Ezek az órák pe-
dig azt mutatják, hogy a hegyvidéken gyorsabban telik
az idő, mint a síkságon. A katonaidő gyorsabban múlik
a felső ágyon, mint az alsón. 12000 km magasságban
csak napi 46 milliomod másodpercről van szó, de ez a
GPS-rendszer esetén már hűsbavágó fontosságú. Ha ezt
a GPS-műholdakon gyorsabban múló időt nem vennénk
figyelembe, akkor egy használhatatlanul pontatlan hely-
meghatározó rendszert kapnánk [4]. Egy évtizede gyer-
mekeim a virtuális térnek a földfelszín pontjaival való
összekapcsolásán alapuló mobiltelefonos pokémonvadá-
szatot játszottak. Ha ennél a GPS-alapú játéknál az alko-
tók az időhorpadást nem vették volna figyelembe, akkor
a pokémonokat a srácok nem a megfelelő helyen találták
volna.

Összefoglalva: Einstein szerint a tér és az idő anyag
nélkül nem képzelhető el. Úgy, ahogy a mosoly sem kép-
zelhető el mosolyra görbülő ajkak nélkül. Ha nem lenne
anyag, akkor a téridő sem görbülne: lapos lenne. Ahol
anyag, ott geometria. „Ubi materia, ibi geometria” – mon-
daná Kepler [5].

3. Kvantumtérelmélet

Hétköznapi reakcióinkat az a beidegződés motiválja,
hogy a megszokott világunk makroszkopikus és (ebből

kifolyólag) klasszikus. *Makroszkopikus*: azaz világunk első közelítésben az emberi méretekkel összevethető (vagy annál is nagyobb) objektumokból áll. Égitestekből, hegyekből, emberekből, állatokból és növényekből. *Klasszikus*: azaz világunk egyes jelenségeinek megértéséhez az iskolában megtanult klasszikus mechanikai, illetve termodinamikai mennyiségek (sebesség, energia, erő, gyorsulás, perdület, hőmérséklet, nyomás) használatra nagyon hasznos. Olyannyira, hogy még átvitt értelemben is beszélünk szembenálló politikai *erőkről*. Az alternatív gyógyítók arról próbálják meggyőzni pácienseiket, hogy kézrátétes gyógykezelései során *bioenergiát* közölnek. Freud pedig az ösztönént egy fortyogó kazánhoz hasonlította, melyben a *nyomás* néha a kritikus értékhez közelít.

De az elmúlt száz év során azt is megtanultuk, hogy a háttérben ott van egy titokzatos világ, amely mikroszkopikus és kvantum. Mikroszkopikus: egy világ, ahol az emberi méreteknél jóval kisebb objektumok is léteznek, baktériumok, vírusok, molekulák, atomok, elemi részecskék. A kvantum kifejezés pedig arról tudósít, hogy a molekuláris szinttől lefelé a megszokott klasszikus mechanikai fogalmakkal történő megértés alapvető nehézségekbe ütközik. Például az atomba zárt elektronok energiája nem folytonosan, hanem csak ugrásszerűen változhat. Vagy: míg egy piruettozó műkorcsolyázó perdülete folytonosan változhat, addig az elektron perdülete csak két lehetséges értéket vehet fel. Azt mondjuk, hogy a kvantumvilágban az említett fizikai mennyiségek kvantáltak.

Naiv módon azt gondolhatnánk, hogy a kvantumvilág a megszokott klasszikus világunk valamifajta bosszantó deviációja. A kvantum jelenségekhez történő ezen hozzáállás kezdetben meglepően jól működött. A recept az alábbi volt: végy egy klasszikus rendszert, például egy rugón rezgő golyót. Ennek kvantumverzióját, például egy kristályban rezgő molekulát, az úgynevezett kvantummechanika törvényeinek alkalmazásával érthetjük meg. Szokatlanok ezek a „kvantálási” szabályok? Sebj, hiszen működnek! Az eredmény: a klasszikus rendszereinket „megkvantálhatjuk”, s így ezek kvantum megfelelőit kapjuk.

Kvantumtérelmélet alatt egy klasszikus térelmélet kvantált változatát értjük. Klasszikus térelmélet alatt a fizikusok nem feltétlenül csak olyanokat értenek, mint Maxwell és Einstein csodálatos elméletei, melyeknek közvetlen köze van a valósághoz. Ezek „játéktérelméletek” is lehetnek. Tanulmányozásuk a fizikusok számára idealizált gyakorlóteret jelent azon eljárások működésének megértéséhez, melyek segítségével egy klasszikus térelméletet kvantumköntösbe öltöztethetünk.

A kvantumtérelméletek prototípusa a Maxwell-elmélet kvantálásával létrejött elmélet. Ez a kvantumelektrodinamika. Ez bámulatosan jól működik. Számos kísérlettel igazolt elmélet – gyakorlati alkalmazások tömkelegével. Einstein elméletének kvantálása azonban katasztrófa. Nem működik.

Node, miért is bánkódunk ezen? Mi szükségünk van egy ilyen kvantumgravitációs elméletre? A nagy tömegű Nap és a Föld között a gravitációs erőter igen erős. Ugyanakkor a mikroszkopikusan kis tömegű objektumok világában a gravitáció gyakorlatilag elhanyagolható. Vannak egyáltalán olyan objektumok, melyek mikroszkopikusak, ugyanakkor igen erősen gravitálnak? Igen, vannak.

Ilyenek például a kihúnyt nagyméretű csillagok parányi méretre történő összeroskadásával keletkező fekete lyukak. Vagy egy másik példa. A táguló Univerzum kezdetben mikroszkopikus méretű volt, ugyanakkor a tágulásának fizikájába a gravitáció döntő módon beleszólt. Tehát: a fekete lyukak fizikájával és az Univerzum születésével kapcsolatos kérdések megválaszolásához igenis szükség van egy kvantumgravitációs elméletre. Ha pedig ennek megalkotása a szokásos módon nem megy, akkor más trükkök után kell kutatnunk.

4. A holografikus elv

Ha egy lábasban főtt tojást készítünk, a víz hőmérséklete alapvető fontosságú. Csak arra kell figyelniünk, hogy a víz felforrjon, és aztán kivárjuk a tojás megfőzéséhez szükséges időtartamot. A hőmérséklet makroszkopikus állapotjelző. Igen ám, de tudjuk, hogy a hó mozgás. Valójában a lábasban elképesztő mennyiségű vízmolekula nyüzsög, és ahogy a hőmérséklet nő, teszik ezt egyre hevesebben. A hőmérséklet a molekulák átlagos mozgási energiájával kapcsolatos. Azonban az egyes molekulák különböző sebességekkel és helyzetekkel rendelkezhetnek. Ezek a sebességek és helyzetek a víz mikroállapotait írják le. Nyilván csillagászati szám adja azoknak a mikroszkopikus lehetőségeknek a számát, melyek ugyanazt a víz-hőmérsékletet eredményezik. Ezeknek a lehetőségeknek a számbavétele a tojáskészítés szempontjából értelmetlen. Ráadásul ez a megkülönböztetés egy földi halandó számára keresztülvihetetlen. Tudatlanságunk a részletek iránt egy evolúciós huzalozásból fakad: érzékelésünk (átvitt értelemben) „életlen”. Túlélésünk záloga ugyanis az volt, hogy az információözbönlől a létfontosságú adatokat időben kihalászhatjuk. És ami nem fontos, azt mint lényegtelen részletet elhanyagoljuk.

Térelméleteket „kvantálni” nyilván nem létfontosságú. Hiszen a térelméletek kvantálásában rejlt titkok feltárásához elkerülhetetlen megengedniünk magunknak azt a luxust, hogy a mikroszkopikus részleteket illetően is tájékozódunk. Ha nem kvantálunk, akkor ezekkel a részletekkel nem kell bajlódnunk. Ezért aztán a klasszikus Maxwell-elmélet a kvantált változat mikroállapotainak természetét illetően semmiféle utalást nem tartalmaz.

A klasszikus Einstein-féle elmélet viszont meglepő módon igen, tartalmaz! Ezen kvantumgravitációs mikroállapotok természetére történő utalások a fekete lyukak fizikájából származó hátsó ajtón settenkedtek be. Jacob Bekenstein [6] és Stephen Hawking [7] munkássága nyomán ugyanis kiderült, hogy a fekete lyukak makrosz-

kopikus termodinamikai rendszerek, melyek entrópiával jellemezhetők. Az entrópia pedig a rejtett mikroállapotok számának logaritmusával arányos mennyiség. Kiderült, hogy a fekete lyukak esetén az entrópia nem a lyukat jellemző téridőtartomány térfogatával, hanem csak az azt határoló felület nagyságával arányos. Tehát a gravitáció kvantált elmélete – bármiféle fán teremjen is az – a felületekkel kapcsolatos rejtett mikroállapotok elmélete. A gravitáció holografikus.

A fenti gondolatok mentén Gerardus 't Hoft javaslatát felhasználva Leonard Susskind publikációjával [8] 1994-ben megszületett a holografikus elv. Eszerint: „a háromdimenziós hétköznapi világunk galaxisokkal, csillagokkal, bolygókkal, sziklákkal és emberekkel valójában egy hologram, a valóságnak egy olyan képe, mely egy távoli felületen van kódolva.” A holografikus elv első matematikailag is precíz megfogalmazása a húrelmélet keretében látott napvilágot. Ez a Juan Maldacena nevével fémjelzett AdS/CFT megfelelés [9]. A következőkben szép lassan tisztázzuk majd, mit is takarnak ezek a fogalmak. Első lépésként egy kis kitérőt teszünk a szimmetriák világába.

5. Szimmetria

Egy objektum szimmetrikus, ha azt valamilyen transzformációnak alávetve változatlan marad. Az objektum lehet egy tárgy vagy egy matematikai kifejezés. A legfontosabb szimmetriák a téridő-szimmetriák: eltolások, tükrözések, forgatások térben és időben.

Például, ha a szobánkban lévő (minden egyéb megkülönböztető jegyet nélkülöző) négyzet alakú asztal távollétünkben valaki 90 fokkal elforgatja (az asztal közepén átmenő képzeletbeli függőleges tengely körül), akkor hazatérve ebből a transzformációból semmit sem veszünk észre. Azt mondjuk, hogy a 90 fokos forgatás az asztal egy szimmetriája.

A téridő-szimmetriákkal bíró térelméletekben a transzformálható objektum nem egy asztal. Az itt szereplő objektum matematikai jellegű: az elméletet meghatározó úgynevezett hatásfunkcionál. Ha egy transzformáció ezt békén hagyja, akkor azt mondjuk, hogy ez a transzformáció az elmélet egy szimmetriáját adja. Nyilván a szimmetriák ezen megközelítése a hétköznapi szimmetriafogalomtól igen távol esik. De a fizikusok már csak ilyenek. Megigéztetjéi annak a Galileo Galileitől származó ideának, hogy a természet nagy könyve a matematika nyelvén íródott, s így a szimmetria lényegének megértése matematikai absztrakciók alkalmazása nélkül keresztülvihetetlen.

A szimmetriáknak a kvantumelmélettel összecsengő absztrakt alapokra helyezésében Wigner Jenő jeleskedett. Megmutatta, hogy a téridő-szimmetriáknak a kvantumelméletben különböző ábrázolásai lehetnek. Ezek különféle térelméleteknek felelnek meg. Ez igen szép, azonban (megint ez a fránya kvantálás) az nem biztos, hogy a vizsgált klasszikus térelmélet szimmetriáit a kvantumos változatban matematikailag korrekt mó-

don meg is tudjuk jeleníteni. Ha ez nem megy, akkor azt mondjuk, hogy a szimmetria anomáliával rendelkezik. Az anomáliák eltüntetése lehet egy fontos elméletépítő feltétel. De jelenlétük sem teljesen nem kívánatos. Hiszen az anomáliákkal kapcsolatos matematikai kifejezések igen fontos fizikai üzeneteket hordozhatnak. Például bizonyos kvantumtérelméletek esetén az anomália lehet egyszerűen csak egy szám, mely egy adott makroállapotot realizáló rejtett mikroállapotok számával, azaz az entrópiával kapcsolatos. Melyek ezek a „bizonyos” kvantumtérelméletek?

6. Konform térelméletek

Hány veréb fér el a Lánchídon? Egy, de az állati nagy! Miért nevetünk ezen? Mert lelki szemeink előtt megjelenik a Lánchíd, amint rajta kuksol egy óriási veréb. Nyilván a mi világunk nem ilyen. Zoomolás során egyre másképp kezd kinézni. Azt mondjuk, hogy a skálaválasztásra érzékeny.

Az olyan kvantumtérelméleteket, melyekben a téridő-szimmetriák mellett a skálaszimmetria is szerepel, konform térelméleteknek (CFT, conformal field theory) nevezzük. Itt nagyíthatunk, kicsinyíthetünk, a világ objektumai minden hosszskálán természetesnek tűnnek. Egy CFT-s világban a verebes vicc nem lenne ütős. Ennek ellenére a CFT-ket a fizikusok imádják tanulmányozni.

Ennek sok különféle oka van. A skálaszimmetriát is tartalmazó úgynevezett konform szimmetria egyszerűbbé teszi a számolásokat. Mivel kellemes tulajdonságúak, viccesen komfort-térelméleteknek is hívhatnánk őket. Ezekben a kvantumtérelméletekben nagyon sok fontos mennyiséget viszonylag egyszerűen ki lehet számolni. Ha egy CFT-ben a skálaszimmetria kvantumszinten megsérül, akkor azt mondjuk, hogy az illető elmélet skálaanomáliával rendelkezik. A CFT-k esetén az anomáliákkal kapcsolatos matematikai mennyiségek meghatározhatók. Ezen mennyiségek viselkedéséből pedig nagyon fontos tanulságokat vonhatunk le.

Melyek ezek a fontos tanulságok? Hamarosan látni fogjuk, hogy a CFT-k speciális szerkezetű téridő-geometriákat kódolnak. Valahogy úgy, ahogy a hologramok háromdimenziós képeket. Az anomáliák a kódolás mechanizmusáról tudósítanak. Hogyan?

Ha egy holografikus képet kódoló lemezre ránézünk, akkor azon semmi olyan nincs, ami a szem számára érdekes lehet. Csak összevisszaságot látunk, krikszkrakszokat, karcolásokat. A lemezképből csak a lézerfény alkalmazása csalogatja elő a háromdimenziós képet – például egy híresség arcát. Hasonló szellemben tekinthetjük a CD-lejátszók őst, a lemezjátszót is. Ezek fekete korong alakú lemezekből csalogatták elő a hangot. A korongok felszínén koncentrikus köröket, mikrobarázdákat láthattunk. Azonban akárhogy meresztgettük is a szemünket, a barázdák vizsgálatából még nem jöhettünk rá arra, hogy a korong Beethoven V. szimfóniáját kódolja a Bécsi Filharmónikusok előadásában.

Ezen analógia mentén haladva a továbbiakban kiderül majd, hogy a CFT-kre érdemes úgy gondolni, mint olyan absztrakt teóriákra, melyek más mennyiségekkel együtt az anomáliák szerkezetébe bizonyos fajta téridők szimfóniáját kódolják. A további feladatunk az, hogy bepillantást kapjunk a kódolás pontosabb mechanizmusába.

Ehhez idézzük fel azt a tényt, hogy a holografikus kép három térdimenziós. A képet kódoló lemez csak két térdimenziós. A holográfia tehát olyan objektumok között létesít kapcsolatot, melyek eggyel különböző dimenziókban élnek. Világunk négy téridő-dimenziós. Ebből három tér- és egy idődimenzió jellegű. A holográfia ötlete szerint tehát négy téridő-dimenziós világunk objektumait egy három téridő-dimenziós „világ” objektumai kódolják. A matematika segítségével azonban bármilyen dimenziós téridőket tanulmányozhatunk. A holográfia ötletét magasabb dimenziókra is általánosíthatjuk. Ekkor a holografikus megfelelés során egy $D + 1$ téridő-dimenziós világot egy D dimenziós világ kódol.

A továbbiakban „világ” alatt mindig a $D + 1$ dimenziós világot fogjuk érteni. A D dimenziós világra mint a „CFT-s világ”-ra fogunk hivatkozni. Tegyük fel, hogy ennek a $D + 1$ dimenziós világnak a fizikai törvényeit egy D dimenziós „lapos” CFT-s világ írja le. Feltevéseink szerint az ilyen téridők laposak, ezért mivel a téridő görbülete a gravitációs erőter jelenlétére utal, a CFT-s világ gravitációmentes. Ha most a CFT-kre úgy gondolunk, mint téridő-szimfóniákat kódoló holografikus lemezekre, akkor mindjárt igen furcsán kell hogy érezzük magunkat. Ha a fenti CFT-k ugyanis gravitációmentes elméletek, akkor hogyan várhatjuk el tőlük azt, hogy a lemezek „lejátásával” majd olyan $D + 1$ dimenziós univerzumok bukkanjanak elő, ahol már a téridőt görbítő gravitáció az úr?

Ráadásul a verebes vicc kapcsán érezzük, hogy a D dimenziós lapos CFT-k igen speciálisak. Ezért nem kódolhatnak akármilyen $D + 1$ dimenziós téridőket. Ezek a téridők tehát valószínűleg igen speciális modelluniverzumokat írnak majd le.

A holografikus megfelelésről fokozatosan kialakuló képünk tehát meglehetősen különös. Sovány vigaszként szolgálhat az, hogy első ránézésre a mikrobarázda és a zenei hang kapcsolata is szokatlan. Vagy a kétdimenziós lemezke és a megjelenő háromdimenziós kép közötti holografikus kapcsolat is az. De ha ismerjük a lemezjátszó működési elvét, akkor már a zene és a hanglemez közötti összefüggés is könnyebben emészthető lesz. Ahhoz tehát, hogy haladást érijünk el, tisztáznunk kell a speciális modelluniverzumok „zenéje” és a CFT-s hanglemezek közötti kapcsolatot. Ehhez a legegyszerűbbnek tűnő CFT-s hanglemezre kell „meghallgatnunk”: a vákuum zenéjét.

7. Vákuum-összefonódottság

Egy kissrácokoromban olvasott, kamaszokról szóló könyvben találtam az alábbi mondatot: „Ez a nap üres volt. Akár

a fizikában a vákuum.” Ennek alapján akkortájt a vákuumnál unalmasabb állapotot, el sem tudtam képzelni. A vákuumban nincs „semmi”, ehhez képest minden ami van, az „valami”. Később a semmiből történő teremtés gondolata azt a képet alakította ki bennem, hogy a vákuum valamiféle alapállapot, amiből minden, ami van, létrejön. Egy CFT vákuumállapota az elmélet alapállapota. Ez a fentiekre rímel is. Azonban a CFT-s vákuum – nevével ellentétben – nem éppen unalmas állapot. Kvantumosan összefonódott állapot. Ismét egy fontos fogalom, melyről egy kicsit többet kell beszélnünk.

Minden makrovilágbeli mesterkedésünk lokális. Egy tóban pancsoló kisgyermek a tükörsima vizet csak a gyermek közvetlen közelében borzolja fel. A felborzolás csak a gyermek egy kis környezetében történik, azaz lokális. Erről a felborzolt állapotról a tó átellenes végén lévő nagymama azonnal nem szerezhet tudomást. A mobillal átküldött szelfi a nagyanyót maximum fénysebességgel érheti el. A borzolás hullámai pedig, mire a tó túloldalára érnek, szinte teljesen elenyésznek. Ennek ellenére akár szelfivel felturbózva, akár hagyományos módon, a borzolással történő üzengetés véges sebességgel, de azért kivitelezhető.

Az üzengetni vágyó nagyit és unokáját jellemző állapot titkos összefonó szálak létén alapul. Nagyit és unokát bizonyos helyzetekben hasonlóan reagálnak. Mintha előzetesen összebeszéltek volna. Ha az unoka már beszélni is tud, az összebeszélés is benne van a pakliban. De valószínűbb, hogy ezen szálak eredete rejtett (genetikai) paraméterekkel kapcsolatos. A téridőbeli események közötti kapcsolatokat az események közötti korrelációknak nevezik. Nagyit és unoka viselkedése között tehát olyan korrelációk vannak, melyek fennállását rejtett paraméterek segítségével értelmezhetjük.

A kvantumos összefonódottság korrelációs száalai azonban nem ilyenek. A CFT-s vákuumállapot térben és időben kiterjedt állapot. Az első furcsa tulajdonsága az, hogy a vákuum egyik helyen történő lokális bökdösésével egy másik igen távoli helyen elvileg bármilyen állapot létrehozható [10]. A másik elképesztő furcsaság az, hogy a CFT-s vákuumállapotba kódolt titkos szálak lokális rejtett paraméterekkel nem értelmezhetők [11]. Itt tehát bizonyos korrelációkról az előzetes összebeszéléshez vagy genetikai programozáshoz hasonló dolgok sem adhatnak számot.

A harmadik, bennünket érdeklő tulajdonság matematikai jellegű: az összefonás mértéke lokális tartományokra a skálaanomáliák erősségével és a tartomány méretével arányos. Például páratlan térdimenziós gömb alakú tartományok esetén az összefonás mértéke tartalmaz egy „univerzális” viselkedésű tagot. Ez a gömb sugarának logaritmusával arányos. A harmadik tulajdonság meglehetősen vadul hangzik. Mivel számunkra most ez a tulajdonság a legfontosabb, bontsuk ki ezt kicsit részletesebben!

A harmadik tulajdonság azt mondja, hogy ez az összefonódottságnak nevezett, a józan észnek fittyet hányó módon viselkedő valami számszerűsíthető. Más szóval,

valamiféle természetes mértékkel rendelkezik. És ez a mérték egy lokalizált tartományban lévő CFT-s mikroállapotok számával arányos, hiszen korábban már megbeszéltük, hogy a skálaanomáliák ezekről a mikroállapotokról tudósítanak. De mi méri az összefonódottságot? Az úgynevezett összefonódottsági entrópia. Ezt a mennyiséget eredetileg Neumann János vezette be, ezért von Neumann-entrópiának is nevezik.

Pilinszky János írja az egyik versében azt, hogy „mi repesztjük ketté azt, ami egy és oszthatatlan”. Valóban. De a világ megismerésére egyelőre nincs jobb módszerünk. Életünk során megfigyeléseket végzünk, s ennek során a világnak egy elszigeteltnek tűnő részét vesszük szemügyre. Felhasítjuk a világot vizsgálendő objektumra és környezetre. Persze az objektum és a környezet szétválasztása nem mindig üdvözítő. Főleg akkor, ha ezek egymással kvantumosan összefonódtak.

A CFT-s vákuumnál ez a szétszakítás teljességgel lehetetlen. Ezt a von Neumann-entrópia matematikai viselkedése kerek pereg megmutatja. Ha a vizsgált téridőtartomány egy rögzített időpontbeli tetszőleges dimenziós gömb, akkor a gömb határától kicsit innen és kicsit azon túl lévő kvantum mikroállapotok mindig maximálisan összefonódtak lesznek. A harmadik tulajdonság azt mutatja, hogy a gömb alakú tartomány összefonódottsági entrópiája a gömb sugarával és a skálaanomáliák erősségével kapcsolatos.

Az entrópia szóval azonban ebben a cikkben már találkozunk. Hol is? A fekete lyukak entrópiájánál és a ho-

lografikus elvnl. Lehet, hogy a fekete lyukak entrópiája igazából összefonódottsági entrópia? Ami azt méri, hogy a világ elkerülhetetlen kettérepesztése során mennyi információ marad előlünk elzárva? Sőt, esetleg az is lehet, hogy tetszőleges téridőtartományokhoz is rendelhetünk összefonódottsági entrópiát? Mi van, ha a téridő szövetét valamilyen értelemben az összefonódottság tartja össze?

Irodalom

1. János evangéliuma, Jn 1,1–3 (revideált új fordítás)
2. A zsidókhöz írt levél, Zsid 11,3 (Károli Gáspár fordításának 1908-as revíziója)
3. Wheeler J. A. (1990): Information, Physics, Quantum: The Search for Links. In: *Proc. 3rd Int. Symp. Foundations of Quantum Mechanics*, Tokyo, 1989.
4. A műholdak nagy sebessége miatt az idő ugyanakkor lassabban is telik. Ez napi 7 milliomed másodpercet jelent. A GPS rendszerben ezt a két egymással versengő effektust kell figyelembe venni.
5. Kepler J. (1601): De fundamentis astrologiae certioribus. Thesis XX: “Ubi materia, ibi geometria”
6. Bekenstein J. D. (1973): Black holes and entropy. *Physical Review D* 7, 2333–2346.
7. Hawking S. W. (1975): Particle creation by black holes. *Communications in Mathematical Physics*, 43, 199–220.
8. Susskind L. (1995): The world as a hologram. arXiv:hep-th/9409089, *Journal of Mathematical Physics*, 36, 6377–6396.
9. Maldacena J. (1998): The large N limit of superconformal field theories and supergravity. arXiv:hep-th/9711200, *Advances in Theoretical and Mathematical Physics*, 2, 231–252.
10. Reeh H., Schlieder S. (1961): Eine Bemerkung zur Unitäritätsäquivalenz von Lorentzinvarianten Feldern. *Nuovo Cimento*, 22, 1051–1068.
11. Bell J. S. (1964): On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox. *Physics*, 1, 195–200.

VERSAILLES-TÓL VERSAILLES-IG – DEBRECEN ÉRINTÉSÉVEL – AZ SI MÉRTÉKRENDSZER REFORMJA – 2. RÉSZ*

Király Beáta^{1,®}, Angeli István²

¹HUN-REN Atommagkutató Intézet, Debrecen

²Debreceni Egyetem, Kísérleti Fizikai Tanszék, Debrecen

[®]E-mail: kiraly.beata@atomki.hu

150 évvel ezelőtt, 1875-ben született meg Párizsban a méteregyezmény, amelynek egyik célja a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatal létrehozása volt. Az első 17 aláíró ország között volt hazánk, akkor még az Osztrák-Magyar Monarchia kötelékében. Az önálló és független Magyarország 100 évvel ezelőtt, 1925-ben erősítette meg tagságát.

E jeles évfordulók tiszteletére újra felvesszük a fonalat, és lezárjuk az SI mértékrendszer 2019-es reformja kapcsán közreadott cikkünket. Az első részben [1] elindultunk Versailles-ból, és visszatértünk Versailles-ba – bemutatva az SI mértékrendszer áttérését a fizikai állandók által definiált alapmennyiségekre. Ebben a részben áttekintjük a méter mérésügyi történetét, és kiderül, mi köze van mindehhez Debrecennek.

* A jelen cikk a 2018 decemberében az ATOMKI szemináriuma keretében elhangzott előadás [6] alapján íródott.

A metrológia

A metrológia vagy mérésstan, mérésstudomány foglalkozik a különféle mérések esetén felmerülő elméleti kérdésekkel, a technikai megvalósítással, azaz a mérés kivitelezésével, a mérési eredmények elemzésével, továbbá a mértéktörténettel is.

A mérésügy feladata a mértékegységek meghatározása, egységesítése, törvények és rendeletek útján ezek bevezetése, a betartásuk ellenőrzése. Az előírásoktól eltérő mértékek használata (különösen a kereskedelemben) igen komoly hatósági, jogi következményekkel járhat.

A mérésügy egyrészt definiálja a mértékegységet, másrészt megadja az etalont, amely megtestesíti az adott mértékegység esetén az egységnyi mennyiséget. Itt érdemes megjegyezni, hogy amit a magyarban etalonnak

nevezünk, azt az angol többnyire standardként, a francia prototípusként (prototype) említi.

A méter egykor

1791-ben a Francia Akadémia javaslatot tett a méter definíciójára: legyen a méter a Föld Párizson átmenő negyed-délkörének tízmilliomod része. Korábban, már a 17. században felmerült, hogy az inga lengésével határozzák meg a métert: legyen 1 méter annak az ingának a hossza, amelynek lengésideje egy adott idő. Ezt azonban elvetették, mivel a hosszúság egységét az idő egységéből származtatná, így nem lenne attól független.

A méter etalonját két francia csillagász készítette elő: *Jean-Baptiste-Joseph Delambre* (1749–1822) és *Pierre-Francois-André Méchain* (1744–1804). Az igen fáradtságos munkát, a délkör negyedhosszának megmérését 1792-ben kezdték el. De nem mentek végig az Egyenlítőtől Párizson át az Északi-sarkig, hanem kiválasztották a Barcelona-Párizs-Dunkerque szakaszt, mivel Barcelona

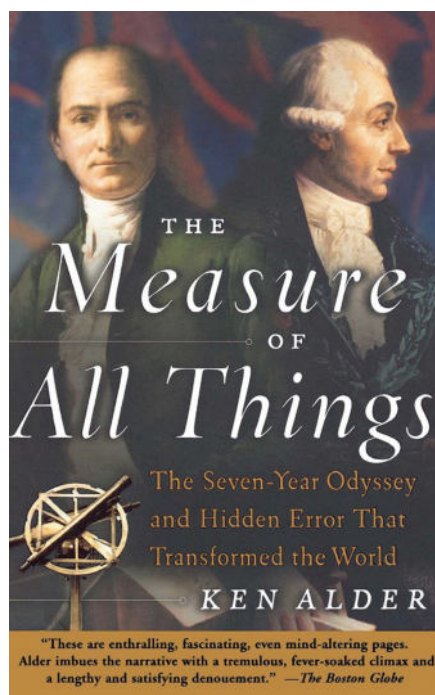
és Dunkerque is Párizs délkörén fekszik (keleti hosszúság $\sim 2^\circ$), közel a tengerszinthez.

A távolságmérést a geodéták által gyakran alkalmazott háromszögelési módszerrel végezték el (1. ábra). Ehhez szükséges legalább egy alapvonal tényleges lemérése és a szögek pontos mérése. A két csillagász két alapvonalat is felvett, az egyiket délen Perpignan mellett (kb. 16 km-es szakasz), a másikat Párizs mellett (kb. 13 km-es szakasz). Az alapvonal hosszának megméréséhez négy darab 12 láb hosszú, tiszta platinából készült mérőrudat használtak.

Hat évig tartott a háromszögelés és 84 napig az alapvonalak lemérése. Az amúgy sem könnyű feladatot tovább nehezítették az áldatlan körülmények. Franciaországban még dúlt a forradalom, folytak a harcok a királypártiak és a köztársaságpártiak között. A belső zűrzavart a külső háborúk is tetézték, az ország hadban állott Európa legjelentősebb hatalmaival. A két férfit többször kémnek nézték, letartóztatták, börtönbe vetették. Nem csoda, ha mind testileg, mind lelkileg erősen megviselte őket ennek a mérésnek a végrehajtása. Küzdelmes munkájukról izgalmas könyv számol be Ken Alder amerikai történész tollából (2. ábra) [3].



1. ábra. A Delambre és Méchain által megmért Barcelona-Párizs-Dunkerque-távolság háromszögelési felosztása [2, 3]



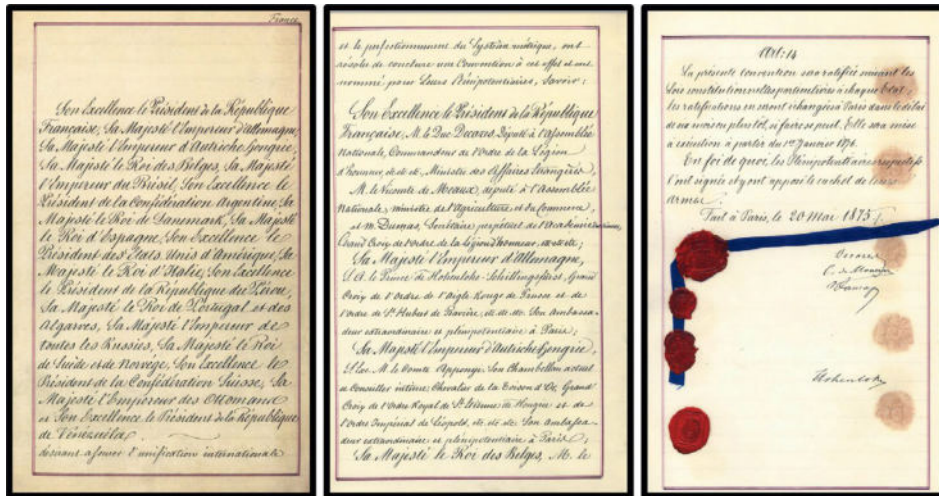
2. ábra. Delambre és Méchain a könyv borítóján [3]



Király Beáta Debrecenben szerzett diplomát matematika-fizika szakon, magfizikából doktorált, első és eddig egyetlen munkahelye az ATOMKI. 2011 óta tudományos titkár. 2010-ben vette át a látogatócsoportok szervezését, 2012 óta egyedül szervezi a fizikusnapok (újában nyílt napok) egyhetes rendezvényét, 2022 óta vezeti az intézeti szemináriumokat; szervezi a kutatók éjszakája és a magyar tudomány ünnepe programjait. Fontos feladatának tekinti az ATOMKI történeti emlékeinek megőrzését, átörökítését és hagyományainak továbbadását.



Angeli István a Debreceni Egyetem nyugalmazott egyetemi tanára. Az ELTE TTK fizikus szakán végzett 1955-ben. Pályája elején részt vett a magyarországi szénak urántartalmának vizsgálatában. Később munkatársaival totális neutron-hatáskeresztmetszeteket mért. Az értelmezéshez kifejlesztették a félklasszikus optikai modellt: ezt a NASA is használja az űrhajósok által elszenvedett dózis becslésére. A töltéssugárban héj- és deformációs effektusokat tártak fel, valamint korrelációt a kötési energiával. 2004-ben és 2013-ban mag sugártáblázatokat közölt.



3. ábra. A méteregezmény kézzel írt eredetije 1875. május 20-ai keltezéssel. Az első oldal harmadik sora: „La Majesté l’Empereur d’Autriche Hongrie”, azaz Őfelsége, Ausztria-Magyarország császára [4]

Munkájuk gyümölcseként 1799-ben elkészülhetett a méteretalon platínából, négyszögletes keresztmetszettel, amelynek polírozott véglapjai jelölték ki az 1 méter hosszúságot 0,05 mm bizonytalansággal. Később felmerült az igény, hogy ne a véglapok, hanem a rúdon ejtett két karcolás jelölje ki a métert. Továbbá a négyszögletes keresztmetszetenél előnyösebb a mechanikai hatásoknak jobban ellenálló X keresztmetszet és az, ha a két karcolást az idomon a semleges szál vonalában készítik el. Az 1889-ben készült új méteretalon anyaga már nem tiszta platina, hanem platina-irídium ötvözet volt, bizonytalansága 0,2 μm .

A méteregezmény

1875-ben Párizsban született meg a Nemzetközi Méteregezmény 17 európai ország együttműködésével, amire azóta további országok csatlakoztak. Magyarország 1875-ben a legelső országok között volt, habár akkor még az Osztrák-Magyar Monarchia részeként (3. ábra). Azt hihetnénk, hogy egy szép napon majd az egész földkerekség tagja lesz a méteregezménynek. Meglepő módon azonban időnként vannak kilépő vagy kizárt országok is, amit például a tagdíjbefizetés elmulasztásával lehet elérni.



4. ábra. Az ATOMKI által megőrzött méterrúd, felirata: Ganz Mávag MSZ4982B 16. (Fotó: Király Beáta)

A Párizsban őrzött etalon az elsődleges. A különböző országok másodlagos etalonokat kaptak, amelyeket azonban gyakorlati mérésre nem használnak, hanem további, gyakorlati használatba vett etalonokat készítenek a segítségükkel. Magyarország 1889. szeptember 24-én kapta meg a 14-es sorszámú méteretalont. Az Atommagkutató Intézet téglalap keresztmetszetű méterrúdját a hozzá tartozó fadobozban ma is őrzüzzük (4. ábra).

E méteregezmény hozta létre az Általános Súly- és Mértékügyi Értekezletet (francia rövidítése után CGPM), amelyet rendszeresen megrendeznek, valamint a Nemzetközi Súly- és Mértékügyi Hivatalt, (francia rövidítése után BIPM), amely a Párizs melletti Sèvres-ben található. Ez a hivatal egy régi palotában kapott helyet, és igen különleges diplomáciai helyzetben van (területenkívüliség); aki oda belép, az elhagyja Franciaország területét.

Az aláíró országok mind létrehozták saját országos mérésügyi hivatalukat. Ezt a funkciót hazánkban jelenleg Budapest Főváros Kormányhivatalának Metrológiai és Műszaki Felügyeleti Főosztálya tölti be, korábban a Magyar Kereskedelmi Engedélyezési Hivatal (MKEH) Metrológiai Hatósága, amely még korábban Országos Mérésügyi Hivatal (OMH) néven működött (5. ábra). Hivatalos lapja a Mérésügyi Közlemények, amely 1910-ben indult, és 2006-tól kizárólag elektronikusan érhető el – vagy már úgy sem.



5. ábra. Az OMH logója, rajta a méteretalon jellegzetes X keresztmetszetének rajza. Az évszám 1874, mivel a métert és a kilogrammot hazánkban már a méteregezményhez való csatlakozás előtti évben bevezették

Ígény a pontosításra

A tudomány és a technika fejlődésével azonban felmerült az igény a platina-irídium rúdnál pontosabban használható etalonra. Főleg a spektroszkópiai szakemberek nem voltak elégedettek a 0,2 μm bizonytalansággal, és szorgalmazták a hullámhosszon alapuló méterdefiníciót.

1960-ban született meg a kriptonetalon, amely a métert a ^{86}Kr atom adott elektronátmenetéhez tartozó narancsszínű vonalának hullámhossza segítségével adta meg, és amelynek bizonytalansága 0,01 μm . A sors finto-ra, hogy három évvel később két neves spektroszkópus, W. R. C. Rowley és J. Hamon kimutatta, hogy a kiválasztott kriptonvonal aszimmetrikus, így nem lehet egyértelműen egyetlen hullámhosszt hozzárendelni. Ekkor új

méterdefiníció után kellett nézni. Hogy ez mennyire nem volt egyszerű feladat, azt mutatja, hogy a kriptonetalon még húsz évig érvényben maradt.

Debrecen érintése

Ezen a ponton ugorjunk vissza az időben, és látogassunk el Debrecenbe! 1910-ben a debreceni Református Kollégium udvarán ugráltak a gyerekek.

(...) Első tízpercben a nagy udvaron, ahol a fiukat bámultam, árván, vad játékkukat, jött valaki, s halkán, objektíven így szólt hozzám: „Ha nem játszol te sem, ne nézzük együtt a többieket?” Megörültem. Kezeltünk. „A neved?” „Bay Zoltán.” Szép arca, szeme volt. Az első barát? Magányom oszolt.

Szabó Lőrinc: Az első tízperc (Tücsökzene 94.)

Bay Zoltán (1900–1992) debreceni diákévei után a Pázmány Péter Tudományegyetemen folytatta tanulmányait, majd Berlinbe került, később Szegeden lett egyetemi tanár, azután az Egyesült Izzólámpa és Villamossági Rt. vezérigazgatója. Már fiatalon a Magyar Tudományos Akadémia levelező, majd rendes tagja. Legismertebb eredménye a közvetlenül a II. világháború után sikeresen végrehajtott magyar Hold-radar-kísérlet. A háború után kialakult rendszer azonban nem kedvezett a tudósnak, amerikai emigrációba kényszerült.

Megismerkedett a lézerekkel, és 1965-ben javasolta, hogy alapozzák a métert a pontosabban mérhető időegységre és a fénysebességre. Amikor 1973-ban hazalátogatott, a volt iskoláiban (Debrecenben, Budapesten és Szegeden) az új méter javaslatáról beszélt, majd 1989-ben az (immár harmadik) akadémiai székfoglaló előadását az addigra már bevezetett új méterről tartotta.

1983-ban a 17. CGPM elfogadta Bay Zoltán javaslatát, és ekkortól a definíció: a méter a fény által vákuumban a másodperc $1/299\,792\,458$ -ad része alatt megtett út hossza. Az etalon most már nem egy fémrúd, hanem a jóddal stabilizált He-Ne lézer, amelynek hullámhossza $632,991\,398\,22$ nm kell legyen a méterdefiníció szerint. A fénysebességen alapuló definíció bizonytalansága $0,1$ nm ($= 10^{-10}$ m), így a relatív bizonytalanság 10^{-10} .

A méter ma

A 2018 novemberében Versailles-ban összeült 26. CGPM [5] döntött a hét alapmennyiség – az 1967/68 óta érvényes másodperc, az 1983 óta érvényes méter, az 1889 óta érvényes kilogramm, az 1948 óta érvényes amper, az 1967/68 óta érvényes kelvin, az 1971 óta érvényes mól és az 1979

óta érvényes kandela – addigi definíciójának módosításáról.

A 26. CGPM rögzítette hét fizikai állandó értékét az alábbiak szerint. Ettől kezdve ezek az állandók hiba (avagy bizonytalanság) nélküli, kőbe véssett számok az adott mértékegységben értve.

- Az alapállapotú ^{133}Cs két hiperfinom energiaszintje közötti átmenetnek a frekvenciája $\Delta\nu_{\text{Cs}} = 9\,192\,631\,770$ Hz.
- A vákuumbeli fénysebesség $c = 299\,792\,458$ m/s.
- A Planck-állandó $h = 6,626\,070\,15 \times 10^{-34}$ Js.
- Az elemi töltés $e = 1,602\,176\,634 \times 10^{-19}$ C.
- A Boltzmann-állandó $k = 1,380\,649 \times 10^{-23}$ J/K.
- Az Avogadro-állandó $N_{\text{A}} = 6,022\,140\,76 \times 10^{23}$ mol $^{-1}$.
- Az 540×10^{12} Hz frekvenciájú monokromatikus sugárzás fényhasznosítása $K_{\text{cd}} = 683$ lm/W = 683 cd·sr·s $^{-3}$ ·kg $^{-1}$ m $^{-2}$.

2019. május 20-án (vegyük észre a május 20-ai dátum ismétlődését!) a régi definíciók hatályukat veszítették, és a fent megadott fizikai állandókon alapuló új definíciók léptek érvénybe, amelyekből itt csak a számunkra érdekes másodperc és méter meghatározását idézzük.

- A másodperc (s) az idő SI-egysége. Úgy definiáljuk, hogy a cézium $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ frekvenciájának $9\,192\,631\,770$ Hz (s^{-1}) a rögzített értéke. Azaz, $1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu_{\text{Cs}}$. Ez fizikai tartalmát tekintve ugyanaz, mint az 1967/68-ban életbe lépett előző definíció.
- A méter (m) a hosszúság SI-egysége. Úgy definiáljuk, hogy a vákuumbeli fénysebességnek $299\,792\,458$ m/s a rögzített értéke. Azaz, $1 \text{ m} = 9\,192\,631\,770 \cdot c / 299\,792\,458 \cdot \Delta\nu_{\text{Cs}}$. Ez gyakorlatilag ugyanaz, mint az 1983-ban életbe lépett előző definíció. Vegyük észre, hogy a métert végül mégis időmérésre vezettük vissza.

Vajon a jövőben lesz-e még igény a definíciók további változtatására? Itt és most nehéz elképzelni, hogy szükség lehet rá – hacsak ki nem derül, hogy a fizikai állandók valójában mégsem állandók. Vélhetően az elődök is mind úgy gondolták abban a pillanatban, hogy tökéletes definíciót hoztak létre.

A mérés kétségkívül rendkívül fontos a mai ember számára, és a technika további fejlődésével ez csak fokozódik. Így a mérésügyi hivatalok sosem fogynak ki a feladatokból.

Irodalom

1. *Fizikai Szemle*, 2019/5, 160–162.
2. <http://www.kenalder.com/measure/maps.htm>
3. Ken Alder (2002): The measure of all things. The seven-year Odyssey and hidden error that transformed the world. Free Press
4. Metremania (2025): *Nature Physics*, 21, 679. <https://doi.org/10.1038/s41567-025-02926-5>
5. Resolution 1 of the 26th CGPM (2018): On the revision of the International System of Units (SI). <https://www.bipm.org/en/committees/cg/cgpm/26-2018/resolution-1>
6. Angeli István: Versailles-tól Versailles-ig – Debrecen érintésével. Az SI mértékrendszer reformja, ATOMKI szeminárium, 2018. 12. 20., videó: <https://www.youtube.com/watch?v=cSmBNCluC9w>

A FÜGGŐLEGES TENGELY KÖRÜL FORGATOTT RUGALMAS SZÁL DEFORMÁCIÓJA

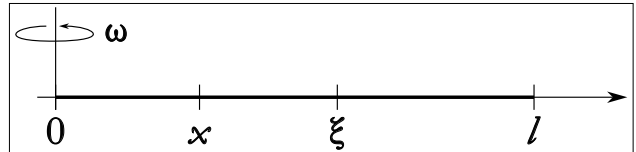
Wiedemann László[®], Bodrog Zoltán[®]
[®]E-mail: wiedemann.krisztina@gmail.com

Cikkíráskor két szempontot biztosan figyelembe kell venni: a szakmai egzaktsgot és a probléma megközelítésének módját, a módszertani-didaktikai elvárásokat. Tudatosítani kell, hogy a matematikai tárgyalás lényeges, bár nem kizárólagos vezérelv. Ezen elvárások érvényre juttatása egy modell bevezetésével lehetséges. Egy jó modell analogonja a valóságnak, és egyszerűbb számításokra vezet, kapcsolódási pontokra mutat, eredmények diskusszióját teszi lehetővé. Egy jó modell hasznos terminus technicusokat foglalhat magában. Például ebben a cikkben egy szál ρ vonalsűrűségének (egysége kilogramm/méter) bevezetése egy ilyen modellelem, mely révén a rugalmas szál szeleteinek elemi megnyúlásai integrálisan összegezhetőek.

A modellszemlélet az eredmények közelítő jellegével szorosan összefügg. Fontos azonban, hogy az egzaktsg ne szenvedjen csorbát: a modell annyira, amennyire szükséges, mindenképpen hű legyen. Elhanyagoljuk a centripetális erő megnyúlás miatti elmozdulás következtében *magasabb rendben* megváltozó értékét. A forgás következtében fellépő erőhatásokat dominánsnak tekintve eltekintünk a szál súlyától; ugyanakkor eltekintünk a nagyon gyors forgás mellett erősödő közegellenállástól is – ezekkel alkalmasint egy, a hasonló „hétköznapi” rendszerektől *eltérő, de releváns* alproblémát definiálunk.

Mindezek fényében és mélységében kiknek szól ez a cikk? Valójában olyanoknak, akik ehhez a nem triviális problémához szakmai és módszertani keretben közelítenek, így például egyetemi hallgatóknak, a megszokott tananyagot túlra is utat mutatni igyekvő tanároknak, a velük tartó felsőéves középiskolásoknak, emellett szakmabeli műkedvelőknek.

A szál egyik végét egy függőleges helyzetű, rögzített tengelyhez erősítjük úgy, hogy a szál e tengely körül ω



1. ábra. A szál mentén felvett koordináták: az l hosszú szál hosszában felvett $x \in [0, l]$ pozíció, aminek a mozdulatlan szálhoz képesti elmozdulását elhanyagoljuk; illetve ennek integrálásakor futó $\xi \in [x, l]$ „másodpéldánya”

szögsebességgel forog. Ennek hatására a szál megnyúlik, de nem egyenletesen. Keressük a szál hosszmenti anyageloszlását leíró függvényt. Ehhez bevezetjük a vonalsűrűség fogalmát, a szál hosszegységének tömegét, ez ρ .

A problémát számolással a következőképpen oldjuk meg. A szálat egyenletesen vékony, párhuzamos szeletekre osztjuk. Külön-külön minden szelet megnyúlik. Amikor egy adott, rögzített x helyen keressük a rugalmas szál megnyúlását, az x helytől kifelé eső valamennyi szelet körpályán tartásához szükséges, egymásra rakódó centripetális ereőelemek nyújtó hatását kell összegezni. A szeletek közül mindegyikre hat a helyi $m\omega^2$ centripetális erő (az integrálban $r = \xi$) és az ezek összegeit az x helyen ellentételező, a szelet nyúlásának hatására ébredő, a Hooke-törvény szerinti erő.

Írjuk fel a szál mentén D vastag (hosszú?) szeletekre érvényes (egydimenziós differenciális) Hooke-törvényt:

$$\Delta D = \frac{1}{EA} FD,$$

ahol E és A a szál rugalmassági modulusa és keresztmetszete, F pedig az innen kijebb eső összes szeletre ható centripetális erő összege. A szelet vastagságát infinitezimálissá téve ($D \rightarrow 0$) minden x helyen megkapjuk a folytonosan változó $\varepsilon(x) \leftarrow \Delta D/D$ fajlagos megnyúlást. Tőle kifelé összegezzük minden ξ helyen az ott levő szeletek-



Wiedemann László Budapesten 1931-ben született. Fizika-matematika szakos tanári diplomát az ELTE-n szerzett. Harminc éven át volt a Fővárosi Pedagógiai Intézet munkatársa, ahol többek közt a budapesti fizikai szakfelügyeletet irányította. Doktori címét 1964-ben kapta. Ösztöndíjasaként később külföldön is dolgozhatott. Szakmai, módszertani cikkek jelentek meg a neve alatt, és volt országos versenyek kuratóriumi tagja is. Fontosabb kitüntetései: Németh László-díj, Rátz Tanár Úr Életmű-díj



Bodrog Zoltán fizikus és közlekedésmérnök, a Fizikai Szemle olvasószerkesztője. Doktori fokozatát fizikusként a Brémai Egyetemen szerezte. Jelenleg az Óbudai Egyetem oktatója, itt kutatási területe a fenntarthatóság menedzsmentje – ezen belül a fizikai valóságtól, korlátoktól elszakadt gazdasági és társadalmi folyamatok problémája. Emellett Magyarország legrosszabb fizikatanáraként fejlődésével az egész szakma minimumát igyekszik javítani.

re ható $dF = dm\xi\omega^2$ (külön-külön szintén infinitezimális) centripetális erőt, ahol $dm = \rho(\xi)d\xi$ a szelet infinitezimális tömege. A felösszegzett erő:

$$F(x) = \omega^2 \int_x^l \xi \rho(\xi) d\xi,$$

ahol ω a stacionárius állapotban az egész szátra egységesen jellemző szögsebesség, l pedig a szál hossza. Végül az x helyen levő szelet relatív megnyúlása, melyet a ξ pozíciókra felösszegzett centripetális erő okoz,

$$\varepsilon(x) = \frac{1}{EA} F(x) = \frac{\omega^2}{EA} \int_x^l \xi \rho(\xi) d\xi.$$

A fenti, egyelőre két ismeretlen függvényt (ε , ρ) tartalmazó integrálegyenlethez a relatív megnyúlásra vonatkozó differenciálegyenletet két átalakítás után kapjuk. Az egyik az egyenlet x szerinti deriválása:

$$\varepsilon'(x) = -\frac{\omega^2}{EA} x \rho(x),$$

ahol a jobb oldal a Newton–Leibniz-tétel eredménye, s a negatív előjel az integrálás alsó határa szerinti deriválás következménye. A másik átalakítás ε és ρ kapcsolata, a sűrűség felírása a relatív megnyúlás függvényében. Ez egyszerűen abból következik, hogy ha egy M tömegű szelet D hossza megváltozik, akkor annak sűrűsége a kezdeti (konstans) $\rho_0 = M/D$ helyett $\rho = M/(D + \varepsilon D)$, s így

$$\rho(x) = \frac{\rho_0}{1 + \varepsilon(x)}.$$

A differenciálegyenletünkbe ezt is beleolvasztva

$$\varepsilon'(x) = -\frac{\omega^2 \rho_0}{EA} \frac{x}{1 + \varepsilon(x)}.$$

Végül ezt a differenciálegyenletet kell megoldani.

A differenciálegyenlet szétválasztható, s így

$$(1 + \varepsilon)d\varepsilon = -\lambda x dx,$$

ahol definiáltuk a $\lambda = \omega^2 \rho_0 / (EA)$ konstans is. Mindkét oldal integrálása után

$$\varepsilon + \frac{\varepsilon^2}{2} = -\frac{\lambda x^2}{2} + c,$$

ahol c egy integrálási konstans, aminek segítségével majd a határfeltételhez igazodunk. Az integrált egyenlet algebrai átalakításával

$$\frac{1}{2} [(\varepsilon + 1)^2 - 1] = -\frac{\lambda x^2}{2} + c,$$

és ebből

$$\varepsilon = \sqrt{1 - \lambda x^2 + 2c} - 1.$$

Az $\varepsilon(l) = 0$ határfeltétel fizikai jelentése: a szabad vég nem deformált. Ebből határozzuk meg az integrálási konstans megfelelő értékét.

$$0 = \varepsilon(l) = \sqrt{1 - \lambda l^2 + 2c} - 1,$$

azaz

$$2c - \lambda l^2 = 0,$$

tehát $c = \lambda l^2 / 2$. Mindezzel együtt végül

$$\varepsilon(x) = \sqrt{1 + \lambda(l^2 - x^2)} - 1.$$

A vonalsűrűség imént megkapott konkrét formája további diszkussziókra alkalmas. Annyit rögtön érdemes a megoldás felett megjegyezni, hogy ez így kvalitatíve megfelel az elvárásainknak: a relatív megnyúlás a forgástengelynél a legnagyobb; a fonal végénél nulla. Ha ezzel felírjuk a sűrűséget is, az a forgástengelynél minimumális, a szál végén az eredetivel egyezik meg:

$$\rho(x) = \frac{\rho_0}{\sqrt{1 + \lambda(l^2 - x^2)}}.$$

Egy további érdekes és messzemenőleg nem triviális kérdés lehet az eredményt és ezzel a modellt, a benne szereplő elhanyagolásokat ellenőrző mérések tervezése. Ezen belül például egy viszonylag egyszerű részfeladat lehet, ha egy mérésnél kihasználjuk, hogy a vízszintes megnyúlás értéke a fentivel megegyezik akkor is, ha a gravitációt figyelembe vesszük – a gravitációt elhanyagoló modellünk tehát az azt mégis figyelembe vevő modell vízszintes dimenzióját jól modellezi. Így ekkor a szál alakja az x -től kifelé felösszegzett centripetális erő és nehézségi erő arányát meredekségével mutatja.

BESZÁMOLÓ A 66. ORSZÁGOS FIZIKATANÁRI ANKÉTRÓL ÉS ESZKÖZBEMUTATÓRÓL

Herendi Borbála^{1,*}, Vitkóczy Fanni²

¹Tóth Árpád Gimnázium, Debrecen; ²ELTE Trefort Ágoston Gyakorló Gimnázium, Budapest
*E-mail: borbala.herendi@gmail.com

A *Fizikatanári Ankét* az elmúlt évtizedekben olyan értékeket vonultatott fel, amelyek miatt a Nemzeti Közszoigálati Egyetem érdemesnek tartotta beiktatni a saját képzési kínálatába. Így az esemény a tartalmi megújító képzések sorába került, sok kolléga számára lehetővé téve az ingyenes részvételt a programon.

Közel 170 pedagógus érkezett a rendezvényre, melynek idén Kecskemét adott otthont 2025. október 26. és 29. között. Míg korábban inkább családi hangulat jellemezte az ankétot, ezúttal már egy kifejezetten nagyszabású szakmai esemény benyomását keltette. A gazdag program egyszerre jelentett szakmai bőséget és szerve-

zési kihívást: időnként a párhuzamos műhelyek, a szűk szünetek és a zsúfolt napirend miatt kevesebb lehetőség maradt a spontán beszélgetésekre, amelyek korábban az ankét egyik fontos sajátosságát adták. Mindez azonban mit sem von le abból, hogy a program szakmai tartalma idén is rendkívül értékes és inspiráló volt.



A 66. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató megnyitója

A megnyitót követően *Szabó Gábor* professzor előadása foglalta keretbe a rendezvényt: az ELI ALPS kutatási irányainak áttekintése sokak számára izgalmas betekintést adott a lézeres fizika legújabb területeire, még ha a pedagógiai alkalmazhatóság ez esetben kevésbé volt is kézzelfogható. A következő nap délelőttje viszont már egyértelműen a fizikaoktatás problémáira fókuszált. *Jenei Péter* előadása határozott hangon szólt a tanárképzés és a közoktatási rendszer nehézségeiről. Különösen nagy visszhangot keltett őszinte megfogalmazása a tantervi kötöttségek gátló hatásáról, valamint az a gondolat, hogy a változás nem kizárólag rendszerszintű reformoktól várható: „egy fecske is csinálhat nyarat”, ha felkészült, és szakmai közösségekbe kapcsolódva folyamatosan fejleszti magát. Az előadás stílusa és tartalma ritkán hallható nyíltsággal, diplomatikusan provokatívan fogalmazta meg a fizikaoktatás modernizációjának dilemmáit. A délelőtt második felében *Örökös-Tóth István* a HUNOR-program kutatási kérdéseinek kulisszatitkaiba vezette be a hallgatóságot, majd *Horváth Dezső* adott áttekintést az antianyag kutatásának mai állásáról. A délutáni és esti előadások közül *Rab Árpád* előadása volt a leginkább gondolatébresztő: a mesterséges intelligencia és az oktatás viszonyát vizsgálta, hangsúlyozva, hogy a technológiai fejlődés csak akkor szolgálja a tanulást, ha világosan

megfogalmazott pedagógiai értékek mentén alkalmazzuk.

A kedd délelőtti program három jól egymásra épülő előadásból állt. *Härtlein Károly* a kísérleti fizika tanításának máig érvényes módszereit mutatta be, látványosan és tanórai szemlélettel. Ezt követte *Dezső Gergely*, aki az additív gyártás (3D nyomtatás) fizikai és mérnöki aspektusait ismertette, hangsúlyozva, hogy a modern technológiai környezet ma már szervesen kapcsolható a középiskolai fizika több témaköréhez. A kedd délelőttöt *Kollár Ernő* zárta, aki az okostelefonok szenzoraiiban rejlő mérési lehetőségekről beszélt. Példái jól mutatták, hogy ezek az eszközök – gyorsulásmérés, pályagörbék vizsgálata – a diákok számára motiváló, elérhető laboratóriumként használhatók.

A záróprogram plenáris előadásai *Aszódi Attila* és *Kroó Norbert* előadásaival méltó módon fejezték be a négynapos rendezvényt. A mesterséges intelligenciához kötődő energetikai kérdések és a nanoplazmonika szerepe a lézeres magfúzióban olyan területek, amelyek hosszabb távon is irányt mutathatnak a modern fizika tanításának.

Az ankét legélénkebb része most is a műhelyfoglalkozások sora volt. Ezek között több olyan is volt, amelyek módszertani tartalmát könnyen lehet közvetlenül beépíteni a tanítási gyakorlatba. Rengeteg színvonalas műhelyfoglalkozás volt, amelyek párhuzamos szekciókban zajlottak. A következőkben azokba a műhelyfoglalkozásokba nyújtunk betekintést, amelyekben mi magunk részt tudtunk venni.

Gutai Árpád szerelőlapos (breadboardos) műhely példaként a tanulói áramköri mérésekhez adott megbízható és könnyen adaptálható eszközrendszerrel. A LED-ek



Pillanatkép *Gutai Árpád* műhelyfoglalkozásáról



Herendi Borbála 2016-ban végzett a Debreceni Egyetemen francia–fizika szakos tanárként. Jelenleg a debreceni Tóth Árpád Gimnáziumban tanít fizikát, valamint 2018 óta az ELTE Fizika Tanítása doktori program hallgatója, valamint az MTA-ELTE Fizikatanítás Digitális Támogatással Kutatócsoport aktív tagja. Kutatási területe az élményalapú fizikaoktatás, amely segítséget nyújthat a fizika iránt kevésbé fogékony diákok motiválásában, hogy tudásukat gyarapítsák.



Vitkóczy Fanni 2016-ban végzett az ELTE-n, 2015 óta az ELTE Trefort Ágoston Gyakorló Gimnázium fizika- és matematikatanára. 2018 óta az ELTE Fizika Tanítása doktori program hallgatója, valamint az MTA-ELTE Fizikatanítás Digitális Támogatással Kutatócsoport aktív tagja. Fontosnak tartja, hogy diákjai nyitottak legyenek a tudományos ismeretekre, és betekintést nyerjenek a modern, számítógéppel vezérelt mérések világába.

karakterisztikájának vizsgálata, a feszültségosztók és az alapvető elektromos kapcsolások felépítése mind olyan feladatok, amelyek a diákok számára is jól átláthatók és motiválóak. A műhely erénye volt, hogy nem csupán eszközt, hanem konkrét tanórai megoldásokat is javasolt kész feladatlap formájában.

Beszeda Imre a befőttesgumi anyagtanú vizsgálatán keresztül mutatta be a rugalmasság és a hiszterézis jelenségét. Míg a klasszikus rugóvizsgálatok ismerősek a tanárképzésből és a közoktatásból, a gumi eltérő viselkedése olyan kérdéseket vet fel, amelyek a tanulókat is gondolkodásra készítik. A gumi megnyúlása, a maradó alakváltozás és az anyagfáradás is könnyen bemutatható egyszerű eszközökkel, mégis új megközelítést ad a mechanika tanításához.

Szász János fűtőfilmes műhelye már a modern épületgépészeti technológiákhoz kapcsolta a fizikát: az elektromos fűtőfólia segítségével a fajlagos ellenállás, a hőkapacitás és az energiaátalakulások mind valós mérési helyzetben váltak vizsgálhatóvá. A foglalkozás külön erénye volt, hogy a háztartási technológia iskolai beemelésének lehetőségét mutatta meg.

Zátonyi Sándor foglalkozása a súly, a nehézségi erő és a súlytalanság tanításához adott értékes fogalmi kapcsolódásokat. A bemutatott kísérletek egyszerre voltak látványosak és gondolatébresztők: a gyorsuló rendszerben fellépő erők tisztázása ma különösen fontos, amikor a közbeszédben is gyakran félreértések övezik a „mikrogravitáció” fogalmát.

A gamifikáció témakörében *Antalné Csorba Katalin*, *Csikós Viktória* és *Varga Szabolcs* műhelye mutatott be olyan játéktervezési és tanulásszervezési megoldásokat, amelyekkel a diákok motivációja és bevonódása számottevően növelhető. A bemutatott példák – online és offline játékmechanizmusok – jól illeszthetők különböző iskolai szintekhez. A téma gyakorlatiasabb oldalát *Kovács Eszter* műhelye mutatta be: társasjátékos és kártyaalapú megoldásokkal a fizika tanulása könnyen válik kooperatív tevékenységgé.

A délutáni programok során *Farkas Oszkár* műhelye a kutatótanári szerepbe adott betekintést. A tehetség-gondozás, a projektmunka és a tudományos utánpótlás

kérdései itt kézzelfogható példákkal jelentek meg. A mesterséges intelligencia oktatási alkalmazásának kérdéseibe pedig *Burkovics Márton* műhelye engedett rálátást, különösen a szöveges válaszok automatikus értékelésének lehetőségeit és határait vizsgálva.

Az ankét elmaradhatatlan része volt az eszközbemutató, ahol tudományos modellektől egyszerű demonstrációs eszközökig sokféle fejlesztéssel lehetett találkozni. A Maxwell-démon szimulációja, az elektrosztatikus eszközök, a chiptechnológiák játékos bevezetése mind olyan megoldások, amelyek a kísérletezésre építő tanítás mellett szólnak. A poszterkiállítás idén széles spektrumot mutatott a tanári innovációból: projekt módszer, versenyfelkészítés, módszertani fejlesztések és regionális programok egyaránt szerepeltek.

A 10 perces kísérletek estje hagyomány szerint kötetlenebb, mégis rendkívül tartalmas része a programnak. A rövid bemutatók olyan ötleteket adnak, amelyek könnyen beépíthetők a tanításba. A felületi feszültségtől a retroreflexión át a mágneses jelenségek szemléltetéséig sokféle témát érintettek, és emlékeztettek arra, hogy a fizika néha egészen egyszerű eszközökkel is látványosan tanítható.

A laborlátogatások – diódalézer-központ, anyagtechnológiai laborok, additív gyártás – a fizika alkalmazott területeibe nyújtottak betekintést. Az itt látott mérések és eszközök nemcsak a modern mérnöki gyakorlatot mutatták be, hanem a diákok számára is jól adaptálható példákat adnak arra, hogyan kapcsolódik össze a tanórai fizika a valós ipari folyamatokkal.

Az idei ankét gazdag programja, nagy létszáma és intenzív ütemezése egyszerre mutatta meg a fizikatanári közösség aktivitását és azokat a kihívásokat, amelyekkel a szakma ma szembenéz. Bár a zsúfolt napirend kevesebb lehetőséget hagyott a kötetlen kapcsolódásokra, a szakmai tartalom és a bemutatott innovációk sokak számára biztosan új lendületet adnak a következő tanévre. A plenáris előadások, a műhelyek, az eszközbemutatók és a laborlátogatások olyan széles spektrumot fedtek le, ami jól mutatja: a fizikaoktatás megújulásának számos iránya egyszerre van jelen, és rajtunk múlik, hogy ezekből mennyit tudunk beépíteni saját gyakorlatunkba.



Retroreflexió *Zátonyi Sándor* vezényletével a 10 perces kísérletek zárásaként

NAPELEMES ÉPÍTŐJÁTÉK ALKALMAZÁSA A KÖZÉP-ISKOLAI FIZIKAOKTATÁSBAN ÉS AZON TÚL – A MECHANIKÁTÓL AZ ŰRKUTATÁSIG

Horváth Zoltán^{1,2,*}, Bérczi Szaniszló³

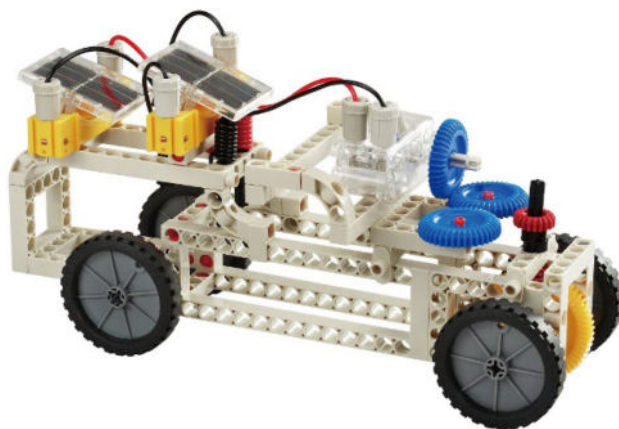
¹Budapesti Ward Mária Gimnázium; ²ELTE TTK, „Fizika Tanítása” Doktori Program, Budapest

³ELTE TTK, Anyagfizikai Tanszék, Budapest

*E-mail: hozoli.mail@gmail.com

Hogyan kerül az építőjáték az asztalra? – Homo ludens

Gyakorló fizikatanárként éppen az űrkutatási szakköröm marsjáróépítéséhez kerestem anyagokat a szertár szekrényeiben, amikor kezembe akadt két régen elfeledett sárga dobozos építőjáték. A két doboz a felirata alapján a Gigo márka „7345” kódjelű Solar Energy névre keresztelt játékát rejti. A játék nem titkolt célja, hogy a – korhatár-megjelölés szerint 8 éves vagy idősebb – gyerekek játékos módon a napenergia felhasználási lehetőségeit bemutassa, és ezáltal is környezettudatosságra neveljen. A 265 darabos készletből – a jól ismert Technic LEGO-hoz hasonlóan, de azzal nem kompatibilis módon – 22 előre elgondolt napelemes járművet lehet építeni a mellékelt



2. ábra. Az irányváltós napelemes autó



1. ábra. A Gigo Solar Energy játék doboza

szereplési útmutató segítségével a hajótól a motorkerékpáron keresztül az irányváltóval rendelkező teherautóig.

Az utóbbi járművet meg is találtam a dobozok mellett megépítve. Mint a kollégáktól gyorsan megtudtam, ezt a napelemcella vizsgálatához mint emelt szintű szóbeli fizikaérettségi-méréshez használták, vagyis szerették volna használni [1]. Ugyanis nem működött. Többször megvizsgáltam a járművet, összehasonlítottam az össze-szerelési útmutatóval, de hibát nem találtam. Ugyanakkor sem erős, 60 W-os izzólámpával közvetlenül közelről megvilágítva sem tudott megmozdulni, sem közvetlen napfénynek kitéve. Kisebb lökések hatására néhány centimétert megtett, de gyorsan meg is állt. A fogaskerekeket egymástól eltávolítva az elektromotor már képes volt forogni, csak éppen a sok súrlódó alkatrész megforgatásához már nem volt megfelelő teljesítménye. Tehát ez a konstrukció vélhetően a gyártói elvárásokat sem teljesítette, az érettségimérésre is valószínűleg alkalmatlan volt. Talán nem véletlenül hevert a szekrény mélyén...



Horváth Zoltán fizika- és informatikatanár, mérnök-informatikus. Mérnök-informatikus (MSc) oklevelet a BME VIK-en szerzett (2006), és PhD-képzésben vett részt, 7 éven át oktatta és kutatta a hálózati és médiatechnológiákat, projektmenedzsmentet. Informatikatanár (2018) és fizikatanár (2020) (MEd) diplomáit az EKE TTK-n szerezte. A 7 év (Jedlik Ányos, Budai Ciszterci Szent Imre, Ward Mária) gimnáziumi tanítása alatt szakköreire és versenyekre a diákjait a csillagászat, űrkutatással is megismertette. A Jedlik Ányos Országos Fizikaversenyen tanári I. díjat, kutatási cikkéért pedig Pollack Virág-díjat kapott. 2021-től az ELTE „Fizika Tanítása” Doktori Iskola doktorandusza.



Bérczi Szaniszló fizikus, csillagász, planetológus. Az ELTE TTK-n szerzett fizikus-csillagász oklevelet (1975), doktoriált matematikából (1987), majd a földtudomány (planetológia) kandidátusa (1995) címet szerezte meg. 50 éve tanít az ELTE TTK-n. 2000-tól pedig a Fizikai Intézet docense az Anyagfizikai Tanszéken (2013-tól nyugállományban dolgozik). A planetológiában, a kozmikus és földi anyagvizsgálatokban, a szimmetria témakörében, valamint az eurázsiai műveltségek fejlődésének témakörében végez kutatásokat. Egyik fő munkája a „Kristályoktól bolygótestekig” c. monográfia, amely a Föld típusú bolygókat és a Naprendszer ásványi anyagait (meteoritok, holdkőzetek) tárgyalja (Akadémiai Kiadó, 1991).

Az Intuíciótól és a kreativitástól a tudatosságig

Egy bátor gondolattól vezérelve ezt az igen korlátozottan működő autót adtam oda a szakkörös kis csapatnak, akiknek a marsjáró-mechanika és -meghajtás témakörébe tartozó feladatok, problémák megoldása volt a feladatuk. Csak annyit mondtam nekik: „Csináljatok jobbat! Van rá 60 percetek.” Az autó mellé pedig odaadtam nekik azt a dobozt, amiből az autó épült – benne a maradék alkatrészekkel.

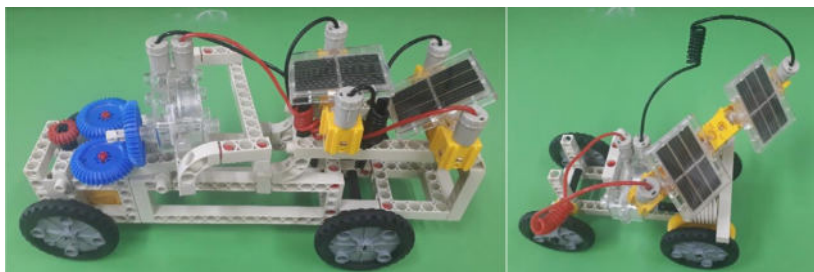
Megdöbbenő volt látni, hogy a hét 9–10. évfolyamos – Technic LEGO-n nevelkedett – fiatal hogyan oldotta meg a problémát. Intuitíven és szinte autonóm módon, kevés kommunikációval, de mégis együttműködve félszavakból is megértve egymást kezdtek neki a megoldásnak.

1. A hétfős csapat igen gyorsan szemrevételezte és tesztelte az eszközt, majd megállapította működésképtelenségét.
2. A csapat percek alatt két táborra vált szét – intuitíven felismerve és csoportosítva a lehetséges problémákat. Az egyik csoport (A) az elektronikára, így a napelemcella, a vezetékek és az elektromotor működésére összpontosított, míg a másik (B) a mechanikai problémákkal, a vázzal és az erőátvitellel kezdett el foglalkozni.

3A. Az (A) elektronikai csapat gyorsan felismerte, hogy a napelemcellák foglalataiba AA 1,5V-os hagyományos elemeket is lehet ten-



3. ábra. A csapat két tábora munka közben



4. ábra. Az eredeti (v1.0) és az újragondolt (v2.0) napelemes autó

ni, valamint a két cellát sorosan és párhuzamosan is lehet kapcsolni. Vizsgálatikhoz multimétereket és AA-s elemeket kértek és kaptak.

3B. A (B) mechanikai csapat új, könnyebb vázat, és egyszerűbb, kevesebb fogaskerék-áttételből álló hajtásláncot épített.

60 perc elteltével a két csapat újraegyesülése után kész volt az új napelemes autó. Meglepő volt látni, hogy részletes gépészeti és elektronikai ismeretek, pontos problémamegfogalmazások és megoldási tervek nélkül, csupán az intuíciójukra hagyatkozva milyen módon oldották meg a problémát 60 perc alatt!

1. táblázat

Szempont	Konstrukció	
	Eredeti (v1.0)	Új (v2.0)
Tömege	429 g	324 g
A napelemek dőlésszöge	60–90° (szinte fix)	0–90° (tetszőleges)
A napelemek forgathatósága (a jármű hosszanti tengelyéhez képest)	0° (nem forgatható)	0–360° (forgatható)
Az áttétel megbízhatósága	„lötyögős”	nem „lötyögős”
Az áttételek száma	4	1
Az áttétel aránya (a motor fordulatszámához képest a hajtott kerekek fordulatszámára)	3 : 2	60 : 1
Sebesség	0 (nem működött; számított: 150 mm/s)	3,75 mm/s
Maximális lejtőmeredekség	– (sík terepen sem)	20°
Az irányváltás lehetősége	mechanikai átkapcsolással vagy polaritásváltással	polaritásváltással

Jól mutatta, hogy a megoldás valóban intuitív módon született, hogy amikor rákérdeztem, csak igen lassan, sok gondolkodás után tudták megfogalmazni, mi volt a probléma az eredeti konstrukcióval; mint ahogy azt is, mit miért csináltak.

Ezek után arra kértem őket, hogy a fentieket gondolják át, és hasonlítsák össze a két verziót előnyös és hátrányos tulajdonságaik alapján. Ennek egy letisztult változata szerepel az 1. táblázatban.

Az összehasonlító táblázat készítése közben megfogalmazták, hogy az eredeti jármű rendkívül sok súrlódó és lötyögő áttételt tartalmazott, így a súrlódás és gördülési ellenállás együttesen a meghajtó elektromotor forgását gátolták.

A csapat egy könnyebb vázat épített, a 4 fogaskerék-áttétel helyett pedig egyetlen (az építőkészletben található) csigahajtoművet épített be, ezzel egy sokkal közvetlenebb meghajtást és a korábbi áttételi arány 40-szeresét tudták elérni. Ezzel ugyan lassan mozgott az eszköz, de megmozdult, sőt akár egy 20°-os lejtőn is képes volt felkapaszkodni! A napelemek pedig új dönthető és

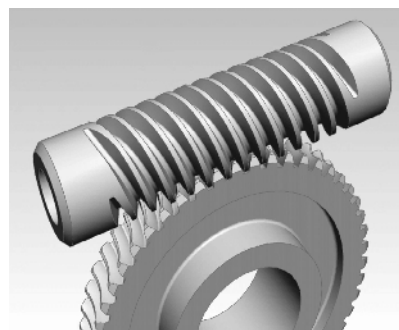
teljesen körbeforgatható konzolt kaptak, hogy a jármű mozgásának irányát a Nap helyzetétől teljesen függetleníteni lehessen, a napelemeket mindig merőlegesre lehessen állítani a Nap irányához képest. Ez ugyan nem volt feladatuk, de az optimalizáláshoz intuitíven hozzáértettek.

A fenti kísérlet alkalmas lehet a mérnöki intuíció, a tudattalanul használt fizikai törvények és beépült tapasztalások mérésére, a kérdések és a táblázat pedig a folyamat tudatosítására, további hasonló helyzetekben az ad hoc megoldás helyett a mérnöki gondolkodás tudatosabb használatára.

A fenti feladatmegoldásnak csoportos elemzése pedig a fizika több területének (mechanika, súrlódás, energetika, elektromágnesség, félvezetők stb.) nagyon is gyakorlati alkalmazását hozza testközelbe.

Fogaskerék és csigahajtás

A fenti megoldásban a diákok a Technic LEGO-s tapasztalataik révén már ismerték a fogaskerekes hajtás- és áttételrendszerét. Sok fiatal sokáig nem is találkozik ezzel, és első alkalommal talán még el is csodálkozik, hogy miért forog gyorsabban vagy lassabban a meghajtott tengelynél egy fogaskerék-áttételen ahhoz kapcsolódó másik tengely. Azt pedig még nehezebb megérteni, hogy a gyorsabban forgó miért tud kisebb erőt kifejteni.



5. ábra. Csigahajtás: csiga és fogaskerék

Az iskolai tananyagban és tananyagokban általában szerepel a forgatónyomaték témakörnél az egy- és kétkarú emelő, esetleg a csigákból álló rendszer, de a fogaskerekek már nemigen. A fenti problémamegoldás során alkalmazott csigahajtás pedig szinte biztosan nem.

A csigahajtás két egymásra merőleges tengely közötti erőátvitelt valósítja meg egy fogaskerék és egy spirálmentes ún. csiga segítségével. A megoldás előnye, hogy igen nagy áttételt lehet vele elérni (az építőjátékban 1:60), de csak a csiga-fogaskerék irányban. A másik irányban általában blokkol, a nagy áttétel, a csiga és a fogaskerék közötti nagy csúszási súrlódás miatt. (Az építőjátékban ezt a megoldást alkalmazva meredek lejtőről sem gurul le az autó). A nagy súrlódás miatt az áttétel hatásfoka jellemzően 40–60% megfelelő kenés esetén. Állandó üzemi gép esetén gondoskodni kell a súrlódás miatt keletkező hő elvezetéséről, aktív hűtésről és a folyamatos vagy gyakori kenésről.

Az építőjátékon keresztül tehát a forgatónyomatéknál tanult iskolai ismereteket bővíthetjük, a gépészet irányába tehetünk némi kitekintést.

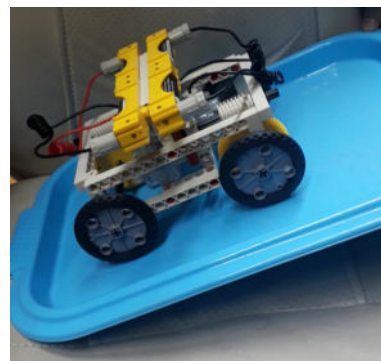
A terepjáró

A csapatot felkértem, hogy készítsenek egy olyan kisautót (v3.0) is, ami még meredekebb lejtőn is képes felkapaszkodni, vagy kisebb akadályokat képes megmászni.

Ebből az alábbi optimalizálási szempontokat határozták meg – immáron nem intuitívan, hanem tudatos tervezéssel:

- négykerékmeghajtás,
- nagyobb fajlagos (tömegre vetített) teljesítmény (2 motor és kétszer annyi napelem, elem, míg a váz tömege jelentősen nem változik),
- minél mélyebb súlypont (az elektromotorok süllyesztése), hogy a meredek lejtőn se boruljon fel,
- az alváz legmélyebb pontja minél magasabban (közel a tengelyhez), hogy ne akadjon el,
- nagy átmérőjű kerekek, hogy a nagyobb tárgyakra is felkapaszkodjon.

Az így kialakított eszköz (a téli kevés napfény miatt és a nagyobb teljesítmény végett ceruzaelemes meghajtásra átválva) a kb. 25–30°-os (enyhén bordázott műanyag) lejtőt is meg tudta mászni. A lejtő dőlésszögének további növelése esetén is



6. ábra. A lejtő- és akadálymászásra optimalizált (v3.0) autó elemekkel

biztosított lenne a felfelé haladás, viszont ez a megcsúszó gumikerék miatt nem lehetséges.

Munka, teljesítmény, hatásfok – egy kis videóelemzés

Vajon mekkora az így létrehozott autónak a teljesítménye? Lehet-e az építőjátékot nem csak szakkörön mérnöki problémamegoldásra vagy éppen ismeretbővítésre használni?

A fenti kérdések alapján a továbbiakban egy minden középiskolás számára érthető számítási és elemzési feladatot mutatunk be.

Feladat: Egy építőjátékból készített, négykerék-meghajtású, 4 db AA elemmel meghajtott 250 g-os össztömegű kisautó a Föld gravitációs terében a tengerszinten egy 30 fokos lejtőn halad felfelé egyenletes mozgást végezve, amelyről videófelvétel (vagy 5 másodpercenként fénykép) készült. A kereke átmérője 4 cm. (A mozgókép, a feladat és a részletes elemzése a mellékelt QR-kód (7. ábra) által hivatkozott weboldalon tekinthető meg.)

- Határozzuk meg az autó sebességét!
- Számítsuk ki mely időpillanatban mekkora lesz a kocsii helyzeti energiája!

c) Mekkora az autó teljesítménye?



7. ábra. QR-kód a weboldalhoz az „energia és teljesítmény” témakör tanításához (a marsjáró mozgásának videóelemzése alapján)

Megoldás: Adatok: $m = 0,25 \text{ kg}$; $g = 10 \text{ m/s}^2$

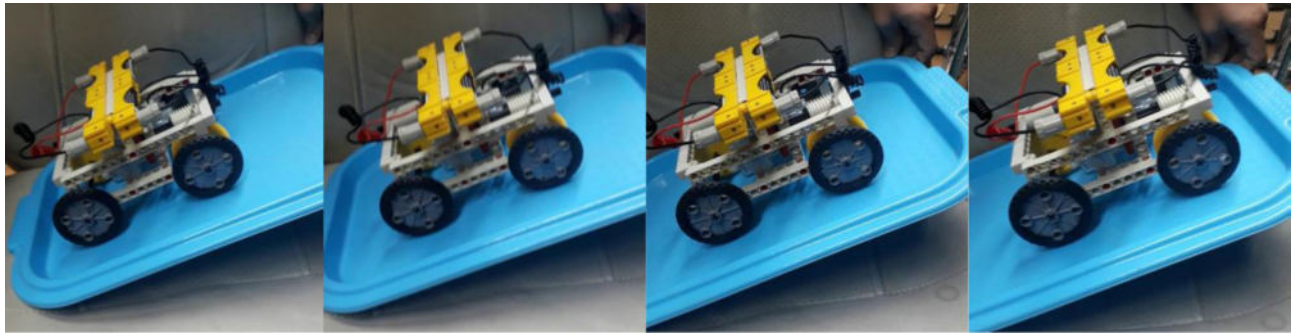
A mozgóképből a sebesség meghatározásához használhatunk egy videóelemző szoftvert (pl. Tracker [2]), vagy a felvételt 5 másodpercenként kikockázva állóképet készíthetünk. Az alábbi képsor (8. ábra) mutatja az autó helyzetét 0, 5, 10 és 15 másodperc múlva.

átmenő egyenest kapunk, tehát a két mennyiség egymással egyenesen arányos, hányadosuk állandó, a kiskocsi teljesítménye konstans (0,00375 W), nem változik.

A „napraforgó” űrjármű

A napelemes autó (v2.0) tesztelése közben kiderült, hogy az eszköz igen érzékeny arra, hogy a napelemcellái mennyire néznek a Nap felé. Hosszabb távú tesztelésnél szintén problémát jelentett, hogy a Nap mozgásával megállt a jármű. Vajon konstruálható olyan szerkezet, ahol ezek nem okoznak gondot? Igen!

Ez a szerkezet (v4) a „marsi napraforgó” becenevet kapta. Az eszköz két fontos tulajdonsággal rendelkezik. Egyrészt nem tartalmaz akkumulátorokat, így a moz-



1. kép: $t = 0 \text{ s}$

2. kép: $t = 5 \text{ s}$

3. kép: $t = 10 \text{ s}$

4. kép: $t = 15 \text{ s}$

8. ábra. A kiskocsi helyzete 5 másodpercenként mintavételezve

A megtett út becslését segíti a 4 cm átmérőjű kerék szögelfordulása is, ami jó közelítéssel 45° 5 s alatt. Ebből a teljes körbeforgás $8 \times 45^\circ$, azaz $8 \times 5 \text{ s} = 40 \text{ s}$. Ez alatt az autó – ha nem csúszik meg – $\pi \cdot 4 \text{ cm}$ -t tesz meg. Így az átlagsebessége $v = s/t \approx 3 \text{ mm/s}$, 5 másodpercenként a megtett út így 15 mm, azaz 0,015 m-nek adódik. Mivel a lejtő 30° -os, az autó magassága mindig a megtett út felével fog növekedni.

Ebből már számolhatjuk az autó helyzeti energiáját ($E_h = mgh$), ezek különbségeként pedig a munkatétel miatt adódik a végzett munka. A teljesítmény pedig az 5 s-os időszakokra is meghatározható. ($P = W/t$)

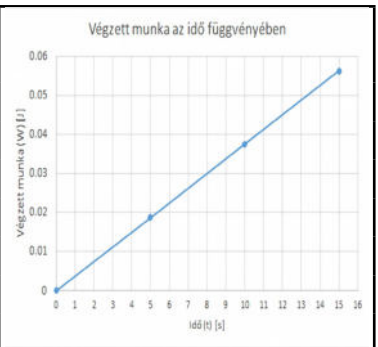
A fentiek alapján a 2. táblázat mutatja az egyes fizikai mennyiségek értékét a kitüntetett pillanatokban.

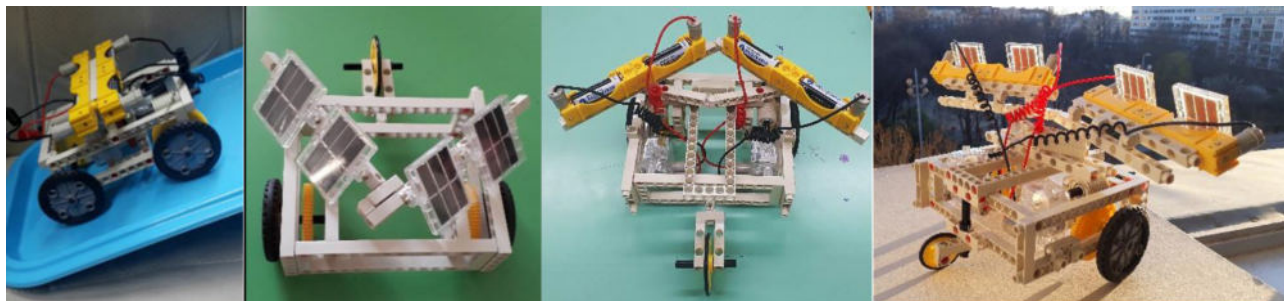
A munkát az idő függvényében ábrázolva egy origón

gáshoz szükséges energiát teljes egészében a tetején található 4 napelemcellából nyeri. (A teszteléshez direkt napfény nélküli helyzetekben akkumulátorokat használtunk, a mesterséges megvilágítás nem volt elegendő.) Másik különlegessége, hogy bármiféle aktív vezérlőegység nélkül mindig a Nap mozgását követi, az égitest irányával állandó szöget bezárva halad. (Innen ered a „napraforgó” elnevezés.) Ezt úgy éri el, hogy a 2-2 napelemcella V alakban, mint egy eke vagy ék (innen a másik megnevezés) eltérő irányba néz, és a cellák a két oldalt külön-külön meghajtó motorokhoz keresztben vannak beköltve. Ezáltal, ha valamelyik oldalra kevesebb napfény jut, akkor a másik oldal motorja kisebb teljesítménnyel működik csak, tehát a nap felé fordul az eszköz. Az ék két szára egymással 107° és 180° közötti szöget tud be-

2. táblázat. Az autóra jellemző fizikai mennyiségek a kitüntetett időpontokban, és a végzett munka az idő függvényében

Fizikai mennyiség	Jele és számítási módja	Mértékegység	1. kép	2. kép	3. kép	4. kép
Idő	t	(s)	0	5	10	15
Megtett út	s	(m)	0,05	0,065	0,08	0,095
Magasság	$h = s/2$	(m)	0,025	0,0325	0,04	0,0475
Sebesség	$v = s/t$	(m/s)		0,003	0,003	0,003
Helyzeti energia	$E_h = mgh$	(J)	0,0625	0,08125	0,1	0,11875
Végzett munka	$W = E_h - E_{h0}$	(J)	0	0,01875	0,0375	0,05625
Teljesítmény	$P = W/t$	(W)		0,00375	0,00375	0,00375





9. ábra. Az akadálymászásra optimalizált (v3.0) autó, a „napraforgó” koncepciója (v4.0 beta), majd az akkumulátoros (v4.1) és a végleges, tesztelés közbeni napelemes (v4.2) változata (az iskola ablakában)

zárni. Előbbi esetben azonban a napelemcellákból nyert energia alig elég a szerkezet mozgatásához, míg utóbbinál a napelemek teljesítménye nem különbözik a Nap iránya szerint, így a jármű nem tud elfordulni. Méréseink alapján a $135\text{--}137^\circ$ -os szög az ideális kompromisszum a megfelelő teljesítmény és irányérzékenység között.

Járulékos tulajdonsága, hogy amennyiben részlegesen egy tereptárgy (pl. szikla) árnyékába kerül, azt sok esetben képes kikerülni a napelemcellák részbeni árnyékolásának megfelelően. Másik tulajdonsága, hogy a Nap mozgását követve a reggel kelet felé menő eszköz a nap során délre, majd nyugatra fordul, közel félkör alakú pályát megtéve. Némi módosítással elérhető, hogy napról napra köríveket leírva, de ezek összetevéséből hozzávetőleg egy irányba – dél felé haladjon az eszköz. Szintén fontos megjegyezni, hogy a terep egyenletlensége, a meghajtás nem tökéletes szimmetriája miatt előfordulhat, hogy hosszabb távon a Nap irányától elfordul az eszköz – pl. ahogy a sivatagban is az ember könnyen körbe-körbe megy –, viszont a javasolt konstrukció ezt a hibát is kiküszöböli, az ideális irány körül fog oszcillálni.

Az, hogy a szerkezet nem rendelkezik vezérlőelektronikával –, csupán napelemcellák, vezetékek és elektromotorok alkotják az elektromos rendszerét –, olyan környezetben – pl. mágneses vagy elektromos térben, erős kozmikus vagy radioaktív sugárzási környezetben – is képessé teszi a hosszú távú működésre, ahol nem alkalmazhatók félvezetők. E tulajdonsága miatt az űrkutatásban is potenciálisan használható megoldásként szolgál.

Az ablaküveg és a kvantumfizika

A napelemes autók beltéri használata korlátozott. A diákok eleinte értetlenkedve figyelték, hogy miért nyitott ki az ablakot a napelemek teszteléséhez. Mint ismert, a közönséges ablaküveg az infravörös tartományt nem engedi át (lásd üvegházhatás), de az ibolyántúli sugarakat is nagyrészt megszüri. Mivel az UV fotonjai nagyobb energiájúak, mint az ablaküvegen áthaladó látható fényéi, ezek kiszűrése a napelemcellára beérkező teljesítményt igencsak rontja. Adott esetben ezen múlik, hogy a napelemes jármű képes-e haladni vagy sem.

Ezzel az építőjáték felhasználási körét tovább bővítve azt a kvantumfizikában is demonstrációs eszközzé tettük.

Felhasználási területek

Összefoglalásként elmondható, hogy a fizikatanítás számos területén felhasználható az eszköz. Így:

- Kinematika témakörben 7. és 9. évfolyamon az egyenes vonalú egyenletes mozgás bemutatásához.
- Súrlódás témakörben 7. és 9. évfolyamon – a meredek lejtőn való megcsúszás vagy az áttétek veszteségei miatt.
- Munka-energia témakörben 7. és 9. évfolyamon – akár feladatkitűzéshez, akár a videóelemzés bemutatásához.
- Forgatónyomaték témakörben 7. és 9. évfolyamon – akár a fogaskerekek és csigahajtás kiegészítő anyagával együtt.
- Optika (fénymérés, fénytelsítmény) témakörben 8. és 10. évfolyamon.
- Kvantumfizika, fényelektromos jelenség és félvezetők témakörben 10. évfolyamon vagy fakultáción.
- Emelt szintű érettségi mérésnél – a napelemcella vizsgálatánál.
- A mérnöki megoldáskeresés tudatosításában – első-sorban szakkörön.

Ugyan a bemutatott eszközt már nem gyártják, még több helyen rendelhető az interneten, ugyanakkor a gyártónak újabb megoldásai és több mint 100 hasonló építőjátéka érhető el, valamennyi segíti a fizikatanítás elmélyítését [3].

Hasonló szerkezetek építhetők Technic LEGO-ból is, melyhez a LEGO korábban egy 5V-os napelemcellát is gyártott, ami szintén még néhány helyről beszerezhető.

Annak, aki az érettségi napelemcella-vizsgálatát szeretné részletesen elemezni, a dr. Piláth Károly honlapján található automatizált megoldást javaslom tanulmányozni [4].

Irodalom

1. Emelt szintű fizikaérettségi – szóbeli mérések dokumentációja 2019. https://www.kormanyhivatal.hu/download/f/b8/45000/Emelt_szint_fizika_erettsegi_szobeli_meresek_dokumentacioja_2019.pdf
2. Tracker videóelemző <https://physlets.org/tracker/>
3. GIGO 2023 Collection – More than play. <https://www.gigotoys.com/uploads/Catalogue/2023GigoCatalogue-EN.pdf>
4. Dr. Piláth Károly: Fizika kísérletek – Napelemcella vizsgálata (automatizált változat) <https://pilath.wordpress.com/napelemcella-vizsgalata-automatizalt-valtozat/>



Lovas Antal (1938–2026)

Az MTA KFKI egykori tudományos főmunkatársa, dr. Lovas Antal 2026. január 6-án, 88 éves korában elhunyt.

Lovas Antal 1938. augusztus 14-én született Cegléden. Az ELTE TTK vegyész szakán szerzett diplomát 1967-ben, ami után a KFKI-ba került, ahol 1997-ig dolgozott a Szilárdtestfizikai Kutatóintézetben; az utolsó évtizedben a Technológia és Mágnesesség Csoport vezetőjeként. Fő tevékenysége a szilárdtestfizikai kutatások számára fontos speciális fémötvözetek metallurgiai módszerekkel való előállítására irányult, de maga is végzett alapvető kutatásokat ezen anyagokon, illetve ipari alkalmazásukkal is foglalkozott. A kutatómunkája során szerzett tapasztalatait 1993-tól kezdve a BME anyagtudományi képzésében adta tovább mérnökhallgatóknak, ahol még nyugdíjba vonulása után is aktív maradt egészen 2024-ig.

A KFKI-ban 1967–1969-ben egykristályok olvadákból és szilárd fázisból történő növesztésével foglalkozott. 1969 és 1973 között a rézalapú hígötvözetek kutatásában vett részt. Ez a program részben a Csepeli

Fémmű kezdeményezésére és támogatásával futott a KFKI-ban, melynek keretében az oxigénmentes nagy hővezető-képességű réz (OFHC Cu) ipari méretű előállítását megalapozandó vizsgálatokat végeztek. Ugyanezen projekt keretében folytak a Cu-alapú ötvözetek belső oxidációjával kapcsolatos kutatások is 1973 és 1978 között.

Lovas Antal 1978-ban bekapcsolódott az olvadákból történő gyors-hűtési technológia kidolgozásába, amelyek az akkor fellendülőben lévő fémüvegkutatások beindítását szolgálták itthon előállított amorf ötvözetekkel. Részt vett az úgynevezett „melt spinning” és „planar flow casting” gyors-hűtési módszerek első magyarországi megvalósításában. Ezért a tevékenységéért elnyerte 1979-ben a KFKI Jánossy-díját.

Az 1983 és 1989 közötti időszakban részt vett a Magyarországon elsőként kifejlesztett, amorf szalagokat alkalmazó lágymágneses induktív elemek prototípusának és első sorozatú gyártásának kidolgozásában.

1993-tól kezdve bekapcsolódott a BME-n folyó mérnökképzésbe, ahol a „szerkezeti anyagok” és az „anyag-tudomány mérnököknek” témakörökben oktatott, 1997-től 2005-ig egyetemi docensként. Nyugdíjba vonulása után is aktív maradt, és a felsőoktatásban végzett kiemelkedő tevékenysége alapján 2009-ben a BME címzetes egyetemi tanári címét kapta meg. A szaktárgyak oktatása mellett aktív témavezetést is végzett, több mint 15 MSc- és 10 PhD-hallgató témavezetője volt. Mindezekért a tevékenységéért a 2000–2003 időszakra elnyerte a Széchenyi Professzori Ösztöndíjat.

A műszaki tudomány kandidátusa fokozatot 1991-ben szerezte meg a Fe–B amorf ötvözeteken elért kuta-

tási eredményeire alapozva. Az MTA doktora címet 2014-ben nyerte el a Műszaki Tudományok Osztályán az átmenetifém-alapú, nem egyensúlyi ötvözetekben fellépő klaszterjelenségek vizsgálata témakörben. Kutatási eredményeit 155 nemzetközi folyóiratcikkben és 60 konferenciaközleményben jelentette meg.

Aktívan részt vett az itthoni és a nemzetközi tudományos közéletben. Az 1980 és 2000 közötti időszakban amorf ötvözetek ezreit készítette hazai és külföldi (osztrák, szlovák, német és orosz) kutatók számára. Egy ízben volt külföldön, 3 hónapig a stuttgarti Max Planck Fémkutatási Intézetben. Különösen szoros kapcsolata volt a kassai egyetemi és akadémiai intézeti kutatókkal, és ezen együttműködés elismeréseként 2003-ban elnyerte a Kassai Safarik Egyetem Jubileumi Ezüstérmét. 1992-től 2005-ig a Soft Magnetic Materials (SMM) nemzetközi konferenciasorozat tanácsadó bizottságának tagja, 1999-ben a magyarországi SMM rendezvény elnöke volt. 2000 és 2008 között az Advanced Manufacturing and Repair Technologies in Vehicle Industry workshopsorozat tudományos bizottságának tagja volt.

Lovas Antal a több évtizedes tudományos pályafutása alatt a saját kutatásai mellett nagyon nagy mennyiségben szolgáltatott főleg amorf ötvözeteket szilárdtestfizikus kollégák számára – ezzel az azokon vizsgálatokat végző belföldi és külföldi kutatók nagybecsülését vívta ki. Kollégái mellett hálásan gondolnak rá mindazon tanítványai is, akiket egyetemi pályafutása során mentorált. Emlékét kegyelettel megőrizzük.

Bakonyi Imre



PÉCSI TUDOMÁNYEGYETEM
UNIVERSITY OF PÉCS

ULTRAPRECÍZIÓS MIKROMEGBUNKÁLÓ KÖZPONT



AKÁR NM-ES FELÜLETI ÉRDESSÉG



TÜKRÖK,
PARABOLATÜKRÖK



ECHOLON
RÁCSOK



SZABAD FORMÁJÚ
OPTIKÁK



KIVÁLÓ FELÜLETI
MINŐSÉG



NAGY PONTOSSÁG
NANOMÉTERES SZINTEN

Amennyiben egyedi gyártású, kiváló felületi minőségű,
nm-es felületi érdességű optikai alkatrészre vagy
ultraprecíziós megmunkálásra van szüksége,
várjuk megkeresését.

KAPCSOLAT:

Dr. Tóth György
PTE TTK, Fizikai Intézet
egyetemi docens, intézetigazgató

✉ tothgy@fizika.ttk.pte.hu

☎ +36 72 503-600 / 24533 mellék

INNOLITE IL600
ULTRAPRECÍZIÓS MEGMUNKÁLÓ GÉP

ÜZEMELTETŐ:
 **INNO-CAPITAL**
KUTATÁSI ÉS INNOVÁCIÓS KFT.

HELYSZÍN:
Matro KFT.