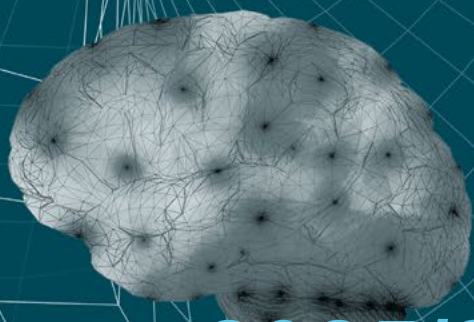


fizikai szemle

Kolozsvári magyar fizikusműhelyek



2025/9

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

SZERKESZTŐSÉG

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

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Asbóth János, Bíró László Péter, Csengeri Kamilla, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Járai-Szabó Ferenc, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda 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: Groma István főtípkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

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

e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

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



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

Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egy számlán. Az egyes számok ára: 1800,- Ft (a dupla számoké 3600,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

A kolozsvári Szent Mihály-templom és a Mátyás szobor sziluettjei

TARTALOM

SZEMELVÉNYEK A KOLOSZVÁRI MAGYAR FIZIKUSMŰHELYEK TEVÉKENYSÉGÉBŐL

Vendégszerkesztők: Járai-Szabó Ferenc, Sándor Bulcsú

- Járai-Szabó Ferenc, Sándor Bulcsú:* Oktatás és kutatás az erdélyi fizikusközösségekben – szerkesztői előszó 293
- Sárközi Zsuzsa, Nagy Melinda-Katalin, Vörös Alpár István Vita, Karácsony János:* Magyar nyelvű fizikaoktatás a Babeş–Bolyai Tudományegyetemen 1990 és 2025 között. 294
A jelen írás megkísérel a kolozsvári magyar fizikaiskolának az 1989-es romániai forradalom utáni helyzetét összefoglalni.
- Nagy László, Borbély Sándor:* Fotoelektron-holográfia 298
Az atomok és molekulák szerkezetének vizsgálatára használt módszerek egy jelentős része elektronspektroszkópián alapul, amikor az elektronhullám fázisának meghatározásához az elektronhullámot interferáltatjuk egy referenciahullammal és így egy elektronhologram hozható létre. A cikk az elektronhologram elméleti kiszámítását ismerteti.
- Józsa Máté, Péntek Balázs, Lázár Zsolt József, Ercsey-Ravasz Mária:* Az agy térbeli szerveződése: egy bonyolult rendszer egyszerű szabálya 304
Az agy bonyolult hálózati szerkezete mögött meghúzódó egyszerű szabályszerűségek feltárása kulcsfontosságú a neurális rendszerek működésének megértéséhez.
- Bálint Zoltán:* 3D nyomtatott eszközök használata a modern sugárterápiás rákkezelésben 311
A sugárterápia a daganatos betegségek egyik leggyakrabban alkalmazott kezelési módja, amikor egy speciális eszközt a bőlust, ami a bőrre helyezett hőre lágyuló műanyag vagy gél alapú réteg, alkalmaznak. A bólus optimális megvalósítására használható a 3D nyomtatási technológia.
- Magyari Klára:* Bioaktív üvegek *in vitro* bioaktivitása 316
Bioaktív üvegek esetén biológiai környezetben az anyag felületén kémiai kötés jön létre az anyag és a csontszövet között, így a bioaktív üveg képes a csontszövetet regenerálni egy sérülés esetén. 316

TANULMÁNY

- Csernai László, Kroó Norbert, Papp István, Veres Miklós, Bíró Tamás:* Új módszer a lézerfúzióra 321
A lézerfúzióra egy új, a felületi plazmonokat alkalmazó módszert mutat be az írás.

KÖNYVESPOLC

- Pálinkás József:* Teller Edéről – saját szavaival 324

REFLEKTORFÉNYBEN

- Ötvös Zoltán:* Sólyom Jenő Akadémiai Aranyérmes 325
Kutatók Éjszakája az Ericsson Házban 328

~~~~~

- F. Járai-Szabó, B. Sándor:* Education and research in the Transylvanian physics community – Foreword of the editor
- Zs. Sárközi, M-K. Nagy, A. I. V. Vörös, J. Karácsony:* Hungarian-language physics education at Babeş–Bolyai University between 1990 and 2025
- L. Nagy, S. Borbély:* Photoelectron holography
- M. Józsa, B. Péntek, Zs. J. Lázár, M. Ercsey-Ravasz:* Spatial organization of the brain: a simple rule for a complex system
- Z. Bálint:* Using 3D printed devices in modern radiotherapy cancer treatment
- K. Magyari:* *In vitro* bioactivity of bioactive glasses

### STUDY

- L. Csernai, N. Kroó, I. Papp, M. Veres, T. Bíró:* A new method for laser fusion

### BOOKREVIEW

- J. Pálinkás:* About Edward Teller – in his own words

### IN SPOT

- Z. Ötvös:* Jenő Sólyom Academic Gold Medalist

Night of Researchers in the Ericsson House

**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT  
megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS  
INNOVÁCIÓS  
MINISZTERIUM

**nka**  
Nemzeti Kulturális Alap

group  
m v m



# OKTATÁS ÉS KUTATÁS AZ ERDÉLYI FIZIKUSKÖZÖSSÉGBEN – SZERKESZTŐI ELŐSZÓ

Járai-Szabó Ferenc<sup>@</sup>, Sándor Bulcsú<sup>#</sup>

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Magyar Fizika Intézet, Kolozsvár, Románia

<sup>@</sup>E-mail: ferenc.jarai@ubbcluj.ro; <sup>#</sup>E-mail: bulcsu.sandor@ubbcluj.ro

Az Erdélyben működő magyar nyelvű fizikusközösség szakmai tevékenysége elsősorban két pilléren nyugszik: az egyetemi szintű fizikaoktatáson és a kutatáson. Fontos kiemelni, hogy egyetemi szinten magyar nyelvű fizikus- és fizikatanárképzés Erdélyben jelenleg kizárólag a kolozsvári Babeş–Bolyai Tudományegyetemen folyik, ahol a fizikai kutatás is rendkívül szerteágazó, magába foglalja az elméleti és számítógépes fizikát, az atom-, molekula- és magfizikát, a szilárdtestfizikát és a kondenzált anyagok vizsgálatát, valamint az orvosi és biofizikát. Ezeket a területeket kiegészíti a fejlett anyagok kutatása, továbbá a modern spektroszkópiai módszerek – például a mágneses rezonancia és a biofizika – alkalmazása is [1]. Ugyanakkor fizikai témájú kutatási tevékenység több Kolozsvárhoz köthető intézményben is zajlik. Az Erdélyi Idegtudományi Intézetben az agyi ideghálózatok dinamikáját fizikai modellezéssel, analitikus számításokkal és számítógépes algoritmusokkal vizsgálják [2], az Izotóp- és Molekuláris Technológiák Országos Kutató-Fejlesztési Intézetében pedig a stabil izotóptechnológiára, a molekuláris és nanotechnológiai fizikai kutatásokra, valamint a megújuló energiaforrásokra fókuszálnak [3]. A Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetemen a kutatás főként az alkalmazott fizika, a környezettudomány és a műszaki tudományok területén valósul meg [4]. Intézményi háttértől függetlenül, a Magyar Tudományos Akadémia Kolozsvári Akadémiai Bizottságának [5] Fizika Szakbizottsága fogja össze a magyar nyelvű fizikaoktatásban és fizikai kutatásban részt vevő szakembereket, rendszeres fórumot teremtve a tapasztalatcserére és az együttműködésre.

Tágabb értelemben Erdély más városaiban is folyó fizikai témájú kutatások nemzetközileg is elismert intézményekben. A Temesvári Nyugati Egyetem kutatócsoportjai az asztrofizikára, a kvantumelektronikára, a környezeti nano- és mikrotechnológiákra, valamint az intelligens anyagok fizikai vizsgálatára fókuszálnak [6], míg az Elektrokémiai és Kondenzált Anyagok Országos Kutató-Fejlesztési Intézete a megújuló energiaforrások, különösen a fotovoltaiikus rendszerek anyagfejlesztésében aktív [7]. A Temesvári Műszaki Egyetem keretében működő Megújuló Energiák Kutatóintézete a hibrid

szélerőművek és napenergia-hasznosító technológiák fejlesztésében nyújt interdiszciplináris hozzájárulást [8]. A Brassói Transilvania Egyetem saját kutatóintézeti infrastruktúrája révén többek között a fotonika, az anyagtudomány és a környezetfizika területén végez kutatókat [9]. A Nagyvárad Egyetem [10] keretében működő Nemzeti Geotermikus Kutatóközpont a geotermikus energia fizikai és energetikai alkalmazásaira fókuszál, de a Fizika Tanszék biofizikai és orvosi fizikai irányultságú tevékenysége is jelentős. Ezen intézmények kutatói számos esetben működnek együtt az erdélyi magyar fizikusközösség tagjaival, és az itt zajló multidiszciplináris kutatások jól példázzák, hogy az erdélyi régió a fizika modern, alkalmazásorientált irányzatainak is fontos színtere.

A szeptemberi tematikus szám írásai különböző megközelítéseket vonultatnak fel, köztük elméleti és alkalmazott kutatásokat, interdiszciplináris elemzéseket és oktatásmódszertani kérdéseket (ezek a tematikus cikkek a következő lapszámban jelennek meg), továbbá egy tanulmány áttekinti az egyetemi szintű magyar nyelvű fizikaoktatás rendszerváltás utáni fejlődését. Az összeállítás jól tükrözi a kolozsvári magyar nyelvű fizikusközösség – különösen a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Fizika Kara és a hozzá kapcsolódó kutatócsoportok – sokrétű tevékenységét. Bízunk benne, hogy a jövőben megvalósuló hasonló tematikus számokban lehetőség nyílik más erdélyi kutatóműhelyek munkájának bemutatására is, kiegészítve ezzel a most kirajzolódó kezdeti képet. Reméljük, hogy a *Fizikai Szemle* ezen száma nemcsak hasznos információkkal szolgál az érdeklődő olvasóknak, hanem inspirációt is nyújt a magyarországi és erdélyi fizikusok közötti szakmai együttműködés további erősítéséhez.

## Hivatkozások

1. <https://atom.ubbcluj.ro/fizika>
2. <https://tins.ro>
3. <https://en.itim-cj.ro>
4. <https://sapientia.ro/hu>
5. <https://kab.ro>
6. <https://www.uvt.ro/en>
7. <https://incemc.ro/en/>
8. <https://www.icer.ro/>
9. <https://www.unitbv.ro/en/>
10. <https://www.uoradea.ro/en/>



Járai-Szabó Ferenc, fizikus, egyetemi docens, a Babeş–Bolyai Tudományegyetem Magyar Fizika Intézetének vezetője. Doktori címét 2007-ben szerezte. Kutatási területe a számítógépes és statisztikus fizika interdiszciplináris alkalmazása, elsősorban a komplex rendszerekben megjelenő önszerveződő folyamatok modellezésére és megértésére.



Sándor Bulcsú a kolozsvári Babeş–Bolyai Tudományegyetem Magyar Fizika Intézetének adjunktusa. Doktori fokozatát a frankfurti Goethe Egyetem Elméleti Fizika Intézetében szerezte meg fizikából 2017-ben, majd ezt követően posztdoktori kutatóként dolgozik ugyanott. 2018-tól Kolozsváron a dinamikai rendszerek, robofizika, hótan és fizika módszertan tárgyak oktatója. Kutatásai az adaptív dinamikai rendszerek, a komplex rendszerek, idősorok elemzése és a robofizika területéhez kapcsolódnak. 2020–2022, majd 2025–2026 között a Román Kutatási és Innovációs Alap által meghirdetett Posztdoktori, illetve Fiatal Kutatócsoportok típusú kutatási projektek vezetője.

# MAGYAR NYELVŰ FIZIKAOKTATÁS A BABEŞ-BOLYAI TUDOMÁNYEGYETEMEN 1990 ÉS 2025 KÖZÖTT

Sárközi Zsuzsa<sup>1,\*</sup>, Nagy Melinda-Katalin<sup>1</sup>, Vörös Alpár István Vita<sup>2</sup>, Karácsony János<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Magyar Fizika Intézet, Kolozsvár, Románia

<sup>2</sup>Apáczai Csere János Elméleti Liceum, Kolozsvár, Románia

\*E-mail: susana.sarkozi@ubbcluj.ro

Az első erdélyi egyetemalapítás folyamata Kolozsvárhoz köthető. A Kolozsvári Magyar Királyi Ferencz József Tudományegyetem keretében valósul meg először a 19. század végén egyetemi szintű fizikaoktatás, amely értelem-szerűen magyar nyelvű volt. Az azóta eltelt 150 év során magyar nyelvű fizikusképzés Erdélyben szintén egyedül a kolozsvári tudományegyetemen folyt.

Gábos Zoltán tanár úr cikke a *Fizikai Szemlében* [1] egy átfogó írás az erdélyi egyetemi szintű fizikaoktatásról a kezdetektől egészen 2000-ig. Kitűnő összegzésében – azokat az eseményeket figyelembe véve, amelyek az iskolák működésében gyökeres változásokat eredményeztek – a következő korszakokat különítette el: 1526-ig, 1526-tól 1690-ig, 1690-től 1784-ig, 1784-től 1919-ig, és végül az 1919-től 2000-ig terjedő időszakot. Megjegyzi benne, hogy: „Nem térünk ki az 1959 és 1989 közötti szakasz tudományos megvalósításainak ismertetésére, úgy gondolom, hogy ez tanítványaink feladata.” Ezt a feladatot, valamint az 1989-es fordulat utáni időszak bemutatását vállalta Karácsony János a Kolozsvári Egyetemi Kiadó gondozásában 2022-ben megjelent „Szemelvények a 150 éve alapított kolozsvári egyetem Matematikai és Természettudományi Karának történetéből” című kiadványában, „A kolozsvári magyar fizikaiskola történetéről” szóló, több mint 80 oldalra kiterjedő fejezetben [2].

Ezt az írást alapul véve megkíséreljük a kolozsvári magyar fizikaiskolának az 1989-es romániai forradalom

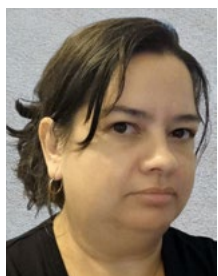
utáni helyzetét összefoglalni. Ahhoz, hogy megértsük, mennyire nehéz volt a helyzet közvetlenül a forradalom után, és hogyan alakult ki az önálló magyar nyelvű oktatás, nagyon fontos a történelmi kontextus ismertetése.

A Babeş-Bolyai Tudományegyetem (BBTE) 1959 őszén, a kommunista időszakban jött létre a magyar tannyelvű Bolyai és a román tannyelvű Babeş egyetemek központilag előirányzott egyesítése folyamán. Bár az egyesítési okmány a magyar nyelvű oktatást biztosította, az egyetem végül csak a tanári szakon tette azt lehetővé. Az egyesítés után két évvel, egy átszervezés címén, karokat választottak szét, és újakat hoztak létre. Így létrejött az önálló Fizika Kar is, melynek elsődleges célja, hogy kutatókat képezzen. Erre a struktúrára már nem volt érvényes az egyesítéskor elfogadott szabályozás, ezért a karon a fizika oktatása csak román nyelven folyhatott. A kutatói képzés ellenére az itt végzettek nagy része központilag irányított tanári kihelyezést kapott. Ez a magyar anyanyelvű végzettek esetében jellemzően tömbromán régiókba, így például Moldvába való kinevezést jelentett. Innen több év román nyelvű tanítás után tudtak csak visszatérni szülőföldjükre, Erdélybe.

Az egyesítés évében 18 magyar oktató tanított fizikát az akkori Matematika-Fizika Karon: László Tihamér, Gábos Zoltán, Weissman Endre, Bódi Sándor, Koch Ferenc, Kelemen Frigyes, Puskás Ferenc, Néda Árpád, Farkas Anna, Kovács Zoltán, Galiger Éva, Dezső Er-



Sárközi Zsuzsa tanulmányait a Babeş-Bolyai Tudományegyetemen végezte 1989 és 1994 között. 1995-ben mesteri oklevelet szerzett szilárdtestfizika szakon, majd gyakornokként alkalmazták a Mechanika tanszékre. PhD-kutatása mágneses anyagokról szólt, tézisét 2005-ben védte meg Kolozsváron. Jelenleg a Magyar Fizika Intézet adjunktusaként alapképzésen főként klasszikus mechanikát tanít. Az EmpirX Egyesület titkáráként szívügye a tudomány népszerűsítése.



Nagy Melinda-Katalin a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karán a Magyar Fizika Intézet adjunktusa. Fizikusi oklevelét és doktori címét itt szerezte meg, az utóbbit 2010-ben. Kutatásának tárgya az atomi ütközések elméleti vizsgálata, pontosabban a kétatomos molekulák ionizációja-kor fellépő interferenciaeffektus tanulmányozása. Oktatóként a magfizika, fluidumok fizikája és általános fizika témákban tart előadásokat.



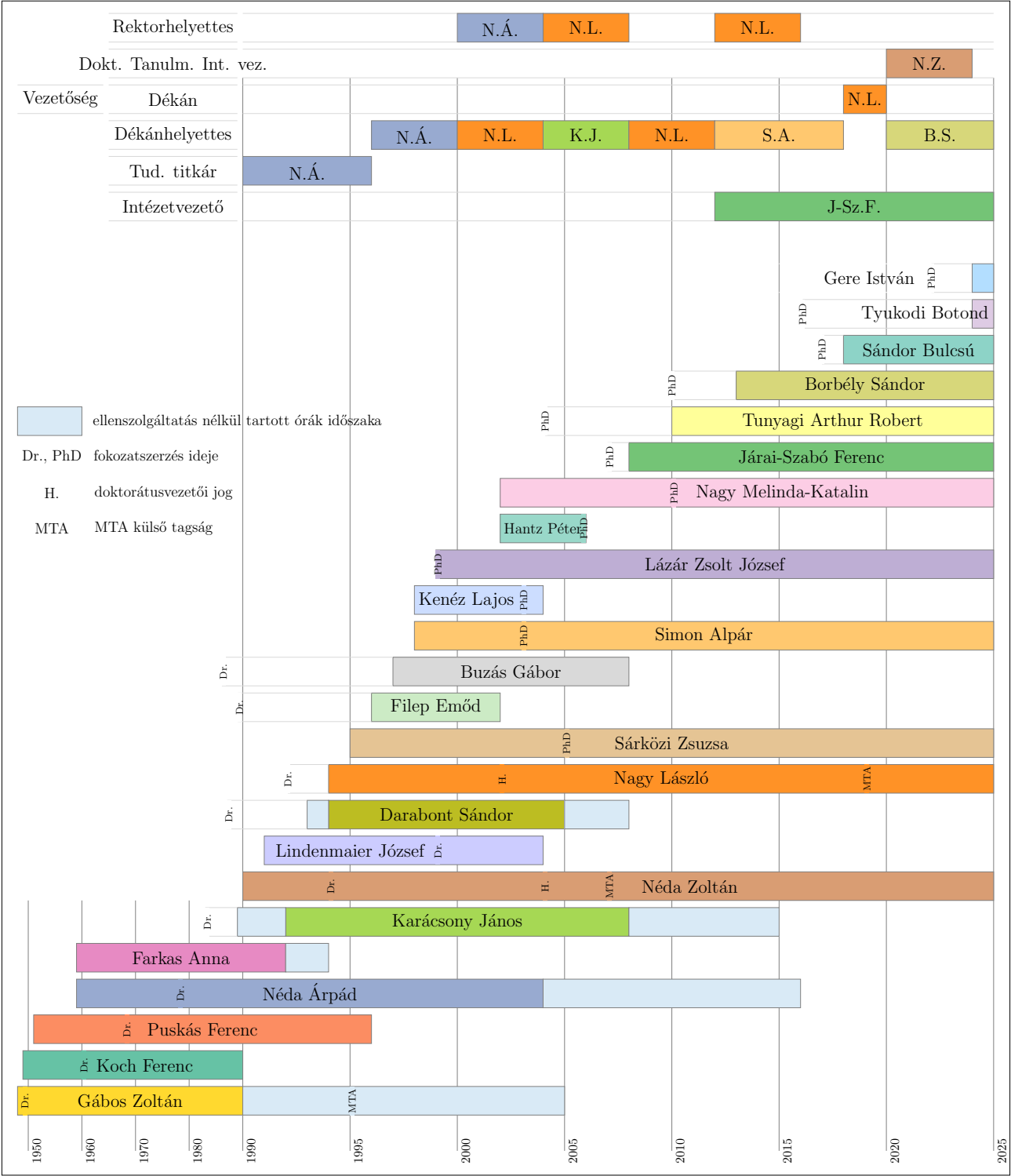
Vörös Alpár István Vita a kolozsvári Apáczai Csere János Elméleti Liceum Bonis bona-díjas fizika szakos tanára, igazgatója. A kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karán szerzett fizikus oklevelet, majd 1996-ban bio- és orvosi fizikus mesterfokozatot. A doktori címet 2019-ben az ELTE Fizika Tanítása Doktori Iskolájában Tél Tamás professzor irányításával szerezte meg. Jelenleg óraadóként a Babeş-Bolyai Tudományegyetemen a fizika tanításának pedagógiai gyakorlatát vezeti.



Karácsony János a Babeş-Bolyai Tudományegyetem nyugalmazott oktatója. 1973-tól fizikusként dolgozott a Román Tudományos Akadémia Elméleti Fizikai Kutatóközpontjában Kolozsváron, majd 1986-tól a BBTE Fizika Kutató Laboratóriumában főkutatóként. 1983-ban szerezte meg doktori fokozatát a BBTE-n. 1992-től a Fizika Kar adjunktusaként optika, plazmafizika, spektroszkópia témájú tárgyakat oktatott, 2004–2008 között a kar dékánhelyettese és magyar tagozatának vezetője volt. Az Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság alapító tagja. 2011 és 2019 között az Öveges József-Vermes Miklós Fizikaverseny szervezőbizottságának elnöke volt. 2008-ban megkapta a Debreceeni Egyetem Orvos és Egészségtudományi Centrum Nukleáris Medicina Intézete emlékérmét. 2019-ben Magyar Arany Érdemkeresztben részesült. Munkásságát 2023-ban az MTA Kolozsvári Akadémiai Bizottsága a Tudománykövetítés és Tudományos Bírálat Díjával ismerte el.

vin, Blédy-Vitályos Erzsébet, Hitter Ibolya, Szőcs Huba, Büchler Antal, Kasszián László és Kovács Kálmán. A későbbiekben újabb magyar oktatót nem alkalmaztak, így 1968-ban már csak 11-en voltak: László Tihamér, Gábos Zoltán, Bódi Sándor, Koch Ferenc, Kelemen Frigyes,

Puskás Ferenc, Néda Árpád, Farkas Anna, Galiger Éva, Dezső Ervin és Kovács Kálmán maradtak aktív oktatók. Óráikat csak román nyelven tarthatták. Az 1970-es évektől megadatott a magyar nyelvű felvételzés lehetősége. Ez az akkori politikai helyzetnek



1. ábra. A BBTE Fizika Karán magyar nyelven oktató, teljes állású oktatók idővonal-diagramja. Az ábrán kizárólag azok a személyek szerepelnek, akik oktatói minőségben, teljes munkaidőben voltak a Kar alkalmazásában. Feltüntettük a tudományos fokozatszerzés (Dr., PhD), a doktori témavezetői jog (H.), valamint a Magyar Tudományos Akadémia külső tagsága (MTA) elnyerésének időpontjait. A világoskék sáv az ellenszolgáltatás nélküli oktatás időszakát jelzi. Az ábra felső felében a vezetői pozíciók betöltésének időszakai láthatók. A betű- és színkód alapján azonosíthatók az oktatók

volt köszönhető, mivel Románia meg akarta szerezni az Amerikai Egyesült Államoktól a legnagyobb vámkedvezményt. Ezért bizonyos engedményeket kellett tennie, ami az oktatás területén azt jelentette, hogy engedélyezték néhány szaktantárgy tanítását magyarul. A Fizika Karon a Mechanika és hangtan, Hőtan és molekuláris fizika, Elektromosságtan, Optika, illetve Atomfizika tárgyakat lehetett 1971-től magyarul hallgatni, azzal az indoklással, hogy ezek az alaptantárgyak, amelyek a tanári szakhoz szükségesek. A magyar diákokat viszont nem volt szabad külön csoportba sorolni a szemináriumok és a laboratóriumi tevékenységeken, így ezeket továbbra is román nyelven kellett tartani.

Sajnos a magyar oktatók számának csökkenése tovább folytatódott: elhalálozás (Kelemen Frigyes, Kovács Kálmán), nyugdíjba vonulás (László Tihamér, Dezső Ervin, Galiger Éva), külföldre történő eltávozás (Weissman Endre, Bódi Sándor) miatt. A kart 1986-ban újból egyesítették a Matematika Karral. Ez tovább rontotta a magyar oktatók alkalmazásának esélyeit. Így 1990-ben, amikor forradalom után a Fizika Kar ismét önállósult, már csak 5 magyar oktatója volt, az egykori 18 oktatójával szemben: Gábos Zoltán, Koch Ferenc, Néda Árpád, Puskás Ferenc és Farkas Anna.

A mellékelt infografika (1. ábra) a Fizika Kar magyar alkalmazottainak (oktatóinak) forradalom utáni alakulását szemlélteti. A megjelenített időintervallum amiatt hosszabb, hogy mindazon oktatók idővonalát is szemléltethessük, akik közvetlenül a forradalom után, a kari szintű változások idején oktatói minőségben képviselték a magyar oktatás érdekeit, viszont az 1990 előtti időskálán léptéke sűrűbb.

Gábos professzor 1990-es nyugdíjazása után is segítette a kart, vállalta előadásainak megtartását bérezés hiányában is. Nem ő volt az egyetlen, aki ezt megtette. Az ábrán halványkék szín jelzi, hogy az illető oktató, még tulajdonképpen alkalmazása előtt, illetve nyugdíjazása után is tanított, sok esetben ellenszolgáltatás nélkül a kar rossz pénzügyi helyzetére való hivatkozás miatt.

Kezdetekben csak nehezen lehetett újabb magyarul oktatott tárgyat bevezetni. A diákok továbbra is csak az alaptárgyak előadásait hallgathatták magyarul. A laboratóriumi gyakorlat és a szemináriumok vegyes összetételű csoportokkal zajlottak román nyelven, még akkor is, amikor az oktató és az adott csoport hallgatóinak többsége is magyar anyanyelvű volt.

Az oktatás szerkezete jelentősen megváltozott 1990 és 2025 között. Három év kitartó meggyőző és szervezői munkának köszönhetően 1993-ban a BBTE keretében, tehát a Fizika Karon is megalakultak a magyar tananyelvű csoportok, amelyek jellemzően 10 és 25 közötti létszámmal indultak. Az első évfolyamok végzettjeinek oklevelére azonban nem került rá az oktatás nyelve. Ez bonyodalmakat okozott a magyar tananyelvű közoktatási intézményekben való elhelyezkedés esetében.

A bolognai rendszer 2005-ös bevezetése a kisszámú magyar csoportot több, még kisebb szakirány szerinti

képzésre osztotta. Egyedül a 4 éves mérnökfizika-képzésen nem sikerült minden tantárgyat magyarul is biztosítani. A szükségszerű változások miatt a rövid ideig (2–3 évig) működő matematika-fizika szakirány megszűnt minden oktatási nyelven, az orvosi fizika szakirány csak románul maradt meg. Jelenleg alapképzésen a magyar nyelvű kínálat: fizika, fizika-informatika és mérnöki fizika.

Rövid ideig, 2011 és 2015 között magyar nyelvű „tudományok” mesterszak is működött, melynek az volt a célja, hogy a biológia, fizika vagy kémia szakos tanároknak képzést biztosítson a másik két tárgy köréből azzal a céllal, hogy a tervek szerint a középiskolába bevezetendő „Tudományok” tárgyat hozzáértő tanerő taníthassa. A képzés megszűnése óta nincs magyar nyelvű mesteri képzés a Fizika Karon.

Értelemszerűen mindennek a kivitelezéséhez szükség volt további oktatók alkalmazására. Az infografikán látható, hogy az első 10 évben nagyjából évente sikerült egy-egy új magyar kollégával bővítenie a karnak. Hol az egyik, hol a másik tanszék alkalmazott újabb oktatót. Abban az időszakban a kar szervezeti struktúrája még megegyezett a forradalom előttivel, tehát kizárólag szakmai, kutatási terület szerinti felosztást követett. Az idők során a tanszékek is összevont, átalakított formákat vettek fel. Mindez a magyar oktatás szempontjából nem hozott változást, hisz a velejáró oktatásszervezési nehézségek mellett minden fórumon alulreprezentáltságot is jelentett. A magyar oktatás koordinálását Néda Árpád előbb tudományos titkári, majd dékánhelyettesi minőségben látta el. Ezt a munkát folytatták Nagy László és Karácsony János dékánhelyettesek. A továbbiakban a magyar oktatásért felelős dékánhelyettesek Simon Alpár, illetve 2020-tól Borbély Sándor voltak. Az elvállalt vezetői funkciókat is nyomon követhetjük az infografika jobb felső részében.

Karácsony János alkalmazása nagyon fontos volt az optika tárgykörének lefedése érdekében, csakúgy mint Néda Zoltáné, aki az elméleti fizika tárgykörét vezette be újra magyarul. Darabont Sándor alapozta meg a szilárdtestfizika magyar nyelvű előadását, illetve elektromosságtan-előadást tartott. Nagy László számítógépes adatfeldolgozás, magfizika és fizikatörténettel kapcsolatos előadásokat vezetett be magyarul, és ő tartja azóta is az atom- és molekulafizika-előadásokat. Filep Emőd és Sárközi Zsuzsa voltak Néda Árpád segítségével abban az időszakban a mechanika, általános fizika, illetve a hőtan tanításában. Buzás Gábor, Lindenmaier József és Simon Alpár alkalmazása az elektronika szakirány szempontjából volt fontos, míg Kenéz Lajos az optika területén Karácsony János munkatársa lett. Közvetlenül külföldi doktorátusának megszerzése után Lázár Zsolt Józsefet az Atomfizika Tanszéken alkalmazták, majd az elméleti és számítógépes fizika tárgykörébe tartozó előadásokat vette át. A helyzet a 2000 és 2005 között történt munkahelyváltások, külföldre való távozás, nyugdíjazás ellenére is – mondhatni – reményteljes volt, hisz látszott, hogy már megszűntek a kezdeti ne-

hézségek, és az egyetem szemlélete a multikulturalitás felé hajlott.

Jelentős lépés volt az önállósulás felé, hogy 2011-ben Nagy László, akkori dékánhelyettes vezetésével megalakult a Magyar Fizika Intézet (románul: Departamentul de Fizică al Liniei Maghiare), amelynek vezetését 2012 tavaszán – Nagy László rektorhelyettesi kinevezése után – *Járai-Szabó Ferenc* vette át. Az önállósuláson kívül az intézet megalakulásának másik pozitívuma, hogy sikerült meghirdetni az intézeten belül egy magyar kutatói állást. Ezt még ebben az évben *Ercsey-Ravasz Mária-Magdolna* töltötte be, aki USA-beli posztdoktori kutatását befejezve települt vissza Erdélybe, azóta pedig már a doktorátusvezetési jogot is megszerezte. Amint az infografikán is látszik, doktorátusvezetési joga (H.) két októnak, Nagy Lászlónak és Neda Zoltánnak volt azelőtt. Megjegyezzük, hogy a karon azóta még egy magyar oktató vezethet doktorátust: *Bálint Zoltán*, aki a Biomolekuláris Fizika Intézet alkalmazottja.

A 2000 után alkalmazott oktatók – egy kivételével – még mindannyian aktívak. *Nagy Melinda-Katalin* vette át többek között a Magfizika, illetve a Fluidumok fizikája előadásokat. *Járai-Szabó Ferenc* elsősorban numerikus módszerekkel és szimulációkkal kapcsolatos tárgyakat oktat, de a szilárdtestfizika és az elemi részek fizikája sem idegen tőle. *Tunyagi Arthur Robert* vezette be a Mikrokontrollerek alkalmazása a fizikában I–II. előadásokat, *Borbély Sándor* vette át az Optika, illetve a Spektroszkópia és lézerek előadásokat. *Sándor Bulcsú* vezette be a Robofizika előadást, illetve ő tartja a Dinamikai rendszereket. *Tyukodi Botond* átvette a Statisztikus fizika, illetve a Fizikában alkalmazott informatika előadásokat, míg *Gere István* a műszerezés és elektrotechnika területére tartozó tárgyakat vette át.

A felvázolt kép korántsem teljes. Azokat az úgymond „külső” segítségeket sem tüntettük fel az ábrán, akik soha nem szerepeltek ugyan állandó alkalmazottként, viszont munkájuk nélkül az önálló magyar nyelvű oktatást nem lehetett volna megvalósítani. Gondolunk itt például *Lázár József*re, a Kolozsvári Műegyetem adjunktusára, aki 1993 és 2015 között az elektrodinamika előadást tartotta, vagy azokra a specialistákra, akik segítségével sikerült rövid ideig magyar nyelvű orvosi fizika szakot működtetni (*Tamás István*, radiológia; *Szabó Judith*, orvosi anatómia). Meg kell említeni az óraadó oktatók között *Tóth Istvánt* is, a kolozsvári INCDTIM Kutatóintézet kutatóját, aki éveken keresztül tartotta a Bevezetés a számítógépes grafikába és a Fizikában alkalmazott informatika előadásokat magyarul.

A magyar diákok előnyére vált az is, hogy magyarországi vendégtanárok is vállalták egyes tantárgyak bevezetését. Így huzamosabb ideig (2–4 éven át) vendég-tanárként tartotta az elemi részek fizikáját *Lovas István*, a Debreceni Egyetem professzor emeritusa, az orvosi fizikán a Képzőeszközök *Galuska László* tanár úr (Debreceni Egyetem), a Biofizikát *Derényi Imre* (ELTE), a Fluidumok fizikáját *Tél Tamás* tanár úr (ELTE). Jelen-

leg vendégtanár *Nemes-Incze Péter* (HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, MFA Nanoszerkezetek Laboratórium), aki a Bevezetés a nanotechnológiába előadást tartja pár éve. Ide sorolhatjuk *Horváth Dezsőt* is (a CERN tagja, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont professzor emeritusz kutatója), aki jelenleg az Elemi részek fizikája előadást tartja, és emellett a BBTE STAR Intézetének kutatója.

2013-tól kezdődően 4–5 ösztöndíjas doktorandusz is segíti az oktatási folyamatot. Félévente mindegyikük legalább heti két óra szemináriumot vagy laboratóriumi gyakorlatot tart.

Az alapképzésen a hallgatók már másodévtől kezdődően tudományos kutatást is végeznek. Ennek ad keretet 2005-től a Kolozsvári Magyar Egyetemi Intézet (KMEI) Fizika Szakkollégiuma. Ennek keretében sikerült kb. 2017-ig a diákoknak szánt előadásokra magyarországi előadókat meghívni. A „szakkollégium” elnevezés megtevesztő lehet, hisz itt a szakkollégista státuson inkább egy kiváltságot kell érteni, és nem jelent sem különösebb anyagi, sem bentlakási előnyöket. Kutatási eredményeik bemutatására az elsődleges fórum az Erdélyi Tudományos Diákköri Konferencia (ETDK).

Nem volt, és ma sincs a BBTE-n kimondottan fizika-tanári képzés. A bolognai rendszer 2005-ös bevezetése előtt mindenki kötelezően felvette a tanári képzéshez szükséges tantárgyakat, utána már csak a tanári pályában gondolkodó diákok veszik fel ezeket egy külön csomag keretében, amelyet a BBTE Tanárképző Intézete biztosít. 1990-től kezdődően 2015-ös nyugdíjazásáig *Kovács Zoltán* tartotta a fizikai szak módszertant és a pedagógiai gyakorlatot a Tanárképző Intézet alkalmazottjaként.

A Fizika Kar magyar oktatói a kezdetektől fontosnak tartották a közoktatásban tanító kollégákkal való kapcsolattartást, az ő továbbképzésüket. Ezt a célt az Erdélyi Magyar Műszaki és Tudományos Társaságon (EMT) keresztül látták megvalósíthatónak. Az EMT Fizika Szakosztálya 1990 szeptemberében Sepsiszentgyörgyön fizika-tanári ankétot szervezett. Itt megfogalmazták a szakosztály programtervezetét: középiskolai tanárok számára nyári továbbképző tanfolyamok, illetve a középiskolás diákok számára nyári szaktáborok szervezése, diákokkal bekapcsolódni a magyarországi fizikaversenyekbe, egy szakmai folyóirat létrehozása, amely középiskolás diákok, tanárok és egyetemi hallgatók számára nyújt tanulási és továbbképzési lehetőséget [3]. Ennek értelmében az EMT 1995 és 2014 között évente megszervezte a Körmöczi János Fizikusnapokat, amelyen az előadók a BBTE Fizika Karának oktatói, illetve meghívott magyarországi előadók voltak, a résztvevők pedig középiskolai tanárok. 1991-től megjelenteti a FIRKA (Fizika, Informatika, Kémia Alapok) című folyóiratot. A FIRKA célja olyan információforrás megteremtése, amely kiegészíti a tankönyvek anyagát, és a fizika jobb megértéséhez segítséget nyújt a diákoknak és a tanároknak egyaránt. A lap egyik elindítója Puskás Ferenc volt, kezdetben a lap társfőszerkesztőjeként, majd 2001 és 2014 között egye-

düli főszerkesztőként. A szerkesztőség további tagjai voltak: Farkas Anna, Gábos Zoltán, Karácsony János, Neda Árpád, Kovács Zoltán és Járai-Szabó Ferenc (2018-tól). Ugyancsak az EMT tevékenységének része az Öveges József – Vermes Miklós Fizikaverseny erdélyi megszervezése, amelynek romániai szakaszához a tételek összeállítását a BBTE magyar oktatói koordinálják: Karácsony János, majd Kovács Zoltán, jelenleg pedig Lázár Zsolt József vállalja ezt a feladatot.

A kar magyar oktatói részéről felmerült egy kolozsvári tudományos játszóház létrehozásának igénye is. Ennek előszeleként 2008-ban „Kísérletszombat” elnevezéssel jött létre az egyetem főépületében zajló egynapos rendezvény, amelyen jellemzően harminc (utóbb már ötven) körüli interaktív kísérletet mutatnak be a hallgatók és oktatók minden évben. Bár a kezdeményezők a magyar oktatók voltak, a rendezvény kétnyelvű (román-magyar), amelybe a román oktatási vonal tanárai és diákjai fokozatosan mind nagyobb és nagyobb lelkesedéssel kapcsolódtak be. Rendszerint egy-két egyórás kísérleti bemutatókra fókuszáló előadás is része a rendezvénynek. Az állandó tudományos játszóház létrehozása érdekében 2010-ben megalakult az EmpirX Egyesület. Az egyesület később a KMEI szövetségébe is belépett mint a Fizika Kar háttérintézménye. Mint ilyen, a Magyar Fizika Intézettel közösen 2014-től szervezi az Erdélyi Magyar Fizikatanári Ankétot. Ez a háromnapos rendezvény vette át tulajdonképpen a Körmöczi-napok szerepét. Kezdetben csak 15–20 közoktatásban tanító fizikatanárt szólított meg, az évek során azonban fokozatosan fejlődött, mind tartalmában, mind pedig a résztvevők részéről mutatott érdeklődésben.

A Magyar Fizika Intézeten belül folyó szakmai kommunikációt elősegítendő, Lázár Zsolt József szervezésében 2016 óta működik a MaFiKlub. A nagyjából heti

rendszerességgel folytatott fórum lehetőséget ad a kötetlen keretek között folytatott megbeszélésekre, szakmai bemutatókra, az intézet mindennapi és távlati kérdéseinek megvitatására mind oktatási, mind kutatási vagy adminisztratív témakörökben.

Az oktatók tudományos kutatásairól 2015-ben Karácsony János részletes beszámolót tett közzé [4]. Ebben tételszerűen megtalálható minden tudományos publikáció és oktatási segédanyag, amit a Fizika Kar magyar oktatói, kutatói, illetve a kolozsvári fizikai kutatóintézetekben alkalmazott kutatók jegyeztek 2002 és 2013 között. A jelenleg folyó kutatásokról pedig épp a jelen lapszám-ban olvashatunk.

A Fizika Kar azon magyar végzettjei, akik a szakmában maradtak, egyrészt fizikatanárként helyezkedtek el az erdélyi és magyarországi köz- és felsőoktatásban, másrészt fizikusként dolgoznak az iparban vagy kutatóként a kolozsvári kutatóintézetekben, a KFKI utódtízményeiben, a szegedi ELI ALPS-ban, a debreceni ATOMKI-ban, nyugat-európai egyetemeken és kutatóintézetekben, illetve az Amerikai Egyesült Államokban is.

## Irodalom

1. Gábos Z. (2000): Az erdélyi fizikusok hozzájárulása a magyar tudományhoz. *Fizikai Szemle*, 2000/4, 117.
2. Karácsony J. (2022): A kolozsvári magyar fizikaiskola történetéről. In: Szemelvények a 150 éve alapított kolozsvári egyetem Matematikai és Természettudományi Karának történetéből. Kolozsvári Egyetemi Kiadó, Kolozsvár, 2022, 89–173.
3. Selinger S. (2025): Gondolatok az EMT megalakulása 35. évfordulójának margójára – Történeti visszatekintés a kezdetekre: 1990–1994. In: XVIII. Tudomány- és Technikatörténeti Konferencia 2025, Erdélyi Magyar Műszaki Tudományos Társaság, 2025, 101–106.
4. Karácsony J. (2015): Erdélyi magyar fizikusok kutatásai 2002 és 2013 között. In: Magyar tudományosság Romániában 2002–2013 között. III. kötet, Ábel Kiadó, Kolozsvár, 2015, 29–76.

# FOTOELEKTRON-HOLOGRÁFIA

Nagy László, Borbély Sándor<sup>@</sup>

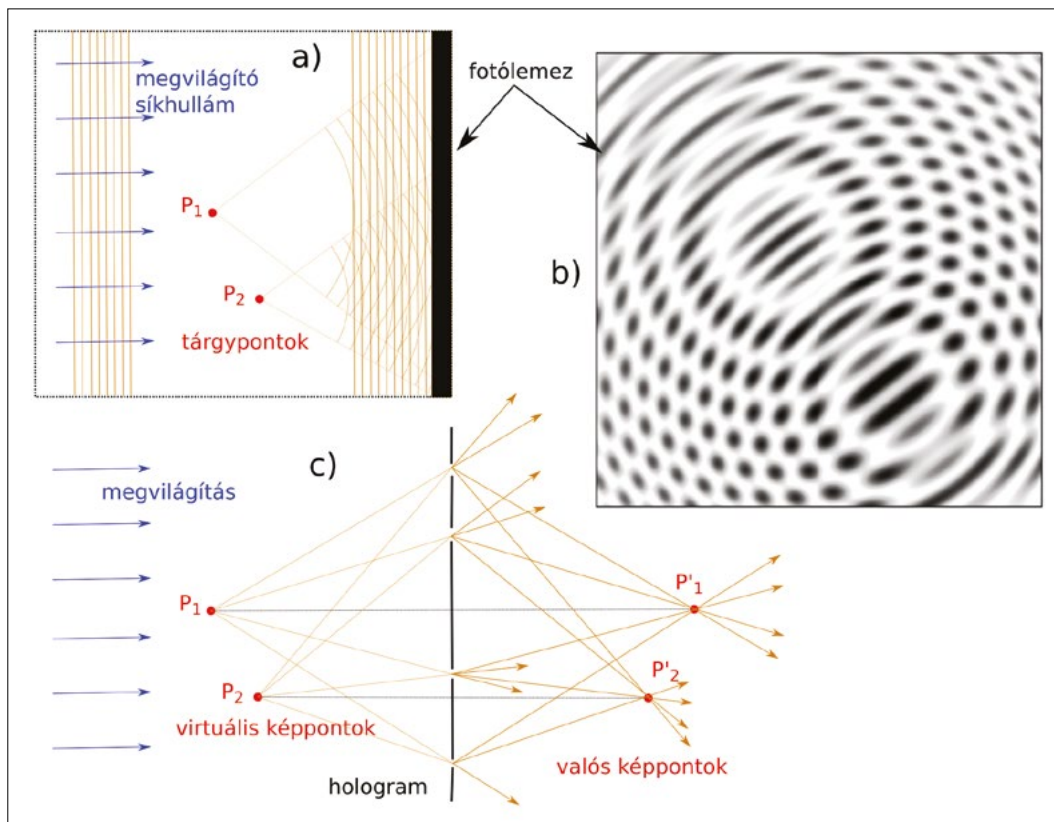
Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Magyar Fizika Intézet, Kolozsvár, Románia  
<sup>@</sup>E-mail: sandor.borbely@ubbcluj.ro

## 1. Bevezető

A hagyományos optikai leképezés során a keletkező kép felbontásának határt szab a leképező elemeken létrejövő fényelhajlás, valamint az ideálistól eltérő leképezőelemekből adódó képhibák. A fényelhajlásból eredő felbontáscsökkenés ellensúlyozható a leképezőelemek (lencsék) átmérőjének növelésével, viszont ez növeli a képhibák nagyságát, ami felbontáscsökkenéshez vezet. Egy adott leképezőrendszer esetén mindig található egy optimális méret (átmérő), amely esetén a fényelhajlásból és a szférikus aberrációból (domináns leképezési hiba) adódó hiba mértéke megegyezik. Ennél nagyobb átmérő esetén

a szférikus aberráció, míg ennél kisebb átmérő esetén a fényelhajlás rontja a keletkező kép felbontását.

Ezzel a problémával szembesült Gábor Dénes is az 1940-es évek második felében, amikor atomrácsok direkt megfigyeléséhez fejlesztett elektronmikroszkópot [1]. Optimális elektronlencse-átmérő esetén az elért legjobb felbontás 1,2 nm volt, amely közel 6-szor rosszabb volt, mint az a felbontás, ami ahhoz szükséges, hogy egy atomrács atomjai megfigyelhetőek legyenek. Ezen gyakorlati feladat megoldásán gondolkodva jött rá Gábor Dénes arra, hogy a hagyományos leképezés (fényképezés) során csak a tárgyról szóródó hullámok amplitúdója által hordozott információt rögzítjük, míg a hullám fázis-



1. ábra. Holografikus leképezés és hullámfront-rekonstrukció. Az [1] 5. ábrája alapján készített illusztráció

sában tárolt információt elveszítjük. Abban az esetben, ha a tárgyról szóródó hullám amplitúdója mellett a fázisát is rögzítjük, akkor a hagyományos leképezés felbontása javítható. Ahhoz, hogy a szórt hullám fázisát rögzíthessük, szükségünk van egy ismert referenciára, amelyet Gábor Dénes javaslata szerint egy síkhullám biztosíthat. A szórt hullám referenciahullámhoz viszonyított relatív fázisa interferencia segítségével rögzíthető egy fényérzékeny lemezen: ha a fáziskülönbség  $0^\circ$ , akkor a találkozó hullámok konstruktívan interferálnak, míg  $180^\circ$ -os fáziskülönbség esetén destruktív interferencia jelentkezik. Az 1a. ábrán egy egyszerű, két pontból álló tárgyról szóródó hullám referenciahullámmal való találkozása látható. Az ebből keletkező interferenciaképet az 1b. ábra szemlélteti. Ezt a képet hologramnak<sup>1</sup> nevezzük, mivel a tárgyról érkező hullám által hordozott információt teljes mértékben rögzíti. Amint az 1b. ábrán is látható, a hologram gyakorlatban sötét (fényelnyelő) és világos (fény-

áteresztő) zónákból álló mintázat, de ha ezt a mintázatot megvilágítjuk a rögzítéskor használt referenciahullámmal, akkor a hologramon történő fényelhajlás létrehoz egy olyan hullámfrontot, amely megegyezik az eredeti tárgyról szóródó hullámfronttal (1c. ábra).

Gábor Dénes ezen ötletének értékét jelzi, hogy 1971-ben fizikai Nobel-díjjal tüntették ki a holográfia felfedezéséért. Az első hologramot és az abból végzett hullámfront-rekonstrukciót már 1948-ra sikerült Gábor Dénesnek megvalósítania, de ezen kísérletek kivitelezése nehézkes volt, mivel nem állt rendelkezésre megfelelő koherenciájú fényforrás. Ezen a lézerek 1960-ban történő felfedezése változtatott, mivel lehetővé tette a holográfiához szükséges koherens hullámok egyszerű előállítását. Ezen fejlemény lehetővé tette a holográfia robbanásszerű fejlődését, és számos területen történő alkalmazásához [2–5] vezetett. Ezek közül megemlíthetjük a holografikus adattárolást, az eredetigazoló ho-

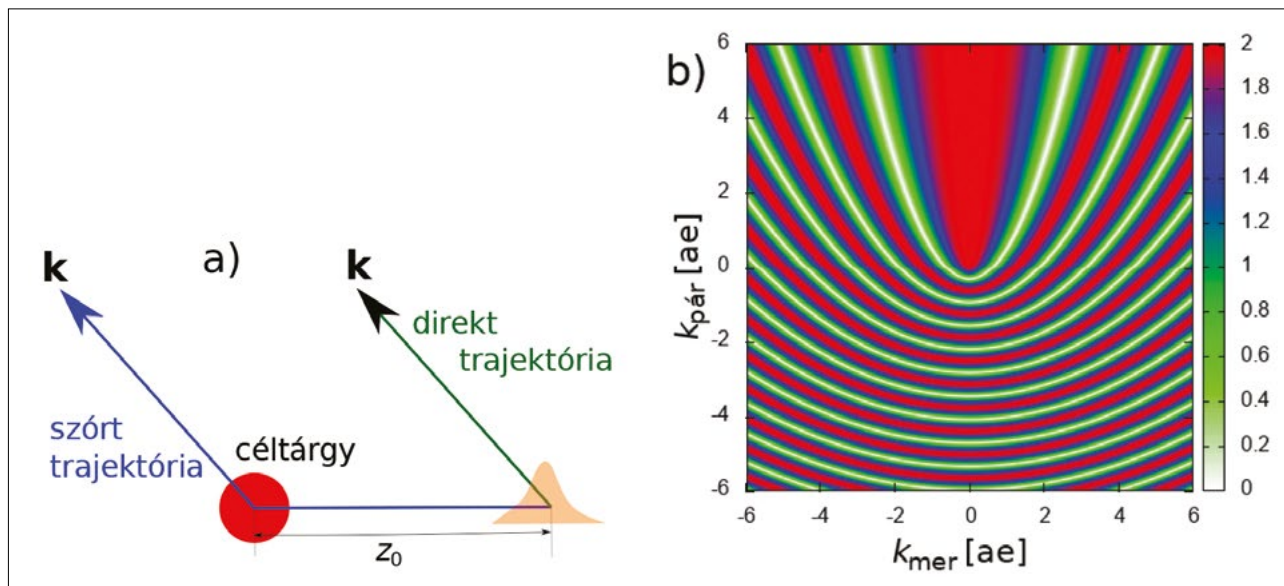
<sup>1</sup> holos = teljes görög nyelven.



Nagy László, fizikus, a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem tanára, az MTA külső tagja, a Kolozsvári Akadémiai Bizottság elnöke. Kutatási területe az elméleti atomfizika, amelyen belül elsősorban ionok, elektronok/pozitronok és fotonok atomokkal és molekulákkal való ütközését vizsgálta. Érdeklődése különösen a részecskék hullámmérszetéből származó interferenciajelenségekre terjed ki.



Borbély Sándor a Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karának adjunktusa, dékánhelyettese. Kutatási területe az elektrondinamika elméleti vizsgálata olyan atomi rendszerekben, amelyek lézerimpulzusokkal hatnak kölcsön, vagy elektromosan töltött részecskékkal ütköznek.



2. ábra. Karakterisztikus elektrontrajektóriák a hullámcsomag szóródása során (a) és ezen trajektóriák interferenciájából keletkező mintázat (b)

lografikus bélyegeket, az orvosi képalkotást, a holografikus mikroszkópiát, a holográfián alapuló metrológiai eljárásokat stb.

## Holográfia lézerindukált elektron-hullámcsomagokkal

Az atomok és molekulák – a továbbiakban céltárgyak – szerkezetének vizsgálatára használt módszerek egy jelentős része elektronspektroszkópián alapul. Egy elektronspektroszkópiás mérés során a vizsgálandó céltárgyat külső behatással ionizáljuk, majd mérjük a rendszerből kilépő elektronok energia és kilépési irány szerinti eloszlását. Ez egyenértékű az ionizált atomból vagy molekulából kilépő elektronhullám amplitúdójának rögzítésével, azaz a hagyományos optikai leképezésből kölcsönzött analógiával élve, egyenértékű a céltárgy klasszikus fényképezésével. Úgy, amint a hagyományos optikai leképezés esetén is történt, az elektronspektroszkópiás mérések során a céltárgyból eredő elektronhullám fázisát nem rögzítjük.

Az első próbálkozások a céltárgyakból eredő elektronhullámok fázisának rögzítésére, kiaknázására a kétcentrumú interferencián alapultak. Ezen kísérletek során sikerült megfigyelni kétatomos molekulák ionizációjakor a molekulát alkotó atomokból származó elektron-hullámcsomagok interferenciáját [6, 7], amely az elektronokkal elvégzett Young-féle kettősrés-kísérlet [8] megfelelője atomi skálán megvalósítva.

Először 2004-ben merült fel ötletként [9], hogy ha a céltárgyról eredő elektronhullámot interferáltatjuk egy referenciahullámmal, akkor az optikai hologrammal analóg elektronhologram hozható létre. Ezen elképzelés szerint az elektronhologram több lépés után jön létre.

Első lépésben egy rövid lézerimpulzus nagy intenzitású elektromos tere ionizálja a céltárgyat, létrehozva

egy impulzustérben széles elektron-hullámcsomagot. Ez a lézert jellemző úgynevezett Keldysh-paraméter<sup>2</sup> értékétől függően történhet több foton által, alagúthatással vagy akár a potenciálgát fölötti ionizáció útján. Az elektronhoz rendelt hullámcsomag így elhagyja a céltárgyat, de az oszcilláló lézertér elektromos tere megfordul, és a hullámcsomag visszatér a céltárgy felé, és szóródik azon.

Ha a szórt hullámcsomagból kiszemelünk egy  $\mathbf{k}$  hullámszámvektorral jellemzett végállapotot, akkor abba a 2a. ábrán is jelzett két karakterisztikus elektrontrajektória mentén juthatunk: a céltárgyon nem szóródott direkt trajektória mentén, valamint a céltárgyon jelentős mértékben szóródott trajektória mentén. Ezen trajektóriákhoz rendelt síkhullámok a detektorban interferálnak létrehozva a fotoelektron-hologramot. A jelentős mértékben szórt elektrontrajektória mentén az elektron fázisát, nagymértékben a céltárgy potenciálja határozza meg, emiatt a létrejövő hologram információt hordoz ezen potenciálról és indirekt módon a céltárgy elektronszerkezetéről. A megjósolt hologramot kísérletileg is sikerült kimutatni a metastabil xenonatom 7 mikrométeres hullámhosszú infravörös lézer útján történő ionizációjánál [10]. A holografikus leképezés egy pókhálószerű, radiális interferenciamintázatot eredményezett.

Az atomok lézerimpulzus általi ionizációjakor létrejövő mintázatokat több elméleti csoport vizsgálta, osztályozta [11, 12]. Mi a tanulmányainkban elsősorban arra fókuszáltunk, hogy hogyan épülnek fel időben az interferenciamintázatok, hogyan függenek a lézerimpulzus paramétereitől (intenzitás, frekvencia), illetve az atom típusa (a szóró potenciál) milyen módon befolyásolja a hologramot.

<sup>2</sup> A Keldysh-paraméter megadja az elektron-atommag és elektron-lézer-tér kölcsönhatások nagyságainak arányát.

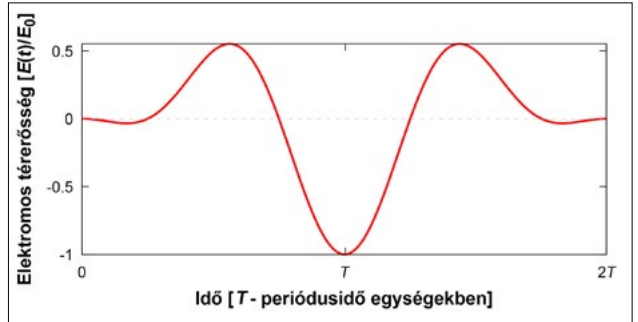
A legtöbb számításunkat a legegyszerűbb atomra, a hidrogénatomra végeztük. A módszerünk az időtől függő Schrödinger-egyenlet numerikus megoldásán alapul, amit egy elektronra nagy pontossággal el tudunk végezni. Az elektron az atommag és a lézertér kombinált terében mozog. A lézerimpulzus megszűnte után a megfelelően hosszú ideig propagált hullámfüggvényből számoljuk<sup>3</sup> egy adott végállapotba való átmenet valószínűségét. A számítást az elektron végső impulzusának minden lehetséges értékére elvégezve az impulzustérben egy interferenciamintázatot kapunk, ami hologramnak tekinthető.

Mielőtt rátérnénk a számításaink eredményeinek bemutatására, egy egyszerű modell segítségével illusztráljuk, hogyan jön létre a hologram, és elsősorban mitől függ az interferenciamintázat sűrűsége. Ezt a modellt először a [10] cikkben mutatták be, és a mi csoportunk is használta az eredmények minőségi elemzésében [13]. Amint a 2a. ábrán látható, a direkt és a szórt sugarak közötti interferencia a két útvonal közötti útkülönbségtől függ. Ha a céltárgyat egy egyszerű szórópontnak tekintjük (csak az elektrontrajektória irányát módosítja) akkor az útkülönbséget a szórási szögön kívül az a  $z_0$  távolság határozza meg, amelyre az elektronhoz rendelt hullámcsomag eltávolodik az atomtól a visszatérítés előtt. Az eredő hullám intenzitását a következőképpen írhatjuk fel:

$$I(\mathbf{k}) \sim |1 + e^{iz_0(k-k_z)}|, \quad (1)$$

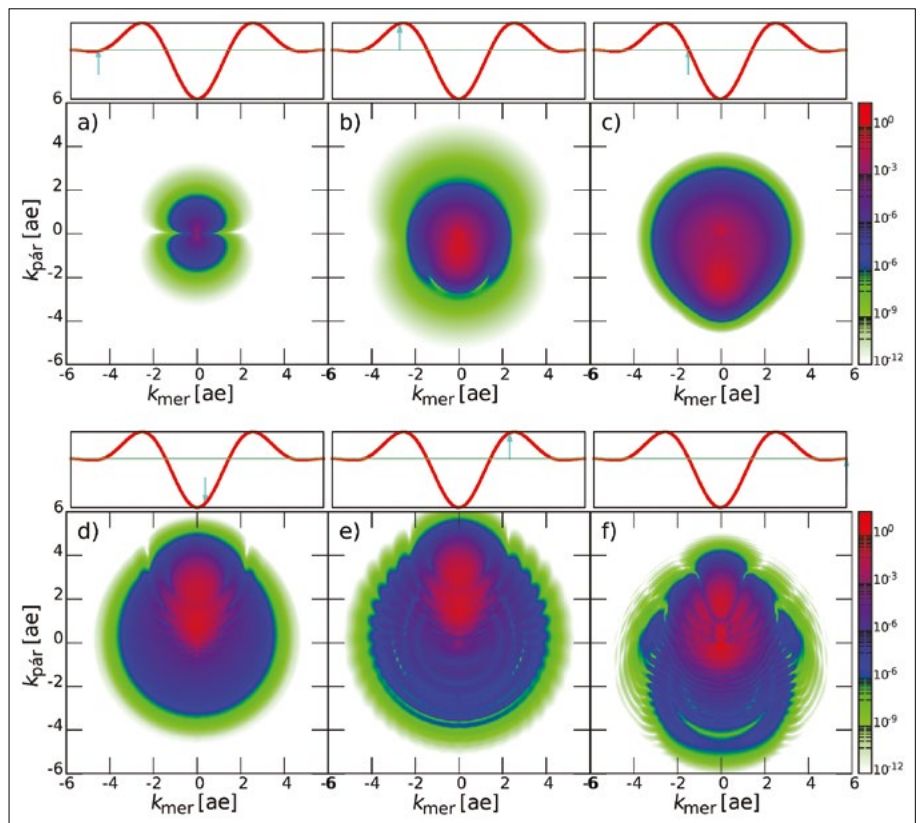
ahol  $k$  a hullámszám és  $k_z$  annak az elektromos térerősséggel párhuzamos komponense. Ebben az egyszerű modellben a  $\mathbf{k}$  irányai szerinti térbeli intenzitáseloszlás egy interferenciaképet ír le, amit csak a  $z_0$  távolság határoz meg, ez látható a 2. ábrán  $z_0 = 5$  ae esetére.<sup>4</sup>

Számításainkban egy két ciklusból álló, a távoli ibolyántúli tartományba eső ultrarövid lézerimpulzust használtunk (3. ábra). Az időtől függő Schrödinger-egyenlet megoldásán alapuló módszernek az az előnye, hogy a kapott hullámfüggvényt a lézerimpulzus bármelyik pillanatában vetíthetjük a végállapotí saját-



3. ábra. A lézerimpulzus elektromos térerősségvektora az idő függvényében

függvényekre, megkapva a szabadelektron-eloszlást, amelyen keresztül figyelemmel követhetjük az interferenciamintázat időben történő kialakulását. A 4. ábrán ezen eloszlást ábrázoltuk a lézerimpulzus különböző időpillanataiban. Az első, kis intenzitású maximum csak egyfotonos ionizációt eredményez, és a kilökött elektron impulzusára a jól ismert dipól eloszlás jellemző (4a. ábra). A következő, intenzív félhullám már közel 1-es valószínűséggel ionizálja az atomot, és az elektronhullámot



4. ábra. A szabadelektron-eloszlásfüggvény a lézertérre merőleges ( $k_{\text{mer}}$ ) és az azzal párhuzamos ( $k_{\text{par}}$ ) impulzuskomponensek függvényében különböző időpillanatokban. Az időpillanatokot a lézerimpulzuson nyilakkal jelöltük

<sup>3</sup> Vetítve a propagált hullámfüggvényt a végállapotot leíró hullámfüggvényre, ami a visszamaradt ion terében számolt folytonos szabadelektron-sajátfüggvény.

<sup>4</sup> ae = atomi egység, távolság esetén az 1 ae megegyezik a Bohr-sugárral (a Bohr-modell alapállapotbeli elektronpályájának sugara a H-atom esetén).

eltávolítja a magtól (4b., c. ábra). Itt még nyoma sincs az interferenciának. Miután az elektromos tér iránya megfordul (4d. ábra), az elektronhoz rendelt hullámcsomag visszafordul az atom felé, szóródik azon. A direkt hullámmal való interferencia immár láthatóvá válik. A lézer-

impulzus további hullámai (4e., f. ábra) valamennyire még módosítják az interferenciámintázatot, és kialakul a végső impulzuseloszlás, ami a távozó elektront jellemzi.

### 3. Hologram függése a lézertér paramétereitől

Részletesen vizsgáltuk, hogyan függ az impulzustérben kapott hologram a lézertér paramétereitől, mint az intenzitás és a körfrekvencia. Amint az előbb tárgyalt egyszerű modell alapján láttuk, a radiális interferenciacsíkok sűrűsége elsősorban attól a  $z_0$  távolságtól függ, amennyire az elektron eltávolodik a magtól. Minél nagyobb ez a távolság, annál nagyobb lesz az interferenciacsíkok sűrűsége – amint az (1) képletből következik. A  $z_0$  nyilván nő a lézerimpulzus intenzitásával, és csökken a frekvencia növekedésével, mert akkor kevesebb ideje van a lézertérnek gyorsítani és az atommagtól távolítani az elektront. Az 5. ábrán állandó frekvencia és csökkenő maximális elektromos tér mellett ábrázoltuk a kapott hologramot. Amint jól követhető, az interferenciacsíkok sűrűsége is egyre csökken az elektromos tér intenzitásával együtt.

A  $z_0$  távolság attól is függ, hogy mennyi ideig távolodik a kilökött elektron a magtól a visszatérítés előtt, ami nyilván a lézerimpulzus periódusával arányos. A 6. ábrán olyan eseteket ábrázoltunk, amelyekre az impulzusátadás (ami az elektromos térerősség és a félperiódus szorzatával arányos) ugyanakkora, ezért az

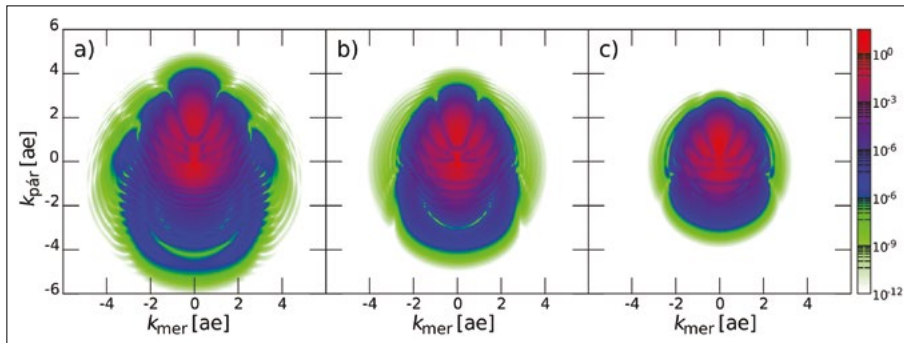
elektron mindhárom esetben ugyanakkora kezdősebességgel távolodik az atomtól. A  $z_0$  így a lézerimpulzus félperiódusával (a távolodási idővel) lesz arányos, tehát az interferenciacsíkok a körfrekvencia csökkenésével sűrűsödnek.

Bár az (1) képleten alapuló egyszerű modell minőségileg helyesen írja le ezeket a függéseket, az időtől függő Schrödinger-egyenlet megoldásán alapuló módszerünk sokkal részletgazdagabb hologramot eredményez, mint a 2b. ábrán látható. Ennek több oka van, az egyik az elektronhoz rendelt hullámcsomag kiterjedése. A másik az, hogy a kétciklusú lézerimpulzus kétszer is oda-vissza mozgatja a hullámcsomagot, így a különböző időpillanatokban távozó elektronhullámok között is létrejöhet az interferencia. A harmadik ok pedig, amivel a következő fejezetben foglalkozunk, a szóró potenciál alakja, ami az ionizált atom típusától függ.

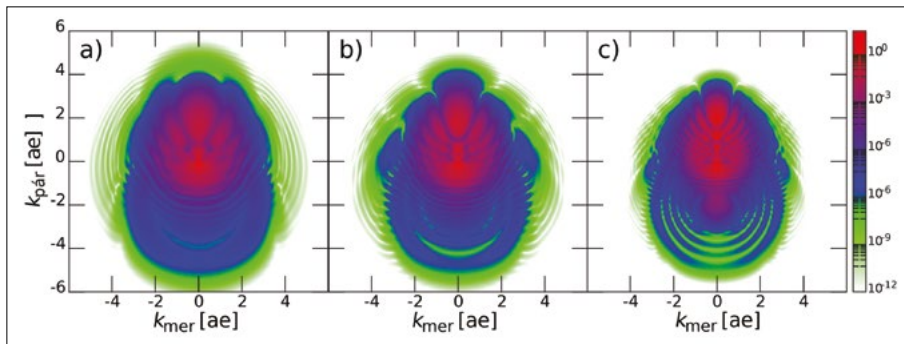
### 4. A hologram függése a célatomtól

A hidrogénatomon kívül számításokat végeztünk más atomokra is: a héliumra, neonra és az argonra [14]. A Schrödinger-egyenletet többelektronos atomok esetén is a csak egy, az aktív, távozó elektrorra oldottuk meg, amely az atommag és a többi elektron átlagolt terében mozog. A visszamaradt atomok potenciáljai különböznek mind a hozzájuk tartozó ionizációs energiában, mind alakban. Mindkét jellemző tulajdonság hologramra gyakorolt hatását vizsgáltuk. Az ionizációs potenciál elsősorban az ionizáció valószínűségét befolyásolja. Ugyanakkor azt észleltük [14], hogy a magasabb ionizációs potenciállal jellemzett atomok esetében (hélium, neon) az interferenciakép komplexebb, mint a másik két atom esetében.

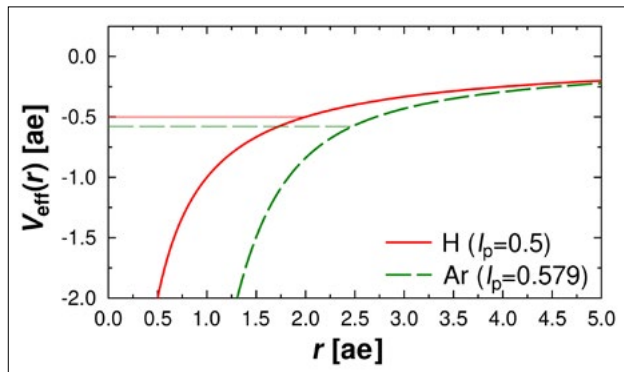
Annak érdekében, hogy a potenciál alakjának a hologramra gyakorolt közvetlen hatását vizsgáljuk, két olyan atomra – a hidrogénre és az argonra – hasonlítjuk össze a kapott hologramokat, amelyekre az ionizációs potenciál közel azonos (7. ábra). Ennek következtében az adott lézertér-paraméterek esetén a keletkező szabadelektron-hullámcsomagok nagysága és az általuk követett térbeli trajektória nagyon hasonló lesz. Ezt igazolja a 8. ábra is, ahol megfigyelhető, hogy a két célatom esetén a teljes ionizációs valószínűség (azaz a keletkező szabadelektron-hullámcsomag



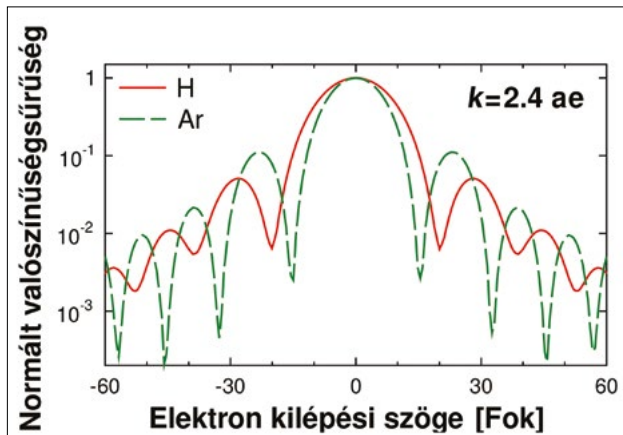
5. ábra. A szabadelektron-eloszlásfüggvény a lézertérre merőleges ( $k_{\text{mer}}$ ) és az azzal párhuzamos ( $k_{\text{par}}$ ) impulzuskomponensek függvényében rögzített körfrekvencia esetén, különböző intenzitásokra: a)  $E_0 = 1$  ae; b)  $E_0 = 0,75$  ae; c)  $E_0 = 0,5$  ae



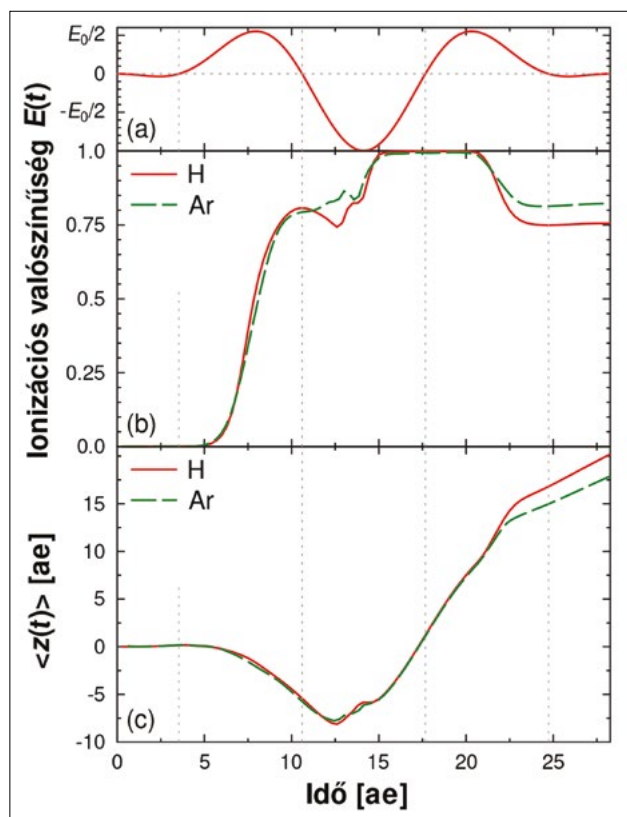
6. ábra. A szabadelektron-eloszlásfüggvény különböző körfrekvencia- és intenzitásértékekre: a)  $E_0 = 1$ ,  $\omega = 0,66$  ae; b)  $E_0 = 1$  ae,  $\omega = 0,44$  ae; c)  $E_0 = 0,5$  ae,  $\omega = 0,22$  ae



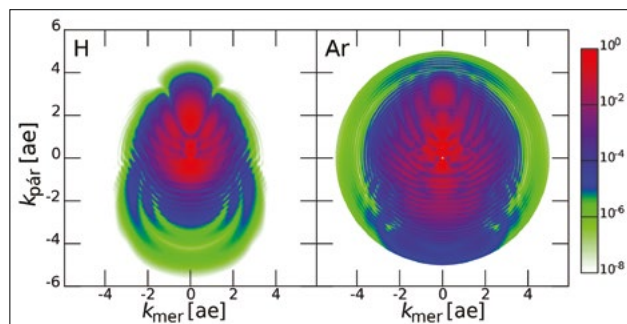
7. ábra. A hidrogénatom és a modell-argonatom effektív potenciálja a távolság függvényében. A vízszintes vonalak jelölik mindkét atom esetén az alapállapot energianívóját



10. ábra. Az elektronok kilépési valószínűsége a kilépési szög függvényében, rögzített elektronimpulzus esetén



8. ábra. A lézertér (a), a teljes ionizációs valószínűség (b) és a z koordináta várható értéke (c) az idő függvényében



9. ábra. A szabadelektron-eloszlásfüggvény a hidrogén és az argon célatomok esetén. A lézertér paraméterei a két esetben azonosak:  $E_0 = 1$  ae,  $\omega = 0,44$  ae

nagysága) és a  $z$  koordináta várható értéke (azaz a szabadelektron-hullámcsomag közepének helyzete) az idő függvényében hasonlóan változik. Mivel a két célatom esetén az elektron-ion kölcsönhatási potenciál nagy távolságokra megegyezik, a direkt trajektória ( $r > 5$  ae) menti fázisok megegyeznek. Ezzel ellentétben, a szórt trajektória ( $r \sim 1$  ae) mentén az Ar-atom potenciálja lényegesen mélyebb, így a rajta haladó elektron sebessége és fázisa nagyobb lesz. Emiatt a direkt és a szórt trajektória közötti fáziskülönbség az Ar-atom esetén nagyobb lesz, és ennek egyenes következménye, hogy az elektron kilépési irányát változtatva az Ar-atom esetén a konstruktív és a destruktív interferencia gyorsabban fogja egymást váltani, azaz a keletkező hologram sűrűbb lesz. Ezen egyszerű gondolatmenet következtetéseit támasztják alá a 9. ábrán látható hologramok, amelyek esetén megfigyelhető, hogy az Ar célatom esetén az interferenciamentázat sűrűbb. Ez a sűrűségbeli különbség még nyilvánvalóbb a 10. ábrán, ahol az elektronok kilépési valószínűsége látható a kilépési szög függvényében rögzített ( $k = 2,4$  ae) elektronimpulzus esetén.

## 5. Kitekintés

Az ultrarövid lézerimpulzusok keltése és ezek kölcsönhatása az atomokkal és molekulákkal ma a tudományos kutatás frontvonalába tartoznak. Bizonyítja ezt többek között a 2023-as fizikai Nobel-díj, amit az attoszekundumos lézerimpulzusok kísérleti megvalósításáért ítéltek oda, ami lehetővé teszi az anyagban az elektrondinamika vizsgálatát. Egyre több kutatóintézet fejleszt ki azokat a technológiákat, melyekkel az ultrarövid lézerimpulzusok és az anyag kölcsönhatásai vizsgálhatók – ezek egyik zászlóshajója a szegedi ELI ALPS intézet. A mi elméleti vizsgálódásunk is ebbe a trendbe illeszkedik. Egyrészt az időtől függő Schrödinger-egyenlet numerikus megoldásával reprodukálni tudjuk azokat a hologramjellegű interferenciamentázatokat, amelyek az atomok vagy molekulák ionizációjakor mutathatók ki az elektron-spektrumban. Ezek a mintázatok tartalmazzák a céltárgy

potenciáljára, az elektronorbitálok alakjára vonatkozó információkat. Másrészt érdekes feladat a jövőre nézve a fordított művelet elvégzése, vagyis hogy adott hologram elemzéséből következtessünk az atomi vagy molekuláris potenciál alakjára. Ahogy az optikai hologramból rekonstruálható a háromdimenziós tárgy, úgy az elektronhullámok hologramjából is meghatározható elvileg az atomi vagy molekuláris orbitál, ami létrehozza a szóró potenciált. A fontos különbség az, hogy míg a makroszkopikus esetben egy adott tárgy képét rekonstruáljuk, az atomi hologramok esetében sok atomról vagy molekuláról szóródott hullámok átlagát tudják csak detektálni. Így a céltárgyak véletlenszerű elrendeződése esetén mindig gömbszimmetrikus potenciált és neki megfelelő orbitált kapunk. Ahhoz, hogy molekulák esetén az orbitálokat rekonstruálhassuk, olyan hologramra van szükség, amit meghatározott irányba beálló molekulákról készítettek.

#### Hivatkozások

1. Gábor Dénes: Holográfia 1948–1971. *Fizikai Szemle*, 2000/6, 181.
2. Gombkötő Balázs, Kornis János: Digitális holográfia. *Fizikai Szemle*, 2011/12, 422.
3. Bányász István: Tökéletesen holográfia. *Fizikai Szemle*, 2021/12, 409.

4. Horváth Zoltán György: A magyar kézműves holográfia hősköze. 1. rész: *Fizikai Szemle*, 2017/9, 295.; 2. rész: *Fizikai Szemle*, 2017/10, 355.
5. <https://fizipedia.bme.hu/index.php/Holográfia>
6. Stolterfoht N. et al. (2001): Evidence for interference effects in electron emission from  $H_2$  colliding with 60 MeV/u  $Kr^{34+}$  ions. *Physical Review Letter*, 87, 023201.
7. Nagy L., Kocbach L., Póra L., Hansen J. P. (2002): Interference effects in the ionization of  $H_2$  by fast charged projectiles. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 35, L453.
8. Tonomura A., et al. (1989): Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern. *American Journal of Physics*, 57, 117.
9. Spanner M., Smirnova O., Corkum P., Ivanov M. Y. (2004): Reading diffraction images in strong field ionization of diatomic molecules. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 37, L243.
10. Huismans Y., et al. (2011): Time-resolved holography with photoelectrons. *Science*, 331, 61.
11. Figueira de Morisson Faria C., Maxwell A. S. (2020): It is all about phases: ultrafast holographic photoelectron imaging. *Reports on Progress in Physics*, 83, 034401.
12. Bian X. B., et al. (2011): Subcycle interference dynamics of time-resolved photoelectron holography with midinfrared laser pulses. *Physical Review A*, 84, 043420.
13. Borbély S., Tóth A., Tökési K., Nagy L. (2013): Spatial and temporal interference during the ionization of H by few-cycle XUV laser pulses. *Physical Review A*, 87, 013405.
14. Borbély S., Tóth A., Arbó D. G., Tökési K., Nagy L. (2019): Photoelectron holography of atomic targets. *Physical Review A* 99, 013413.

# AZ AGY TÉRBELI SZERVEZŐDÉSE: EGY BONYOLULT RENDSZER EGYSZERŰ SZABÁLYA

Józsa Máté, Péntek Balázs, Lázár Zsolt József, Ercsey-Ravasz Mária®

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Kolozsvár, Románia

®E-mail: maria.ercsey@ubbcluj.ro

## Bevezetés

Az idegtudományok napjaink egyik leggyorsabban fejlődő tudományága, amely az agy és az idegrendszer működésének mélyebb megértésére törekszik. Az agykutatás nemcsak a tudományos kíváncsiságot elégíti ki, hanem komoly társadalmi és orvosi jelentőséggel is bír, különösen a neurológiai betegségek kezelésének magas költségei miatt. Az interdiszciplináris megközelítés elengedhetetlen: a biológusok és orvosok mellett szükség van mérnökökre, fizikusokra, kémikusokra és informatikusokra is.

A kísérleti technológiák fejlődése lehetővé teszi, hogy egyre több adatot kapjunk az agy szerkezetéről és működéséről. Az egyik fontos ágazat, a konnektomika azzal foglalkozik, hogy feltérképezze az agy strukturális hálózatait. Az emberi agy egy sok milliárd idegsejtől álló rendszer, ezeknek a kapcsolási rajzát nevezzük konnektomnak. Agyunk dinamikája szorosan összefügg a fizikai struktúrájával és a neuronok térbeli elhelyezésével. Az idegi aktivitás folytonos időben zajlik, nem pedig disz-

rét lépésekben, mint a digitális számítógépekben. A távoli neuronok közti jelek terjedési ideje – bár nagyon gyors (50–60 m/s) – dinamikai szempontból nem hanyagolható el, ami kiemeli a térbeli topológia (kapcsolati szerkezet) jelentőségét. A neuronok szintjén a konnektom folyton változik, a szinapszisok (kötések) erősödnek, gyengülnek, változnak az élményektől függően. Hogy pontosan milyen módon tárolódnak az emlékeink, vagy hogyan alakul ki a tudatosság, csak néhány a sok megválaszolatlan kérdés közül.

A gondolkodás, memória, tudatosság, nyelv szempontjából az agyunk legfontosabb része az agykéreg vagy szürkeállomány (cortex). Ez egy legkívül elhelyezkedő 2–4 mm vastag réteg, amelyen belül 6 sávban helyezkednek el az idegsejtek. Gyűrött struktúrája van, kiegyenesítve a fejünknel ötször nagyobb átmérőjű gömbfelületet fedne le. Az agy belső részében helyezkedik el a fehérállomány, ez nagyrészt axonkötegekből áll. Ezek az axonkötegek kötik össze az agy különböző funkcionális területeit. Míg a szürkeállományon belül csak egymáshoz közeli neuronok tudnak kommunikálni, ezek a hosszú

axonok fontosak a különböző távolabbi funkcionális zónák közti kommunikáció lebonyolításában. A kísérleti és elméleti kutatások során az elmúlt néhány évtizedben nagy figyelmet fordítottak az agy összetett strukturális hálózatának megismerésére, mivel ez kulcsfontosságú az idegrendszer működése szempontjából. A kísérletek főként a különböző fajokra jellemző strukturális agyi hálózatok feltérképezésére összpontosítottak. Az emlősök esetében a térképezés általában mezo- (lokális neuron-csoportok) vagy makroskálán (az agyterületek szintjén) történik, a funkcionális területek közötti kapcsolatok felkutatásával.

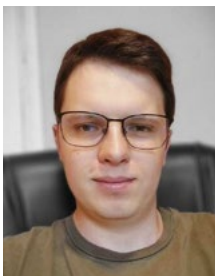
Ebben jelentős előrelépéseket értek el ún. retrográd nyomkövető kísérletekkel makákókban (Markov et al., 2011, 2014), valamint különböző nyomkövetési technikákkal egereken (Gămănuț et al., 2018; Horvát et al., 2016; Oh et al., 2014). Az emberi agy esetében csak nem invazív (a testbe közvetlen beavatkozást nem igénylő) képalkotó eljárások alkalmazhatók; azonban ezek csak közvetett módon képesek a kapcsolatok rekonstruálására, és gyakran jelentős pontatlansággal terheltek (Donahue et al., 2016; Dyrby et al., 2007). A neuronális szintű konnektom feltérképezése először a fonálféreg (*C. elegans*) esetében valósult meg (White et al., 1986), és nemrég az *ecetmuslica* teljes agyát feltérképezték (Scheffer et al., 2020; Zheng et al., 2018). Az így létrejött adatbázis mintegy 140 ezer neuront és 150 millió szinapszist tartalmaz, amelyek 78 neuropilban – azonosított makroszkopikus agyterületekben – helyezkednek el. A különböző agyi területek neuroanatómiai kapcsolatainak gráfként való ábrázolása lehetővé tette a gráfelmélet széles körű eszköztárának alkalmazását az idegtudományokban is. Ennek köszönhetően olyan komplex hálózati jellemzők váltak vizsgálhatóvá, mint az optimális drótozási elv, vagy a kisvilágjelleg felismerése (Watts & Strogatz, 1998). Emellett egy hierarchikus modularitás is kimutatható volt (Bullmore & Sporns, 2012), ami arra utal,

hogy a kortikális hálózatok modulokba szerveződnek, ahol sűrű intramoduláris és ritkább intermoduláris kapcsolatok találhatók, melyek ezáltal hatékony információfeldolgozást és kommunikációt tesznek lehetővé. A makákó agyában megfigyelt exponenciális távolsági szabály (EDR – exponential distance rule) alapján egy prediktív hálózati modellt alakítottak ki (Ercsey-Ravasz et al., 2013), amely számos topológiai jellemzőre adott magyarázatot, valamint mélyebb betekintést nyújtott a drótozási optimalizációba, a moduláris szerkezetbe és a hatékony információfeldolgozásba.

## Az exponenciális távolságszabály

Az EDR kimondja, hogy egy adott hosszúságú axon valószínűsége exponenciálisan csökken a hosszával:  $p(s) = c \cdot e^{-\lambda \cdot s}$  (lásd az 1a. ábra alsó paneljét). Egyszerűbben fogalmazva, sok neuronnak van rövid axonja, míg kevésnek hosszú, ez a csökkenés pedig exponenciális. Ezt a makákó fehérállományára vonatkozó megfigyelést később egereken is megerősítették (Gămănuț et al., 2018; Horvát et al., 2016). Ugyanakkor a szabályt a makákó és az egér szürkeállományában is kimutatták, fajszer specifikus  $\lambda$  csökkenési rátával (Horvát et al., 2016). Egy friss kutatás alapján ez a jelenség érvényes az *ecetmuslicától* a selyemmajmokon keresztül az emberig (Józsa et al., 2024). Úgy tűnik, ez egy alapvető geometriai elv, amely egyensúlyt teremt a drótozási optimalizáció és a hatékony kommunikáció között. A  $\lambda$  csökkenési ráta fajonként különböző, és az agy mérete szerint változik.

A legutóbbi elméleti kutatások (Pósfai et al., 2024) azt is kimutatták, hogy olyan fizikai hálózatokban, ahol a csomópontok és kötések geometriai térben helyezkednek el, fizikai méretük van, és nem metszhetik egymást, a kapcsolatok hosszúságának exponenciális eloszlása sűrűn tömörített állapotban természetes módon következik ezekből a geometriai korlátokból. Ezek az elméleti



Józsa Máté a Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karának doktorandusza, a Pszichológia Kar hallgatója és az Erdélyi Idegtudományi Intézet kutatója. Kutatási területe a komplex rendszerek leírása statisztikus fizikai módszerekkel, illetve ezek átfedése az ökonofizikával és idegtudományokkal, hálózatelmélettel és adattudománnyal.



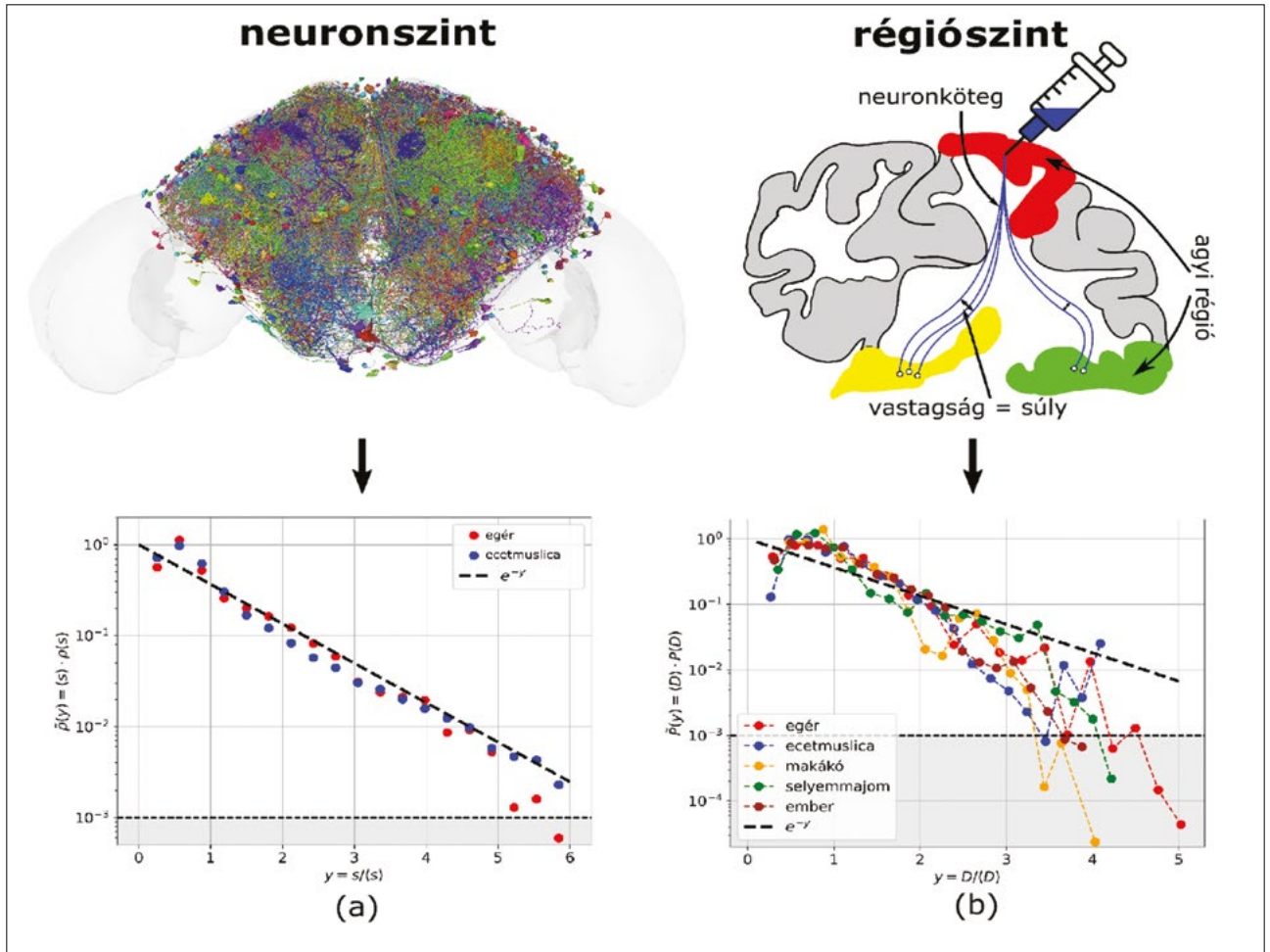
Péntek Balázs a Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karának doktorandusza, valamint részben kutató az Erdélyi Idegtudományi Intézetben. Kutatási témája az agyi hálózatok vizsgálata, amely a hálózattudomány alkalmazását célozza az agy felépítésének és működésének tanulmányozásában.



Lázár Zsolt József a Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karának oktatója és az Erdélyi Idegtudományi Intézet kutatója. Doktoriját a norvégiai University of Bergen Fizika Karán szerezte és kutatóként az írországi University College Dublin Fizika Karán dolgozott. Jelenlegi kutatásainak tárgya az idősorok elméleti és gyakorlati vonatkozásai, illetve ezeknek az agyi jelek feldolgozásában történő alkalmazásai.



Ercsey-Ravasz Mária jelenleg kutató a kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetemen és az Erdélyi Idegtudományi Intézetben, amelynek társalapítója. Tanulmányait a Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika, valamint a Pázmány Péter Katolikus Egyetem Információs Technológia Karain végezte. Kutatási területei közé tartozik a hálózatelmélet idegtudományi alkalmazása, az optimalizálási problémák és a nemlineáris dinamika. Eddigi pályafutása során elnyerte az MTA KAB Fiatal Kutatók díját, a Román Tudományos Akadémia Constantin Miculescu-díját és az MTA QP Akadémiai Kiválóság díját.



1. ábra. Az exponenciális távolságszabály (Ercsey-Ravasz et al., 2013; Ercsey-Ravasz, 2025) kétféle kapcsolati adat tükrében (Józsa et al., 2024). (a) Részletes neuronszintű adatok. A felső ábra az ecetmuslica központi kapcsolathálózatát mutatja több ezer rekonstruált axonnal (Codex Web App), míg az alsó ábra az egér 1984074 neuronjából és az ecetmuslica 32422 neurális kapcsolatából számolt axonhosszszelést ábrázolja (Matsliah et al., 2023; Scheffer et al., 2020; Horvát et al., 2016). Ezek az elemzések alapozzák meg az exponenciális távolságszabályt (EDR). (b) Kis felbontású, régiószintű megközelítés. A felső ábrán agyrégiók (színekkel) és a köztük futó axonkötegek láthatóak. Az alsó ábra súlyozott régiók közötti távolságeloszlásokat mutat be több faj esetén: makákó, ecetmuslica, egér, selyemmajom, ember (Betzel & Bassett, 2018; Chiang et al., 2011; Gámánut et al., 2018; Majka et al., 2020; Markov et al., 2014). Az exponenciálisról való eltérés a régiószintű felbontás következménye (Józsa et al., 2024). A szaggatott vonal az EDR elméleti határát jelöli, a vízszintes vonal pedig a zajhatárt

eredmények megerősítik, hogy az EDR – amelyet korábban a makákónál és az egereknél figyeltek meg – valószínűleg minden agyban igaz lehet.

Míg az EDR az egyes neuronok száma és az axonok hosszúsága közötti kapcsolatot írja le, és így az egyéni neuronok szintjén nyújt információt, addig egy egyparaméteres, prediktív, régiószintű hálózati modellt építettek ennek az elvnek alapján (Ercsey-Ravasz et al., 2013), és ez jól visszaadta számos fontos tulajdonságát a makákó és egér kortikális területei által alkotott hálózatnak (Gámánut et al., 2018; Horvát et al., 2016).

## A neuronális távolságszabály a régiószintű kapcsolatok tükrében

Az axonhosszak eloszlásáról alkotott képet nagymértékben befolyásolja, hogy milyen szinten történik az adatok

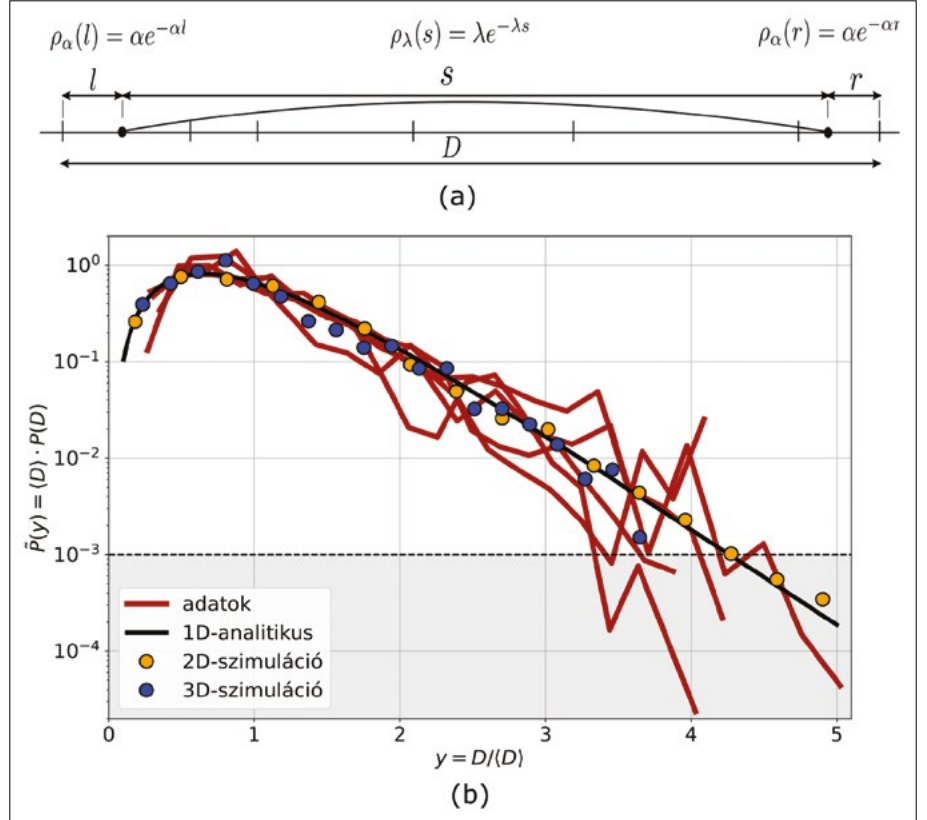
gyűjtése. Amikor az egyes neuronokhoz tartozó axonok pontos térbeli pályáját ismerjük, a hosszúságeloszlás jól követi az ismert exponenciális szabályt, ahogyan azt az egér (Horvát et al., 2016) és az ecetmuslica (Scheffer, 2020) esetében rögzített adatok mutatják. Más a helyzet, amikor csak azt tudjuk, hogy két nagyobb agyi régió között mennyi kapcsolat van, és hogy ezeknek mekkora az átlagos hossza. Ilyen típusú adatok állnak rendelkezésre például a selyemmajom (Majka et al., 2020), a makákó (Markov et al., 2011) és az ember (Betzel & Bassett, 2018) esetében, ahol az eloszlás formája eltér az axonhosszokra jellemző szabálytól, különösen a nagyon rövid és nagyon hosszú távolságok tartományában (1b. ábra). Ez az eltérés nem a szabály érvényességét kérdőjelezi meg, hanem a mérési módszer sajátosságaira vezethető vissza.

A probléma forrása az, hogy az agy régiókra bontása során sok különböző axonvégződést ugyanahhoz a régióhoz rendelünk, függetlenül attól, hogy azok való-

jában a régióon belül pontosan hol végződnek. Így amikor azt mondjuk, hogy egy kapcsolat például a bal látókérget köti össze a jobb halántéklebeny egyik területével, az valójában sok különböző, egyedi axonból álló csoport átlagos hosszaként jelenik meg, egyetlen érték-ként. Az így kapott távolságok nem az egyedi axonok valódi hosszstartományát tükrözik, hanem az axonális távolságok és régióméretetek eloszlásának egyféle konvolúcióját.

Ennek a torzulásnak a hatása jól leírható egy matematikai modellel, amelyben az axonhossz és a régióméret is véletlenszerű, de egyszerű statisztikai szabályokat követ. Az egydimenziós modell az axonokat szakaszokként, az agyrégiókat pedig egy végtelen tengely mentén egymás mellett elhelyezkedő intervallumokként reprezentálja. Az axonok végei ezekbe az intervallumokba esnek, és a kis felbontású (régiószintű) kapcsolat hosszát az axonvégeket tartalmazó két régió közötti távolságként definiáljuk.

Feltételezhetjük, hogy a régiókat modellező intervallumhosszak exponenciális eloszlást követnek, és az  $s$  hosszúságú szakaszok (axonok) véletlenszerűen vannak a tengelyre szórva. Ez az előfeltevés – az exponenciális távolságszabálytól (EDR) függetlenül – lehetővé teszi az analitikus leírást, és összhangban van az agyrégiók térfogateloszlásával, amely mind az egész agyának biológiailag releváns nullmodelljéből (olyan referenciahálózat, amely megtart bizonyos fontosnak vélt strukturális jellemzőket), mind az emberi régiószintű konnektómákból származó adatok alapján exponenciálisnak mutatkozik (Józsa et al., 2024). Az exponenciális régiófelosztás határainak kijelölése Poisson-pontfolyamat alapján történik (egy adott intervallumon véletlenszerűen elhelyezett pontok statisztikai modellje), ahol az  $\alpha$  intenzitási paraméter reciproka adja a régiók átlagos hosszát. A folyamat tulajdonságaiból következik, hogy a szomszédos határok közötti távolság – vagyis az intervallum- (régió-) hossz – exponenciális eloszlást követ:  $\rho_\alpha(x) = \alpha e^{-\alpha x}$ . Az EDR szabálynak megfelelően az axonok méreteinek eloszlása is exponenciális függvényt követ  $\rho_\lambda(s) = \lambda e^{-\lambda s}$ , ahol  $\lambda$  az átlagos axonhossz reciproka. Az  $s$  hosszúságú axon két végpontját tartalmazó régiók távolságát a  $D = s + l + r$  kifejezéssel definiáljuk, ahol  $l$  és  $r$  a bal és jobb oldali régiószél, valamint az axon meg-



2. ábra. Az axonális és régióközi távolságeloszlások kapcsolatának elméleti háttere. (a) Az egydimenziós analitikus modell sématisztikus ábrája: az  $s$  hosszúságú szakasz (axon) több agyi régióon halad át (függőleges vonalakkal elválasztva), végei pontokkal jelöltek; a kis felbontású kapcsolatok hossza a szélső régiók határai közötti távolságként ( $D$ ) van értelmezve. (b) Az egydimenziós analitikus modell (fekete), a két-dimenziós Voronoi-alapú szimuláció (narancssárga pontok), valamint a háromdimenziós neuronális nullmodell alapjánuló szimuláció (kék pontok) illeszkedése a kísérleti adatokhoz

felelő végpontjai közötti távolságok (2a. ábra). Az  $l$ ,  $r$  és  $s$  független exponenciális eloszlásait felhasználva, egyszerű statisztikai megfontolásokkal meghatározható a régióközi kapcsolatokat jellemző  $D$  hosszúság eloszlása:

$$P(D) = \alpha^2 \lambda D^2 e^{-\lambda D} F[(\alpha - \lambda)D],$$

ahol

$$F(z) = \frac{1 - e^{-z}(1+z)}{z^2}.$$

Ha megvizsgálunk három jellemző határesetet – kis régiók és hosszú kapcsolatok ( $\alpha \gg \lambda$ ), nagy régiók és rövid kapcsolatok ( $\lambda \gg \alpha$ ), illetve hasonló méretű régiók és kapcsolatok ( $\lambda \approx \alpha$ ) –, mindhárom esetben gamma-eloszlás adódik:

$$\lim_{\alpha \rightarrow \infty} P(D) = \lambda e^{-\lambda D}, \quad \lim_{\lambda \rightarrow \infty} P(D) = \alpha^2 D e^{-\alpha D},$$

$$\lim_{\lambda \rightarrow \alpha} P(D) = \frac{1}{2} \alpha^3 D^2 e^{-\alpha D}.$$

Ez arra utal, hogy az általános alak is jó közelítéssel gamma típusú eloszlásként viselkedik, ahogyan azt az 1b. ábra alsó panelja is sejtette. Az átlagra való normalizálás ( $D \rightarrow y = D / \langle D \rangle$ ) után kapott egyparaméteres modell jól

közelíti a kapcsolathossz-eloszlások kísérleti görbáját. Bár a modell jelentősen leegyszerűsíti a régiógeometriát és a neuron-régió hozzárendelést, kvalitatív szinten megfelelő leírást nyújt. Az optimális, dimenziótlanított  $\lambda = 2,3$  mellett a modell jól illeszkedik a mért adatokhoz (2b. ábra).

A modell érvényessége különböző szimulációs megközelítésekkel vizsgálható. Ezek között szerepelnek egy- és kétdimenziós Monte Carlo-szimulációk (speciálisan súlyozott Voronoi-felosztással modellezett régiókkal, ahol a tér egyes pontjai a legközelebbi generáló ponthoz tartoznak), valamint egy valós neuronelrendezésen alapuló háromdimenziós nullmodell (Józsa et al., 2024). Az eredmények azt mutatják, hogy a különböző régiógeometriai konstrukciók minőségileg hasonló kapcsolathossz-eloszlásokat eredményeznek. A geometriai részletek elsősorban az olyan paraméterek becslésének pontosságát befolyásolják, mint az exponenciális távolságszabály lecsengési rátája. Az axonhossz- és régióméret-eloszlások különböző modellezése mellett igazolható, hogy az exponenciális komponens kihagyása esetén a modell nem képes a kísérleti adatokkal összeegyeztethető viselkedést produkálni (Józsa et al., 2024).

Az eredmények tehát arra utalnak, hogy az EDR relevanciája nem korlátozódik rágszálókra vagy főemlősökre, hanem kiterjed olyan fajokra is – így az emberre is akár –, amelyek esetében részletes axonszintű adatok nem állnak rendelkezésre. Ugyanakkor az agy jelentős strukturális komplexitására való tekintettel a használt adatkészletek és módszerek alapján kialakuló egyszerűsített kép óvatosságot igényel. A kis felbontású, régiószintű kapcsolatokkal operáló modell több alapvető szerkezeti jellegzetességet megragadhat, de alkalmazhatóságának és korlátainak pontosabb meghatározása további vizsgálatokat kíván. A fentiek alapján az EDR egy általános érvényű szabály. Adja magát a feltételezés, hogy ez az univerzalitás erőteljes lenyomatot kell hagyjon az agyi drótozás topológiája szintjén is.

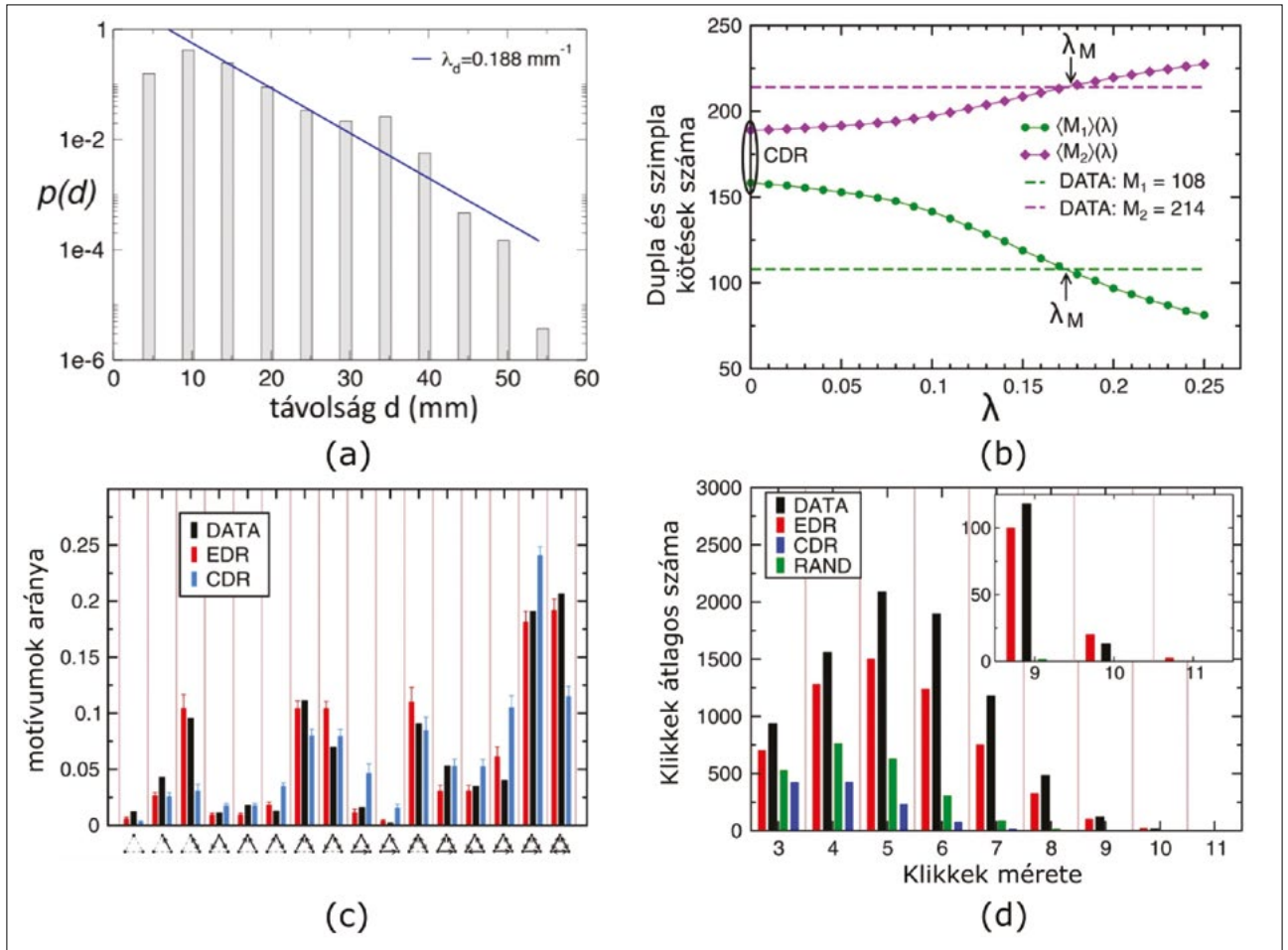
## Az EDR-modell

Az agy strukturális vizsgálatakor gyakran hálózatként tekintünk az agykérgi régiók közötti kapcsolatok rendszerére, és a gráfelmélet eszköztárát használjuk az összefüggések elemzésére. Egy hálózat elemzésekor sokféle tulajdonságot megmérhetünk, de mindig felmerül a kérdés, hogy mihez viszonyítjuk ezeket. Például egy irányított hálózatban megmérhetjük, hogy hány darab dupla kapcsolat van (amikor  $i \rightarrow j$  és  $j \rightarrow i$  is létezik), illetve hány szimpla (egyirányú) kapcsolat. De mit mondanak ezek a számok önmagukban? Nyilvánvaló, hogy a hálózat sűrűségétől is függnek: ha a sűrűség 100%, vagyis minden kötés jelen van, akkor csak dupla kötések lehetnek. Minél nagyobb a sűrűség, annál több lesz a dupla kötések száma is. Általában a hálózatot egy ugyanolyan sűrűségű véletlenszerű hálózattal (null-

modellel) hasonlítjuk össze, hogy lássuk, mely tulajdonságai térnek el attól, amit véletlen esetén várnánk.

Az agyi hálózatok modellezésénél rendelkezésünkre áll egy további információ is: ismerjük az exponenciális távolságszabályt (EDR), ezért ezt is beépítjük a nullmodellbe. Ezt a modellt EDR-modellnek nevezzük. A következőképpen generáljuk a hálókat: figyelembe vesszük a területek között lemerített távolságokat, és betartva egy adott paraméterű távolságszabályt, véletlenszerűen „dobálunk” axonokat a területek közé. Több axon is kerülhet két terület közé, ez adja majd a kötés súlyát. Amikor a hálózat sűrűsége elérte azt, ami a kísérletben is megfigyelhető, a generálást leállítjuk. Egy paraméterre több hálót is generálunk, és ezeknek az átlagos tulajdonságait hasonlítjuk össze a kísérleti adatokkal. Például a  $\lambda = 0$  eset egy konstans távolságszabályt jelent (innen ered a CDR jelölés a 3. ábrán – constant distance rule). Megállapítható, hogy milyen paraméternél jósol legjobban a modell. Ha ez elég jól egyezik a 3b. ábrán is látható kísérleti adatokból illesztett paraméterrel, akkor az azt jelenti, hogy az EDR-modell jól visszaadja az adott tulajdonságot – tehát a hálózat ezen jellemzője ennek a távolságszabálynak a következménye (hiszen minden egyéb véletlenszerű a modellben).

A makákó agyára kapott eredmények jól szemléltetik az EDR-modell prediktív erejét (Ercsey-Ravasz et al., 2013). Az EDR-modell számos hálózati tulajdonságot sikeresen előre jelez. A 3a. ábrán látható a kísérleti adatok alapján illesztett EDR-görbe, ahol a lecsengési ráta értéke körülbelül  $\lambda = 0,188 \text{ mm}^{-1}$ . A 3b. ábrán a szimpla és dupla kapcsolatok előfordulása látható a  $\lambda$  paraméter függvényében. A görbék a  $\lambda = 0,18 \text{ mm}^{-1}$  értéknél metszik a kísérleti értékeket jelző vízszintes vonalakat, ami szoros egyezést mutat az illesztett paraméterrel. Egy másik gyakran vizsgált jellemző a háromszög motívumok (három csomópontot összekötő, zárt hármas kapcsolat) gyakorisága, amelynek eloszlása a 3c. ábrán látható: itt az EDR-modell ( $\lambda = 0,18 \text{ mm}^{-1}$ ) lényegesen jobb egyezést mutat a kísérleti adatokkal, mint a távolságtól független CDR-modell ( $\lambda = 0$ ). A klikkek (olyan csomóponthalmazok, amelyekben minden elem közvetlen kapcsolatban áll egymással) számát vizsgálva szintén azt találjuk, hogy kizárólag a távolságszabály beépítésével magyarázható a nagyméretű, teljesen összekapcsolt részgráfok jelenléte (3d. ábra). Ezek a klikkek fontos szerepet játszanak az agy szerkezetében, és egyfajta mag-periféria (core-periphery) struktúrát alkotnak (olyan hálózati elrendezés, ahol a mag erősen összekapcsolt elemeket tartalmaz, míg a periféria ritkábban kapcsolódik, és főként a maghoz kötődik): a magban a kapcsolatok sűrűsége meghaladja a 95%-ot, míg ez a periférián 50% alatti. Vizsgálhatunk további, összetettebb hálózati jellemzőket is – mint például a globális és lokális kommunikációs hatékonyság, valamint a gráf spektrális sajátértékei (a részletes tárgyalást lásd: Markov et al., 2013a; Markov et al., 2013b).



3. ábra. Az EDR-modell alkalmazása a makákó konnektomára. (a) A neuronok távolság szerinti eloszlása jól közelíthető egy exponenciális függvénnyel: a szürke hisztogram a kísérleti adatokból származó eloszlást mutatja, míg a folytonos vonal a  $\lambda = 0,188 \text{ mm}^{-1}$  paraméterrel illesztett exponenciális görbét. (b) Az EDR-modell által generált hálózatokban megjelenő egyszeres (lila) és dupla (zöld) kötések átlagos száma különböző  $\lambda$  paraméterértékek mellett. A vízszintes szaggatott vonalak a kísérleti adatokból mért referenciaértékeket jelölik. (c) A 16 lehetséges háromszög motívum relatív arányainak összehasonlítása az EDR-modell ( $\lambda = 0,18 \text{ mm}^{-1}$ ), a CDR-modell ( $\lambda = 0$ ) és az empirikus adatok között. (d) Az egyes modellek (EDR, CDR, valamint egy fokszámmegtartó, véletlenszerűen kötött hálózat, RAND) által generált hálózatokban található klikkek átlagos száma, összevetve a kísérleti adatokban megfigyelt értékekkel (Ercsey-Ravasz, 2025)

## Következtetések

Az agy bonyolult hálózati szerkezete mögött meghúzódó egyszerű szabályszerűségek feltárása kulcsfontosságú a neurális rendszerek működésének megértéséhez. Mint kiderült, a különböző agyi régiókat összekötő neuronok hosszeloszlása exponenciális szabályt követ, amelyet exponenciális távolságszabályként (EDR – exponential distance rule) ismerünk. A szabály olyan univerzális statisztikai törvényszerűségeként értelmezhető, amely természetes módon következik a térbeli beágyazottság geometriai korlátaiból. Érvényessége közvetlenül kimutatható több faj – köztük rágcsálók, főemlősök és rovarok – agyában.

Ugyanakkor a neuronszintű feltérképezésnek nyilvánvaló korlátokat állít az agysejtek magas száma és a vizsgálati módszerek invazív jellege (az alany nem éli túl a mérést). Kisfelbontású, régiószintű kapcsolatokból közvetve is megerősíthető az EDR szabály. Ezen a szín-

ten a kapcsolatok hosszának eloszlása torzul a neuronális kapcsolatok csoportosítása és átlagolása következtében. Ez a hatás matematikailag magyarázható – egy kis felbontású modell bevezetésével –, és a torzított eloszlások mögött az exponenciális távolságszabály univerzális jelenléte továbbra is valószínűsíthető.

Az agyi hálózatok gráfelméleti jellemzőinek vizsgálata során elengedhetetlen egy megfelelő referencia-keretrendszer meghatározása, amely lehetővé teszi az empirikus adatok értelmezését. Ehhez nullmodelleket alkalmazunk, amelyek kontrollált véletlenszerűséggel generált hálózatokat reprezentálnak. Ha ezekben a modellekben figyelembe vesszük az axonhosszak exponenciális eloszlását, egy olyan valósághűbb referenciahálózat konstruálható, amely az agy térbeli beágyazottságát is tükrözi – ez az EDR-modell.

Az EDR-modell prediktív erejét vizsgálva kimutatható, hogy bár a paraméterei fajonként különböznek – összhangban az agyméret szerinti skálázódással –,

a hálózati szerkezetek közös topológiai mintázatokat mutatnak. Az EDR tehát egy informatív nullmodellként szolgál: segítségével azonosíthatók azok a hálózati tulajdonságok, amelyek túlmutatnak a geometriai és topológiai megszorításokon. E jellegzetességek fajok közötti összehasonlítása új lehetőségeket nyit az agyi struktúraszerveződés általános és fajspecifikus törvényszerűségeinek feltárására.

Az EDR és a hozzá kapcsolódó modellek bioinspirált mintázatokon alapuló hálózattervezést tesznek lehetővé. Alkalmazhatók mesterséges intelligencia neurális hálózataiban a topológia optimalizálására, illetve neuromorf rendszerekben, ahol az alacsony fogyasztású, térben korlátozott drótozás elsődleges. Az egyszerű geometriai szabályok hatékony, skálázható architektúrákat inspirálhatnak. A bemutatott kutatás szemléletes példája annak, hogy a fizikai módszerek alkalmazási határai jelentősen kitolhatók, messze túl a hagyományos kereteken. Meggyőződésünk, hogy a fizikai módszerek interdiszciplináris kutatásban betöltött szerepe az iskolai oktatásban is nagyobb hangsúlyt kaphat, és ezáltal is vonzóbbá tenné a tárgyat a felnövő generációk szemében (Ercsey & Varga, 2024).

## Irodalom

Betzler R. F., Bassett D. S. (2018): Specificity and robustness of long-distance connections in weighted, interareal connectomes. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(21), E4880–E4889. <https://doi.org/10.1073/pnas.1720186115>

Bullmore E., Sporns O. (2012): The economy of brain network organization. *Nature Reviews Neuroscience*, 13(5), 336–349. <https://doi.org/10.1038/nrn3214>

Chiang A.-S., Lin C.-Y., Chuang C.-C., Chang H.-M., Hsieh C.-H., Yeh C.-W., ... Tsai C.-Y. (2011): Three-dimensional reconstruction of brain-wide wiring networks in *Drosophila* at single-cell resolution. *Current Biology*, 21(1), 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.cub.2010.11.056>

Donahue C. J., Sotiropoulos S. N., Jbabdi S., Hernandez-Fernandez M., Behrens T. E., Dyrby T. B., Glasser M. F. (2016): Using diffusion tractography to predict cortical connection strength and distance: A quantitative comparison with tracers in the monkey. *Journal of Neuroscience*, 36(25), 6758–6770. <https://doi.org/10.1523/JNEUROSCI.0493-16.2016>

Dyrby T. B., Søgaard L. V., Parker G. J., Alexander D. C., Lind N. M., Baaré W. F. C., ... Jelsing J. (2007): Validation of in vitro probabilistic tractography. *NeuroImage*, 37(4), 1267–1277. <https://doi.org/10.1016/j.neuroimage.2007.06.022>

Ercsey-Ravasz M., Markov N. T., Lamy C., Van Essen D. C., Knoblauch K., Toroczkai Z., Kennedy H. (2013): A predictive network model of cerebral cortical connectivity based on a distance rule. *Neuron*, 80(1), 184–197. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2013.07.036>

Gămănuț R., Kennedy H., Toroczkai Z., Ercsey-Ravasz M., Van Essen D. C., Knoblauch K., Burkhalter A. (2018): The mouse cortical connectome, characterized by an ultra-dense cortical graph, maintains specificity by distinct connectivity profiles. *Neuron*, 97(3), 698–715.e10. <https://doi.org/10.1016/j.neuron.2017.12.037>

Horvát S., Gămănuț R., Ercsey-Ravasz M., Magrou L., Gămănuț B., Van Essen D. C., Knoblauch K., Knoblauch K., Toroczkai Z., Kennedy H. (2016): Spatial embedding and wiring cost constrain the functional layout of the cortical network of rodents and primates. *PLOS Biology*, 14(7), e1002512. <https://doi.org/10.1371/journal.pbio.1002512>

Ercsey-Ravasz M. (2025): Modelling and analyzing structural and functional brain networks. <https://www.youtube.com/watch?v=4ELm2yWE6cM>

Józsa M., Ercsey-Ravasz M., Lázár Z. I. (2024): Coarse-graining model reveals universal exponential scaling in axonal length distributions. *Journal of Physics: Complexity*, 5(3), 035012. <https://doi.org/10.1088/2632-072X/ad66a6>

Majka P., Chaplin T. A., Yu H.-H., Tolpygo A., Mitra P. P., Wójcik D. K., ... Rosa M. G. P. (2020): Open access resource for cellular-resolution analyses of corticocortical connectivity in the marmoset monkey. *Nature Communications*, 11, 1133. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-14995-2>

Markov N. T., Ercsey-Ravasz M., Lamy C., Ribeiro Gomes A. R., Magrou L., Misery P., Giroud P., Barone P., Dehay C., Toroczkai Z., Knoblauch K., Van Essen D. C., Kennedy H. (2013): The role of long-range connections on the specificity of the macaque interareal cortical network. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 110(13), 5187–5192. <https://doi.org/10.1073/pnas.1214124110>

Markov N. T., Ercsey-Ravasz M., Van Essen D. C., Knoblauch K., Toroczkai Z., Kennedy H. (2013): Cortical high-density counterstream architectures. *Science*, 342(6158), 1238406. <https://doi.org/10.1126/science.1238406>

Markov N. T., Misery P., Falchier A., Lamy C., Vezoli J., Quilodran R., Gariel M. A., Giroud P., Ercsey-Ravasz M., Pilaz L. J., Huissoud C., Barone P., Dehay C., Toroczkai Z., Van Essen D. C., Kennedy H., Knoblauch K. (2011): Weight consistency specifies regularities of macaque cortical networks. *Cerebral Cortex*, 21(6), 1254–1272. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhq201>

Markov N. T., Ercsey-Ravasz M. M., Ribeiro Gomes A. R., Lamy C., Magrou L., Vezoli J., Misery P., Falchier A., Quilodran R., Gariel M. A., Sallet J., Gămănuț R., Huissoud C., Clavagnier S., Giroud P., Sappey-Marinié D., Barone P., Dehay C., Toroczkai Z., ... Kennedy H. (2014): A weighted and directed interareal connectivity matrix for macaque cerebral cortex. *Cerebral Cortex*, 24(1), 17–36. <https://doi.org/10.1093/cercor/bhs270>

Matsliah A., Sterling A. R., Dorkenwald S., Kuehner K., Morey R., Seung H. S., Murthy M. (2023): Codex: connectome data explorer. <https://doi.org/10.1101/2023.02.24.529942>

Oh S. W., Harris J. A., Ng L., Winslow B., Cain N., Mihalas S., ... Zeng H. (2014): A mesoscale connectome of the mouse brain. *Nature*, 508(7495), 207–214. <https://doi.org/10.1038/nature13186>

Pósfai M., Szegegy B., Bačić I., Blagojević L., Abért M., Kertész J., Lovász L., Barabási A.-L. (2024): Impact of physicality on network structure. *Nature Physics*, 20(1), 142–149. <https://doi.org/10.1038/s41567-023-02267-1>

Scheffer L. K., Xu C. S., Januszewski M., Lu Z., Takemura S. Y., Hayworth K. J., ... Plaza S. M. (2020): A connectome and analysis of the adult *Drosophila* central brain. *eLife*, 9, e57443. <https://doi.org/10.7554/eLife.57443>

Watts D. J., Strogatz S. H. (1998): Collective dynamics of ‘small-world’ networks. *Nature*, 393(6684), 440–442. <https://doi.org/10.1038/30918>

White J. G., Southgate E., Thomson J. N., Brenner S. (1986): The structure of the nervous system of the nematode *Caenorhabditis elegans*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences*, 314(1165), 1–340. <https://doi.org/10.1098/rstb.1986.0056>

Zheng Z., Lauritzen J. S., Perlman E., Robinson C. G., Nichols M., Milkie D., Torrens O., Price J., Fisher C. B., Sharifi N., Calle-Schuler S. A., Kmecova L., Ali I. J., Karsh B., Trautman E. T., Bogovic J. A., Hanslovsky P., Jefferis G. S. X. E., Kazhdan M., ... Bock D. D. (2018): A complete electron microscopy volume of the brain of adult *Drosophila melanogaster*. *Cell*, 174(3), 730–743.e22. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2018.06.019>

Ercsey-Ravasz M., Varga L., (2024): Forradalmi kutatási eredmények az agy betegségeinek kimutatásában. <https://www.facebook.com/watch/?v=1035799618301312>

# 3D NYOMTATOTT ESZKÖZÖK HASZNÁLATA A MODERN SUGÁRTERÁPIÁS RÁKKEZELÉSBEN

Bálint Zoltán

Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Biomolekuláris Fizika Intézet, Kolozsvár, Románia

E-mail: zoltan.balint@ubbcluj.ro

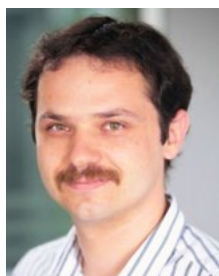
## 1. Bevezető

A sugárterápia a daganatos betegségek egyik leggyakrabban alkalmazott kezelési módja, amely ionizáló sugárzással pusztítja a daganatos sejteket. A rosszindulatú sejtek örökítő anyagának (DNS) károsításával a sugárzás sejthalált okoz, de közben a környező egészséges sejtek is érintettek. Az egészséges sejtek hatékonyabban javítják DNS-üket, így a sugárterápia inkább a daganatos szöveteket károsítja.

A sugárterápiát radikális vagy palliatív céllal alkalmazzák. Előbbi a daganat teljes megsemmisítésére, utóbbi a tünetek – például fájdalom vagy légzési nehézség – enyhítésére irányul. A két alkalmazási forma közötti különbséget az határozza meg, hogy milyen stádiumban van a betegség, és mi a várható terápiás eredmény [1]. A terápiás cél mindig az, hogy a sugárzás a megfelelő helyre, a megfelelő mélységbe jusson el, és ott a megfelelő dózisban fejtsen ki hatását. Ezt azonban számos fizikai kihívás nehezíti: az emberi test nem homogén közeg, a szövetek vastagsága és sűrűsége változik, a felszín domborulatai pedig befolyásolják a sugárzás eloszlását.

Kétféle stratégiát alkalmaznak: leggyakrabban külső sugárterápiát, ahol a sugárforrást a betegtől távol helyezik el, valamint brachyterápiát, amely során a radioaktív forrást közvetlenül a daganat belsejébe vagy annak közelébe helyezik [1, 2].

Sugárterápiás kezeléskor különböző segédeszközöket is alkalmaznak pl. a páciens pozicionálása érdekében az egyedi terápiás kezelésekkor, vagy az immobilizáláshoz (maszkok), valamint a pontosabb dózisbevétel és a szövődmények csökkentése érdekében. A bőr a sugárkezelés során gyakran mutat látható elváltozásokat; enyhébb esetekben bőrpír, súlyosabb esetekben hólyagosodás vagy akár szövetelhalás is jelentkezhet. Ezeket determinisztikus hatásoknak nevezik, mivel csak akkor jelentkeznek, ha az elnyelt dózis túllép egy küszöbértéket.



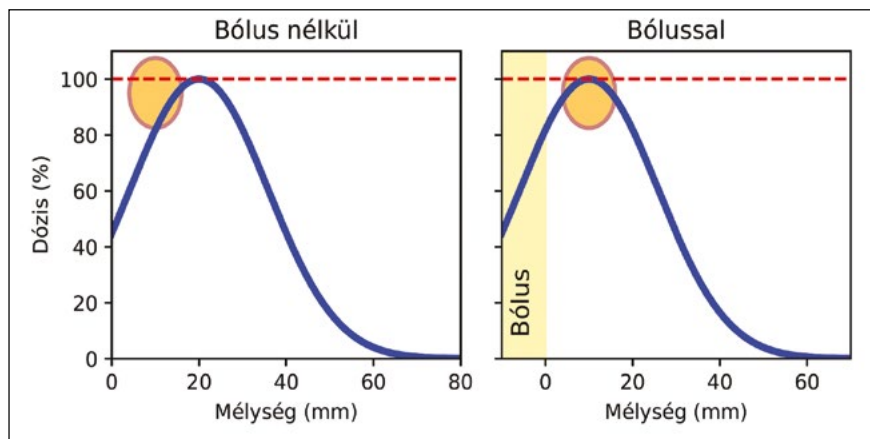
Bálint Zoltán a Babeş-Bolyai Tudományegyetemen orvosi fizikát és biofizikát oktat. Fő kutatási területe az intelligens algoritmusok és innovatív technológiák orvosi alkalmazása mind a képalkotó diagnosztika, mind pedig az általános adatelemzés terén. 2010 és 2016 között a grazi (Ausztria) „LBI for Lung Vascular Research” pulmonális hipertónia non-invazív diagnosztikájával foglalkozó kutatócsoportját vezette. 2016 és 2020 között az Európai Unió által finanszírozott „imATFIB” kutatási projekt multidiszciplináris csapatát vezette, a Kolozsvári Megyei Sürgősségi Kórház IMOGÉN kutatóintézetében. Jelenleg az orvosi képalkotás mesterséges intelligencia-alapú megoldásain dolgozik, valamint érdekli a 3D nyomtatott technológiák alkalmazása a sugárterápiában.

A kezelés hatékonyságát segíti egy speciális eszköz, a *bólus*, ami egy bőrre helyezett hőre lágyuló műanyag vagy gél alapú réteg. Ennek egyik fontos feladata, hogy a legnagyobb sugárdózis ne mélyen a testben, hanem közelebb a felszínhez adódjon le. Ez különösen akkor fontos, ha a daganat a bőr közelében van, vagy ha a felszíni szövetek egyenetlenségeit szeretnénk kiküszöbölni. Mivel a testünk nem lapos, a bőr kontúrja eltérések forrása lehet. Ezek az egyenetlenségek dóziseloszlásbeli eltéréseket okoznak, ezáltal a célzott területek dózisértékének alul- vagy túlbecslését okozza. A bólus egyenletesen osztja el a dózist a kezelt területen.

A lineáris gyorsítóval előállított sugárzás (LINAC) egy sugárterápiás lehetőség daganatos betegek számára, amelynek célja a lehető legmagasabb dózis leadása a daganatban, miközben a daganat közelében található egészséges sejtek dózisát minimalizálják. A dóziseloszlásnak pontosnak kell lennie a terápiás cél elérése érdekében. A mélységi dózisszázalék (PDD) és a dózisprofil két olyan változó, amelyet a LINAC használata előtt ellenőrizni kell. A PDD azt mutatja meg, hogy a különböző mélységekben leadott sugárdózis mekkora arányban viszonyul a referenciaértékhez – általában a bőr alatti dózismaximumhoz –, és olyan tényezők befolyásolják, mint a forrás és a felület közötti távolság, a mező mérete, a nyaláb energiája és a célterület elhelyezkedése.

Az 1. ábra kék görbéje azt mutatja, hogyan változik a mélységi dózisprofil a bólus jelenlétében. A bal oldali panel a bólus nélküli állapotot mutatja, míg a jobb oldali panelen a bólus használatával módosított dóziszgörbe látható. A daganatot a grafikonon mindkét esetben narancssárga ellipszis jelöli; ez a célzott sugárkezelés szempontjából kiemelt terület. A bólus nélküli esetben a sugárzás elnyelődése a testfelszínen kezdődik, és a dózismaximum jellemzően mélyebben, azaz a bőr alatti szövetekben alakul ki. Ez kedvezőtlen lehet, ha a célterület, például egy felszínhez közeli daganat, nem ott helyezkedik el, ahol a legnagyobb dózis adódik le. A bólus alkalmazása lehetővé teszi, hogy a dózismaximum közelebb kerüljön a felszínhez. A bólus anyagának sugárzáselnyelése hasonlít a lágy szövetekéhez. A dózisprofil ezért balra tolódik, és a legnagyobb dózis éppen ott jelentkezik, ahol a daganat található.

A sugárterápiában hagyományosan vizet, nedves gézt, paraffint, méhviaszt vagy vazelint használtak bólusként. Ezek olcsók és könnyen beszerezhetők, de korlátozottan illeszkednek a testfelszínhez, és nehéz őket pontosan formázni. Ezért folyamatosan új anyagokat



1. ábra. A mélységi dóziszprofil alakulása bólus nélkül (balra) és bólussal (jobbra)

lítják be a szimuláció során, ahogy a tényleges kezelések alatt is lesz – ehhez speciális asztalt, rögzítő-eszközöket és lézeres pozicionáló rendszert használnak [1, 2].

A szimuláció során a lézerek metszéspontját röntgenárnyékoló gyöngyökkel jelölik, amelyek láthatók a CT-felvételen. A vizsgálat elvégzése után a gyöngyöket eltávolítják, és helyükre kis pontokat tetoválnak. Ezek segítenek abban, hogy minden alkalommal ugyanazt a testhelyzetet lehessen viszszaállítani az ismételt kezelések során.

és technológiákat keresnek a jobb bólusok előállítására – itt merül fel a háromdimenziós (3D) nyomtatással előállított anyagok alkalmazása. A 3D nyomtatás egy olyan technika, amely digitális tervek alapján hoz létre meghatározott formájú valódi modelleket. Előnye nemcsak a személyre szabhatóság, hanem az is, hogy kevesebb anyagvesztéssel és jobb illeszkedéssel jár. Nem véletlen tehát, hogy az elmúlt másfél évtizedben meredeken nőtt az érdeklődés a 3D nyomtatott bólusok iránt. A témában publikált tudományos közlemények száma 2001-ben még csak 10 volt, 2024-re viszont 204-re nőtt. Ez jól mutatja, hogy a 3D nyomtatásban komoly lehetőségek rejlenek a sugárterápiás kezelések pontosságának és hatékonyságának növelésére [3, 4, 10, 11].

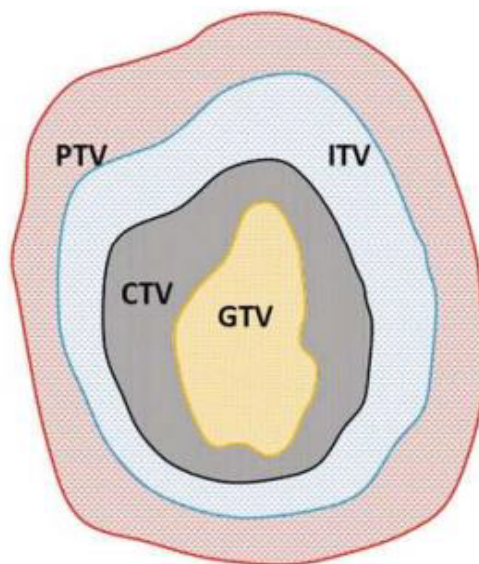
A jelen cikk célja, hogy bemutassa, miként illeszkedik ez a modern technológia a sugárterápia gyakorlatába, és milyen fizikai elveken alapul a működése.

## 2. Hogyan tervezik meg a sugárkezelést?

Ahhoz, hogy a sugárterápia hatékony és biztonságos legyen, alapos tervezésre van szükség. A cél az, hogy az előírt dózismennyiség pontosan a daganatos szövetbe jusson, miközben a környező egészséges szerveket a lehető legjobban megkíméljük. A folyamat során több lépés egymásra épül: a diagnosztikai képalkotástól a kezelési terv összeállításán át egészen a tényleges sugárkezelésig.

A kezelés megtervezése jellemzően képalkotó vizsgálatokkal kezdődik. A daganat helyének és méretének azonosítására korszerű diagnosztikus képalkotó eljárásokat használnak – például mágneses rezonancián alapuló képalkotást (MRI), a pozitronemissziós tomográfiát (PET) vagy kontrasztos komputertomográfiát (CT). A diagnosztikai CT-t az állapot általános felmérésére használják, míg a tényleges kezelés előtt, a sugárterápiás kezelés szimulációs szakaszában a CT-szimulátor következik. A CT-felvételek alapján digitális háromdimenziós modellt készítenek a beteg testéről, amelyet az orvosi fizikusok használnak a kezelés modellezéséhez és a dózisgörbék meghatározásához. A beteg testhelyzetét úgy ál-

A következő lépés a besugárzandó célterület kijelölése. A klinikai céltérfogat (clinical target volume – CTV, 2. ábra) olyan anatómiai szövettérfogat, amely egyrészt magában foglalja a képalkotó eljárásokkal egyértelműen kimutatható makroszkopikus daganatot, azaz a tumortérfogatot (gross tumour volume – GTV), másrészt tartalmazza azokat a területeket is, amelyekben feltételezhetően mikroszkopikus kiterjedésű, nem látható daganatsejtek lehetnek jelen. Ezeket a betegségtérfogatot is célba kell venni és megfelelően kezelni annak érdekében, hogy a sugárterápia végső célját – vagyis a daganatos betegség teljes megszüntetését, illetve kontrollálását – sikeresen el lehessen érni. A CTV kijelölése különösen összetett és kihívást jelentő feladat, ezért klinikai szakértelmet és tapasztalatot igényel, amely gyakran előzetes adatsorokon, korábbi klinikai vizsgálatokon és betegcsoportok hosszú távú megfigyelésén alapul. Az orvosok és fizikusok ezek alapján következtetnek arra, hogy a daganat által érintett primer területen kívül mely szövetek



2. ábra. ICRU (International Commission on Radiation Unit and Measurements – A Sugárzási Egységek és Mérések Nemzetközi Bizottsága) által definiált térfogatok [1]

lehetnek potenciálisan érintettek, és ezeket a területeket is belefoglalják a kezelési térfogatba.

Végül a tervezési céltérfogat (planning target volume – PTV) már nem anatómiai, hanem egy biztonsági tartalékot tartalmazó zóna. Figyelembe veszi a beteg napi pozicionálásának változásait, a beteg esetleges mozgásait, például légzést vagy a belső szervek elmozdulását (internal target volume – ITV), valamint a besugárzási technológia működéséből eredő pontatlanságokat és biztosítja, hogy a sugárzás ezek ellenére is a megfelelő helyre jusson. Fontos megjegyezni, hogy míg a GTV és a CTV közvetlenül a beteg anatómiai viszonyaihoz, szöveteihez kapcsolódik, addig a PTV már nem anatómiai, hanem geometriai jellegű meghatározás.

A szimuláció és a besugárzási terv elkészítése során a fizikai szempontok kulcsszerepet kapnak. A sugárzás nem áll meg egy adott ponton, hanem elnyelődik az anyagban – a pontos céltérfogat kijelölésekor tehát ismerni kell a szövetek sugárfizikai tulajdonságait, sűrűségét, elnyelési karakterisztikáját. A modern tervezőszoftverek ezeket az adatokat felhasználva modellezik, hogyan oszlik el a sugárdózis a testben, és hogy a különböző szövetek mekkora sugárterhelést kapnak.

Miután a céltérfogatot meghatározták, elkészül a konkrét kezelési terv. Ez tartalmazza a leadandó összdózt, annak frakcionálását (azaz több kisebb adagban való beadását), valamint a besugárzás technikáját. A sugárzási mezőket és a sugárnyalábok irányát úgy választják meg, hogy a daganat lehetőleg teljes dózist kapjon, miközben a környező egészséges szervek csak minimálisat. Az optimális elrendezés megtalálása mérnöki pontosságot igényel, a legjobb hatást gyakran több irányból érkező nyaláb kombinációjával lehet elérni. Ezért is van fontos szerepe az orvosi fizikusnak a sugártervezésben.

A sugárkezelés előtt minden tervet többszörösen ellenőriznek a protokollok és irányelvek szerint. A kezelést a megállapított terv szerint alkalmazzák, és időnként képalkotással is visszaellenőrzik, hogy a sugárzás valóban a megfelelő területre irányul-e. A beteg pozíciójának és a dózis beadásának időszakos ellenőrzése segít fenntartani a kezelés hatékonyságát, és csökkenti az egészséges szövetekre gyakorolt mellékhatások kockázatát [1, 2].

### 3. 3D nyomtatott eszközök használata a sugárterápiában

A sugárterápia hatékonysága azon múlik, hogy a sugárzás ott és akkor fejt-e ki hatását, ahol valóban szükség van rá – vagyis a daganatban, nem a környező egészséges szövetekben. Ehhez azonban sok esetben fizikai korrekciókra van szükség. A testfelszín szabálytalan lehet, a daganat elhelyezkedése változó, és a sugárzás energiája nem mindig ott adódik le, ahol szükséges lenne. Ilyen esetekben a bólus alkalmazása elengedhetetlen lehet. Ahogy azt korábban láttuk, használatával biztosítani le-

het, hogy a legnagyobb dózis a felszínhez közelebb, a célterületen adódjon le. A nemzetközi klinikai irányelvek a bólus használatát javasolják, ha a daganat a bőrhez közel, például a mellkasfalon vagy a nyakon található.

A bólus emellett segíthet kiegyenlíteni a testfelszín egyenetlenségeit, és pontosabb dóziseloszlást biztosít. A hagyományos bólusok alatt azonban levegő csapdázódhat, ami befolyásolhatja a kezelés hatékonyságát. A sugárterápiában a légrések a célterület aluldozírozásához vezethetnek, különösen felületi daganatok esetén. A levegő alacsony sűrűsége miatt a sugárzás kevesebb energiát ad le ebben a tartományban, így a dózismaximum mélyebbre tolódik, és nem a kívánt helyen adódik le, ami nem megfelelő daganatkontrollt és fokozott kiújulási kockázatot eredményez. Az optimális kezelési eredmények érdekében tehát nemcsak a bólus alkalmazása, hanem annak pontos illesztése és a légrések kiküszöbölése is elengedhetetlen.

A 3D nyomtatási technológia optimális megoldást kínál erre a problémára. Segítségével akár az is lehetővé válik, hogy minden betegnek egyedi, digitális modell alapján készítsenek bólust, amely pontosan követi a test kontúráját. A 3D nyomtatott bólusok ígéretesnek bizonyultak a megfelelő terápiás dózis célba juttatásában, a bőr és a bólus közötti érintkezés javításában és a kezeléstervezés egyszerűsítésében. Például a hálós szerkezetű bólusoknak minimális hatásuk van a mélységi dózisprofilokra, de növelik a felszíni dózist, egyszerűsítve a kezeléstervezést. Wang és munkatársai [5] kutatása hangsúlyozza a megfelelő bólusanyagok kiválasztásának fontosságát az elektronnyalábos sugárterápiában a mélységi szövetek védelme érdekében. Ugyanakkor továbbra is kihívást jelent a bólus pontos illesztése és a légrések minimalizálása. A 3D nyomtatási technológia fejlődése, valamint az anyagok és gyártási folyamatok egyre jobb integrációja segíthet áthidalni ezeket a korlátokat, és lehetővé teheti a 3D nyomtatott bólusok széleskörűbb alkalmazását a sugárterápiában.

A sugárterápiás kezelések során többféle anyagot használnak a dóziseloszlás optimalizálására. Ezek közé tartoznak a kompenzátorok, amelyek nagy csillapítású anyagokból készülnek, és a sugárnyaláb intenzitásának beállítására szolgálnak. Fontos, hogy ne növeljék a felszíni dózist, miközben lehetővé teszik a kívánt eloszlás elérését a mélyebb rétegekben. A kompenzátorok anyaga lehet szövetekhez hasonló tulajdonságú kompozit, de alkalmaznak fémeket (pl. ólom, volfrám) és különböző polimereket is. A szövetekhez hasonló anyagokat előnyben részesítik, mert jobban modellezik az emberi test sugárfizikai viselkedését. A fémek hatékonyan csillapítanak, de súlyosak, nehezen formázhatók és potenciálisan veszélyesek. Ezért a kompenzátor anyagválasztásnál egyensúlyt kell találni a teljesítmény, a biztonság és a költségek között (1. táblázat).

A kompenzátorokat rendszerint minden beteghez és nyalábkonfigurációhoz egyedileg gyártják. Minden esetben fontos, hogy az eszköz precízen illeszkedjen, és ne

| Anyag                       | Összetevők                                        | Felhasználás                                                                                     | FDA/EMA-engedély                                                                                                         |
|-----------------------------|---------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Szövethegyettesítő műgyanta | Paraffinviasz adalékanyagokkal keverve            | Elektronnyaláb-kompenzátorokhoz használják a szöveti csillapítás utánpótlására.                  | Egyedi megoldások az egyes betegek számára; az engedélyezés a klinikai felhasználástól és a gyártási szabványoktól függ. |
| Poliakril (PMMA)            | Polimetil-metakrilát                              | Fotonnyaláb-kompenzátorokhoz használják; könnyű és könnyen formázható.                           | Az FDA által jóváhagyott PMMA-alapú kompenzátorok sugárterápiás alkalmazásokhoz.                                         |
| Réz vagy sárgaréz           | Fémötvözetek                                      | Nagy energiájú fotonnyalábokhoz használják nagy sűrűségük és csillapításuk miatt.                | Az FDA, EMA által jóváhagyott sárgaréz kompenzátorok specifikus sugárterápiás rendszerekhez.                             |
| 3D nyomtatott poli-merek    | Biokompatibilis műgyanta vagy hőre táguló műanyag | Egyedi kompenzátorok a betegspecifikus dózismodulációhoz.                                        | Az FDA által jóváhagyott 3D nyomtatott bólusok és kompenzátorok sugárterápiához.                                         |
| Ólom                        | Ólom vagy ólomötvözetek                           | Régebben fotonnyaláb csillapítására használták, de toxicitása miatt ma már ritkábban fordul elő. | Korlátozott használat; szigorú felügyeletet, és jóváhagyást igényel.                                                     |

okozzon nem kívánt dózisemelkedést a felszíni rétegekben.

Egy másik fontos eszköz az ék, amelyet a LINAC kezelőfejére helyeznek. Ezek nagy csillapításúak, és az izodózisvonalak eloszlásának módosítására szolgálnak. A modern lineáris gyorsítók dinamikus ékeket használnak, amelyek a fizikai ékhez hasonlóan csökkentik a dózist. Ha a testkontúr túl szabálytalan, és az ékek nem elegendőek a kívánt eloszlás eléréséhez, akkor bólust használnak kiegészítésként [6].

A bólusok 3D nyomtatásához használt anyagok kiválasztása szintén fizikai kérdés: a bólusnak a szövetekhez hasonló elnyelési tulajdonságokkal kell rendelkeznie, miközben mechanikailag rugalmasnak és a nyomtatás szempontjából is kezelhetőnek kell lennie. Ez számos tényezővel számszerűsíthető, például az anyagok szerkezeti tulajdonságaival, a kémiai szerkezetük sugárzás hatására bekövetkező változásaival vagy az adalékanyagok használatával a 3D nyomtatás alapanyagául szolgáló filament gyártási folyamatai során, amelyek hatással vannak a biokompatibilitásra. A 3D nyomtatott anyagok, például a politejsav (PLA), a hőre lágyuló poliuretán (TPU) és a műgyanta biokompatibilitásával kapcsolatos kutatások kimutatták, hogy alkalmasak sugárterápiás alkalmazásokhoz. A PLA alkalmas sugárterápiás eszközök 3D nyomtatására, mivel dozimetriai szempontból hasonló elnyelési tulajdonságokat mutat, mint a lágy emberi szövetek. A TPU-t jó szakadás- és kopásállósága miatt használják betegspecifikus rögzítőeszközökhöz. A PLA és a TPU a klinikai követelményektől függően lehetőséget kínál a merevség és a rugalmasság optimalizálására. Ezen kí-

vül a gyantaanyagok nagy felbontást és sima felületeket biztosítanak a precíz modellekhez.

A sugárterápiában használt 3D nyomtatott bólusok alapanyagául szolgáló filamentek kiválasztásánál több fizikai és technológiai szempontot is figyelembe kell venni. A filamentnek kellően szilárdnak kell lennie ahhoz, hogy ellenálljon a nyomtatás és a kezelések során fellépő mechanikai terhelésnek, ugyanakkor rugalmasnak is, hogy jól illeszkedjen a beteg testének egyenetlen felszínéhez. Egyes anyagok viszkoeelasztikus tulajdonságai előnyt jelentenek: ezek a szálak nyomás hatására képesek alakot változtatni, majd visszanyerni eredeti formájukat, ami pontosabb felszíni illeszkedést tesz lehetővé.

Emellett fontos követelmény a jó nyomtathatóság, ami azt jelenti, hogy az anyag alkalmas kell legyen a 3D nyomtatás finom részletgazdagságot igénylő folyamataihoz. Sugárfizikai szempontból a bólusanyagoknak olyan elnyelési tulajdonságokkal kell rendelkezniük, amelyek lehetővé teszik a kívánt felszíni dóziseloszlás kialakítását. Végül, mivel ezek az eszközök közvetlenül érintkeznek a bőrrel, elengedhetetlen a megfelelő biokompatibilitás is, hogy elkerülhető legyen az irritáció vagy egyéb nem kívánt biológiai reakció.

A polimereken alapuló 3D nyomtatott bólusok használata modern megoldásként jelent meg a sugárterápia területén. A polimerek egyedi fizikai tulajdonságokkal rendelkeznek, mint például a szívósság, a rugalmasság és a viszkoeelaszticitás, amelyek alkalmasabbá teszik ezeket a modern bólusok előállítására.

A 3D nyomtatás többféle technológiát használ, eltérő működési elvekkel és alkalmazásokkal. Ezek közül a sugárterápiás alkalmazásokhoz – például bólusgyártás-

ra – csak néhány eljárás bizonyult alkalmasnak [8, 9]. Az egyik legelterjedtebb módszer az anyagextrudálás (material extrusion), azon belül is az olvasztott leválasztási modellezés (FDM – fused deposition modeling), ahol hőre lágyuló műanyag szálakat – például PLA-t vagy TPU-t – olvasztanak meg és helyeznek el rétegről rétegre. Ez a megoldás költséghatékony, gyors, és jól alkalmazható egyedi, páciensspecifikus bólusok előállítására. Egy másik, szintén gyakori technológia a fotopolimerizáció (például SLA vagy DLP), ahol folyékony műgyantát keményítenek meg rétegenként UV fény segítségével. Ez a módszer kiváló felületi minőséget és részletgazdagságot biztosít, így precíz illeszkedésű bólusok gyártására is alkalmas.

Bár számos más 3D nyomtatási technológia is létezik (pl. anyagszórás, porágyas fúzió, kötőanyagszórás vagy lemezlaminálás), ezek ritkán alkalmazhatók bólus készítésére, mivel az anyagaik, költségeik vagy technológiai igényeik nem felelnek meg a klinikai követelményeknek.

A 3D nyomtatási technológia új távlatokat nyitott a sugárterápiában azáltal, hogy lehetővé tette a betegspecifikus bólusanyagok és rögzítőeszközök előállítását. Ezek az eszközök javítják a kezelések pontosságát és a pozicionálás stabilitását. Fontos ugyanakkor megjegyezni, hogy a 3D nyomtatott bólusok alkalmazásának vannak korlátai is. Egyes anyagok lebomlási jellemzői nem elég jól kontrollálhatók, előfordulhat immunválasz vagy nem megfelelő mechanikai viselkedés. Ezért gondosan mérlegelni kell az anyagok és a gyártási technikák kiválasztását, hogy biztosítsuk a 3D nyomtatott bólus biztonságosságát és hatékonyságát a sugárterápiában.

Saját kutatási eredményeink is azt mutatják [10, 11], hogy a 3D nyomtatott bólusanyagok életképes alternatívát kínálnak a hagyományos anyagokkal szemben, de a szabványosítás és a klinikai alkalmazás továbbra is kihívást jelent. Az első tanulmányunk a 3D nyomtatott anyagok dozimetriai tulajdonságait vizsgálta, amelyek közül a PLA lett a legjobb jelölt a kedvező dóziszfelhalmozódása és homogenitása miatt. A második validáció során a hőre lágyuló műanyag az eddig használt bólusokhoz képest kiváló anatómiai illeszkedést mutatott, minimalizálva a légresek és javítva az elnyelt dózist.

A 3D nyomtatott bólusoknak a klinikai rutinyakorlatba való integrálása azonban megköveteli a munkafolyamatok optimalizálását, a költséghatékonysági elemzéseket és a szilárd minőségellenőrzési eljárásokat.

A klinikai alkalmazás követi a technológiai fejlődést, így hamarosan a valós idejű légzésmonitorozás, a háromdimenziós pácienspozicionáló kamerarendszer és az intelligens algoritmusok használata mellett [12] a 3D nyomtatóval készült eszközök is segíthetik a terápia pontosságát és ezáltal a páciensek életminőségének javulását.

Ez már túlmutat a klasszikus orvosi eszközök világán: a fizika, informatika és anyagtudomány határterületén járunk, ahol a precizitás közvetlen hatással van a betegek életminőségére.

\* \* \*

**Munkatársak:** *Cristina Gheară*, orvosi fizikus, Kolozsvári Rákkutató Intézet – PhD-hallgató, BBTE Fizika Doktori Iskola; *Ghizela Sălăgean*, orvosi fizikus, Marosvásárhelyi Sugárkezelési Központ – PhD-hallgató, BBTE Fizika Doktori Iskola; *Andreea Ciobanu*, orvosi fizikus, Ovidius Kórház, Konstanca – PhD-hallgató, BBTE Fizika Doktori Iskola; *Bugar Oana*, magiszteri hallgató, orvosi fizika és biofizika szak, BBTE Fizika Kar.

## Irodalom

- Hussain A. Muhammad W. (2017): Treatment planning in radiation therapy. *Biological and Medical Physics, Biomedical Engineering*, 63–129. DOI: 10.1007/978-3-319-61540-0\_4
- Bugar Oana (2025): Szakdolgozat, BBTE, Fizika Kar
- Andreea Ciobanu (2025): PhD-értekezés, BBTE, Fizika Doktori Iskola
- Ghizela Sălăgean (2025): PhD-értekezés, BBTE, Fizika Doktori Iskola
- Wang X., Wang X., Xiang Z., Zeng Y., Liu F., Shao B., He T., Ma J., Yu S., Liu L. (2021): The clinical application of 3D-printed boluses in superficial tumor radiotherapy. *Frontiers in Oncology*, 11. <https://doi.org/10.3389/fonc.2021.698773>
- <https://www.orfit.com/radiation-oncology/blog/thermoplastic-bolus-for-targeted-radiotherapy>
- McGarry C. K., Tonino Baldion A., Burnley J., Byrne N., Doolan P. J., Jenkins R., Jones E., Jones M. R., Marshall H. L., Milliken F., Sands G., Woolliams P., Wright T., Clark C. H. (2025): IPEM topical report: Guidance on 3D printing in radiotherapy. *Physics in Medicine & Biology*, 70(4), 04TR01. <https://doi.org/10.1088/1361-6560/ada518>
- Suta Márton, Beres Monika, Csámer Loránd, Csík Attila, Hegedüs Csaba (2022): Polyjet és SLA 3D nyomtatók összehasonlító vizsgálata. *Fogorvosi Szemle*, 115, 64–68. 10.33891/FSZ.114.2.64-68
- Csehi Bálint, Bihari Zoltán (2021): FDM/FLM/FFF 3D nyomtatók típusainak összehasonlítása. *Multidiszciplináris tudományok*, 11. 64–69. 10.35925/j.multi.2021.3.8
- Ciobanu A. C., Petcu L. C., Járai-Szabó F., Bálint Z. (2025): Validation of a 3D printed bolus for radiotherapy: A proof-of-concept study. *Biomedical Physics & Engineering Express*, 11(2), 10.1088/2057-1976/adb15d. <https://doi.org/10.1088/2057-1976/adb15d>
- Ciobanu A. C., Petcu L. C., Járai-Szabó F., Bálint Z. (2024): Exploring the impact of filament density on the responsiveness of 3D-printed bolus materials for high-energy photon radiotherapy. *Phys. Med.*, 127, 104849. DOI: 10.1016/j.ejmp.2024.104849. Epub 2024 Nov 1. PMID: 39488128.
- Nakamura M., Mizowaki T. (2024): Applications of artificial intelligence for machine and patient-specific quality assurance in radiation therapy: Current status and future. *Journal of Radiation Research*, 65(4), 421–432. DOI: 10.1093/jrr/rrae038. <https://academic.oup.com/jrr/article/65/4/421/7668341>

# fizikaiszemle.eft.hu

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

# BIOAKTÍV ÜVEGEK *IN VITRO* BIOAKTIVITÁSA

Magyari Klára<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Interdiszciplináris Bio-Nano Tudományok Kutatóintézet, Kolozsvár, Románia

<sup>2</sup>Babeş–Bolyai Tudományegyetem, INSPIRE Kutatási Platform, Kolozsvár, Románia

E-mail: klara.magyari@ubbcluj.ro

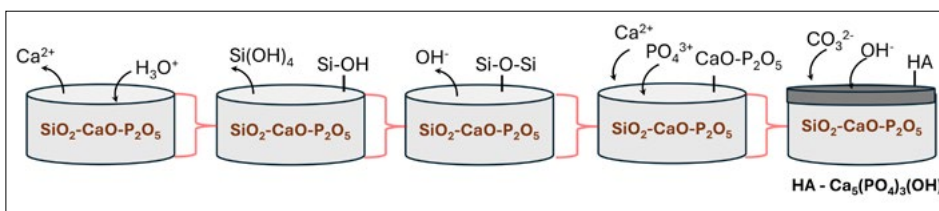
A bioaktív anyagok első úttörője Larry L. Hench volt, aki 1969-ben megalkotta az első  $45\text{SiO}_2\cdot 24.5\text{Na}_2\text{O}\cdot 24.5\text{CaO}\cdot 6\text{P}_2\text{O}_5$  (m/m%) összetételű bioaktív üveget, melyet 45S5 Bioglass® néven szabadalmaztatott [1]. Az anekdota szerint Hench egy anyagtudományi konferencia kitérőjén szóba elegyedett egy, a vietnámi háborúból hazatért amerikai ezredessel, aki a háborúból hazatérő katonák végtagproblémáira hívta fel a figyelmét. Az akkor rendelkezésre álló fém- és polimeralapú anyagok bioinertek voltak. A bioinert anyagok előnye, hogy a szervezet elfogadja őket, nem jelentkezik idegentest-reakció, de hátrányuk, hogy kémiai kötést sem alakítanak ki a szervezetet alkotó szövetekkel [2]. Felismerve ezt a hiányosságot, Hench egy olyan anyagot keresett, mely képes regenerálni a csontszövetet úgy, hogy pozitív válaszreakciót képes kiváltani a csontszövetből.

A Hench által létrehozott bioaktív üvegek esetén biológiai környezetben az anyag felületén egy apatitréteg alakul ki. Ezen apatitrétegen keresztül kémiai kötés jön létre az anyag és a csontszövet között. Az üveg tehát kedvező válaszreakciót vált ki a csontszövetből, mely tulajdonság megfelelt a bioaktivitásnak. Definíció szerint egy anyag akkor tekinthető bioaktívnak, ha képes kedvező választ vagy aktivitást kiváltani egy biológiai szervezet bármely részéből. Az évek során a bioaktivitás fogalma a bioanyagok esetén szinte teljesen azonosult a bioaktív anyagok apatitréteg-növesztő képességével, kiszorítva az eredeti meghatározást. A továbbiakban a bioaktivitás ezen szűk részére szorítkozunk.

Az *in vitro* bioaktivitás vizsgálatát Tadashi Kokubo [3] szabványosította a szimulált testfolyadék (SBF, simu-

lated body fluid) bevezetésével. Az SBF egy sejtnélküli, fehérjementes, túltelített kalcium-foszfát-oldat, amelynek ionösszetétele közel megegyezik az emberi vérplazmáéval, amely fiziológiás körülmények között (pH 7,4 és 36,5 °C) pufferelt. Az eljárás szerint, ha a bioanyagot meghatározott időn keresztül 37 °C hőmérsékleten tartva SBF-ben áztatjuk, akkor a felületén hidroxilapatit-(HA-) réteg keletkezik. Szilíciumalapú üvegek esetén a HA-réteg kialakulása a következő lépésekben megy végbe (1. ábra):

- Az első szakaszban az üvegből származó  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  vagy  $\text{Ca}^{2+}$  ionok kicserélődnek az oldatból származó  $\text{H}^+$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$  ionokkal. A kioldódott ionok az üveg összetételétől függenek. Maria Vallet-Regi és munkatársai [4] kimutatták, hogy a  $\text{SiO}_2$ -CaO bináris üvegrendszerekben az oldat kalciumtartalma az első órákban növekszik, ami a Si–O–Ca csoportok hidrolízisének eredménye.
- A második szakaszban létrejön a szilanizáció, vagyis az oldható szilícium-dioxid  $\text{Si}(\text{OH})_4$  formájában kioldódik. Ez a Si–O–Si kötések felszakadásával jár, ami az üvegben szilanol (Si–OH) létrejöttét eredményezi.
- A harmadik szakaszban Si–O–Si kötések alakulnak ki a  $\text{SiO}_2$  kondenzációjának és újrapolimerizációjának következtében.
- A negyedik szakaszban a  $\text{Ca}^{2+}$  és  $\text{PO}_4^{3-}$  ionok a szilícium-dioxidban gazdag rétegbe migrálnak, ami következtében kialakul egy amorf kalcium-foszfát-réteg.
- Az utolsó szakaszban a kalcium-foszfát-rétegbe  $\text{CO}_3^{2-}$  és  $\text{OH}^-$  ionok épülnek be kialakítva a kristályos HA-réteget.

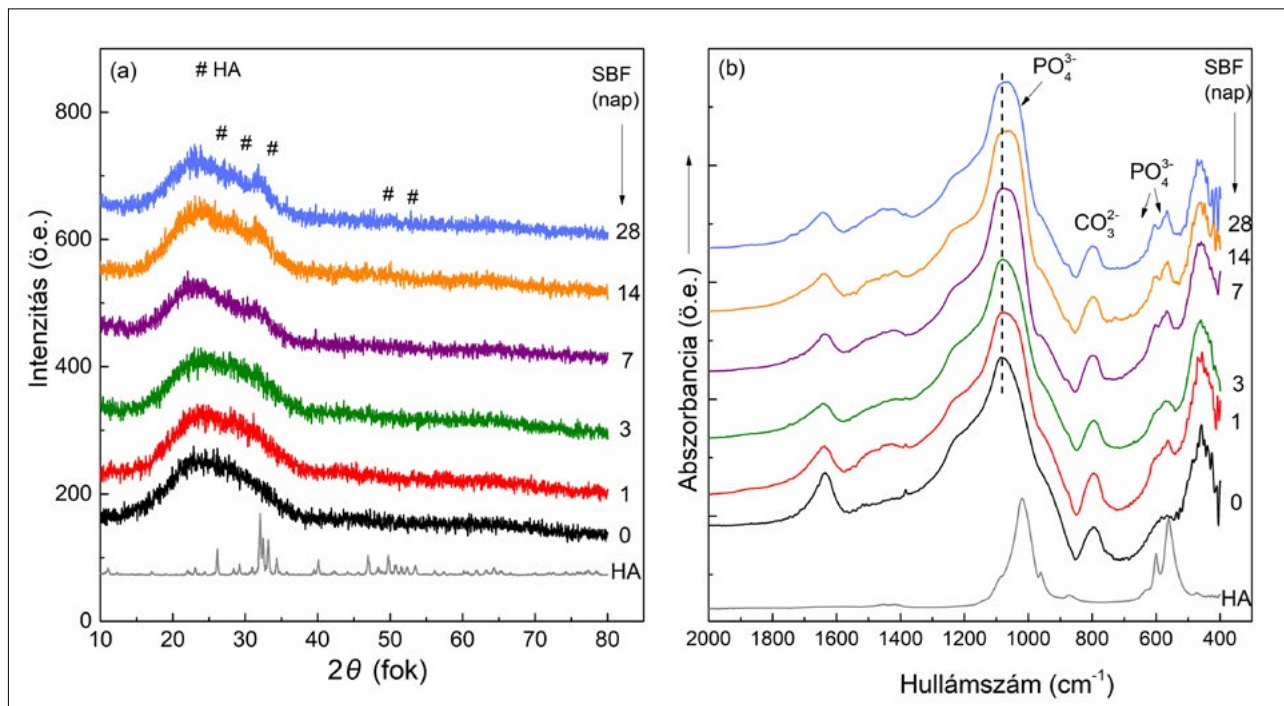


1. ábra. Az *in vitro* bioaktivitás lépései sziliká alapú üveg esetén



Magyari Klára a kolozsvári BBTE Interdiszciplináris Bio-Nano Tudományok Intézetének tudományos főmunkatársa. Fizikusdiplomát a kolozsvári BBTE Fizika Karán szerzett, majd ugyanitt a biofizika és orvosi fizika szakon MSc-oklevelet. Doktori tanulmányait is itt végezte, 2009-ben szerzett PhD-fokozatot. Két alkalommal is elnyerte a UEFISCDI „Fiatal csapat” pályázatát, egy alkalommal a UEFISCDI „Demonstrációs kísérleti projekt” pályázatát. 2019-ben az MTA Bolyai Ösztöndíjban részesült. Kutatási területe az anyagtudomány, azon belül a bioanyagok kutatása.

A bioaktív üveg felületén az apatitképződést az SBF-ben való áztatás után röntgendiffrakciós felvételekkel (XRD) és Fourier-transzformációs infravörös (FT-IR) spektrumok segítségével követhetjük nyomon (2. ábra). Ennek bemutatására a  $70\text{SiO}_2\cdot 26\text{CaO}\cdot 4\text{P}_2\text{O}_5$  (mol%) összetételű bioaktív üveget választottuk, melyet SBF-ben áztattunk 37 °C hőmérsékleten, statikus körülmények között. 28 napos áztatás után a rögzített XRD-felvételen már jól kivehetőek a HA kristályos fázisának reflexiói,



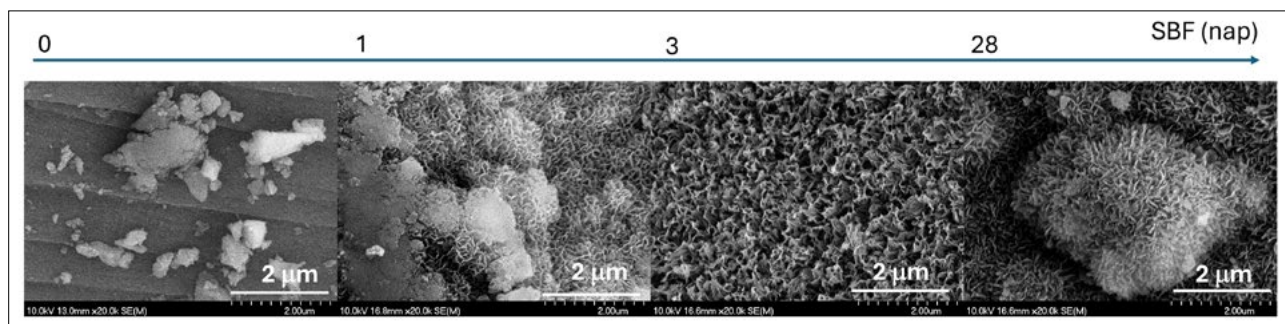
2. ábra. A  $70\text{SiO}_2\cdot 26\text{CaO}\cdot 4\text{P}_2\text{O}_5$  (mol%) összetételű bioaktív üveg röntgendiffrakciós felvételei (a) és FT-IR-spektrumai (b) az SBF-be való áztatás előtt és 1, 3, 7, 14, 28 nap áztatás után. Az áztatás  $37^\circ\text{C}$  hőmérsékleten történt, statikus körülmények között. Összehasonlítási célból a hidroxiapatit (HA) röntgendiffrakciós felvételét és FT-IR-spektrumát is feltüntettük

melyek  $2\theta = 25,9^\circ$ ,  $28,3^\circ$  és  $31,6^\circ$  értékeknél figyelhetőek meg (2a. ábra). A reflexiók intenzitásának növekedése az áztatási idő múlásával jól mutatja a kristályosodás időbeli kialakulását. Az FT-IR-spektrumok esetén a SBF-ben való áztatást követően  $604$  és  $564\text{ cm}^{-1}$  hullámszámnál egy dublett figyelhető meg a P–O deformációs rezgésének következményeként, mely jellemző a kristályos HA-ra (2b. ábra). Ha a dublett intenzitását összehasonlítjuk a  $465\text{ cm}^{-1}$  hullámszámnál megjelenő, a Si–O–Si deformációs rezgésre jellemző spektrumvonal intenzitásával, akkor jól kivehető a dublett intenzitásának növekedése. Ez is igazolja a kristályosodási folyamat időbeli változását.

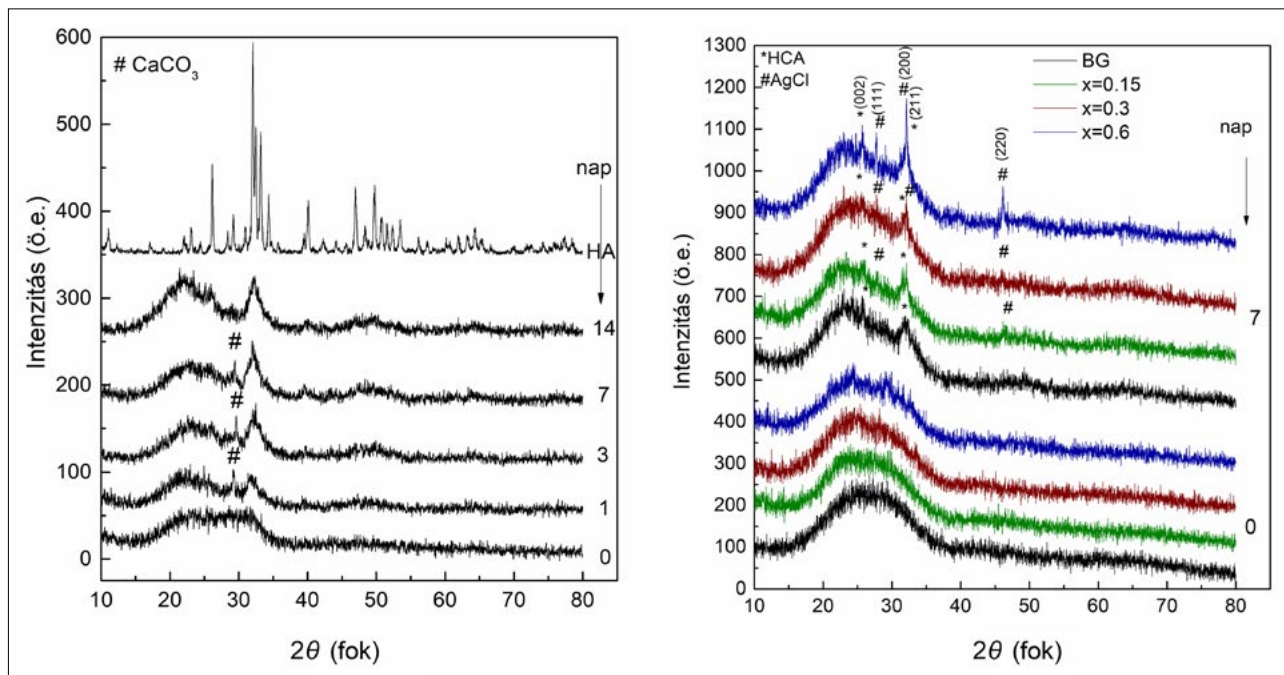
Az üvegfelületen kialakuló HA-réteg struktúrájának időbeli változása jól megfigyelhető pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételek készítésével (3. ábra). Az áztatás után a  $70\text{SiO}_2\cdot 26\text{CaO}\cdot 4\text{P}_2\text{O}_5$  (mol%) bioaktív üveg felületén képződött ásványi réteg apró apatit nano-

rudakkal rendelkező tipikus szerkezete látható, melyek pehely vagy karfiolszerű klasztereket formálnak. Összehasonlítva a nanorudak méretét 1 és 3 nap áztatás után, jól megfigyelhető a rudak méretbeli változása.

Érdeemes megjegyezni, hogy miután az üvegeket testnedvekbe merítjük, az apatitrétegen kívül más kémiai vegyületek is megjelenhetnek, annak függvényében, hogy a bioanyag milyen kémiai elemeket tartalmaz. Például kalcit ( $\text{CaCO}_3$ ) képződhet, ha az üveg viszonylag nagy mennyiségű kalcium-oxidot tartalmaz (4a. ábra) [5], míg ezüst-klorid ( $\text{AgCl}$ ) jelenik meg ezüst tartalmú üveg esetén (4b. ábra) [6]. Magasabb ezüsttartalmú üvegek ( $60\text{SiO}_2\cdot 31,4\text{CaO}\cdot 8\text{P}_2\text{O}_5\cdot 0,6\text{Ag}_2\text{O}$  mol%) esetén az  $\text{AgCl}$  kialakulása Dulbecco-módosított Eagle-táptalajban (DMEM), valamint Mueller–Hinton táptalajban (MHB) is észlelhető már 1 napos áztatás után. A DMEM a sejtek tenyésztésére használt táptalaj, melyet a bioanyagok *in vitro* citotoxicitásvizsgálata esetén is hasz-



3. ábra. A  $70\text{SiO}_2\cdot 26\text{CaO}\cdot 4\text{P}_2\text{O}_5$  (mol%) bioaktív üveg pásztázó elektronmikroszkópos (SEM) felvételei SBF-be való merítés előtt és 1, 7, 3 és 28 nap áztatás után



4. ábra. A BG (bioaktív üveg,  $60\text{SiO}_2\text{-}32\text{CaO}\cdot 8\text{P}_2\text{O}_5$ , mol%) [5] (a), valamint BG- $x\text{Ag}_2\text{O}$  ( $60\text{SiO}_2\text{-(}32-x\text{)CaO}\cdot 8\text{P}_2\text{O}_5\cdot x\text{Ag}_2\text{O}$ , mol%) [6] (b) röntgendiffrakciós mintázata SBF-be való merítés előtt és után (a John Wiley & Sons és az Elsevier Publishing kiadók engedélyével felhasznált ábrák)

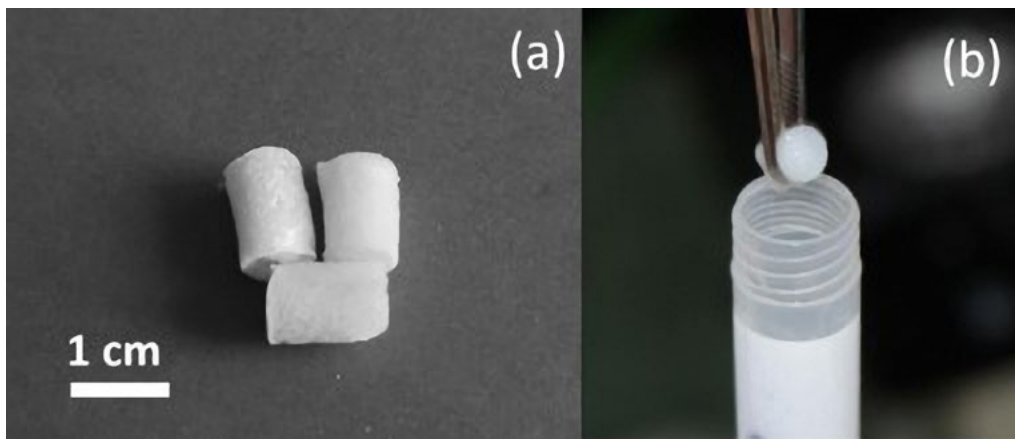
nálnak. Az MHB a baktériumok tenyésztésére használt táptalaj, melyben az anyag esetleges antibakteriális hatását vizsgálják. Az SBF-ben való áztatás során az AgCl jóval kevesebb ezüstöt tartalmazó üveg ( $60\text{SiO}_2\text{-}31.7\text{CaO}\cdot 8\text{P}_2\text{O}_5\cdot 0.3\text{Ag}_2\text{O}$  mol%) esetén is kialakul. Figyelembe véve, hogy ezek az anyagok toxikusak is lehetnek, az SBF-ben történő *in vitro* bioaktivitás vizsgálatával egyes toxikus minták is kiszűrhetőek.

Ahogy már fent említettük, az SBF egy sejtnélküli, fehérjementes oldat, melynek ionösszetétele közel megegyezik az emberi vérplazmáéval. A vérplazma az ásványi sók mellett egy nagyon összetett fehérjekeveréket (7–8%) is tartalmaz, körülbelül 7,0–7,5 g/100 ml mennyiségben. Ugyan jelenleg 22 különböző emberi plazmafehérje szerkezete ismert, a vérplazmában található fehérjemennyiség nagy részét az albumin (60%), a globulinok és a fibrinogén alkotja. Ebből kiindulva az SBF-hez 10 mg/ml szarvasmarha-szérumalbumint (BSA) adtunk, és az apatitréteg képződését vizsgáltuk a szilíciumalapú bioaktív üveg ( $60\text{SiO}_2\text{-}32\text{CaO}\cdot 8\text{P}_2\text{O}_5$  mol%) felületén, összehasonlítva a fehérje nélküli SBF-ben áztatott mintákkal [5]. Azt figyeltük meg, hogy abban az esetben, amikor a folyadék albumint tartalmazott, az apatitréteg kezdetben lassabban nőtt. Ez azzal magyarázható, hogy a kísérlet elején az üvegből származó kalcium az albuminhoz kötődött. Ez a különbség azonban 14 napos áztatás után eltűnik. Azt is vizsgáltuk, hogy mi történik akkor, ha az üveg felületét először fibrinogénnel módosítjuk, majd ezt követően áztatjuk albumint tartalmazó, valamint fehérjementes SBF-ben. Megállapítottuk, hogy a fibrinogénnel módosított felületű minták esetében az apatitszerű fázis jelenléte ki-

fejezőbb úgy fehérjét tartalmazó SBF, mint fehérjementes SBF esetén.

A bioaktív üvegek önálló alkalmazása kihívásokba ütközik, mivel szövetregeneráció esetén képtelen a megfelelő nedvességszint fenntartására, valamint a megfelelő szilárdság biztosítására. Előnye, hogy könnyen képez polimerrel kompozitot, mely segítségével változó viszkozitású, injektálható szuszpenziót, pasztát vagy hidrogéleket hozhatunk létre [7]. A célszövet függvényében választhatunk a természetes vagy a szintetikus polimerek között, figyelembe véve a kívánt szövetregeneráció specifikus követelményeit.

Felmerült a kérdés, hogy az SBF-ben történő *in vitro* bioaktivitás vizsgálata mennyire hasonlítható össze a szervezetben kialakuló folyamatokkal. Ennek a vizsgálatnak a helyességét a patkányok csontdefektjéből visszanyert anyag elemzésével igazoltuk [8]. A tanulmány során két kompozitot használtunk: alginát-pullulán-arany nanorészecskékkel adalékolt bioaktív üveget (Alg-Pll-BGAuSP) és alginát-pullulán-trikalcium-foszfát/hidroxiapatitot (Alg-Pll- $\beta\text{TC/HA}$ ). Az alginát és a pullulán két olyan biopolimer, amelyek képesek serkenteni a célzott szövet regenerációs képességét, biokompatibilisak, biológiailag lebomlóak és nem toxikusak, emellett nem mutagének és nem karcinogének [9, 10]. Az alginát egy lineáris poliszacharid, amelyet barnamoszat-fajokból izolálnak. A pullulán vízben oldódó poliszacharid, főként az aureobasidium pullulán gombákból nyerik. Az alginát-pullulán kompozit segítségével egy makroporozitással rendelkező, henger alakú mintát kapunk, ami könnyen beültethető a csontdefektusba (5. ábra). Könnyen formálható, folyadék hatására meg-



5. ábra. A száraz (a) és nedves (b) Alg-PLL-BGAuSP kompozit digitális képe [11] (az Elsevier Publishing kiadók engedélyével felhasznált ábrák)

duzzad, gélszerűvé válik, így könnyen behelyezhető a biológiai szervezetbe.

A bioaktív üvegek klasszikus előállítási módszere az oxidok magas hőmérsékletű (1200–1400 °C) olvasztásával történik. Ez hasonlít a muranói üveggyárakban is megfigyelhető üveg előállításához. Egy másik igen gyakran használt módszer a szol-gél módszer, mely hasonlít a kocsonya elkészítéséhez. A szintézis során a vízben vagy etanolban oldott prekursorok oldatát lefedett tárolódobozokban állni hagyjuk. Néhány órán belül elkezdődik a gélesedési folyamat. A megkeményedett gélét szárítjuk, majd utolsó lépésként hőkezeli. A szol-gél módszerrel előállított üvegek előnye, hogy könnyen módosíthatóak az igényeknek megfelelően.

Számos elem a periódusos rendszerből beépíthető az üveg szerkezetébe, ezzel megváltoztatva az anyag tulajdonságait. Ezek az elemek jótékony hatással lehetnek a regenerációs folyamatra. A bioaktív üveg lebomlása során ionok szabadulnak fel, melyek fokozhatják a szervezet specifikus sejtválasztát, elősegíthetik a regeneratív folyamatokat és javíthatják az üveg antimikrobiális tulajdonságait. Például ezüst, cink és réz hozzáadásával az üveg antibakteriális tulajdonságokkal felruházható [6, 12, 13], a cériumtartalom gyulladáscsökkentő hatást fejt ki [14], az arany nanorészecskék pedig fokozzák az angiogenezist [15]. Az angiogenezis, vagyis érképződés alatt az új vérerek képződésének folyamatát értjük a már meglévő vérerekből, mely tulajdonság rendkívül fontos a szövetregeneráció szempontjából. Ebből kiindulva nagyon kis mennyiségű (0,09 atomtömeg%), 20 nm átmérőjű, gömb alakú arany nanorészecskét adagoltunk a szilíciumalapú bioaktív ( $60\text{SiO}_2 \cdot 32\text{CaO} \cdot 8\text{P}_2\text{O}_5$  mol%) üvegebe (BGAuSP).

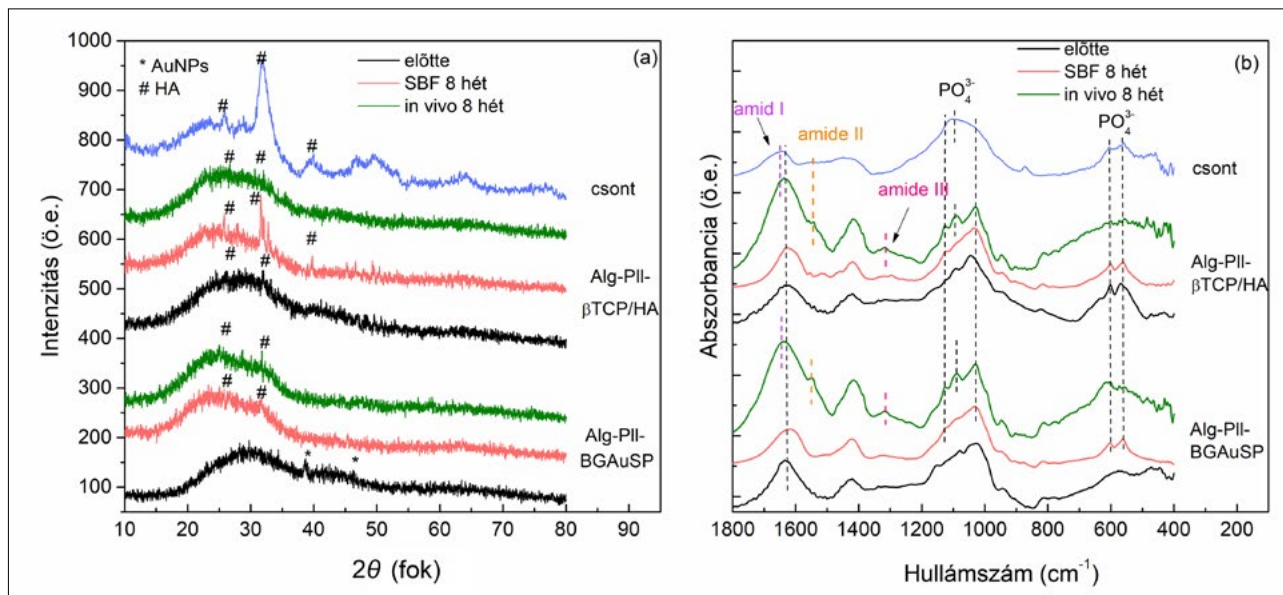
Ahhoz, hogy valós képet kapjunk arról, hogy egy általunk előállított anyag jobb vagy rosszabb tulajdonságokkal rendelkezik-e a piacon levő, már alkalmazott anyagokhoz képest, kísérleteink során eredményeinket ajánlatos egy ilyen anyaghoz hasonlítani. Esetünkben ez a pozitív kontroll a trikálcium-foszfát/hidroxilapatit (βTCP/HA) volt, mivel ezt fogászati implantátumok és

csontpótlások, például endoprotézisek anyagaként használják.

Az így kapott kompozitokat Sprague Dawley-patkányok combcsontján létrehozott csontdefektusba ültettük, és különböző módszerekkel követtük a csont gyógyulását 8 héten keresztül. Eredményeink azt mutatták, hogy mindkét kompozit elősegítette a csontképződést. Az adatokból a leginkább figyelemre méltó eredmény az, hogy az Alg-PLL-BGAuSP képes 30 nap alatt serkenteni a csontregenerációt. Így ez a bioanyag ideális lehet a csontritkulással, cukorbetegséggel, hipokalcémiával és más anyagcsere-patológiákkal összefüggő késleltetett csontgyógyulás javítására. Minden kompozit bizonyította oszteointegrációs és oszteopromóciós képességét. Oszteointegráció alatt azt a folyamatot értjük, amikor az implantátum közvetlenül a környező csontszövethez kötődik, bármilyen közbeeső lágy szövet kötődés nélkül. Az oszteopromóciós képesség az új csont képződésének elősegítése. Ezen kompozitok hátránya, hogy lebomlási sebességük valamivel lassabb volt, mint az egészséges patkányok csontregenerálódása. Ennek megértése és javítása további tanulmányokat feltételez.

Kihasználva a kompozitok hátrányát, 8 hét elteltével a csontdefektusban maradt mintákat összegyűjtöttük, és összehasonlítottuk az SBF-be áztatott kompozitokkal. A XRD-felvételeken (6a. ábra) és az FT-IR-spektrumokon (6b. ábra) jól látszik az apatitréteg jelenléte minden esetben. A röntgendiffrakciós felvételeken megjelenik az apatit reflexiója  $2\theta \sim 32^\circ$ -nál, az FT-IR spektrumokon a 565 és 603  $\text{cm}^{-1}$  hullámszámoknál jól kivehető a dublett jelenléte. A patkányokból visszanyert kompozitok és az SBF-ben áztatott minták közötti különbség a fehérje-adszorpcióban mutatkozott meg, mely csak a visszanyert minták esetén volt megfigyelhető. A tanulmány igazolta a Kokubo [3] által kidolgozott *in vitro* bioaktivitás-vizsgálat protokolljának helyességét.

Kezdetben az *in vitro* bioaktivitás vizsgálata csak olyan szilíciumalapú bioaktív üvegekre korlátozódott, melynek célja a kemény szövet sérülésében nyújtott regenerációs segítség volt. Később kiderült, hogy a test-



6. ábra. Az Alg-Pil-AuSP és az Alg-Pil-βTCP/HA kompozitok röntgendiffrakciós felvételei (a) és FT-IR spektrumai (b) az SBF-be merítés előtt, a merítés után 8 héttel, valamint 8 hét után in vivo körülmények között. Összehasonlítási célból a patkány combcsontjának röntgendiffrakciós felvételét és FT-IR spektrumát is feltüntettük [8] (az IOP Science kiadó engedélyével felhasznált ábrák)

nedvek hatására apatitréteggépző tulajdonsággal rendelkeznek a foszfát- és borofoszfátalapú üvegek is. Bizonyos biopolimerkompozitok esetében is megfigyelhető az apatitképződés, például az alginát-pullulán [16] vagy az alginát-gumiarábikum [17] kompozitok esetén, ami a polimerek térhálósítára használt kalcium jelenlétének köszönhető.

Sokáig az SBF-ben való áztatás egyetlen szerepe az volt, hogy megfigyeljük, hogy az áztatott minta felületén keletkezik-e apatitréteg, és hogyha igen, akkor az hogyan és mikor, valamint a minta összetétele milyen mértékben befolyásolja ennek a rétegnek a keletkezését. Manapság már olyan anyagokat is áztatnak SBF-ben, melyeknek nem kifejezett célja a keményszövet-regenerációban nyújtott segítség – hiszen a test bármely részébe jutott anyag először a testnedvvel kerül kapcsolatba, és így egyszerűen, olcsón és viszonylag gyorsan megfigyelhetjük, hogy milyen esetleges változás következik be a vizsgált anyagokban testnedvvel érintkezve. Például az alginát-pullulán kompozitok felületén az apatitréteg mellett kalcium-oxalát is keletkezik, ami a vesekő egyik leggyakoribb formája.

A szövetregenerációra használt anyag tulajdonsága, hogy idővel teljesen lebomlik. Az SBF-ben történő biodegradáció tesztelése áll a legközelebb a testben történő folyamatokhoz. Ebben az esetben megfigyelhető az anyagok tömegének átmeneti növekedése 3–7 nap áztatás után, ami a felületen lerakodott apatit és egyéb vegyületek következménye.

## Érdekességek

Az első bioaktív üveg klinikai alkalmazására 1984-ben került sor. A Bioglass 45S5 nevű üveget ültették be egy

korábban fertőzés miatt megsüketült beteg középfülébe. A fertőzés következtében a középfülben levő három csont közül kettő lebomlott. Az implantátumot úgy tervezték, hogy pótolja a csontokat, és a hangot a dobhártyáról a csigába továbbítsa, helyreállítva a hallást. Az erre a célra korábban használt implantátumok anyaga fém és műanyag volt, de ezek kudarcot vallottak, mert a beültetés után rostos szövet alakult ki körülöttük. A Bioglass 45S5 középfülprotézist (MEP®) olvadékból öntötték formára [1].

A második bioaktív üveget felhasználó implantátum, ami kereskedelmi forgalomba került, a Bioglass 45S5-tartalmú Endosseous Ridge Maintenance Implant (ERMI®) volt. Az 1988-ban piacra kerülő anyagot a friss foghúzás helyére helyezték be a foggyökerek helyett. Ezek az implantátumok hatékonyak és stabilnak bizonyultak, de széles körben nem terjedtek el, mert az implantátumokat a sebésznek alakra kellett vágnia [1].

Jóval nagyobb sikere volt a 2004-ben piacra dobott NovaMin® nevű bioaktív üvegnek, mely ~18 µm méretű Bioglass 45S5-részecskéket tartalmaz. Ezt fogkrémekbe adalékolták a fogak túlérzékenységének kezelésére. A bioaktív üvegrészecskék a dentinhez tapadnak, és egy HA-réteget képeznek. Ennek összetétele hasonló a fogzománc összetételéhez, és elzárja az ~1 µm átmérőjű tubulusokat, miáltal enyhíti a fájdalmat. Manapság több mint 20 országban kapható ilyen fogkrém.

## Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki a PN-IV-P1-PCE-2023-1377 UEFISCDI-projekt projekt anyagi támogatásáért.

1. Jones J. R. (2013): Review of bioactive glass: From Hench to hybrids. *Acta Biomater.* <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2012.08.023>
2. Magyari K., Tóth Z.-R. (2022): Bioanyagok a mindennapokban. *Firka: EMT*, 31, 14–20.
3. Kokubo T., Takadama H. (2006): How useful is SBF in predicting *in vivo* bone bioactivity? *Biomaterials*, 27, 2907–2915. <https://doi.org/10.1016/j.biomaterials.2006.01.017>
4. Martínez A., Izquierdo-Barba I., Vallet-Regí M. (2000): Bioactivity of a CaO–SiO<sub>2</sub> binary glasses system. *Chemistry of Materials*, 12, 3080–3088. <https://doi.org/10.1021/cm001107o>
5. Magyari K., Baia L., Vulpoi A., Simon S., Popescu O., Simon V. (2015): Bioactivity evolution of the surface functionalized bioactive glasses. *J. Biomed. Mater. Res. B Appl. Biomater.*, 103, 261–272. <https://doi.org/10.1002/jbm.b.33203>
6. Tóth Z. R., Feraru A., Debreczeni D., Todea M., Popescu R. A., Gyulavári T., Sesarman A., Negrea G., Vodnar D. C., Hernadi K., Pap Z., Baia L., Magyari K. (2022): Influence of different silver species on the structure of bioactive silicate glasses. *J. Non. Cryst. Solids*, 583. <https://doi.org/10.1016/j.jnoncrysol.2022.121498>
7. Magyari K. (2020): Bioaktív üvegkompozitok alkalmazása csontszövet regenerálására. <https://Kab.Ro/Hirek/Hir/Bioaktiv-Uvegkompozitok-Alkalmazasa-Csontszövet-Regeneralasara-1216>
8. Dreanca A., Bogdan S., Popescu A., Sand D., Pall E., Astilean A. N., Pestean C., Toma C., Marza S., Taulescu M., Cenariu M., Sevastre B., Oana L., Todea M., Baia L., Magyari K. (2023): The evaluation of the osteopromoting capabilities of composites based on biopolymers and gold/silver nanoparticles doped bioactive glasses on an experimental rat bone defect. *Biomedical Materials*, 18, 055014. <https://doi.org/10.1088/1748-605X/ace9a6>
9. Lee K. Y., Mooney D. J. (2012): Alginate: Properties and biomedical applications. *Progress in Polymer Science (Oxford)*, 37, 106–126. <https://doi.org/10.1016/j.progpolymsci.2011.06.003>
10. Coltellì M. B., Danti S., de Clerck K., Lazzeri A., Morganti P. (2020): Pullulan for advanced sustainable body- and skin-contact applications. *J. Funct. Biomater.*, 11. <https://doi.org/10.3390/jfb11010020>
11. Aștilean (Perte) A. N., Dreancă A., Gog-Bogdan S., Sevastre B., Ungur A., Negoescu A., Taulescu M., Rotar O., Dindelegan M., Gherman L.-M., Magyari K., Oana L. (2025): Bone proliferation in osteoporotic experimental animals using alginate-pullulan-bioactive glass/gold nanoparticles composite. *Bone*, 194, 117439. <https://doi.org/10.1016/j.bone.2025.117439>
12. Heras C., Jiménez-Holguín J., Doadrio A. L., Vallet-Regí M., Sánchez-Salcedo S., Salinas A.J. (2020): Multifunctional antibiotic- and zinc-containing mesoporous bioactive glass scaffolds to fight bone infection. *Acta Biomater.*, 114, 395–406. <https://doi.org/10.1016/j.actbio.2020.07.044>
13. Popescu R. A., Magyari K., Vulpoi A., Trandafir D. L., Licarete E., Todea M., Ștefan R., Voica C., Vodnar D. C., Simon S., Papuc I., Baia L. (2016): Bioactive and biocompatible copper containing glass-ceramics with remarkable antibacterial properties and high cell viability designed for future: *in vivo* trials. *Biomater. Sci.*, 4. <https://doi.org/10.1039/c6bm00270f>
14. Kurtuldu F., Kaňková H., Beltrán A. M., Liverani L., Galusek D., Boccaccini A. R. (2021): Anti-inflammatory and antibacterial activities of cerium-containing mesoporous bioactive glass nanoparticles for drug-free biomedical applications. *Mater. Today Bio.*, 12, 100150. <https://doi.org/10.1016/j.mtbio.2021.100150>
15. Dreanca A., Muresan-Pop M., Taulescu M., Tóth Z. R., Bogdan S., Pestean C., Oren S., Toma C., Popescu A., Pall E., Sevastre B., Baia L., Magyari K. (2021): Bioactive glass-biopolymers/gold nanoparticle based composites for tissue engineering applications. *Materials Science and Engineering C*, 123. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2021.112006>
16. Magyari K., Dreancă A., Székely I., Popescu A., Feraru A., Pall E., Gyulavári T., Suciu M., Cenariu M., Bobu E., Baia L., Baia M. (2022): How does the structure of pullulan alginate composites change in the biological environment? *J. Mater. Sci.* <https://doi.org/10.1007/s10853-022-07775-8>
17. Feraru A., Tóth Z.-R., Magyari K., Baia M., Gyulavári T., Pall E., Licarete E., Costinas C., Cadar O., Papuc I., Baia L. (2025): The effect of nanoceria on the alginate-gum arabic crosslinking mechanism and *in vitro* behavior as a wound dressing. *Int. J. Biol. Macromol.*, 288, 138569. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2024.138569>

## TANULMÁNY

# ÚJ MÓDSZER A LÉZERFÚZIÓRA

Csernai László, Kroó Norbert<sup>@</sup>, Papp István, Veres Miklós, Bíró Tamás  
HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest  
<sup>@</sup>E-mail: kroo.norbert@wigner.hun-ren.hu

A közelmúltban a lézernyaláb által indukált atommagfúzió forradalmi fejlődésen megy át. Az amerikai Lawrence Livermore National Laboratory-ban a National Ignition Facility (NIF) projekt a targetbe jutó körülbelül 2 MJ energiából 8.6 MJ fúziós energiakibocsátást ért el. Ennek hatására gomba módjára szaporodnak a lézerfúziós startupprojektek és laboratóriumok. Ezek többsége ugyanazon az elvi alapon működik, mint a NIF projekt: viszonylag lassú, mechanikus extrém összenyomás és ennek hatására nagy termikus hőmérsékletemelkedés – leggyakrabban kriogén fagyasztott deutérium-trícium fúziós reakciója révén. Ennek a kezdeti hagyományos módszernek vannak hátrányai. Az összenyomott target gyorsabban tágul, mint a begyűjtött középpontból terjedő fúziós égés, így csak a target kisebb része fuzionál, és lassú mechanikus instabilitások is kialakulhatnak.

Már az 1970-es években megfigyeltük, hogy nanoszekundumos lézerimpulzusokkal már  $10^{10}$  W/cm<sup>2</sup> körüli intenzitástartományban sikerült elektronokat kiszakítani aranyminták felületéről – szemben a várt  $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup> körüli értékekkel. Rövidesen sikerült bebizonyítani, hogy ezért a diszkrpanciáért az úgynevezett felületi plazmon-polaritonok (SPP, a felületközeli vezetési elektronok és a hozzájuk csatolt elektromágneses tér házassága) felelősek [1]. Ezek a plazmonok kis térfogatba tudják összegyűjteni a lézerimpulzusok energiáját, ráadásul az optikában ismert felbontási korlát, az úgynevezett diffrakciós limit nem érvényes rájuk, ezért képesek azt megfelelő anyagú nanorészecskéken is megtenni. Ebben az esetben lokalizált felületi plazmon-polaritonokról (LSPP) beszélünk. Ezen tulajdonságuk miatt a felületi plazmonokat a nanovilág fényének is tekinthetjük. Az

LSPP-k élettartama például arany nanorészecskék esetén a néhányszor tíz femtoszekundumos tartományban van, ezért az ebben az időtartományban működő Ti:Sa lézerek optimálisak ilyen plazmonok gerjesztésére.

Kézenfekvő volt, hogy ezt a technológiát megpróbáljuk kombinálni a magfúziót eredményező nukleáris folyamatokkal, és így például egy sor olyan problémától megszabaduljunk (lásd alább), ami a „lassú”, néhányszor 10 nanoszekundumos lézerimpulzusok esetén lép fel. Így alakult ki az új módszer.

Egy kis asztali Ti:Sa lézer 25 mJ-os impulzusaival is sikerült már egyetlen lézernyaláb alkalmazásával bizonyítani, hogy  $p \rightarrow d$  és  $p + {}^{11}\text{B} \rightarrow 3\alpha$  magreakciókat tudtunk kelteni [2, 3], és azt is, hogy ezek a folyamatok energiafelszabadulással járnak.

Az új módszer felhasználja a sugárzásdominált detonációk elméletét is, valamint a nehézionfizika legújabb eredményeit. Így egy nem termikus és mérsékelt, viszont nagyon gyorsan összenyomott, szobahőmérsékletű targetet kapunk, nem radioaktív fúziós üzemanyaggal, és reakciótermékekkel. A nem termikus jelleg és a két irányból való begyűjtés a folyamat hatásfokát nagymértékben javítja, és az ipari mértékű alkalmazást is lehetővé teszi. A módszer bemutatása egyben válasz is a közelmúltban a *Fizikai Szemlében* megjelent cikkekre [4], amely a kezdeti, hagyományos módszer szempontjából próbálja az általunk bevezetett új módszert kritizálni.

A jelen cikk szerzői közül hárman 2017-ben szabadalmi bejelentést tettek [5] a lézeres fúzió egy új módszerével kapcsolatban. Ezt egy rövid publikációban ismertettük [6]. Ezután 2019-ben Kőszegen megalakult a NAPLIFE együttműködés [7]. A NAPLIFE által javasolt módszert először 2020-ban publikáltuk részletesen [8]. A *Fizikai Szemlében* nemrég ismertettük ezt a módszert [9]. Az új módszer szükségességét az ultrarelativistikus nehézion-reakciós kutatások és a plazmonika eredményei ihlették, ahol a sugárzásdominált energiát leadó detonációk alapvetően máshogy viselkednek.

Az ilyen reakciókban létrejött kvark-gluon plazma égése (hadronizációja) tipikusan egyszerre történik a reakcióterefogat túlnyomó részében. Ezt a kezdet, hagyományos megközelítés követői lehetetlennek tartják, mert vagy a nemrelativisztikus Rankine–Hugoniot-leírást követik, vagy ennek relativisztikus változatát, amelyet Abraham Taub, Einstein kollegája Princetonban, írt le [10] hibásan! Ezt Csernai javította ki, de csak 1987-ben [11], amikor már kísérletileg is kiderült, hogy Taub leírása hibás, pontosabban nem teljes. Sajnos ezt a hibás leírást a legtöbb tankönyv is átvette egészen mostanáig – például a Landau–Lifsic-sorozat Hidrodinamikája.

A detonációk leírása az energia és impulzus megmaradásából származtatható, így termikus és nem termikus rendszerekre egyaránt érvényes. Ennek következménye, hogy olyan rövid lézerimpulzussal kell a fúziót begyűjtani, ami alatt a fény egyszer és csak egyszer jut át a targeten. További feltétel, hogy a két irányból való besugárzást úgy kell szinkronizálni, hogy azok szuper-

pozíciója konstruktív legyen. Ehhez 1 femtoszekundumos pontosság kell. Ezeket a kívánalmakat az ELI ALPS kielégítheti, és ma ez az egyetlen berendezés, amely ehhez megfelelően nagy energiával rendelkezik.

A *Fizikai Szemlében* 2025 júniusában megjelent és a kezdeti, hagyományos módszert követő cikk (Földes, 2025), a  $D + T$  reakciót tárgyalva arra a következtetésre jut, hogy csak termalizálódott rendszerben érhetünk el fúziót. Ez ellentétes a mi módszerünk tanúságával. A lézerindukált fúzióban a kiinduló lézerfény monokromatikus, nem termikus, és egy adott transzverzális irányban polarizált. A végállapotban szintén nem hő, hanem elektromos áramot akarunk kinyerni. Így minden termalizációs lépés a hatásfok csökkenésével jár. Módszerünk egyik lényege, hogy minden termalizációs lépést igyekszünk elkerülni. A NIF esetében a bejövő 400 MJ energia nagy része már a target DT pelletet magában foglaló „hohlraum”-ban elvész, és csak ~2 MJ jut a DT pelletbe. A hagyományos módszerben a fény abszorpcióját lökéshullámok sorozatával igyekeznek erősíteni.

A lézerfény abszorpcióját a fúziós targetben nem triviális szabályozni; ezt módszerünkben elsőként nanotechnológiával oldjuk meg. Módszerünkben kihasználjuk, hogy a lézerfény monokromatikus, így a targetbe erre a frekvenciára rezonáns arany nanorúd antennákat pláztálunk, amelyekkel szabályozni tudjuk a lézerfény abszorpcióját. Ezek a nanorúd antennák a lézerfény irányára merőlegesek, (így az elektromos térerő vektorával párhuzamosak), hogy szabályozzák és maximalizálják az abszorpciót. A nanorúd antennákban rezgő plazmonikus elektronhullám mint rezgő dipól a rúd melletti protonokat már 25 mJ lézerenergiánál is 150–200 keV energiára gyorsítja. Az így felgyorsított protonok nem termikusak, energiájuk közel azonos, és irányuk a nanorúd antennákkal közel párhuzamos [12]. Így termalizáció és összenyomás nélkül  $p + {}^{11}\text{B}$  reakciót sikerült létrehozni 25 mJ lézerenergiával [13]. A NAPLIFE által követett módszer másik legfontosabb alapvonása a target megfelelő nanotechnológiai kialakítása. Ez jelenleg is fejlesztés alatt van – mind a target elrendezése, mind a target előállítása szempontjából. Ebben a fejlesztésben a Debreceni Egyetem, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, az ELI ALPS Ultragyors Nanotechnológiai Osztálya, és a FUSENOW együttműködés keretében a Bergeni Egyetem Nanotechnológia Csoportja is részt vesz.

Módszerünk ellen az egyik ellenvetés az, hogy „a magas hőmérsékletű ionizált gáz, a plazma a fémekhez hasonlóan nem engedi be a fényt, a lézerfény csak a szkinmélységig tud behatolni. Még a nagyon nagy intenzitású rövid lézerimpulzusok is a mikrométer tört részéig képesek befújni magukat. ...”, írja Földes. Ezt a kijelentést egy saját, V. T. Tikhonchukkal közös cikkére [14, 15] hivatkozva írta. A lézerfény plazmába való behatolását részletesen vizsgáltuk kísérleteinkben, és 2022-től kezdve ezt számos publikációban és előadásban közzétettük. A lézerfény által létrehozott kráter mélysége egy 25 mJ

energiájú,  $10^{17}$  W/cm<sup>2</sup> intenzitású lézerimpulzusra 27 mikrométer, míg ha a céltárgyba nanorúd antennákat implantálunk, ez 7-re növekszik [16]. A besugárzott targeten a kráterek szabad szemmel is láthatóak, és ezek felületének bemutatása meggyőző erejű. Sajátságos, hogy időközben olyan hazai kísérleti cikkek is születtek, amelyek igazolják, hogy a plazmatükrözés nagy intenzitásnál megszűnik [17, 18].

A NIF által használt hagyományos módszerben a target extrém összenyomásához hozzátétőlegesen 10 nanoszekundum nagyságrendű időtartam szükséges, ami természetesen számunkra nem releváns, mivel nem az összenyomás a cél. Az extrém összenyomás láthatóan több problémát okoz, mint hasznót. Módszerünkben a protonokat a rezonáns elektronok által alkotott dipóltér direkt gyorsítja, és mozgásuk egyáltalán nem termikus, így a direkt gyorsított protonok igenis fúziót hoznak létre ahogy azt a kísérlet is mutatja [13].

A hagyományos módszerben az ipari méretű megvalósítás alig elképzelhető a kívánt komplikált kriogén, ablátorfelülettel ellátott targettel. Egy target előállítása és az energiatermelés kriogén technológiája olyan költségekkel jár, ami nem teszi megvalósíthatóvá a hagyományos módszert ipari méretekben. Az általunk bevezetett és jelenleg fejlesztés alatt álló módszer ipari megvalósítása sokkal kedvezőbb lehet. A lézeres belövés iránya, a létrejött reakciótermékek kibocsátása és a fúziós üzemanyag és a target(ek) bevitele három egymásra merőleges irányba, irányból lehetséges. A target előállításának költsége is nagyságrendekkel kisebb, és sem kriogén, sem radioaktív technológiát nem igényel.

A nemzetközi NAPLIFE kollaboráció nyitott minden partner csatlakozása előtt, akik vagy amely szervezet a módszer fejlesztésében részt kíván venni, és ehhez pozitívan hozzájárul. (Ismételt kritikus és támadó megnyilvánulások nem tekinthetők csatlakozási szándéknak.) Már számos egyetemi kutató és kutatócsoport részt vett a módszer fejlesztésében. A NAPLIFE kollaboráció alappillére a Wigner FK Budapest és az ELI ALPS, Szeged. Ez utóbbi partner speciális, mert a kívánt nagy precizitású (femtosekundumos) lézernyaláb ma csak itt érhető el. Az eredmények hatására már (a hagyományosan magfizikaellenes) Norvégia is csatlakozott az új módszerrel történő lézerfúziós kutatásokhoz: a Trond Mohn Research Foundation / Tromsø Science Foundation által jelentős mértékben támogatott norvég FUSE-NOW projekt együttműködik a NAPLIFE [\*] projekttel. Sajnálatos, hogy ez a Magyarországról kiindult projekt csak nagyon korlátozott mértékben kap hozzáfértést az ELI ALPS létesítményeihez.

## Irodalom

1. N. Kroó, S. Varró, P. Rácz, P. Dombi: Surface plasmons: a strong alliance of electrons and light. *Phys. Scr.* 91, 053010 (2016).

2. N. Kroó, M. Aladi, M. Kedves, B. Ráczkevi, A. Kumari, P. Rácz, M. Veres, G. Galbács, L. P. Csernai, T. S. Biró (NAPLIFE Collaboration): Monitoring of nanoplasmonics assisted deuterium production in a polymer seeded with resonant Au nanorods using in situ femtosecond laser induced breakdown spectroscopy, *Scientific Reports (Nature)* 14, 18288 (2024).
3. I. Rigó, J. Kámán, Á. Nagyné Szokol, R. Holomb, A. Bonyár, M. Szalóki, A. Borók, S. Zangana, P. Rácz, M. Aladi, M. Á. Kedves, G. Galbács, L. P. Csernai, T. S. Biró, N. Kroó, M. Veres (NAPLIFE Collaboration): Raman spectroscopic characterization of crater walls formed upon single-shot high-energy femtosecond laser irradiation of dimethacrylate polymer doped with plasmonic gold nanorods. *Scientific Reports (Nature)* 15, 14469 (2025).
4. Földes I.: Néhány szó a lézeres fúzióról, *Fizikai Szemle*, 847, 188–191 (2025).
5. Csernai, L. P., Kroó and Papp, I. (2017): Procedure to improve the stability and efficiency of laser-fusion by nano-plasmonics method, *Patent Note # P1700278/3* at the Hungarian Intellectual Property Office.
6. L. P. Csernai, N. Kroó, and I. Papp: Radiation dominated implosion with nano-plasmonics. *Laser and Particle Beams*, 36 (2), 171–178 (2018).
7. L. P. Csernai: Laser driven fusion for energy – invited talk. In: Int. Workshop on Collectivity – 2019, Kőszeg, Hungary, Sept. 14–19, 2019. [190914c]
8. L. P. Csernai, M. Csete, I. N. Mishustin, A. Motornenko, I. Papp, L. M. Satarov, H. Stöcker, N. Kroó (NAPLIFE Collaboration): Radiation dominated implosion with flat target, *Physics of Wave Phenomena*, 28 (3), 187–199 (2020).
9. Dombi P., Kroó N., Szípcs R., Veres M.: Femtoszekundumos lézeralkalmazások a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban, *Fizikai Szemle*, 2024/9, 302–306 (2024).
10. A. H. Taub: Relativistic Rankine-Hugoniot equations. *Phys. Rev.* 74, 328 (1948).
11. L. P. Csernai: Detonation on a time-like front for relativistic systems. *Zh. Eksp. Teor. Fiz.* 92, 379–386 (1987).
12. I. Benabdelghani, M. Aladi, P. Rácz, G. Hegedüs, Á. Inger, L. P. Csernai, T. S. Biró, N. Kroó, M. Á. Kedves, K. Osvay, P. Varmazyar, T. Gilinger, A. Bonyár, N. Tarpataki, Zs. Márton (Naplif Collaboration), invited talk, Experimental investigations of laser-driven ion acceleration and fusion reaction enhanced by Plasmonic Nanostructured Targets, XIV International Conference on New Frontiers in Physics, 17–31 July 2025, OAC, Kolymbari, Crete, Greece
13. N. Kroó, L. P. Csernai, I. Papp, M. A. Kedves, M. Aladi, A. Bonyár, M. Szalóki, K. Osvay, P. Varmazyar, T. S. Biró (NAPLIFE Collaboration): Indication of p + <sup>11</sup>B reaction in laser induced nanofusion experiment. *Scientific Reports (Nature)* 14, 30087 (2024).
14. Földes I., Pokol G.: *Laser and Particle Beams*, 38 (3), 211–213 (2020).
15. Földes I. B., Tikhonchuk V. T.: *Phys. Lett. A*, 424, 127845 (2022).
16. Á. Nagyné Szokol, J. Kámán, R. Holomb, I. Rigó, M. Aladi, M. Kedves, B. Ráczkevi, P. Rácz, A. Bonyár, A. Borók, S. Zangana, M. Szalóki, I. Papp, G. Galbács, T. S. Biró, L. P. Csernai, N. Kroó, M. Veres (NAPLIFE Collaboration): Morphology studies on craters created by femtosecond laser irradiation in UDMA polymer targets embedded with plasmonic gold nanorods, *Eur. Phys. J. Spec. Top.* Apr. 3 (2025).
17. I. B. Földes, B. Gilicze, Zs. Kovács, S. Szatmári: Plasma mirrors for cleaning laser pulses from the infrared to the ultraviolet. *EPJ Web of Conferences* 167, 04001 (2018): “Short wavelength laser beams however have a larger critical density in the plasma, and due to their deeper penetration the absorption is higher, the reflectivity, and the corresponding plasma mirror efficiency is lower.”
18. Kovács Z., Bali K., Gilicze B., Szatmári S., Földes I. B.: Reflectivity and spectral shift from laser plasmas generated by high-contrast, high-intensity KrF laser pulses. *Phil. Trans. R. Soc. A* 378, 20200043 (2020): “In the present work, however, the reflectivity drops below 10% above 1018 Wcm<sup>-2</sup>, i.e. the absorption surpasses 90%.”

[\*] <https://csernai.no/naplife/hu/index-hirek.html>, 2025.06.05.

## TELLER EDÉRŐL – SAJÁT SZAVAIVAL

Pálinkás József

E-mail: jozsef.palinkas.mail@gmail.com

Különös módon mutatja be Teller Edét Hargittai Balázs és Hargittai István könyve, mely a Gondolat Kiadónál „Teller szerint a világ – A tudós és időtálló mondásai” címmel jelent meg.

Hargittai István egy korábban megjelent, Teller Ede életéről és munkásságáról szóló könyvében (Hargittai István: „Teller”, Akadémiai Kiadó, 2011) részletesen bemutatja Teller életét, a tudományban, a tudományos közéletben és a politikában, bátran mondhatjuk, hogy a világpolitikában betöltött szerepét.

Ez a – pontos forrásokat megjelölő – könyv viszont más, mint a Teller életét és munkásságát bemutató sok-sok korábbi könyv és visszaemlékezés. Teller rövid életrajza után pontosan idézett mondásainak válogatását is tartalmazza, és így Teller saját szavai alapján kapunk képet arról, hogy mit gondolt a világról a huszadik századnak ez a vitatott szerepű, de mind gondolataiban, mind tetteiben meghatározó egyéniség. Ezzel persze képet kapunk arról is, hogy milyen ember és tudós volt Teller Ede. Nekem csupán néhányszor volt módom találkozni és beszélgetni Tellerrel, de az ebben a könyvben idézett gondolatok közül számos úgy hatott rám, mintha Tellert magát hallanám – sajátos hanghordozásával, különös lényeglátásával, fantasztikus reagálóképességével.

A könnyen befogadható – rövid – életrajz önmagában is értékes, sok képpel illusztrált alkotás, amely Teller életrajzi adatai mellett felvillantja a huszadik század különböző korszakainak társadalmi és tudományos közéletét is; azt a szellemi pezsgést, ami ekkor a tudományban – a fizikában különösen – végbement.

Az idézetválogatás két szempontból is különleges. A kiemelkedő egyéniségek rövid mondásai gyakran sokszoros áttételek révén egyfajta városi legendává válnak, és pontatlanul jelennek meg a közbeszédben. Ebben a könyvben az idézett mondások pontosak és pontosan megjelölik az autentikus forrást. A másik – és a mai viszonyaink között, ha tetszik, ha nem, fontos – szempont, hogy a mondások rövid és egyszerű kijelentések; remélhetően a fiatal nemzedékek számára is könnyen befogadhatóak.

Teller a huszadik – nagy fizikusokban igencsak gazdag – század egyik kiemelkedően eredeti gondolkodójának számít. Ebben a könyvben idézett gondolatai is nagyon széles területeket ölelnek fel. Széles műveltségét a családi neveltetés mellett a kitűnő budapesti Minta-gimnázium, a Heisenberg mellett töltött évek és persze a körülötte lévő pezsgő intellektuális környezet részben meghatározta, részben inspirálta.

Az oktatásról, nevelésről idézett gondolatai azt mutatják, hogy szeretett tanítani, a rutinoktatással szemben azonban inkább a megismertetés, a meg- és felismerés örömét helyezte előtérbe. „A legnagyobb nehézséget nem az új elképzelések elsajátítása, hanem a régi, megcsontosodott nézetektől való megszabadulás jelenti.” – vallotta. Élénken foglalkoztatta a megértés igazi természete: „Az ember egyik legfőbb törekvése, hogy megértse valamit.” „A megértés a legnagyobb intellektuális élmény”. Ugyanakkor, mint mindenben, a megértésben is kritikus: „Egyetlen nézőpontból ritkán következik megbízható megértés”. „Amikor valamit megértünk, ez gyakran csak azt jelenti, hogy a dolog ismerőssé vált számunkra.” Teller fő terepe a tudomány, a technológia és ezeknek a mindennapi életre és a jövőre gyakorolt hatása. Gondolatai a természettudományos gondolkodásról és ismeretekről ma is érvényes és megfontolandó állítások vagy kérdések: „Meddig fog egy, a tudományon és technológián alapuló társadalom virágozni, ha a többség képtelen műszakilag megalapozott döntéshozatalra?”. Sokszor nagyon egyszerűen rámutatott a tudomány és technológia gondatlan vagy etikátlan alkalmazásának veszélyeire is: „a tudományos fejlődés bolygónkat nagyon veszélyes lakhellyé változtatta”. Nem láttam az idézetek között – lehet, hogy nincs is pontos forrás –, de én jól emlékszem, hogy egy beszélgetésünk során Teller hogyan definiálta a szakértő fogalmát: „szakértő az, aki szűk szakterületének minden lehetséges hibáját legalább egyszer már elkövette” – erre rímelt a könyvben a pontos forrással megjelölt mondás: „a tudományos kutató leggyakoribb tapasztalata a tévedésből adódik, amit felismer és kijavít”.

Azt hiszem, hogy abban még a Tellert és tevékenységét különbözően megítélők között is egyetértés van, hogy ő a diktatúrák minden formáját élesen elítélte: „egy kisebbség uralma csak a kisebbségnek jó”. Legszilárdabb politikai nézete éppen a diktatúrák elítélése volt. Ez vezette Los Alamosban is, és a közbeszédben a „csillagháborús terveknek” is nevezett Stratégiai Védelmi Kezdeményezés (Strategic Defence Initiative) támogatásában is. „A szabadságot nem őrizhetjük meg hosszú évekig, hacsak nem gondoskodunk nap, mint nap a megvédéséről.”

Sok-sok gondolatot idézhetnénk még, hiszem a titkolódzsról, a honvédelemről, az energiáról és a környezetről éppen úgy találhatunk időtálló gondolatokat, mondásokat, mint az ember és társadalom, az élet, a válás vagy a jövő kérdéseiről. Hasznos olvasmány mindenkinek.

## SÓLYOM JENŐ AKADÉMIAI ARANYÉRMES

Ötvös Zoltán

ELI ALPS, Szeged

E-mail: Zoltan.Otvos@eli-alps.hu



Sólyom Jenő 1940. november 27-én született Kolozsvárt. 1959-ben érettségizett a budapesti Vörösmarty Gimnáziumban. 1959 és 1964 között az ELTE TTK fizikus szakos hallgatója volt. A kitüntetéses diploma megszerzése után 1964-ben az MTA Központi Fizikai Kutatóintézet Szilárdtestfizikai Laboratóriumában akkor alakuló szilárdtest-elméleti csoportba került. 1967-től tudományos munkatárs, 1976-tól tudományos főmunkatárs, 1981-től tudományos tanácsadó, 1991-től pedig kutatóprofesszor. 1970-ben szerezte meg a fizikai tudomány kandidátusa fokozatot. 1972-ben sub auspiciis kitüntetéssel avatták az ELTE-n a természettudományok doktorává. 1978-ban lett a fizikai tudomány doktora. Az MTA 1987-ben levelező, 1993-ban rendes tagjává választotta. 2011 és 2017 között az MTA Fizikai Tudományok Osztálya elnöke. 2007 és 2009, illetve 2017 és 2021 között az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöke volt. 1980-ban Állami Díjat, 1999-ben Széchenyi professzori ösztöndíjat kapott. 2011-ben Széchenyi-díjat, 2017-ben a Magyar Érdemrend Középkeresztjét kapta meg. 2025-ben az Akadémiai Aranyérmet vehette át.

Az alapításának 200. jubileumát ünneplő Magyar Tudományos Akadémia 2025. májusi közgyűlésén adták át a tudótestület legrangosabb kitüntetéseit. Az Akadémiai Aranyérmet Sólyom Jenő professzor, az MTA Fizikai Tudományok Osztályának korábbi elnöke vehette át. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnöki posztját a közelmúltban kétszer is betöltő akademikust pályájáról kérdeztük.

#### Meglepődött, amikor megtudta, hogy ön kapja az Akadémiai Aranyérmet?

Igen is, meg nem is, hiszen tudtam a felterjesztésről. Ez az elismerés 1960 óta létezik. Előtte 1949 és 1960 között nem volt ilyen jellegű díj. Az alapítástól 1949-ig nagyjából volt a legrangosabb akadémiai jutalom elnevezése. Az MTA 11 osztálya évente egy-egy személyt javasolhat a kitüntetésre, de csak egyvalaki veheti át az elismerést. Tehát tíz százaléknyi esélye sincs annak, hogy a jelölés évében a jelölt befut. Általános gyakorlat, hogy az adott osztály másodszor, harmadszor, de akár negyedszer is ajánlja ugyanazt a személyt. Létezik egy íratlan szabály, hogy a tudományterületek között lehetőleg egyenletesen oszlanak el az elismerések. Az MTA alapítása óta eltelt kétszáz év alatt én vagyok a tizedik fizikus, akit megtiszteltek ezzel a jutalommal, illetve éremmel. Legutóbb, 2007-ben Keszthelyi Lajos munkásságát díjazták az Akadémiai Aranyéremmel. Az is igaz viszont, hogy 1949-ig mindössze négy személyt tüntettek ki fizikai tárgyú munkáért. Közöttük volt Jedlik Ányos és Eötvös Loránd.

#### Milyen programokkal készül az MTA alapításának 200. évfordulójára a fizikai osztály?

Havonta más-más tudományos osztály népszerűsítheti eredményeit a nagyközönségnek, illetve tarthat tudományos előadásokat, konferenciákat. A fizikusoknak 2025 szeptembere jutott. Arra a hónapra sok eseményt tervezünk. Az MTA aulájában posztereken, videókon, tárgyakon keresztül mutatkozik be az osztály. Tartunk tudományos előadásokat a kvantumtechnológiáról, fúziós kutatásokról, illetve 12 részes ismeretterjesztő előadás-sorozatot a kvantumok világáról – hiszen az ENSZ közgyűlésének tavalyi döntése alapján a 2025-ös év a

kvantumtudomány éve –, valamint négy kísérleti bemutatót. Fiatalokat és idősebbeket egyaránt várunk a rendezvényekre.

#### Ez a megközelítés egyértelműen a tudománynépszerűsítésről szól. Hogyan lehet eladni a fizikát?

A kérdés fontos, de nem biztos, hogy én adom erre a legjobb választ. Habitusomnál fogva ugyanis ritkán vettem részt az ismeretterjesztésben, illetve a témám sem olyan, hogy arról könnyen lehetne népszerűsítő előadást tartani. Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat korábbi (kétszeres) elnökeként azonban mindig fontosnak tartottam a tanárok támogatását. Tagjaink jelentős része pedagógus, ezért a Társulat tevékenységében dominánsnak kell lennie, hogy a tanárokon keresztül, az ő munkájukat segítve a fiatalokkal megszeressük a fizikát.

#### Kolozsváron született, de már Budapesten érettségizett. A második világháború erre a magyarázat?

A két világháború együtt okozta ezt. Apai nagyapám Kolozsvárt volt iskolaigazgató, de az első világháború után nemcsak az állását, hanem a szolgálati lakását is elvesztette. 1920-ban családjával Budapestre költözött. A Kolozsvárt született édesapám Sopronban lett teológianár. Amikor Észak-Erdély 1940-ben visszatért Magyarországhoz, a szintén kolozsvári születésű édesanyám úgy döntött, hogy ezt kihasználva akkor várt gyermekét ott hozza világra. Ott születtem, de már jöttünk is vissza Sopronba, ahol a család 1951-52 fordulójáig élt. Én Sopronban voltam gyerek, az első négy osztályt ott jártam ki.

#### Miért költözött a család Budapestre?

Édesapám a pécsi Magyar Királyi Erzsébet Tudományegyetem Sopronban működő Evangélikus Hittudományi Karán volt az egyháztörténet tanára. 1951-ben a határvárosból, ahova akkor csak engedéllyel lehetett beutazni, a lelkészképzést felköltöztették Budapestre. A család 1952 januárjában ezért került a fővárosba.

#### Kire vagy mire vezethető vissza a természettudományos érdeklődés?

Ahogy említettem, édesapám teológus, egyháztörténész volt. Édesanyám matematika-kémia szakos tanárként Kolozsvárt végezte el az egyetemet. Amikor férjhez ment,

átjött Magyarországra. Úgy gondolta, hogy nem kell honosítani a diplomáját, mert nem lesz szüksége erre. Honosítás nélkül azonban nem taníthatott Magyarországon. A hat gyereke miatt nem is tudott volna. Amikor nagyobbak lettünk, időnként magántanítványokat fogadott. Azaz családunk mindennapjaiban a hittudomány, a bölcsészet, a matematika és a reáltudományok egyaránt jelen voltak.

### **Hogyan került kapcsolatba a fizikával?**

A tárgyat a fővárosi Vörösmarty Gimnáziumban szerettem meg. A fizikát oktató Óhegyi Ernő tanár úr feladatmegoldó versenyt szervezett évfolyamunknak, amin jól szerepeltem. Akkor és ott éreztem meg, hogy kedvem és tehetségem is van fizikafeladatok megoldásához. Rádöbrentem, hogy a természeti világ kiszámítható. Azaz a fizika nekem nem a kísérleteket jelentette – nem a kísérletezés ragadott meg –, hanem a feladatmegoldást.

### **Hogyan fogadták az egyetemen a teológus fiát?**

Az ELTE fizikus szakára elsőre felvettek. Apró érdekesség: az induláskor az évfolyamunk fele sem volt KISZ-tag, mire végeztünk, én maradtam az egyetlen, aki nem lépett be a párt ifjúsági szervezetébe. Az első fél év után – vélhetően azért, mert kitűnő rendű lettem – a Központi Fizikai Kutatóintézetből (KFKI) levelet kaptam. Azt kérdezték, hogy érdekelne-e az intézet által felajánlott társadalmi ösztöndíj. Ha érdekel, küldjem el az életrajzomat. Elküldtem, csakhogy az életrajzom édesapám foglalkozásával kezdődött. Postafordultával jött a levél, hogy nem áll módjukban ösztöndíjat adni. A harmadik évben a KFKI igazgatóhelyettese, Pál Lénárd vizsgáztatott atomfizikából. A vizsga után megkérdezte, hogy érdekelne-e a KFKI társadalmi ösztöndíja. Megmondtam neki, hogy engem már egyszer megkérdeztek, jelentkeztem is, de elutasítottak, vélhetően származásom miatt. Ő azt mondta, hogy ne törődjek vele, adjam be újra a kérvényt. Beadtam, és megkaptam az ösztöndíjat. Az utolsó egyetemi évben Zawadowski Alfréd speciális előadásain láttam meg, hogy a szilárdtestfizikában mennyi érdekesség van. A diploma megszerzése után bekerültem az általa vezetett elméleti csoportba. Azóta folyamatosan elméleti fizikusként dolgoztam. Az, hogy ma hazánkban vannak nemzetközi szinten is elismert eredményt elérő, szilárdtestfizikával foglalkozó csoportok, döntően Pál Lénárdnak és Zawadowski Alfrédnek köszönhető.

### **Ha úgy dönt, maradhatott volna az ELTE-n?**

A kar egyik akkori vezető professzora kijelentette, hogy vallásos ember az egyetemen nem kaphat állást. Az egyetemmel ellentétben a KFKI-ban nem számított, hogy kinek milyen a politikai háttere. Teljesítményük alapján ítélték meg a kutatókat.

**Így viszont már értem a professzor úr kitüntető érdeklődését az 1949-től 1960-ig tartó időszak iránt. Ennek eredménye lett a Typotex Kiadónál 2021-ben megjelent A fizika Magyarországon 1945 és 1959 között című kötet, ami igazi tudománytörténeti csemege. Hogyan fogadta a nagyközönség?**

Keszthelyi Lajos akadémikus a COVID-járvány előtt nem sokkal vetette fel, hogy próbáljuk meg összegyűjteni a hazai fizika 1945-ös újraindulását követő másfél évtized dokumentumait. Engem javasolt erre a feladatra. Kitört a koronavírus-járvány, nem lehetett feljárni az intézetbe,

így belevetettem magamat ebbe a munkába. Úgy érzem, hogy erről a nagyon érdekes időszakról egyedi anyagot állítottam össze. Bemutattam a fizika tudományát művelő intézményeket, illetve az ezekben tevékenykedő embereket. Az eredmények mellett természetesen szó esik benne a politikai tisztogatásokról is és a kommunista párt, az MKP, majd utódja, az MDP beavatkozásairól a szakma életébe. A könyv második része a korszakra vonatkozó életrajzi lexikon, amely felrajzolja a fizikusszakma korabeli családfáját, mestereket és tanítványait.

A kötet megjelenése után határoztam el, hogy feldolgozom annak történetét, hogy az Akadémia 200 éve alatt a fizikusok, csillagászok mit tettek az Akadémiáért, illetve az Akadémia mit tett a fizikáért és a csillagászatért. A hatszáz oldalas munka első négyszáz oldala a fizika és az Akadémia közös története, a további kétszáz oldal pedig a személyi rész. Ezen a könyvön még dolgozom; remélem, hamarosan nyomdába kerül.

### **Az MTA-nak két fizikus elnöke volt: Eötvös Loránd és Pálinkás József. Mit adtak ők a tudótestületnek ebben a pozícióban?**

Mindkettejüknek meghatározó szerepe volt az MTA életében. Az Eötvös Loránd előtti elnökök mind nagyszerű vezetők voltak, de azért kerültek abba a pozícióba, mert valamilyen módon a politika felől érkeztek. Eötvös Loránd később politikus is lett, de ő kiemelkedő tudósként lett akadémiai elnök. Ő volt az első, aki a tudós testület ünnepi közgyűlésén tartott nyitóbeszédében tudományos eredményekről beszélt.

Pálinkás József az intézethálózat átszervezésével, modernizálásával tett sokat a hazai kutatásért. Ő indította el a tehetséges magyar kutatókat hazahívó, illetve itthon tartó Lendület programot.

### **Egyik interjújában olvastam, ahhoz, hogy valaki igazán jó fizikus legyen, kíváncsinak és nyitottnak kell lennie. Kell még más is?**

Kitartás. Nyilvánvalóan nagyon kell érdeklődni a fizikai iránt, de ezt nem lehet úgy csinálni, hogy 8-tól 4-ig bemegyek a munkahelyemre és csak akkor foglalkozom a fizikával, majd amikor hazamegyek, mást csinálok. A kutatói pálya teljes elkötelezettséget igényel. Ezt a családnak nem könnyű elviselni. Erről a három lányom és tizenegy unokám tudna mesélni.

### **A lányait sikerült megfertőzni a tudománnyal, vagy látva az édesapjuk példáját, azt mondták, hogy valami egészen más életet szeretnének élni?**

Egyikük sem fordult a természettudomány felé. Ez részben abból is adódik, hogy összességében közel tíz évet voltam, voltunk külföldön. A külföldi utak alatt a lányok kiválóan megtanultak angolul, franciául; az életükben a nyelvtudás meghatározó szerepet játszik. Két lányom tanárnő, a harmadik tanítónő lett. Tehát nem lettek kutatók, tudósok, de nem baj.

### **Az 1970-es évektől gyakran megfordult külföldön. Mi volt ennek ára?**

Egy elviselhető apróság. A KFKI-ban az 1960-as évek közepén, második felében az volt az elvárás, hogy ha valaki szeretne hosszabb időre Nyugatra utazni, előtte töltsön el legalább egy fél évet a Szovjetunióban. Azért érzem szerencsésnek magam, mert engem nem Dubnába, hanem a

Landau Intézetbe küldtek, ami akkor a világ talán legjobb elméleti fizikai központja volt. A névadót, Lev Davidovics Landau Nobel-díjas szovjet elméleti fizikust – már súlyos balesete után – csak egyszer láttam egy szemináriumon. A Landau körül dolgozó világhírű kutatókkal viszont közeli kapcsolatba kerültem. Néhányukkal szinte barátok lettünk. Ezt követően mehettem Nyugatra. 1970–71-ben és 1985–88-ban összesen öt évig a grenoble-i Laue–Languevin Intézetben voltam vendégkutató. 1978–80-ban a University of Illinois Urbana-Champaign, 1984–85-ben és 1991–92-ben pedig a lausanne-i egyetem vendégprofesszora voltam.

### **Nem merült fel, hogy végleg kint maradnak?**

Nem. Jó volt kimenni, jól éreztük magunkat, de mindig magyarnak tartottuk magunkat, folyamatosan bennünk volt, hogy hazajövünk.

### **Ugyanott, a KFKI egyes számú épületében dolgozott szinte egész életében. Mit jelent Önnek ez a kutatóhely?**

Mindent, hiszen ottani munkámhoz fűződik tudományos pályám minden mérföldköve. 1964-ben kaptam állást a KFKI szilárdtest-fizikai laboratóriumában. 1970-ben védtem meg a mágneses fázisátalakulások Landau-elméletének általánosításával kapcsolatos eredményeimet tartalmazó kandidátusi értekezésemet. Ennek alapján avattak doktorrá az ELTE-n sub auspiciis kitüntetéssel. 1978-ben lettem a fizikai tudomány doktora a renormálás egy új módszerét bemutató munkáért. 1987-ben a Magyar Tudományos Akadémia levelező tagjává, 1993-ban pedig rendes taggá választottak.

A pályámat színezték rövidebb-hosszabb külföldi útjam és oktatási tevékenységem. Az ELTE-n az 1972–73-as tanévtől kezdődően vettem részt a szilárdtestfizika oktatásában. Eleinte speciális előadásokat tartottam. Ennek alapján lettem címzetes egyetemi tanár 1982-ben. 1989-től a fizikushallgatók kötelező, illetve a szakirányban választott szilárdtestfizika előadásait is nagyrészt én tartottam. Egyetemi tanári kinevezést azonban csak a rendszerváltozás után, 1992-ben kaptam a Szilárdtestfizika Tanszékre – másodállásban, mert főállásban maradtam az intézetben. 70 éves koromig egyetemi tanárként, aztán még öt évig professor emeritusként tanítottam. 75 évesen azt mondtam, most már jönnek fiatalok, vegyék át a még fiatalabbak tanítását.

### **A 2011-ben kapott Széchenyi-díj indoklásában A modern szilárdtestfizika alapjai című háromkötetes tankönyvét is kiemelték. Hogyan született meg ez a mű?**

Minden évben írtam magamnak egy jegyzetet, és azal mentem be az óráimra. Egy idő után a három féléves tárgyhoz készült jegyzeteim alapján jött létre a kérdésben említett háromkötetes munka. Mindent beleírtam, amiről azt gondoltam, hogy arra egy szilárdtestfizikát tanuló – akár a doktori fokozat megszerzésére hajtó – fiatal szakembernek szüksége van, illetve lehet. Mások is fontosnak tartották ezt a művet, hiszen ezért is kaptam meg a Széchenyi díjat. A Springer angol nyelven is megjelentette ezt a munkát. Külföldi egyetemeken szintén használták a könyveimet.

### **Mivel foglalkozott kutatásai során?**

Egyetemista koromban az volt a közvélekedés, hogy aki fizikus, az biztosan atomfizikus. Az atomfizika a mikro-

világgal foglalkozik. A másik oldalon ott van az univerzum, az asztrofizika, ami pedig az egészen nagy skálájú objektumokkal, eseményekkel foglalkozik. A kettő között van a szilárdtestfizika, amely a mindennapi életünk tárgyainak fizikája. Tehát leegyszerűsítve fogalmazva azt kutatja, hogy miért fém a fém, miért szigetelő egy szigetelő. Akkor még keveset tudtunk a félvezetőről, a folyadékkristályokról. Eleinte mágnességgel foglalkoztam, majd megértettem, hogy a szilárdtestek legizgalmasabb tulajdonságait az szabja meg, hogy mi történik bennük az elektronokkal. Bár a szerkezetet a nagy alkotórészek, azaz az atommagok elhelyezkedése adja, és az elektronok mintegy ragasztóanyagként tartják össze azokat, ennél sokkal fontosabb, hogy az elektronok hogyan mozognak az atomok között, illetve mennyire erős vagy gyenge az elektronok közötti kölcsönhatás.

Elméleti szilárdtestfizikusként az erősen korrelált, alacsony dimenziós rendszerek fizikájával foglalkoztam. A leendő fizikusok, akik az egyetemen még csak ismerkednek a szilárdtestfizikával, olyan egyszerű modellekről tanulnak, ahol az elektronok közötti kölcsönhatások szinte elhagyhatók. Ehhez képest számos olyan anyag létezik, ahol ez a megközelítés nem állja meg a helyét, mert a részecskék közötti kölcsönhatások rendkívül fontos szerepet játszanak. Az ilyen rendszerekre használjuk az erősen korrelált kifejezést, melyek tulajdonságai újdonságot jelentenek a megszokottakhoz képest. Ez volt a kutatásaim egyik témája. A másik az alacsony dimenziós rendszerekkel kapcsolatos. Háromdimenziós világunkban vannak olyan anyagok, amelyekben az elektronok lényegében csak egy síkban vagy egy atomi lánc mentén mozoghatnak. Ezeket nevezzük kétdimenziós (kvázi-kétdimenziós), illetve egydimenziós anyagoknak. Ezeknek az elektronok korlátozott mozgása következtében megjelenő megváltozott tulajdonságaival, illetve azok elemzésével foglalkoztam sokat. A korábban használt módszerek nem voltak elegendők a kölcsönhatás kezelésére. A térelméletből kölcsönzött módszereket kellett úgy módosítani, hogy az alacsony dimenziós szilárdtestek kölcsönható elektronjainak rendszerében megjelenő anomáliákat kezelni lehessen.

### **Most milyen problémák érdeklik?**

A fizika elmúlt 200 évét feldolgozó kötet mellett van még egy nagy projekt. Amikor elkezdtem a tankönyv írását, rájöttem, hogy olykor nekem is problémát jelent az, hogyan kell bizonyos szakkifejezéseket helyesen írni. A diákjaim, kollégáim szövegeit olvasva azt láttam, hogy ez másoknak is gondot jelent. Két nyelvész kollégával évtizedek óta dolgozunk egy fizikai helyesírási szótáron. Eddigi eredményünk az Akadémia honlapján elérhető. A szógyűjtemény többé-kevésbé összeállt, már csak a nyelvészeknek kellene valamilyen módon ebben rendet rakniuk. Ha ez megvalósul, akkor úgy érezhetem, hogy egy lezárt életút van mögöttem. Időnként felmegyek a KFKI-ba, de az utóbbi néhány évben a kutatásaim színhelye inkább az Akadémia levéltára volt.

### **Volt esetleg, ami kimaradt az életéből?**

Úgy gondolom, hogy több elismerést kaptam, mint amit megérdemeltem. Az ad feloldozást, hogy kíváncsiság, szorgalom és kitartás jellemzett. Ezen tulajdonságoknak köszönhetem az eredményeimet.



Öveges Tanár úr utódai – Fizikai kísérletek nem csak tudósoknak



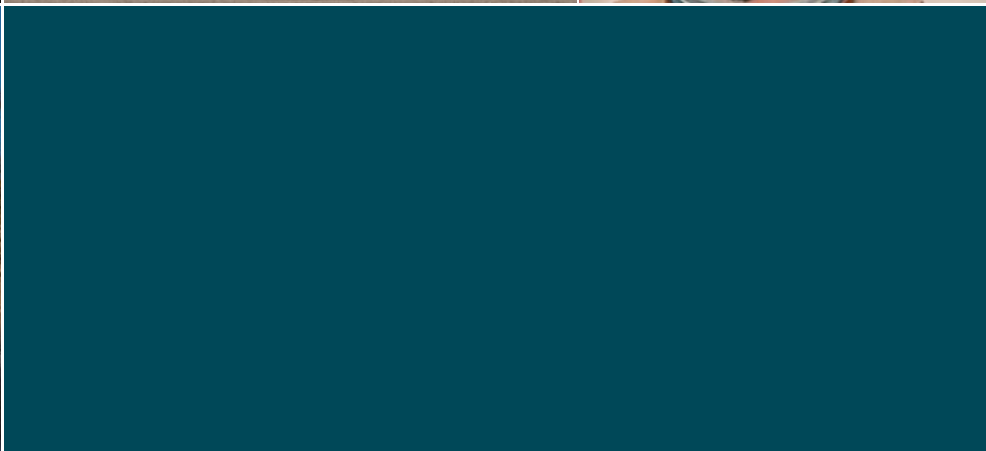
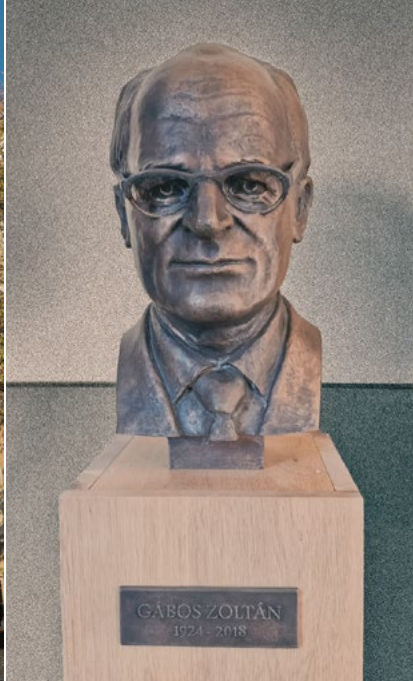
# Kutatók Éjszakája az Ericsson Házban

| Időpont            | Az előadás címe                                                                          | Az előadó neve                                                                                                                                |
|--------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 15:50–16:00        | Megnyitó – a program felvezetése                                                         | <b>Dr. Jarosievitz Beáta &amp; Dr. Sükösd Csaba</b>                                                                                           |
| 16:00–16:35        | Színek, fények, energiaátmenetek                                                         | <b>Kilián Balázsné Dr. Raics Katalin</b> , Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma és Kollégiuma, Pécs (Ericsson-díj 2025)                       |
| 16:45–17:20        | A fizika érdekes, izgalmas, olykor meglepő részei                                        | <b>Pántyáné Kuzder Mária</b> , Miskolci Herman Ottó Gimnázium, Miskolc (Ericsson-díj 2016)                                                    |
| 17:30–18:05        | Kvantumshow                                                                              | <b>Dr. Jarosievitz Beáta</b> , Budapest XIV. Kerületi Teleki Blanka Gimnázium, Budapest (Ericsson-díj 2010)                                   |
| 18:15–18:50        | Tartsunk egyensúlyt!                                                                     | <b>Hasznosi Tamásné</b> , Sashalmi Tanoda Általános Iskola – Csodák Tanodája, Budapest (a győri Mobilis „Kísérletbazár” versenyén különdíjas) |
| <b>19:00–19:40</b> | <b>Kerekasztal-beszélgetés a STEM diákolimpiai csapatok tagjaival</b>                    | <b>Vendégünk:<br/>Prof. Dr. Krausz Ferenc<br/>Nobel-díjas fizikus</b>                                                                         |
| 19:50–20:25        | Kísérletek a fizika különböző területeiről, a légnyomástól az elektromágneses indukcióig | <b>Nagy Tibor és Nagyné Biró Kornélia</b> , Szolnok (Ericsson-díj 2016)                                                                       |
| 20:35–21:10        | Erőhatások–kísérletek saját készítésű eszközökkel                                        | <b>Filep Doina Otília</b> , Megyaszói Mészáros Lőrinc Körzeti Általános Iskola, Megyaszó (Ericsson-díj 2018)                                  |
| 21:20–21:55        | Tűz és robbanás – amikor a fizika lángra kap!                                            | <b>Berkes-Sinka Márta</b> , Egri Dobó István Gimnázium, Eger (Ericsson-díj 2025)                                                              |
| 22:05–22:40        | Gurul, pattan, száll – a sportlabdák mérnöki fizikája                                    | <b>Dr. Nagy Anett</b> , Szegedi Radnóti Miklós Kísérleti Gimnázium, Szeged (Ericsson-díj 2008, Öveges díj – 2009)                             |
| 22:50–23:25        | Látható és láthatatlan                                                                   | <b>Dr. Szeideman Ákos</b> , Eötvös József Gimnázium és Kollégium, Tata (MOL Mester-M díj, Mikola Sándor-díj)                                  |

**2025. szeptember 26.** | Ericsson Ház, 1117 Budapest, Magyar tudósok körútja 11.

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







UNIVERSITATEA BABEȘ-BOLYAI  
BABEȘ-BOLYAI TUDOMÁNYEGYETEM  
BABEȘ-BOLYAI UNIVERSITÄT  
BABEȘ-BOLYAI UNIVERSITY  
TRADITIO ET EXCELLENTIA

# BBTE FIZIKA KOLOZSVÁR

<https://atom.ubbcluj.ro/fizika>



GÁBOS ZOLTÁN  
1924 - 2018



COMPUTATIONAL  
PHYSICS



SOLID STATE  
PHYSICS



HIGH ENERGY  
PHYSICS



FIZIKA



FIZIKA  
INFORMATIKA



MÉRNÖKI  
FIZIKA

ALAPKÉPZÉS MESTERKÉPZÉS

ŐSZI FELVÉTELI  
SZEPT. 5-8.

KOLOZSVÁRI EGYETEMI HAGYOMÁNY A XVI. SZÁZADTÓL  
FIZIKA. TUDOMÁNY. MÚLT ÉS JÖVŐ.