

fizikai szemle

**ELFT Ipari Fizikai
Szakosztály**

Anyagtudomány

**Kvantum-
mikroszkóp**

**Fúziós
berendezések**

2024/12

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:

Felélős szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő

Olvasószerkesztő: Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG:

Asbóth János, Bíró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczi Bence, 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

Felélős kiadó: Groma István főtítkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

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

e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

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



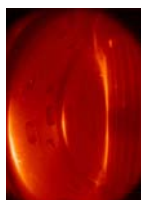
Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.

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

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

AJT-60SA tokamak plazmájának képe

(Fotó: Szepesi Tamás)

TARTALOM

ELFT IPARI FIZIKAI SZAKOSZTÁLY – TEMATIKUS BLOKK

Vendégszerkesztő: Szipőcs Róbert

- Hülber Tímea, Szipőcs Róbert:* Kvantummikroszkópia, anyagtudomány, kísérleti fúziós berendezések – fókuszban az ELFT ipari fizikusai 401
- Temesi Ottó, Varga Lajos Károly, Gulyás Gábor:* Az anyagtudományi kutatások ipari jövője: az innováció hétköznapi lépései a gyakorlatban a tudomány, a technológia és az ipar határán 402
- Az anyagtudomány központi szerepet játszik a tudomány és a technológia fejlődésében. Az anyagtudomány cikkben felsorolt eredményei között találjuk például a Litium-ion akkumulátorokat, a kevlárt, a post-it címkéket, a teflont vagy a pillanatragasztót, hogy csak néhányat említsünk ezek közül.*
- Jegenyész Nikolett, Tamási János, Gali Ádám, Szipőcs Gergely, Kolonics Attila, Szipőcs Róbert:* Új generációs kvantummikroszkóp fejlesztése egy magyar–német EUREKA-együttműködésben 412
- Mágneses terek nagy térbeli felbontású mérésére alkalmas az a fluoreszcencia tartam mérésekre kifejlesztett konfokális mikroszkóp, amelyben érzékelőként gyémántban lévő NV- színcentrumokat használnak fluorofórként a Wigner FK kutatói.*
- G. Szabó István, Dunai Dániel, Kis Zoltán, Nagy Domonkos, Szepesi Tamás:* Kisvállalkozás nagy vállalkozásokban: magfúziós és neutronos képalkotási együttműködések a KFKI-telephelyen 418
- A cikkben a szerzők bemutatják a plazmafizikai folyamatok monitorozásához, szabályozásához kifejlesztett optikai rendszereiket, amelyeket különböző tokamak rendszerű kísérleti fúziós berendezésekhez (Wendelstein 7-X, JT-60SA, ITER) terveztek és készítettek el.*

REFLEKTORFÉNYBEN

- Somjai Ellák:* A mesterséges intelligenciához vezető út – a 2024-es fizikai Nobel-díj 426
- A 2024-es fizikai Nobel-díjat John J. Hopfield és Geoffrey E. Hinton a mesterséges neuronhálók kidolgozásához szükséges alapvető felfedezésekért kapta, ahol a kezdeti lépések alapvetően kapcsolódtak mágneses rendszerekhez és ezek statisztikus fizikai modelljeihez, mint a spinűvegekhez.*
- Panek Sándor:* A tudásom egy része fölösleges lett, de immunitást szereztem a butaságok ellen – interjú a Széchenyi-díjas dr. Szabó Gábor fizikussal 429
- Iskolateremtő lézerfizikai munkájáért és meghatározó tudományos együttműködések kialakításáért idén Széchenyi-díjban részesült dr. Szabó Gábor fizikus, akadémikus, a Szegedi Tudományegyetem Fizikai Intézetének egyetemi tanára. Ötvenéves kutatói múlt van mögötte, és ma az ELI ALPS lézeres kutatóintézetnek az ügyvezetője.*
- A címlapon:* A JT-60SA tokamak egyik legelső plazmájáról EDICAM kamerarendszerrel készített hamisszínes kép (HUN-REN EK Fúziós Plazmafizikai Laboratóriuma)

INDUSTRIAL PHYSICISTS GROUP OF ELFT – THEMATIC BLOCK

- T. Hülber, R. Szipőcs:* Quantum microscopy, materials science, experimental fusion devices – industrial physicists of ELFT in focus
- O. Temesi, L. K. Varga, G. Gulyás:* The industrial future of materials science research: everyday steps of innovation in practice at the border of science, technology and industry
- N. Jegenyész, J. Tamási, Á. Gali, G. Szipőcs, A. Kolonics, R. Szipőcs:* Development of a new generation quantum microscope in a Hungarian–German EUREKA collaboration
- I. G. Szabó, D. Dunai, Z. Kis, D. Nagy, T. Szepesi:* Small business in big business: nuclear fusion and neutron imaging collaborations at the KFKI site

IN SPOTLIGHT

- E. Somjai:* The road to artificial intelligence – the 2024 Nobel Prize in Physics
- S. Panek:* Some of my knowledge became redundant, but I gained immunity against stupidity – interview with the Széchenyi Prize winner physicist dr. Gábor Szabó

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap



KVANTUMMIKROSZKÓPIA, ANYAGTUDOMÁNY, KÍSÉRLETI FÚZIÓS BERENDEZÉSEK – FÓKUSZBAN AZ ELFT IPARI FIZIKUSAI

Hülber Tímea¹, Szipőcs Róbert²

¹Radosys Kft., ²R&D Ultrafast Lasers Kft., Budapest

Elérhetőség: <http://www.iparifizika.hu/>

A *Fizikai Szemle* decemberi tematikus számában az Eötvös Loránd Fizikai Társulat (ELFT) Ipari Fizikai Szakosztálya mutatkozik be három, külön erre a célra megírt cikk formájában. A szerzők a szakosztály tagjai, illetve a velük együttműködésben dolgozó, többnyire a HUN-REN Magyar Kutatóhálózathoz (korábban MTA kutatóintézetek) tartozó kutatók és fejlesztők.

Az ELFT Ipari Fizikai Szakosztálya 2018. július 10-én alakult meg Harmat Péter (Ante Kft.) vezetésével, az ELFT vezetőségének egyetértésével és támogatásával. Az alakuló ülésen 12 fő vett részt 9 cég képviseletében. A szakosztály létrejöttét elsősorban az indokolta, hogy a különböző tudományterületeken dolgozó ipari fizikusoknak nem volt a társulaton belül olyan közös fóruma, ahol a rájuk speciálisan jellemző témákat meg tudták volna beszélni. A taggyűléseken – tipikusan szakterületek szerint csoportosítva – bemutatkoznak a csoportban lévő cégek, vállalat- és laborlátogatásokkal vagy egyéb szabadidős programokkal (pl. múzeumlátogatás) egybekötve. Az elmúlt hat évben a szakosztály megjelent az ELFT Fizikus Vándorgyűlésein, második alkalommal Veszprémben már külön szekciót kitöltő előadásokkal és egy plenáris előadással.

A szakosztály jelenléte az ELFT-n belül a felsőoktatásban fizikusdiplomát szerző fiatalok számára is fontos, hiszen a csoportunk révén tájékozódhatnak arról, hogy hol tudnak fizikusként – az egyetemeken és a kutatóintézeteken kívül máshol is – elhelyezkedni. Mint a most megjelenő dolgozatokból is látni fogjuk, az iparban ugyancsak szükség van rájuk, sőt mi több, ott is kifejezetten érdekes és aktuális szakmai kérdésekkel foglalkozhatnak – versenyképes fizetésekért. Természetesen ezeken a munkahelyeken a profitorientált szempontok jobban érvényesülnek, mint az akadémiai szférában.

2021 októberében a szakosztály vezetését Harmat Pétertől Szipőcs Róbert (R&D Ultrafast Lasers Kft.) vette át. Taglétszámunk jelenleg 36 fő, 15 cég képviseletében. A csoport tagjai értelemszerűen különböző tudományterületeken dolgoznak, és tipikusan részt vesznek más szakcsoportok tevékenységében is. Munkájuk jellemzően a „technológiai fejlettségi szintek” (TRL) skálájának (ld. még a tematikus szám első cikkét) a felső egyharmadában helyezkedik el, amit a többi cikk is jól tükröz.

Az első cikk címe: „Az anyagtudományi kutatások ipari jövője: az innováció hétköznapi lépései a gyakorlatban a tudomány, a technológia és az ipar határán”,

szerzői a H-ION Kft. és a Metalloexpert Kft. munkatársai. A cikk bevezető része az anyagtudomány fejlődését, annak hétköznapijainkra gyakorolt hatását mutatja be néhány példán keresztül. Ilyen például az elhanyagolható hőátagulással rendelkező ötvözetek kifejlesztése, vagy ilyenek a napjainkban oly fontos energiatároló eszközök, a lítiumion akkumulátorok kifejlesztését megalapozó anyagtechnológiai fejlesztések.

A második cikkben egy olyan magyar–német Eureka-projekt legfrissebb eredményeit mutatjuk be, amelyben a HUN-REN Wigner FK kutatói és az R&D Ultrafast Lasers Kft. műszaki fejlesztői egy olyan „kvantummikroszkópot” fejlesztettek ki, aminek segítségével nagy térbeli pontossággal lehet mérni a mágneses tér nagyságát gyémánt részecskéiben lévő NV színcentrumok segítségével. Egyedi színcentrumok esetén meghatározhatóak vele egyetlen elektronpályához tartozó elektronspin állapotai is! A kifejlesztett mikroszkóp tulajdonképpen egy fluoreszcenciaélettartam-mérésekre is alkalmas konfokális mikroszkóp, amelyben a mért élettartam adatok adnak információt a mért mágneses tér nagyságáról, illetve az adott elektronspin állapotáról.

A harmadik cikk a fúziós energiatermelés témaköréhez kapcsolódik, amelyben egy – szintén a KFKI-telephelyen működő – kisvállalkozás, az Optika Mérnökiroda Kft. mutatja be a plazmafizikai folyamatok monitorozásához, szabályozásához kifejlesztett optikai rendszereit, amelyeket a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont kutatóinak kérésére, azokkal együttműködve fejlesztettek ki többek között olyan tokamak rendszerű kísérleti fúziós berendezésekhez, mint a Németországban működő Wendelstein 7-X, vagy a európai–japán összefogással kifejlesztett JT-60SA rendszer. Jelenleg egy olyan munkán dolgoznak a HUN-REN EK Fúziós Plazmafizika Laboratóriumának munkatársaival, amely lehetővé teszi a Franciaországban építés alatt lévő ITER-tokamak (International Thermonuclear Experimental Reactor) gyors és biztonságos leállítását szolgáló pelletbelövő rendszer optikai mérését és monitorozását.

Bízunk benne, hogy a decemberi számban megjelenő írásokkal sikerült felkeltenünk érdeklődésüket az ELFT Ipari Fizikai Szakosztályban folyó munka iránt! Szeretettel várjuk az érdeklődő fizikusok, mérnökök (és cégek) csatlakozását az ELFT-hez, azon belül is Ipari Fizika Szakosztályhoz!

AZ ANYAGTUDOMÁNYI KUTATÁSOK IPARI JÖVŐJE: AZ INNOVÁCIÓ HÉTKÖZNAPI LÉPÉSEI A GYAKORLATBAN A TUDOMÁNY, A TECHNOLÓGIA ÉS AZ IPAR HATÁRÁN

Temesi Ottó^{1,@}, Varga Lajos Károly¹, Gulyás Gábor²

¹H-ION Kft., Budapest, Székesfehérvár

²Metalloexpert Kft., Budapest

@E-mail: otto.temesi@h-ion.hu

Bevezetés

Az anyagtudomány történelmi szerepét mi sem mutatja jobban, mint hogy az emberi kultúra fő (történelem előtti) korszakait is a meghatározó anyagaik alapján neveztük el: kőkorszak, bronzkor és vaskor – egyesek szerint mostanában a szilícium korszakát éljük. Az anyagok fejlődése mindig is kulcsfontosságú volt a technológiai előrelépésekben, mivel az anyagok tulajdonságainak megértése tette lehetővé új eszközök és technológiák kifejlesztését. Sokáig az anyagtudományt a fizika vagy a kémia területéhez sorolták, mivel az anyagok alapvető tulajdonságai ezen tudományok keretein belül voltak leírhatók. Az anyagtudomány önálló területté válása a 20. század során következett be, ahogy a fizikai, kémiai, és mérnöki ismeretek egyre mélyebb integrációja vált szükségessé az összetett anyagszerkezetek és tulajdonságok megértéséhez.

A terület megbecsülését tükrözik a Nobel-díjak is, amelyekkel elismerték az anyagtudomány különleges eredményeit. Az első anyagtudományi Nobel-díjat Charles Édouard Guillaume svájci-francia mérnök kapta 1920-ban az invar ötvözet (tömegszázalékban: 64 Fe, 35 Ni) felfedezéséért. Az invar ötvözet kiemelkedő tulajdonsága, hogy rendkívül alacsony hőtágulási együtthatóval rendelkezik, így mérete gyakorlatilag független a hőmérséklet-változástól 150 °C alatt. Guillaume nemcsak az ötvözet összetételét dolgozta ki, hanem gyártási technológiáját is, ami lehetővé tette precíziós mérőműszerek és hőmérsékleti eltolódástól mentes precíziós mechanikai órák fejlesztését. Az invar felfedezése áttörést jelentett a hőtágulás problémájának megoldásában, és hatalmas előrelépést tett lehetővé az ipar számára, különösen a mérnöki és geodéziai eszközök pontosságának növelésében.

Guillaume felfedezése rámutatott arra, hogy az anyagtudomány egy új, integrált területként képes alapvetően új tulajdonságokkal rendelkező anyagokat biztosítani, amelyek előre nem látott módon formálhatják át a technológiai lehetőségeket. Az invar ötvözet kidolgozása egyben azt is demonstrálta, hogy az anyagok tulajdonságainak tudományos igényű kiaknázása nemcsak a természet törvényeinek ismeretét kívánja meg, hanem a gyakorlati alkalmazhatóságát és a gyártástechnológiáit is, amelyek szintén a modern anyagtudomány integrált részét képezik.

Említhetnénk más Nobel-díjakat is, amelyeket az anyagtudomány terén vagy közvetlen vonatkozással osztottak ki, például a grafén felfedezéséért (Andre Geim és Konstantin Novoselov, 2010), a kvázikristályok feltárásáért (Dan Shechtman, 2011), a kék LED fejlesztéséért (Isamu Akasaki, Hiroshi Amano, Shuji Nakamura, 2014), a topológiai fázisátmenetek és topológiai anyagok megértéséért (David J. Thouless, F. Duncan M. Haldane, J. Michael Kosterlitz, 2016), a lítium-ion akkumulátorokért (John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham, Akira Yoshino, 2019), valamint a kvantumpöttyök kifejlesztéséért (Moungi Bawendi, Louis Brus, Alexei Ekimov, 2023). Ezek mind olyan jelentős eredmények, amelyek



Varga Lajos Károly szilárdtestfizikus, kandidátus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont nyugdíjasa, jelenleg a H-ION Kft. munkatársa. Kutatási területei: híg ötvözetek, amorf fémötvözetek, nanokristályos finemet, nagy entrópiájú ötvözetek és azok alkalmazásai. Két EU- és egy NATO-pályázat magyar koordinátoraként gyarapította fémfizikai műszerparkját. 12 diplomamunka és 9 PhD-dolgozat készült el vezetésével. Két nemzetközi konferenciát szervezett a lágy mágneses anyagok témakörben (1999, 2013).



Temesi Ottó fizikus-mérnök (ELTE), PhD-hallgató (ELTE). A H-ION Kutató, Fejlesztő és Innovációs Kft. társalapítója, K+F+I igazgatója és K+F+I tanácsadó. Szakterülete: speciális és szuperötvözetek, energiatárolási rendszerek (fém-ion akkumulátorok, hidrogéntárolás), új generációs szigetelőanyagok; anyagtudományi és anyagtechnológiai K+F+I projektek tervezése, vezetése. Doktori értekezésének címe: „Nagy entrópiás szuperötvözetek tervezése és vizsgálata magas hőmérsékletű alkalmazásokhoz”.



Gulyás Gábor fizikus-mérnök (ELTE), PhD-hallgató (ELTE), a Metalloexpert Kft. vezető kutatómérnöke. Szakterülete: vékonyréteg- és vákuumtechnika, lágy mágneses anyagok, nagy entrópiás ötvözetek funkcionális tervezése és 3D fémnyomtatási technológiákba történő integrálása; metallurgiai célgépek és technológiák fejlesztése. Doktori értekezésének címe: „Magas hőmérsékletű termoelektromos generátor, nagy entrópiás ötvözetre alapozva”.

az anyagtudomány különleges területeire és az anyagok innovatív tulajdonságaira épülnek. De most koncentráljunk arra, mi is a közös ezekben a díjazott nagyszerű anyagtudományi felfedezésekben, felismerésekben! Az egyik közös vonás ezekben a felfedezésekben az a különleges, nem mindenhol elérhető technikai előfeltétel, amely az új anyagok létrehozásához és egyedi tulajdonságaik feltárásához szükséges volt. Például az invar ötvözetek előállításához a Heraeus cég által kidolgozott hidegtégelyes olvasztási technika vált nélkülözhetetlenné, mivel ez megakadályozta az olvadék reakcióját az olvasztótégely falával, ezzel fenntartva az ötvözet tisztaságát és stabilitását.

A kék LED fejlesztése során a molekuláris sugárnyaláb-epitaxia (MBE) technológiát alkalmazták, amelyet a Knudsen-forrás és a visszaverődéselectron-diffrakció (REED) detektor egészített ki, lehetővé téve az ultravékony InGaN réteg szendvicselését két gallium-nitrid réteg közé. E technikai újítások pontos rétegfelépítést biztosítottak, ami szükséges a kék fényt kibocsátó félvezető heterostruktúrák működéséhez.

A grafén felfedezése során az anyag különleges, kétdimenziós szerkezetét fizikai leválasztással (mikromechanikai exfoliálással) érték el, amely az elektronikus tulajdonságok szempontjából forradalmi áttörést jelentett. Ehhez nélkülözhetetlen volt az atomi rétegeket mikroszkóposan stabil formában leválasztó eljárás alkalmazása, amelyhez speciálisan éles szerszámokra és ultratiszta környezetre volt szükség, hogy megakadályozzák az anyag szerkezetének szennyeződését.

A kvázikristályok felfedezése új megértést hozott a kristálytanban, mivel ezek az anyagok a hagyományos periódusos szerkezet nélküli szimmetriával bírnak. Dan Shechtman, a kvázikristályok felfedezője a nagy felbontású transzmissziós elektronmikroszkópiát (HRTEM) alkalmazta a szokatlan ötszörös forgásszimmetria és a kváziperiodikus szerkezet megfigyeléséhez, amely hagyományos röntgendiffrakcióval nem lett volna látható. Ez a technológia alapvető jelentőséggel bírt a kvázikristályos struktúra azonosításában.

A topológiai anyagok és fázisátmenetek esetében olyan speciális körülmények között dolgoztak, ahol a kvantummechanikai topológiai tulajdonságok kiemelkedő szerepet játszanak, például a kétdimenziós rendszerekben, ahol az elektromos vezetőképesség stabil a zavarokkal szemben. Az ilyen anyagok felfedezéséhez olyan mérési és vizsgálati technikákra, mint a pásztázó alagútmikroszkópia (STM), és a szinkrotron-röntgenspektroszkópia volt szükség, amelyek nagy felbontásban mutatják meg az elektronok szokatlan eloszlását és a vezetési állapotok stabilitását.

A lítium-ion akkumulátorok fejlődése szintén példázza a technikai újítások fontosságát, mivel ezek az energiatároló rendszerek lehetővé tették az energiasűrűség és a hosszú élettartam optimalizálását. A lítium-ion akkumulátorok fejlesztéséhez speciális elektrokémiai analízis, a töltési és kisütési ciklusokat monitorozó rendsze-

rek, valamint a nedvességmentes tisztatér-technológia alkalmazása volt elengedhetetlen, mivel a lítium rendkívül érzékeny a nedvességre és egyéb szennyeződésekre.

A kvantumpöttyök fejlesztése során új, nanoméretű anyagokat hoztak létre, amelyek lehetővé teszik a fénykibocsátás színének finom szabályozását. Ez a kijelzők technológiájában és az orvosi képalkotásban rendkívüli perspektívával bír. A kvantumpöttyök előállításához nagy pontosságú, kontrollált növesztési eljárásokat, például kolloidális szintézist alkalmaztak, amely során az oldatban lévő nanorészecskék méretét és formáját precízen szabályozták, hogy a kívánt fénykibocsátási tulajdonságokat biztosítsák.

További közös vonás ezekben az anyagtudományi áttörésekben, hogy az új anyagok felhasználásával egyúttal új hasznos jelenségek is megvalósíthatók. Az invar ötvözet esetében például a hőtágulás hiánya tette lehetővé a precíziós mérőműszerek használatát (maga a jelenség pedig máig az elméleti kutatás tárgya). A kék LED-ek felfedezése az energiatakarékos fehér fényt kibocsátó LED-lámpák kifejlesztéséhez is elvezetett. A grafén kiemelkedő elektromos vezetőképessége és mechanikai szilárdsága új elektronikai eszközök számára nyitott utat, míg a kvázikristályok különleges szimmetriája és felületi szerkezete új típusú felületkezelési alkalmazásokat tett lehetővé. A topológiai anyagok, mint például a topológikus szigetelők, stabilan megőrzik vezetési tulajdonságaikat külső zavarok mellett is, ami fontos lehet a kvantumszámítógépek fejlesztésében. A lítium-ion akkumulátorok olyan lehetőséget nyújtottak az energiatárolás hatékonyságának növelésére, ami új energetikai megoldások kifejlesztéséhez is elvezethet, míg a kvantumpöttyök színvezérelhetősége új alkalmazások bevezetését is lehetővé teszi a kijelzőtechnológiában és a nanomedicinában.

Összességében az anyagtudományi újítások nemcsak új anyagokat, hanem technikai újításokat és fejlesztéseket is igényelnek, amelyek elérhetővé teszik ezeknek az anyagoknak a speciális tulajdonságait, és lehetővé teszik azok gyakorlati alkalmazását – olyanokat is, amelyek az alkalmazások eredeti spektrumát is kiszélesítik. Ezáltal az anyagtudományi kutatás jövője sok izgalmas lehetőséget tartogat. Az ipar számos területén fontos szerepet játszanak, sőt, alapját képezik további új anyagok fejlesztésének, amelyek ismét lehetővé teszik innovatív technológiák kifejlesztését és új termékek előállítását.

Az anyagtudomány központi szerepet játszik tehát a modern tudomány és technológia fejlődésében, mivel az anyagok szerkezetének és tulajdonságainak megértése alapvető fontosságú az új eszközök, gépek és technológiák kifejlesztéséhez. Az anyagtudomány az anyagok viselkedésének és tulajdonságainak mélyebb megismerésére törekszik, különösen a szerkezetük és összetételük szempontjából. Ez a tudományterület – mind elméleti és kísérleti szinten – szorosan összefonódik más természettudományokkal; különösen a fizikával, a kémiával és a biológiával, és alapvető fontosságú a mérnöki tudományokban is.

Az anyagtudományi kutatások jelentősége és fókuszja

Az anyagtudományi kutatások középpontjában olyan kérdések állnak, mint a szilárdság, keménység, rugalmasság, elektromos és hővezetés, korrózióállóság, optikai tulajdonságok és egyéb olyan fizikai, kémiai jellemzők, amelyek meghatározzák az anyagok felhasználási lehetőségeit. Az anyagtudomány különböző típusú anyagokat – például fémeket, kerámiákat, polimereket, félvezetőket, kompozitokat és újabban nanoméretű anyagokat – vizsgál, és keres olyan új tulajdonságokat, amelyek innovatív alkalmazásokhoz vezethetnek.

A 21. század egyik legnagyobb kihívása a fenntartható anyaghasználat megvalósítása. Ez nemcsak az anyagok élettartamára és újrahasznosíthatóságára vonatkozik, hanem arra is, hogy csökkenteni kell az energiafelhasználást és a környezeti terhelést az anyagok előállítása és felhasználása során. Ennek érdekében az anyagtudományi kutatások jelentős része új, energiatakarékos technológiák, például a fentebb említett LED-es világítás fejlesztésére irányul, amelyek radikálisan csökkentik a globális energiaigényt és hozzájárulnak a fenntarthatóbb jövőhöz.

Anyagtudomány és (véletlen) innováció

Az anyagtudományi kutatások jelentős hatást gyakorolnak az iparra és mindennapi életünkre, különösen akkor, ha a tudományos eredmények közvetlenül alkalmazhatók az ipari fejlesztésekben. Az innováció kulcsa a tudomány és ipar együttműködésében rejlik, hiszen az ipari partnerek versenyképes termékeket nyerhetnek az új felfedezésekből, míg a kutatók számára ez biztosítja eredményeik gyakorlati megvalósítását. A technológiatranszfer folyamatának révén az anyagtudományban elért eredmények gyorsan átültethetők az ipari gyakorlatba, felgyorsítva a fejlesztési folyamatokat és elősegítve a gazdasági növekedést vagy éppen a fenntarthatóságra való áttérést.

Az ipari problémák, kihívások megoldásához kapcsolódó kutatás-fejlesztési tevékenységek során gyakran keletkeznek „melléktermékek” is amelyek, annak farvizén jönnek létre, hogy a kutatásban a negatív eredmény is eredmény. Ezek a „sikertelen próbálkozások” később számos más területen, így a mindennapi életben is hasznosíthatók. Ezek a melléktermékek gyakran váratlan módon és nagy hatékonysággal tudnak új termékek vagy technológiák létrehozásához vezetni. Nézzünk néhány példát ezekre!

1. Neoprén – a szintetikus gumi kutatásának sikertelen kezdete

A 1930-as évek elején a DuPont vállalat kutatója, *Wallace Carothers* szintetikus gumi kifejlesztésén dolgo-

zott, mivel akkoriban nagy igény volt az olyan anyagok iránt, amelyek helyettesíthetik a természetes gumit az iparban. Bár az eredeti cél a gumipótlás volt, *Carothers* és csapata nem volt képes előállítani egy teljesen megfelelő szintetikus gumit. Ennek ellenére felfedezték a neoprén nevű anyagot, amely kiváló olajállóságot és hőállóságot mutatott, nem beszélve kiváló hőszigetelő tulajdonságairól (hővezetési együtthatója tipikusan 0,05–0,065 W/m·K) [1].

2. Szuperragasztó – a műanyag irányzék fejlesztésének mellékterméke

Az 1940-es években *Harry Coover*, az Eastman Kodak kutatója átlátszó műanyag irányzékot akart létrehozni a második világháború során használt fegyverekhez. Kutatásai során egy olyan anyagot fejlesztett ki, amely rendkívül ragacsos volt, de nem tudta megvalósítani az eredeti célt, mert az anyag túlságosan tapadt, és ezzel nehezen kezelhetővé vált. Később, 1951-ben *Fred Joyner*, Coover kollégája felfedezte, hogy ez az anyag (cianoakrilát) különlegesen erős kötést biztosít, amelyet a legkülönbébb anyagok ragasztására lehet használni. Így jött létre a szuperragasztó (pillanatragasztó), amelynek gyors kötése számos ipari, háztartási és orvosi alkalmazáshoz is ideális lett [2].

3. Teflon – a hűtőközeg-kutatás véletlen eredménye

1938-ban *Roy Plunkett*, a DuPont kutatója egy új, nem mérgező hűtőközeg kifejlesztésén dolgozott. Kísérletei során azonban véletlenül olyan anyagot hozott létre, amely rendkívül tapadásmentes volt, és nagy hőállóságot mutatott. Az új anyag, a politetrafluoretilén (PTFE) vagy más néven teflon nem volt használható a hűtőközegként, amire eredetileg tervezték, viszont a rendkívüli tapadásmენტességét különféle alkalmazásokban kamatoztatták. Ma a teflon az edények, szigetelések, tömítések és számos ipari termék gyártásában elterjedt, különösen a tapadásmentes konyhai eszközöknél [3].

4. Post-it jegyzettömb – a gyenge ragasztó mint az erős mellékterméke

1968-ban a 3M vegyész, *Spencer Silver* egy erős ragasztó kifejlesztésén dolgozott, de az eredeti cél elérése helyett egy rendkívül gyenge kötésű ragasztót alkotott meg. Ezt az anyagot nem tartották hasznosnak, mert nem nyújtott tartós tapadást, ám évekkel később *Arthur Fry*, a 3M egy másik munkatársa felismerte, hogy a gyenge ragasztó ideális lehet könyvjelzők és jegyzetek rögzítéséhez. Így született meg a Post-it jegyzettömb, amely azóta számos irodai és háztartási alkalmazásban alapvető eszközzé vált [4].

5. Penicillin – a szennyezett minta mint orvosi áttörés

1928-ban *Alexander Fleming* baktériumok növekedésének tanulmányozása során felfedezte, hogy egy penészgomba (*Penicillium notatum*) elpusztítja a baktériumokat. Fleming eredetileg nem antibiotikumot keresett, csupán a baktériumkultúrák viselkedését figyelte. Felfedezése, amely nem volt szándékos, forradalmasította az orvostudományt, és a penicillin lett az első széles körben alkalmazott antibiotikum, amely rengeteg fertőző betegséget gyógyíthatóvá tett [5].

6. Lítium-ion akkumulátorok – az eredeti fejlesztési célt túlszárnyaló alkalmazások

A lítium-ion akkumulátorok fejlesztése során *John B. Goodenough*, *M. Stanley Whittingham* és *Akira Yoshino* kezdetben olyan energiatárolási megoldást kerestek, amely könnyebb és hosszabb élettartamú lehet, mint a hagyományos ólom-savas akkumulátorok. Bár eredetileg az elektromos autók és hordozható elektronikai eszközök számára fejlesztették, a lítium-ion technológia az energiatárolás számos új területén vált alapvetővé, beleértve a megújuló energiaforrások hálózati tárolását, valamint az űrkutatást és a katonai eszközöket [6].

7. Kevlár – erős gumi helyett páncélzat

1965-ben *Stephanie Kwolek*, a DuPont kutatója egy erős és könnyű gumialapú anyagot keresett az autógumik megerősítésére. Ehelyett olyan szintetikus rostot fedezett fel, amely sokkal erősebb volt, mint az acél, és ellenállt a szélsőséges hőmérsékletnek. Bár a kezdeti cél nem valósult meg, az új anyag, a kevlár végül golyóálló mellényekben, védőruházatokban és különféle ipari termékekben vált elterjedtté, mivel kiváló védelmi tulajdonságokkal rendelkezik [7].

Ezek csak néhány példát mutatnak arra, hogyan vezethetnek a kutatás-fejlesztés – különösen az anyagtudományi és anyagtechnológiai kutatás-fejlesztés – nem szándékos, nem várt eredményei jelentős innovációkhoz a mindennapi termékek és technológiák terén.

A kutatás-fejlesztés mint az innovációba ágyazott kulcselem

Az anyagtudományi kutatás és fejlesztés alapja az interdiszciplináris szemléletmód – hiszen tudjuk, *a jelenségek legtöbbször a határfelületen játszódnak le* – és a rendszerszemlélet, valamint a nyitottság az újra és a szokatlanra. A kíváncsiság hajt bennünket előre: nem feltalálók, hanem inkább felismerők vagyunk, hiszen az anyagi világ törvényszerűségei mentén működik, és nekünk (tudósoknak, mérnököknek) lehetőségünk nyílik pillanatnyi

bepillantást nyerni ezekbe a törvényekbe és felismerni azokat.

Ebben a kontextusban érvényes Kopernikusznak tulajdonított gondolat is, miszerint: „a tudomány rendre a hit birodalmába utazik az intuíció szárnyán – s onnan sosem tér vissza szüzenir nélkül”. Eme gondolat lényege, hogy a tudományos kutatás gyakran lépi át a megszokott határokat, és ismeretlen területekre merészkedik, ahonnan új ismeretekkel tér vissza. Ez rámutat arra, mennyire fontos a felfedezés, a felismerés szelleme és a nyitottság az új lehetőségek iránt.

Ez az út sokszor problémacentrikussággal indul, mint egy keresés, és a megadatott villanásnyi bepillantás eredményeképpen megfogalmazódik, formát ölt a koncepció, az ötlet. Sokszor ez a villanás egy tömörített „csomagként” érkezik, melyet eltart egy ideig kibontani. Innen az utunk gyakorlati része már a megoldáscentriskusság sávjába tér át az autópályán, amelyen határterületi szemléletmóddal és rendszerszemlélettel haladva a cél a megértés és a koncepció helyességének bizonyítása. Ezen az autópályán van, amikor lassítószávbba, van amikor gyorsítószávbba sorolunk vagy szorulunk.

Az innováció autópályáján haladva fontos felismerni, hogy a rendszerszemlélet kulcsszerepet játszik. A különböző rendszerek összekapcsolása újfajta komplexitást tár fel, ahol az egyedi komponensek nem csupán önmagukban, hanem az egész rendszer részeként értelmezendők. Ez a megközelítés különösen az anyagtudományban elengedhetetlen, ahol a cél az anyagok molekuláris szintű megértése és a belső szerkezetek tudatos tervezése. Az utóbbi évtizedekben a nanotudományok fejlődése lehetővé tette, hogy az anyagokat az atomok szintjén vizsgáljuk és módosítsuk, így teljesen új szerkezetek és tulajdonságok jelenhettek meg. Ez a tudományos áttörés alapvető szerepet játszott a különféle anyagtulajdonságok – például a szilárdság, vezetőképesség vagy hőállóság – új szintű manipulációjában és felismerésében (lásd pl.: aerogélek). Ezek azóta is egyre intenzívebben jutnak el arra a szintre, hogy ipari alkalmazásként jelenjenek meg. A különböző tudományterületek – például a kémia, fizika, biológia – találkozása gyakran új lehetőségeket teremt a problémák megoldására, hiszen egy-egy kutatás új perspektívából közelít egy problémához, és így válik képessé olyan megoldásokat találni, amelyeket korábban talán nem tartottak kivitelezhetőnek.

Ez a folyamat, amelyben a kutatás és fejlesztés időszakonként akár egymást is „beelőzi”, dinamikus és egymásra épülő. Van, amikor előbb kell fejleszteni, hogy utána kutatni lehessen. Ez a szépsége a határok nélküli innovációnak – az autópályán számos sáv és leágazás található, ahol a kutatók, mérnökök bátran mozoghatnak. Az anyagtudományi innováció tehát nemcsak egy új anyag vagy technológia megalkotásában nyilvánul meg, hanem abban, hogy a meglévő ismereteinket új módon alkalmazzuk, új lehetőségeket fedezünk fel, és folyamatosan kibővítjük a „sávokat”, ahol a jövő technológiai születhetnek. Mindehhez hozzátartozik az is, hogy

nem pusztán az anyagokkal, hanem az új gondolkodásmódokkal is dolgozunk, hiszen a valódi innováció lényege a folyamatos kérdezés, és az, hogy a megszokott határok mögé tekintve, eddig ismeretlen megoldásokat találjunk – ezáltal formálva az anyagtudomány jövőjét és az új ipari lehetőségeket.

Ahogy oktatóink, mentoraink tanították: „fontos, hogy jól kell kérdezni a természettől, hogy hajlandó legyen válaszolni”. Albert Einstein szavaival élve: „nem az a fontos, hogy mindent tudjunk, hanem az, hogy megértjük, hogyan kell kérdezni”. Az igazi tudományos kíváncsiság és a felismerések alapja a jól feltett kérdés, hiszen azok a kutatók és mérnökök is, akik képesek megfogalmazni a megfelelő kérdéseket, olyan válaszokat kapnak a természettől, amelyek végül az ismeretek határainak kitolásához vezetnek.

Cégünk alapításakor az innovációs lánc első szakaszára definiáltuk magunkat. Ez a szakasz az alap- és alkalmazott kutatás, valamint kísérleti fejlesztés. Ennek a végén jön létre a prototípus ami sokféle formát ölthet (anyag, összetétel, berendezés, műszer, módszertan, technológia stb). Technológiai készültségi szint (technology readiness level) tekintetében ekkor TRL1–TRL5-ről beszélünk a gyakorlatban [20]. Ezt a szakaszt jól jellemzi az előzőekben hivatkozott kopernikuszi gondolat.

Idővel, ahogy a különböző kutatás-fejlesztési eredmények megszületnek, az innováció felé mutató folyamatban több alapvető kérdés is felmerül. Hogyan lehet ezeket az eredményeket további forrásokkal támogat-

ni? Miként biztosítható a folyamatos fejlődés? Hogyan hasznosíthatók az elért eredmények, és kik lesznek képesek megérteni, illetve kinek kell továbbvinni azokat?

Ekkor lépünk egy másik gondolattal jellemezhető szakaszba, ami már a piaci tesztelés, validáció mellett a termék és technológia optimalizálásán keresztül igyekszik eljutni a gyártáshoz, a skálázáshoz és a piaci vonatkozásokhoz. Ennek alap gondolata Edisontól származik, miszerint: „a lángész egy százalék ihlet és 99 százalék verejték”. Ezzel a kijelentéssel Edison arra utalt, hogy a valódi eredmények eléréséhez sokkal fontosabb a kitartó munka és erőfeszítés, mint az egyszeri ötlet vagy ihlet. Milyen igaza volt! Ugyanis ez a szakasz még több erőforrást igényel, mint az addigiak. A tapasztalat alapján az idő is ilyen erőforrás, és ekkor derül ki sok esetben, hogy még a kompetenciák felülvizsgálata is szükségszerű, és annak határai vagy korlátai alapján szükséges kiegészíteni az addigiakat. Ide tartozik a tudományos és műszaki bizonytalanságok felmérése, értékelése; a kockázatelemzések és a SWOT-analízis. Ezek mind elengedhetetlen feltételei a sikeres út folytatásának a piacképes termékek és szolgáltatások felé.

Fontos megjegyezni, hogy a két szakasz határán található az innovációs szakzsargonban „halál völgynek” nevezett szakasz (TRL4–TRL6). Ennek egyik oka, hogy a kockázatok még magasak, de további források bevonása szükséges, és noha látszik a perspektíva, kevés külső szereplő vállalja a kockázatot. Másik ok, hogy ebben a

Technológiai fejlettségi szintek (TRL, Technology Readiness Levels)		TRL/IRL megvalósítási		Befektetési fejlettségi szintek (IRL, Investment Readiness Levels)	
		tényező %	kockázat %		
9	A rendszer bizonyításra került, kereskedelmi bevezetésre készen áll: A rendszer megfelelő működése bizonyításra került, készen áll a teljes ipari léptéki kereskedelmi bevezetésre.	90–99%	1–5%	9	Kulcsfontosságú mérőszámok azonosítása és validálása: Az üzleti modell és a termék validálását követő fejlődés tervezése. A fontosabb metrikák azonosítása: tervezett eladás, bevétel, kiadás, közösségi média befolyása stb.
8	A rendszer beépítve a kereskedelmi tervezésbe: A rendszer/folyamat fejlesztése befejeződött, a tesztek és demonstrációkat követően minősítésre került (kereskedelmi forgalom előtti demonstráció).	75–90%	15–25%	8	Az üzleti modell bal oldalának validálása: Kulcsfontosságú partnerek/tevékenységek/erőforrások, költségvetés (Ezen feladatok közül néhány már korábbi lépésekben befejezésre került.)
7	Integrált kísérleti rendszer demonstrálása: A komponens és/vagy folyamat demonstrálása releváns környezetben (integrált kísérleti rendszerszint).	60–75%	40–70%	7	Magas kidolgozottságú változat (MVP): Alaposabb validálás és magas kidolgozottságú termék szükséges, így maximalizálódik a befektetési készülség és a technológia fejlesztése is előrehalad.
6	A rendszer prototípusa elfogadásra került: A komponens és/vagy folyamat demonstrálása releváns környezetben (P-prototípus rendszerszint).	Kutatás és technológiai fejlesztés kockázati fedezeti pont		6	Az üzleti modell jobb oldalának validálása: Vásárlók, kapcsolatok, ügyfélszempontok, csatornák, bevételi források feltérképezése. (Ezen feladatok közül néhány már korábbi lépésekben befejezésre került.)
5	Laboratóriumi tesztelés az integrált/félig integrált rendszernek: A komponens és/vagy folyamat validálása kerül releváns környezetben.	<25%	>90%	5	Termék piaci alkalmazhatósága: Annak validálása, hogy a kidolgozás alatt lévő termék jelenti majd az adott probléma legjobb megoldását (UVP, unique value proposition).
4	Laboratóriumi tesztelés/a komponens vagy folyamat a-prototípusának validálása: A fejlesztés dizajinja és laboratóriumi tesztelése, ami útmutatást szolgál, hogy a technológia a jövőben elérje-e a célkitűzéseket.	<3%	>97%	4	Alacsony kidolgozottságú változat: Kizárólag a bemutatáshoz szükséges funkcionalitással rendelkező termék létrehozása (MVP, minimum viable product).
3	A kritikus funkció vagy az elgondolás bizonyításra kerül: Az alkalmazott kutatás előrehalad, a fejlesztés korai szakaszba lép. A technológia egyes elemeinek tanulmányok és laboratóriumi mérések által történő validálása.	0–1%	100%	3	Probléma/megoldás validálása: A megoldandó probléma pontos körülírása, valamint annak validálása, hogy a fejlesztendő rendszer megoldást fog rá nyújtani.
2	Alkalmazott kutatás: Az elmélet alkalmazhatóságának kezdeti feltérképezése. A technológiai lehetőség egy probléma megoldására, igény kielégítésére megerősítésre kerül.	0–1%	100%	2	Piacutatás: A nyers, vázlatos üzleti modell megalkotását követő piacutatás. A piac telítettségének meghatározása, versenytárs elemzés.
1	Alaputatás: Előzetes tudományos kutatás lett elvégzve. Az általános elvek kvalitatív megfogalmazása és megfigyelése. Ezen a ponton a figyelem még a felfedezésre összpontosul, nem az alkalmazhatóságra.	0–1%	100%	1	Előzetes vázlat: Az üzleti modell vázlatos körülírása. Ezen a ponton a feltételezések még nincsenek validálva.

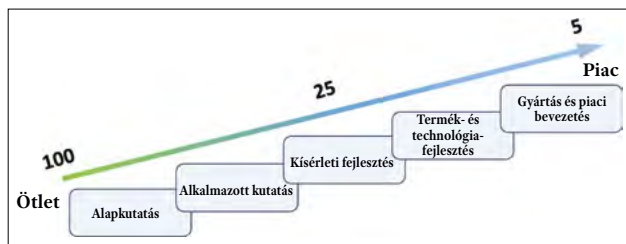
A TRL (más néven TRA, Technology Readiness Assessment) az Európai Bizottság C(2014)4995 számú döntésén és az Amerikai Egyesült Államoknak az 1980-as évek óta alkalmazott hivatalos módszerein alapul (NASA, DoD, ESA, Európai Bizottság H2020-ban 2014 óta, ISO 16290:2013 standard). Az IRL az OECD (Gazdasági Együttműködési és Fejlesztési Szervezet) és más nagy pénzügyi szervezetek módszerein alapul. Az IRL bizonyításon alapuló demonstráció a befektetőknek arról, hogy van egy megismételhető és méretezhető üzleti modell.

1. ábra. Technológiai és befektetési fejlettségi szintek

szakaszban derül ki a méretnövelés megvalósíthatósága, ami sok esetben negatív eredményt hoz. Itt már általában csak műszaki vagy technológiai bizonytalanság van. A TRL szintek mellett nagy szerepet kapnak ekkor a befektetésre való alkalmasságot mérő IRL (investment readiness level) szintek [21]– ezek együtt kezelve katalizálják a sikeres továbbhaladást. Az IRL szintek különös jelentőséget kapnak a befektetők szempontjából, mivel itt már bizonyítani kell, hogy a technológia nemcsak megvalósítható, hanem üzletileg is életképes modellként létezik, amely megismételhető és méretezhető.

Ahogy az 1. ábra is mutatja, a TRL és IRL szintek szervesen összefüggenek, hiszen nagyon kevés intézet, kutatóközpont és vállalkozás engedheti meg magának, hogy mindegyik szintet saját erőforrásból valósítsa meg. A különböző TRL és IRL szinteken más és más kompetenciák szükségesek: kezdetben inkább kutatói és fejlesztői erőforrásokra van szükség, míg későbbi IRL szinteken egyre nagyobb szerepet kap az üzleti modellezés és a piaci alkalmazhatóság vizsgálata, amelyek a megvalósítás során elengedhetlenné válnak.

Nagyon sok kiváló magyar példa van előttünk, ahol tudósok és mérnökök ezen az úton járva értek el és érnek el ma is eredményeket, legtöbbször megfizetve a tanulópénzt. Az innovációs lánc (2. ábra) általános ábrája a következő grafikon szemlélteti, hogy a nemzetközi átlag alapján 100 ötletből (TRL1) 25 jut el a prototípus szintjéig (TRL4–5). Viszont onnan a piacérett szintig (TRL9) már csak 5.



2. ábra. Az innovációs lánc

Az anyagtudományi és technológiai kockázatelemzések, SWOT-analízis, valamint a tudományos és műszaki bizonytalanságok feltérképezése éppen azért szükséges, mert ezekkel jelentősen növelhető a fenti átlag a gyakorlatban a kockázatok kiszűrése és menedzselése révén. Nagyon fontos megjegyezni, hogy az anyagtudományi és anyagtechnológiai kutatás-fejlesztések jellemzően hosszú inkubációs időt igényelnek, ami akár 10–15 év is lehet – éppen az alapkutatási vonatkozások és finanszírozási kihívások miatt. Azon projektek, amelyek sikeresen túljutnak ezeken a szakaszokon, kiemelkedő piaci potenciált hordoznak, hiszen a piacérett szint elérésekor a technológia már nemcsak stabilan működik, hanem kereskedelmi szempontból is életképes megoldásként léphet a piacra.

Az elmúlt évtizedben egyik oldalról saját eredményeinkhez kerestük az ipari alkalmazásokat, míg másik oldalról ipari problémákra kerestük a megoldást anyagtudományi és anyagtechnológiai szempontok szerint. Ezek

legtöbbször TRL1–TRL3 szintről indult. Az évek során több határterületen sikerült eredményt elérni egészen a TRL6–9 szintig egyedül vagy kooperációban. A teljesség igénye nélkül néhány példa:

- Általános kémiai labor és kisüzemi berendezések, technológiák
- 3D nyomtatott fémfelületek finomítási technológiája
- Nanopórusos alumínium-oxid szálak szigetelőanyag úripari alkalmazásokhoz
- Új generációs elektróda és fém-ion cellák
- Új generációs szuperötvezetek és alakadási technológia
- Új generációs hidrogén-előállítás és -tárolás

Az anyagtudományi és anyagtechnológiai kutatás-fejlesztés ipari oldalról való serkentése kiemelten fontos. A következőkben két olyan példával (ezek pont a TRL4–6 szakaszban vannak) illusztráljuk ezt. Az ipari fizikai szemlélet egy nagyon fontos külön világ, ahol továbbra is van relevanciája a kopernikuszi és az edisoni útnak egyaránt.

- Nagy entrópiás ötvözetek alkalmazása szerkezeti anyagként a mechanikai tulajdonságok optimalizálásával.
- Nagy entrópiás ötvözetek alkalmazása funkcionális termofeszültséges anyagként a hulladékhő hasznosítására magas hőmérsékleten. Ezen két téma egy-egy PhD-kutatás témája is, mely túlmutat a kutatási perspektíván és konkrét fejlesztési vonatkozásai vannak anyagtechnológiai oldalon is. Mindkét esetben ipari alkalmazhatósági szempontok inspirálták az indulást. A munkaterv komplex kísérlettervet tartalmaz, ami mentén haladunk (összetétel-tervezés, mintaelőállítás, mintapreparálás, additív technológiák, anyagvizsgálatok, mérések, kiértékelések stb.).

A tapasztalatok alapján a nagy entrópiájú ötvözetmin-ták között több olyan is van, melyek alakadása és megmunkálhatósága hagyományos módszerekkel lehetetlen, egyrészt a magas olvadáspont, másrészt a speciális mechanikai tulajdonságok miatt. Éppen ezért kutatás-fejlesztésünk során az alakadás módját a háromdimenziós fémnyomtatási eljárással valósítjuk meg.

A nagy entrópiás ötvözetek fizikai tulajdonságai

Az ötvöztés mindig is a tulajdonságok javításának az eszköze volt a fémek tudományában. Az alapcél az, hogy a megmunkálhatóság megőrzésével növeljük a szilárdságot. További igényként jelentkezik, hogy az ötvözet a nagy szilárdságot őrizze meg a lehető legmagasabb hőmérsékletekig (refraktori elemek – tűzálló elemek), és lehetőleg minél korrózióállóbb legyen.

A hagyományos ötvözetekkel szemben, amelyek egy domináns alapanyagból és kisebb arányú ötvözőkből állnak, a nagy entrópiás ötvözetek (high-entropy alloy)

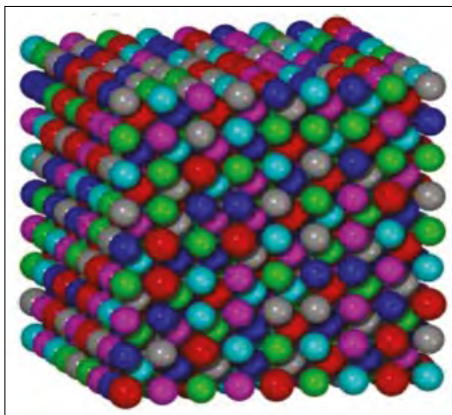
négy, öt, vagy akár több összetevőt tartalmaznak közel azonos atomszázalékban.

A HEA koncepcióját 2004-ben mutatta be két, egymástól független kutatócsoport, Jien-Wei Yeh és kutatócsoportja Tajvanon, illetve Brian Cantor és társai az Egyesült Királyságban. Yeh és munkatársai azzal a céllal dolgoztak, hogy radikálisan új, magas konfigurációs entrópiájú ötvözeteket hozzanak létre öt vagy több elem közel azonos arányú keverésével. Yeh koncepciójában a konfigurációs entrópia stabilizáló hatását hangsúlyozták, amely lehetővé tette, hogy az ötvözetek szilárd oldatként kristályosodjanak, és így elkerüljék az intermetallikus fázisok kialakulását.

Cantor és csapata ugyanakkor más megközelítést alkalmazott. Tömbi amorf ötvözetet szerettek volna előállítani az ún. összezavarodottság elvének (confusion principle [22]) a kihasználásával. Ezen elv szerint minél több komponenst tartalmaz egy ötvözet, annál kisebb a valószínűsége a vegyületfázist adó kötéseknek, mert az adott elemnek annyi sok választási lehetősége van vegyületfázis képzésére, hogy összezavarodik, nem tud választani, így nem képez vegyületet. A sok lehetőség közepette még a lokális kristályszerkezetek sem alakulnak ki, így az ötvözet amorf marad, nem alakul ki sem a kémiai, sem a topológiai rend. Cantor 2004 júliusában az Oxfordban tartott XI. RQ anyagtudományi konferencián bemutatott poszterelőadásán beszámolt az ötvözési kísérleteiről, melynek során egyre több fémot ötvözött egybe egyenlő mértékben. A legtöbb 20 fém összeolvasztása volt, mind egyikből 5-5 atomszázaléknyit véve. Tömbi amorft nem kapott, de a várt fázisok száma is csökkent.

A két megközelítés különbsége ellenére mindkét kutatócsoport ugyanarra a felismerésre jutott: a nagy entrópiás ötvözetek szerkezetükben gyakran lapcentrált köbös, tércentrált köbös vagy hexagonális szoros illeszkedésű rácsokat alkotnak, miközben az intermetallikus fázisok képződése minimális.

Annak ellenére, hogy ezek az ötvözetek topológiai rendezettséget mutatnak, kémiai rendezetlenségnek ma-
radnak (3. ábra), amely szerkezet alapját képezi olyan sajátos tulajdonságaiknak, mint a jelentős rácsdeformáció, lassú diffúzió és az úgynevezett koktéleffektus.



3. ábra. Kémiai rendezetlenség topológiailag rendezett rácsban

Ez a többkomponensű megközelítés lehetővé tette új típusú ötvözetek létrehozását, amelyek rendkívüli hőállósággal, mechanikai szilárdsággal és korrózióállósággal rendelkeznek. A sokösszetevős összetétel következménye, hogy lehetővé válik a kémiai összetétel folytonos „hangolása” is, mind az elemek fajtáját, mind koncentrációját illetően.

Az alapelgondolás négy fő tudatos pillére a következő:

1. **Magas konfigurációs entrópia.** A több, közel azonos mennyiségű elem keveréke növeli a rendszer konfigurációs entrópiáját, ami termodinamikailag stabilizálja az egyfázisú szilárd oldatot, csökkentve az intermetallikus fázisok képződését.
2. **Lassú diffúzió.** A sokféle atomféleség miatt az atomok diffúziója lelassul, ami növeli az anyagok magas hőmérsékleti stabilitását és tartósságát, különösen nagyon magas hőmérsékleteken.
3. **Súrlódási hatás.** A különböző atomok eltérő méretei megakadályozzák a rács deformációját, ami nagyobb szilárdságot és keménységet eredményez.
4. **Koktéleffektus.** A különböző elemek jelenléte különböző kölcsönhatásokat és tulajdonságokat eredményez, így az anyag mechanikai, hő- és korróziós ellenállása jelentősen javul.

A nem egyensúlyi, túltelített szilárd oldatot, vagyis a rendezetlenséget stabilizálhatja a konfigurációsentrópia-tag (ΔS) a Gibbs-féle szabadenergia kifejezésében ($\Delta G = \Delta H - T\Delta S$), mikor ott van mellette a rendeződésért felelős képződésentalpia-tag (ΔH), amelyik éppenséggel a szilárd oldatot akarja felszámolni vegyületfázisok létrehozásával, betartandó a Gibbs-féle fázisszabályt ($F = C - P + 2$).

Az öt, egyenlő koncentrációban lévő ötvöző konfigurációs (keveredési) entrópiája $\approx 1,6 R$, ami átlagos 1200–1500 K-es olvadáspont estén 16–20 kJ/mol energiával csökkenti a szabadenergiát, ami összemérhető a képződési hővel, így stabilizálhatja a szilárd oldatot.

- Az első feltétel tehát ehhez az, hogy az átlagos képződési entalpia legyen kicsi (kisebb mint 16 kJ/mol).
- A második feltétel az, hogy az atomi átmérők ne nagyon különbözzenek.

A túltelített szilárd oldatnak köszönhetően az ötvözet tele van atomi szintű belső feszültséggel, ami gátolja a diszlokációk mozgását, tehát a szilárdság nagy, ami párosul a plasztikus deformálhatósággal az egyszerű kristályos (FCC vagy BCC) szerkezetből adódóan.

A féművegekkel összehasonlítva a nagy entrópiás ötvözetek előnye, hogy rendelkeznek a kristályos ötvözetekre jellemző plasztikus deformálhatósággal, míg a tömbi féművek általában ridegek és törékenyek. Ugyanakkor sokkal nagyobb a termikus stabilitásuk, mert a kiválasztott precipitáció hőmérséklete több száz fokkal haladja meg a féművek kristályosodási hőmérsékletét. A féművek kémiai és topológiailag is rendezet-

lenek, míg a szilárd oldatú nagy entrópiás ötvözetek csak kémiaiailag rendezetlenek, topológiaiailag rendezettek, még ha torzultan is [8].

A témánk a nagy entrópiás ötvözetek különleges tulajdonságai, ezek tervezése, előállítás és alkalmazása. A továbbiakban csak a mechanikai tulajdonságokkal foglalkozunk, mert itt elsősorban strukturális alkalmazásokra gondolunk. Kutatási eredményeinkre példákat is hozunk, melyek célja a mechanikai tulajdonság becslése egyfázisú ötvözetek esetében.

Ezek a tulajdonságok kapcsolódnak a C_{ij} tenzorral jelölt rugalmas paraméterekhez, a B , E és G betűkkel jelölt rugalmassági moduluszokhoz (tömbi, Young- és nyírási), valamint a ν -vel jelölt Poisson-hányadoshoz.

A tulajdonságok másik fele a plasztikus deformációval kapcsolatos, mint a folyás-határfeszültség vagy a keménység. A deformációval kapcsolatos paraméterek elméletileg számíthatók (akár elsőelvű, azaz *ab initio* módon, lásd [13]), de ez komoly számítástechnikai felkészültséget és felszerelést igényel. Ezért az egyszerű ötvözetek mindennapos tervezéséhez egyszerű képleteket dolgoztunk ki, minimális bemenő adattal, melyek publikált táblázatokban megtalálhatóak (tabulált adatok: www.knowledgedoor.com).

A kohéziós energiával kezdjük, mert ez fejezi ki legjobban a kötések erősségét, a deformációval szembeni ellenállást. Csupán két paraméter felhasználásával:

$$E_C = 1,7 \text{ eV} \cdot \text{\AA} (Z/R_m), \quad (1)$$

ahol R_m a fémes atomsugár ångströmben és Z a fémes vegyérték, E_C egysége az eV.

A kohéziós energia és az olvadáspont szoros kapcsolatban állnak, úgy hogy egymásra skálázhatók:

$$E_C = 0,24 \text{ (kJ/mol} \cdot \text{K)} T_m. \quad (2)$$

Kaptay George ezt az összefüggést korrigálta [9]:

$$E_C = 0,288 \text{ (kJ/mol} \cdot \text{K)} T_m, \quad (2')$$

ahol az E_C egysége a kJ/mol, és a hőmérséklet K-ben értendő.

A fenti összefüggésekből azt kapjuk, hogy a fémes vegyérték az olvadásponttal arányos:

$$Z = T_m / 500 \text{ K}. \quad (3)$$

Várható (és például az elsőelvű számításokkal is igazolható), hogy a (Vickers-) keménység is arányos a kohéziós energiával, hiszen mindketten a kötések erősségével arányosak:

$$\text{HV} = 0,37 \text{ (kp/mm}^2\text{)} \cdot (\text{mol} \cdot \text{cm}^3/\text{kJ}) E_C (Z/V_m), \quad (4)$$

ahol a kJ/mol-ban kifejezett kohéziós energiát osztjuk a cm^3 -ben kifejezett moláris térfogattal, hogy megkapjuk a keménységet kp/mm^2 -ben.¹

¹ Az iparban dolgozók a kp/mm^2 egységet használják a keménység számára, nem a fizikusok által preferált egységesített rendszert. (1 GPa = 100 kp/mm^2). Az elasztikus állandókat (B , E , G) GPa-ban adjuk meg.

A nyírási moduluszt is sikerült meghatározni csupán két paraméter, Z és R_m segítségével:

$$G = 14 \text{ (GPa} \cdot \text{\AA}^4) (Z^2/R_m^4). \quad (5)$$

Tiszta fémekre azt találtuk, hogy $\text{HV} = 0,0617 G$, de BCC egyfázisú, szilárdoldat-szerkezetű ötvözetekre figyelembe kellett venni G mellett az atomi átmérők δ közepes eltérését is.

$$\text{HV} = 60 \text{ (kp/mm}^2\text{)} + 0,7 G \delta^{4/3}, \quad (6)$$

ahol az első tag az alkotóelemek keménységének súlyozott átlaga, a második tag pedig a szilárd oldat okozta keménységnövekedés, amiben δ az atomi átmérők relatív szórásnégyzete. Ezen egyszerű képletek alapján megbecsülhető, hogy a tiszta fémek közül az ozmium a legkeményebb ($\text{HV} = 3 \text{ GPa}$) a szilárdoldat-szerkezetű nagy entrópiás ötvözetek maximális keménysége pedig 900 kp/mm^2 -re jön ki a (6) egyenlet alapján, ha a maximálisan megengedhető atomátmérő-eltérés $\delta = 6,5\%$, és az ötvözet átlagos nyírási modulusa $G = 100 \text{ GPa}$.

Ez egy jobbfejta szerszámacél keménységének felel meg. A magas hőállóságú nagy entrópiás ötvözetek alkalmazása mellett szól két tényező: a tulajdonságok tervezhetősége és a munkadarabok 3D nyomtatással való előállíthatósága.

A nagy entrópiás ötvözetek fizikai, s közte mechanikai tulajdonságainak gyors áttekintése után nézzünk néhány konkrét példát jelenlegi kutatás-fejlesztési fázisú alkalmazásokra!

- **Repülőgép- és űripár.** A *Rolls-Royce* nagy entrópiás ötvözeteket alkalmaz a sugárhajtóművek és űreszközök olyan alkatrészeinél, amelyek extrém körülményeknek – például a magas hőmérsékletnek és oxidáló légkörnek – vannak kitéve. A nagy entrópiás ötvözetek, különösen a Cr-, Al-, és Ti-alapú ötvözetek kiváló hőállóságot, oxidációs ellenállást és mechanikai szilárdságot biztosítanak magas hőmérsékleten. Ez lehetővé teszi a hajtóművek és rakétarendszerek megbízhatóságának növelését és az élettartam meghosszabbítását, különösen a hiperszonikus és űrkutatási alkalmazásoknál, ahol a hagyományos ötvözetek nem elegendőek [10].
- **Energetika.** A *General Electric* kutatásaiban nagy entrópiás ötvözeteket alkalmaznak a gázturbinák magas hőmérsékletű alkatrészeinek fejlesztésére. Ezeket az anyagokat a gázturbinák égési zónájában használják, ahol extrém hőmérsékletek mellett van szükség hosszú élettartamú, korrózióálló és magas hőállóságú anyagokra. A nagy entrópiás ötvözetek, különösen a Ni-, Fe-, és Co-alapú ötvözetek magas hőmérsékleten is stabilak, csökkentve az alkatrészek cseréjének gyakoriságát és javítva a turbina hatékonyságát [11].
- **Orvostechnikai alkalmazások.** Ezeket az teszi lehetővé, hogy az elasztikus moduluszok értéke olyan kicsire állítható be, ami összemérhető az emberi csont rugalmas moduluszának az értékével. Ez a mechanikai kompatibilitás elősegíti a biológiai kompatibilitást. Ha

egy korai átmeneti fémekből (Ti, Zr, Hf, V, Nb) álló összetétellel az összvegyértékszámot 4,2 környékére állítjuk be, akkor minimális, akár 20 GPa értékre is lecsökkenthető a nyírási modulus értéke. Ha ezenközben a szakítószilárdság értéke nem vagy csak kicsit változik, akkor ez azt jelenti, hogy a feszültség-deformáció görbe „lefektethető”, vagyis kitolható az elasztikus deformáció határa, ami elérheti az 1%-ot is. A fémüveg esetében ez 2%, míg deformálható anyagokra az elasztikus deformáció határát folyáshatárnak szokták nevezni, ami az acél esetében a közismert érték, 0,2%. A biológiai kompatibilitást elősegíti a Ti-tartalom, különösen ha nitrogénben hőkezelve egy titán-nitrid réteggel vonjuk be a munkadarabot [12].

Projektjeinkben a szerkezeti anyagként való felhasználás terén jelenleg az a nagy entrópiájú ötvözetek alkalmazásának fő célja, hogy sikerüljön például magasabb hőmérsékleten működő turbinalapátot, vagy a sugárzási károsodásnak ellenállóbb atomreaktor-tartályt készíteni, mint ami a jelenlegi tömbi megoldásokkal elérhető. A számítások szerint ahhoz hogy 1%-kal növeljük a jelenlegi turbinák hatásfokát, a turbinalapát működési hőmérsékletét 40 °C-kal kell növelni. A jelenlegi Ni-alapú szuperötvözetek a működési határukon vannak (1150 °C). Kiváltásuk előnyösebb ötvözetekre csak a magas olvadáspontú (tűzálló) fémek segítségével lehetséges. Ez kilenc fémeket jelent: Ti, Zr, Hf, V, Nb, Ta, Cr, Mo és W, melyek közül azonban mindegyik valamilyen „káros tulajdonsággal” rendelkezik. A Ti, Zr, Hf kristálytanilag nem stabil, 880 °C körül allotróp fázisváltozást mutatnak, ráadásul magas hőmérsékleten nagy mennyiségben oldják az oxigént (akár 28 atomszázalékos mennyiségben) – többet felvesznek, mint amennyit a víz magába old (8%). A wolfram már 800 °C-on oxidál, és az oxidja szublimál. A molibdén is oxidál és törékennyé válik. Egyedül a króm és valamennyire a tantál áll ellen az oxidációnak.

Cégünk feladatul tűzte ki egy nemcsak tűzálló, hanem az oxidációnak ellenálló ötvözet kifejlesztését. Az oxidációnak való ellenállás kialakításának egyik útja a „belülről kifelé” irányuló diffúzióval a minta felszínén létrehozott Al- és Cr-tartalmú védőoxid-réteg létrehozása. A másik út a „kívülről befele” történő cementálással vagy nitridálással létrehozott felületi karbid vagy nitrid védőréteg, ami impermeabilis az oxigén számára.

A nagy entrópiás ötvözetek alkalmazása funkcionális termofeszültséges anyagként a hulladékhő hasznosítására magas hőmérsékleten

A világ energiatermelésének körülbelül 50%-a hulladékhőként vész el a környezetbe. Ennek az energiának a megmentése és közvetlen átalakítása elektromos energiává nemcsak a hagyományos tüzelőanyagok felhasználását

csökkenti, hanem ezzel a CO₂-kibocsátás mérsékléséhez is hozzájárul. A technológia alapját a Seebeck-effektus adja, amely lehetővé teszi a hő elektromos energiává való közvetlen alakítását mozgó alkatrészek nélkül.

A Seebeck-effektus során elektromos feszültség keletkezik egy vezető vagy félvezető anyag két vége között, ha azokat különböző hőmérsékletre hevítik. A hőmérséklet-különbség miatt a magasabb hőmérsékletű vég felől az alacsonyabb hőmérsékletű vég irányába elektronok (vagy egyéb töltéshordozók) áramlanak, ez hozza létre a feszültségkülönbséget. A feszültség nagyságát az anyag tulajdonságaitól függő Seebeck-koeficiens (S) határozza meg, amelynek mértékegysége $\mu\text{V/K}$ (mikrovolt per kelvin).

Az elnevezések tisztázása végett megemlítjük, hogy itt a felhasználás két fő területét a termofeszültség-jelenséget adó termoelektromos anyagok (TEM), valamint az ezen anyagokból készült termoelektromos generátorok (TEG) jelentik [14].

A TEM jellemzésére szolgál az úgynevezett jósági tényező, ami a hőmérséklettel beszorozva egy dimenziómentes szám. A szorzat kívánatos nagysága 1 vagy 1-nél nagyobb [15]:

$$ZT = \frac{S^2 \sigma}{\kappa} T = \frac{S^2}{\kappa \rho} T,$$

ahol

S a Seebeck-koeficiens,

κ a hővezetési tényező,

σ az elektromos vezetőképesség,

ρ a fajlagos elektromos ellenállás és

T a hőmérséklet

A jósági tényező második alakját teljesítménytényezőnek is hívjuk: $S^2/(\kappa\rho)$.

A termoelektromos anyagból készült termoelektromos generátor energiakonverziós hatásfokát adja meg az úgynevezett hatékonysági tényező, ami már nem csak anyagi jellemző; függ az effektív fűtési (T_{hot}) és hűtési (T_{cold}) hőmérsékletektől, illetve ezek átlagától (T_{avg}) is:

$$\eta = \frac{\Delta T}{T_{\text{hot}}} \cdot \frac{\sqrt{1 + ZT_{\text{avg}}} - 1}{\sqrt{1 + ZT_{\text{avg}}} + \frac{T_{\text{cold}}}{T_{\text{hot}}}}.$$

A jósági tényező felső határát megkapjuk, ha csak az elektronok hővezetését vesszük figyelembe, és a rács hővezetését nullának vesszük. Ekkor [15]

$$L_0 T = \kappa / \sigma,$$

ahol L_0 az elektronikus hővezetést leíró Lorentz- vagy Wiedemann–Franz-állandó [16]:

$$2,45 \cdot 10^{-8} \text{ V}^2/\text{K}^2,$$

és ezzel

$$ZT = S^2 / L_0.$$

Az optimális $ZT = 1$ értékhez $S^2 = L_0$ tartozik, ahonnan származtatható a Seebeck-együttható alsó határa:

$$S = (L_0)^{1/2} = 157 \mu\text{V/K}.$$

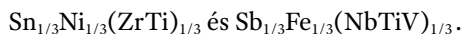
Ez egy szigorú követelmény a termoelektromossággal szemben, mert ha a rács hővezetőképességét is figyelembe vennénk, akkor még nagyobb S érték jönne ki.

A magas entrópiájú ötvözetek termoelektromos alkalmazásai az utóbbi években jelentős kutatási figyelmet kaptak [14–19]. Az alkalmazás fontos előnyei és hátrányai a következők.

- **Alkalmazási hőmérséklet.** A nagy entrópiás ötvözetek széles hőmérsékleti tartományban alkalmazhatók, gyakran akár 300 °C és 800 °C között. Ez a tulajdonságuk különösen alkalmassá teszi őket magas hőmérsékletű termoelektromos alkalmazásokra.
- **Jósági tényező (ZT).** A nagy entrópiás ötvözetek jósági tényezője a kutatások szerint 0,8 és 1,5 között mozog a megadott hőmérsékleti tartományban. Ezek elméleti határok melyek felső értéke jelenleg lehetőség csupán.
- **Problémák.** Bár a ezek az anyagok ígéretesek a termoelektromos alkalmazásokban, több kihívással is szembesülnek, mint például a gyártási nehézségekkel. A többkomponensű összetétel miatt az ötvözetek előállítása bonyolult és költséges lehet. Egy másik nagyon fontos probléma a hővezetés. A magas hővezetési képesség csökkentheti a termoelektromos hatékonyságot, ezért a hővezetés optimalizálása kulcsfontosságú.

Példaként megemlíthetjük, hogy egy kereskedelemben elérhető termoelektromos rendszer (nem HEA) ZT szorzata 0,8, η -ja pedig 5–6%. A hozzá tartozó termoelektromos anyag PbTe–PSb összetételű, aminek hátránya az alacsony olvadáspont és a rossz korrózióállóság.

Az alábbiakban saját munkatervünk alapján mutatjuk be az említett nehézségek megoldási lehetőségeit. A kulcs a 3D fémnyomtatás, amely új technológiaként lehetővé teszi, hogy olyan termoelektromos anyagból készítsük el a termoelektromos generátort, amely alkalmas 500–600 °C-os üzemi hőmérsékletű alkalmazásokra, és jósági tényezője (a ZT szorzat) 0,8–1,0. Az optimális anyagot a nagy entrópiájú ötvözetek közül választottuk ki, amelynek összetétele:



A tervezéshez egy, az irodalomban már ismert összetételt használtuk, amelynek elektromos paraméterei adottak. A TEG készítése során egyedül a hővezetési tényezőt (κ) tudjuk módosítani technológiai eszközökkel. Ennek érdekében a nyomtatás során speciális szerkezetet alakítunk ki az anyagban, amely növeli a hőszigetelési képességet, és ezzel csökkenti a hővezetési tényezőt. Ezzel az eljárással a két különböző összetételű komponenst is összeolvaszthatjuk, így a többkomponensű összetétel kezelése sem jelent problémát.

A fémnyomtatók között a legelterjedtebbek az ún. poros nyomtatók, amelyek a síkban terített ötvözetport lézersugárral olvasztják össze, majd rétegről rétegre haladva építik fel a háromdimenziós testet. Ez a módszer

azonban nem felel meg számunkra, mivel itt nem biztosítható a különböző ötvözetek megfelelő elrendezésű és szerkezetű nyomtatása.

A másik, számunkra megfelelőbb nyomtatási módszer a filamentum, azaz szál alkalmazása – hasonlóan a műanyagnyomtatáshoz –, ahol az ötvözetport extrudálással előzetesen a szálba keverjük. A nyomtatott testet ezt követően szintereléssel hozzuk létre a kívánt hőmérsékleti és nyomásviszonyok között, így előállítva a tömbi ötvözetet. Ez a módszer lehetővé teszi, hogy a termoelektromos generátor gyártása során a különböző típusú ötvözeteket az elvárásoknak megfelelően nyomtassuk. Ezen túlmenően ez a gyártási technológia biztosítja a hőállóságot is.

A hulladékhő termoelektromos generátorokkal történő hasznosítása a nagy entrópiájú ötvözetek egyik legígéretesebb ipari alkalmazása. Sokrétű felhasználása például kipufogócsövek, kemencék és egyéb magas hőmérsékleten működő rendszerek hőveszteségeinek csökkentésére nyújt megoldást.

Jövőbeli irányok és összegzés

Az anyagtudomány fejlődése elengedhetetlen a modern ipar és technológia fenntarthatósága szempontjából. A kutatás-fejlesztés során szerzett ismeretek nemcsak az új anyagok tulajdonságainak megértéséhez vezetnek, hanem olyan ipari alkalmazások kialakításához is, amelyek növelhetik a termelési hatékonyságot, csökkenthetik a környezeti hatásokat, és hozzájárulhatnak az energiaszolgáltatás optimalizálásához. A nagy entrópiájú ötvözetek és a termoelektromos anyagok terén végzett kutatások például új lehetőségeket nyitnak a hulladékhő hasznosítására és az extrém környezetekhez igazított szerkezeti anyagok fejlesztésére.

Az anyagtudományban elért innovációk – a tudományos felfedezésektől kezdve az ipari alkalmazásokig – új utakat nyitnak a technológiai fejlődés számára. Az ipar és a tudomány együttműködése elengedhetetlen az új felfedezések gyakorlati megvalósításához és a fenntarthatóbb jövő felé vezető úton. Ehhez természetesen végig kell menni az úton szem előtt tartva azt a szemléletmódot, miszerint „rossz ötlet nincs, csak még jobb ötlet van”.

Irodalom

1. Carothers W. (1931): Neoprene: A new synthetic rubber. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, 23(12), 1412–1416.
2. Coover H., Joyner F. (1951): Cyanoacrylate adhesives and their properties. *Journal of Applied Polymer Science*, 5(1), 32–35.
3. Plunkett R. (1938): The discovery of PTFE (polytetrafluoroethylene). *DuPont Research Notes*, 10(4), 45–49.
4. Silver S., Fry A. (1968): A novel adhesive for temporary bonding applications. *Journal of 3M Materials Science*, 11(3), 219–223.
5. Fleming A. (1929): On the antibacterial effects of penicillin. *British Journal of Experimental Pathology*, 10(2), 226–236.
6. Goodenough J. B., Whittingham M. S., Yoshino A. (1980): Advances in lithium-ion battery technology. *Journal of Electrochemistry*, 25(7), 1564–1578.

7. Kwolek S. (1965): The development of Kevlar: A high-strength synthetic fiber. DuPont Research Journal, 15(1), 63–72.
8. Fuyang Tian, Lajos Karoly Varga, Levente Vitos (2017): Theoretical Design of Single Phase High-entropy Alloys. LAP Lambert Academic Publishing
9. Kaptay G. (2007): On the Equation Describing the Equilibrium Concentration of Vacancies as a Function of Temperature. Materials Science Forum, Vol. 537–538, pp. 503–508. DOI: 10.4028/www.scientific.net/MSF.537-538.503.
10. Gorsse S., Couzinie J.-P., Miracle D. B. (2020): From high-entropy alloys to high-entropy coatings and multi-principal element materials. Scripta Materialia, 187, 199–232. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2020.07.043.
11. Gao M., Zhang Y., Liaw P. K. (2013): High-entropy alloys for advanced turbine applications. JOM, 65(12), 1751–1760. DOI: 10.1007/s11837-013-0771-4.
12. Senkov O. N., Wilks G. B., Scott J. M., Miracle D. B. (2011): Mechanical properties of Nb₂₅Mo₂₅Ta₂₅W₂₅ and V₂₀Nb₂₀Mo₂₀Ta₂₀W₂₀ refractory high entropy alloys. Intermetallics, 19(5), 698–706.
13. Levente Vitos (2007): Computational Quantum Mechanics for Materials Engineers: The EMTO Method and Applications. Springer. ISBN: 978-3540688317
14. Zhang Y., et al. (2020): High-entropy alloys for advanced thermoelectric applications. Materials Today Physics, 15, 100255.
15. Liu Ruiheng et al. (2017): Entropy as a gene-like performance indicator promoting thermoelectric materials. Advanced Materials, 29(38), 1702712. <https://doi.org/10.1002/adma.201702712>
16. Wang S., et al. (2021): Thermoelectric properties of high-entropy alloys: A review. Journal of Alloys and Compounds, 872, 159712.
17. Doe J. (2022): Thermoelectric waste heat recovery in high-entropy alloys. Journal of Applied Physics, 134, 987–995. DOI: 10.1063/jap.2022.1340987
18. Smith A. B. (2021): Measurement of figure of merit in thermoelectric materials. Material Science Reports, 29, 456–467. DOI: 10.1016/j.matrep.2021.029045
19. Brown C. (2023): Wiedemann-Franz law and applications in modern physics. Physical Review, D98, 112–125. DOI: 10.1103/PhysRevD.98.011112
20. Héder Mihály (2017): From NASA to EU: the evolution of the TRL scale in public sector. The Innovation Journal, 22, 1–23.
21. Innovation readiness level: <https://steveblank.com/2013/11/25/its-time-to-play-moneyball-the-investment-readiness-level/>
22. Greer A. L. (1993): Confusion by design. Nature, 366, 303–304. <https://doi.org/10.1038/366303a0>

ÚJ GENERÁCIÓS KVANTUMMIKROSKÓP FEJLESZTÉSE EGY MAGYAR–NÉMET EUREKA-EGYÜTTMŰKÖDÉSBEN

Jegenyés Nikoletta¹, Tamási János¹, Gali Ádám¹, Szipőcs Gergely², Kolonics Attila², Szipőcs Róbert^{2,*}

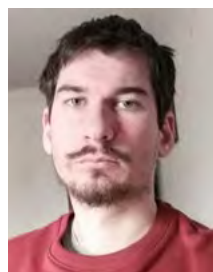
¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

²R&D Ultrafast Lasers Kft., Budapest

*E-mail: robert.szipocs.rnd@gmail.com

A szilárdtestekben lévő ponthibák kvantumállapotainak szabályozása felhasználható kvantumérzékelők előállítására, amelyek szobahőmérsékleten üzemeltethetők és nanométeres térbeli felbontást biztosítanak. A legígéretesebb ponthiba a gyémántban elhelyezkedő nitrogén-vakancia (NV) centrum, amelynek elektronspinje kvantumérzékelőként alkalmazható elektromos és mágneses mezők detektálására, illetve a környezet hőmérsékletének mérésére. Az NV centrumon alapuló érzékelők laboratóriumi keretek között már működnek, azonban a piacon még nem érhető el olyan berendezés, amely az egyedi NV centrumok tulajdonságain alapulna. A német–magyar EUREKA-projekt¹, amelynek magyar konzorciumi tagjai

Gali Ádám csoportja a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontból és a Szipőcs Róbert által vezetett R&D Ultrafast Lasers Kft. cég, egy ilyen egyedülálló berendezés, egy egyetlen NV centrumra épülő kvantummikroszkóp megvalósítását tűzte ki célul.



Tamási János, MSc, okleveles gyógyszer-gyógyász-mérnök (BME, MSc), a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont fejlesztőmérnöke. 2019 óta részt vesz a Gali Ádám vezette Félvezető Nanoszerkezetek „Lendület” Kutatócsoport különböző ODMR mérőrendszereinek kifejlesztésében.



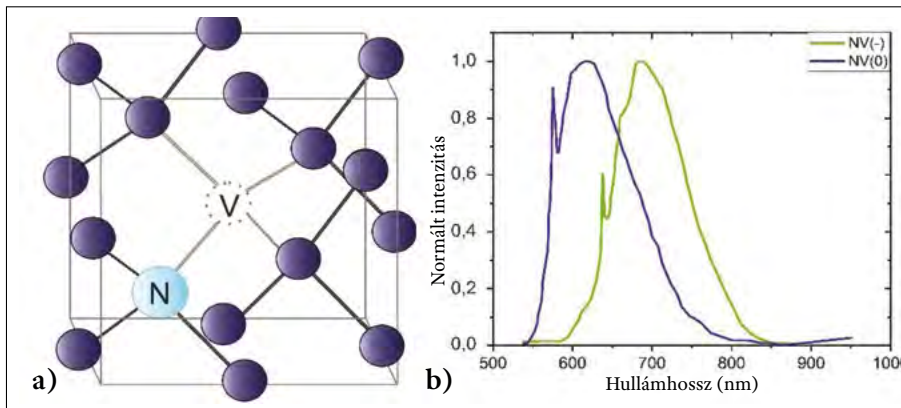
Jegenyés Nikoletta, PhD, fizikus, tudományos munkatárs a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetben. PhD fokozatát a Szegedi Tudományegyetemen szerezte, és több évnyi franciaországi kutatómunka után 2020-ban csatlakozott az intézet Elméleti Szilárdtestfizika Osztályához, ahol a Félvezető Nanoszerkezetek „Lendület” Kutatócsoport tagja. Tudományterülete a nanogyémántok színcentrumainak tanulmányozása optikai módszerekkel és SiC nanoszerkezetek előállítása.



Gali Ádám, PhD, MTA doktora, fizikus, kutatóprofesszor és tudományos igazgató a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Szilárdtestfizikai és Optikai Intézetben, a MTA Félvezető Nanoszerkezetek „Lendület” Kutatócsoport vezetője, és egyetemi tanár a Budapesti Műszaki és Gazdasági Egyetem Fizikai Intézetében (Atomfizika Tanszék). Fő tudományterülete a ponthibák elméleti és kísérleti spektroszkópiája félvezetőkben, a ponthibaalapú kvantumbitek szakértője. A kvantummikroszkóp kifejlesztésére vállalkozó EUREKA-projektben a magyar partnerek konzorciumvezetője.

A gyémánt a szénatomok tetraédes kötéseiből épül fel, amelyek hézagmentesen rendeződve egy háromdimenziós kristályt hoznak létre. A gyémántkristály egy nagyon kemény, átlátszó (a tiltott sáv szélessége 5,5 eV) és egyben nagyon jó hővezető anyag. Ugyanakkor ez a kristályszerkezet hétköznapi körülmények között metastabil a szén méhsejtszerkezetbe (szabályos hatszögek) rendeződő kétdimenziós grafitkristálya mellett, emiatt a szénatomok gyémántkristályba rendeződése tipikusan nagy nyomás és hőmérséklet alatt történik meg. A természetben a földkéregben találhatóak meg ezek a körülmények. A mesterséges gyémánt magas nyomású és magas hőmérsékletű (angol betűszóval HPHT) előállítása ezeket a körülményeket utánozza. Itt a nitrogén egy gyakori szennyező, ami a nyomáscella anyagából kerül be a gyémántba. A kémiai gőzleválasztással (angol betűszóval CVD) előállított gyémántban a nitrogénszennyezés koncentrációját le lehet csökkenteni nagyon kis értékre, amely tiszta gyémántot eredményez. Utóbbi anyagba a nitrogént szabályozottan, egy adott mélységbe lehet bevinni nitrogénion-implantáció segítségével, ahol a nitrogén egy szénatom helyére ül be, kiütve a rácsból az eredeti szénatomot egy kaszkádfolyamat végén, ahol az ionimplantáció során több szénatom is kiesik a helyéről, ahol vakanciák keletkeznek.

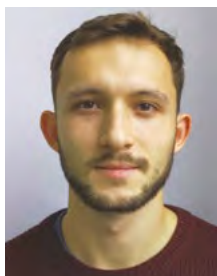
Hőkezelést alkalmazva lehet ezeket a rácshibákat kigyógyítani: 600 °C feletti hőmérsékleten a vakanciák mozogni kezdenek a rácsban (mint a buborékok a vízben), és a nitrogén mellé kerülve létrehozzák a nitro-



1. ábra. a) NV színcentrum a gyémántkristály-rácsban, b) az NV(0) és NV(-) fluoreszcenciaspektruma

gén-vakancia (NV) ponthibát (1a. ábra). Az így kialakult NV ponthiba elsősorban semleges töltésű NV(0) és negatív töltésű NV(-) ponthibaként jelenik meg, ahol a negatív töltést biztosító elektront azok a szubsztitúciós nitrogénhibák adhatják, amelyek mellé nem kerültek vakanciák. Az NV ponthiba energiaszinteket hoz létre a gyémánt tiltott sávjában, és mindkét töltésállapotában a látható fény tartományában fényt bocsát ki megfelelő optikai gerjesztés hatására (1b. ábra). Az NV(0) zérusfonon-vonala (angol betűszóval: ZPL) 575 nm hullámhossznál, míg az NV(-) ZPL-e 637 nm hullámhossznál jelenik meg. Emiatt is nevezik ezeket a ponthibákat színcentrumoknak, mert az átlátszó gyémántot megszínezik. Ezek a ponthibák paramágnesesek is egyben. Az NV(0) elektronspinje $S = 1/2$, míg az NV(-) hibát a két párosítatlan elektrontól származó $S = 1$ elektronspin jellemzi. Az NV(0) elektronspinjének rácsrelaxációs ideje (ún. T_1 ideje) nagyon rövid, ezzel szemben az NV(-) elektronspinjének T_1 ideje kriogén hőmérsékleten több óra, és szobahőmérsékleten sem csökken milliszekundum alá, emiatt szobahőmérsékleten működő kvantumbitként is szóba jöhet, amelyet érzékeny kvantumszenzorként is lehet használni.

Az NV(-) ponthiba – vagy röviden NV centrum – kvantumszenzorként való hasznosítása terén a kulcs az elektronspin beállítását és kiolvasását lehetővé tevő optikailag detektált mágneses rezonancia (ODMR) jelenség, amelynek elméleti leírását már 1949-ben megalkották [1]. Ugyanakkor az ODMR-jel kimutatása az NV-sokaságra egészen 1987-ig váratott magára [2]. Gruber és munkatársai mutatták be 1997-ben, hogy egy egyedi NV centrum



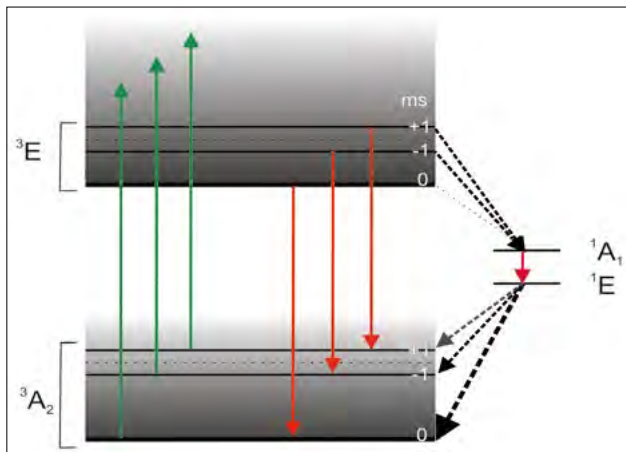
Szépőcs Gergely, mechatronikai mérnök (Pannon Egyetem, BSc), az R&D Ultrafast Lasers Kft. fejlesztőmérnöke, 2019 óta vesz részt a cég munkájában. Korábbi jelentősebb munkái a cégben: szinkronpumpált optikai parametrikus oszcillátor (OPO) mechanikai tervezése egy európai EuroStar-projekt keretein belül, valamint szálcsatolt szub-ps-os lézerrendszer mechatronikai tervezési és kivitelezési munkái. A cikkben bemutatott Eureka-projekt keretein belül a FLIM konfokális mikroszkópban a FLIM-es kiegészítő egységek mechanikáit tervezte meg, készítette el és építette be a mikroszkópba.



Kolonics Attila, PhD biológusmérnök (BME, MSc), molekuláris biológus (ELTE, PhD), az R&D Ultrafast Lasers Kft. résztulajdonosa. Korábban a bécsi egyetemen kutatott immunológiai témakörben posztdoktorként. Ezt követően az N-Gene Kutató Kft. antidiabetikus hatású gyógyszerjelölt molekulinak hatásmechanizmusát vizsgálta. 2010-től négy évig molekuláris biológusként részt vett egy farmakológiai és orvosi diagnosztikai célra tervezett nemlineáris mikrodioszkóp fejlesztésben az R&D Ultrafast Lasers Kft. mint konzorciumvezető szakértőjeként. Jelenleg a szelenoproteinek hatásmódját kutatja az Országos Onkológiai Intézetben.



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



2. ábra. Az NV centrum energiadiagramja. A gerjesztett állapot $m_s = 0$ spinállapotából nincs vagy csak nagyon halvány átszórás van a közvetett bomlási útvonal felé, míg az alapállapot hasonló spinállapota a legvalószínűbb végállapot. A szürke sáv jelképezi a fononalsávokat, ahol minden m_s állapotnak saját fononalsávja van.

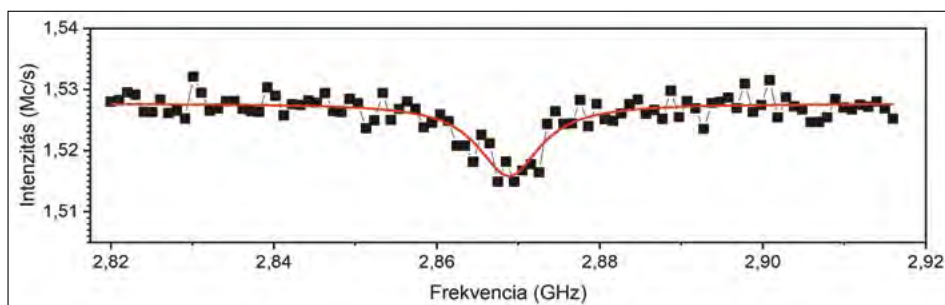
elektronspinjét be lehet állítani és ki lehet olvasni ezzel a módszerrel [3]. Jelezko és munkatársai utána kimutatták 2004-ben, hogy az egyedi NV centrum elektronspinjének koherens oszcillációját is ki lehet mérni ezzel a módszerrel [4]. A fenti méréseken keresztül hamarosan rájöttek arra, hogy az NV centrumot jól lehetne használni nagyon kicsi mágneses terek érzékelésére kis térfogatban [5, 6], amellyel nemrég pikotesla érzékenységet sikerült elérni [7]. Az ODMR jelenséget az NV centrumra alább ismertetjük.

Mivel az NV centrum egy $S = 1$ spinrendszer, három elektronspin-alszint létezik benne, amelyeket $m_s = 0$ és $m_s = \pm 1$ spinkvantumszámmal jellemzünk, ahol az $m_s = 0$ és $m_s = \pm 1$ energiaszintek felhasadnak az NV centrum axiális C_{3v} szimmetriája miatt az elektronspin-elektronspin dipól-dipól kölcsönhatás következtében. Zöld fényű, tipikusan 532 nm hullámhosszú nem rezonáns optikai gerjesztéssel az alapállapotból az optikai gerjesztett állapotba kerül úgy, hogy a kezdeti spinállapot változatlan marad. Ezt követően egy sugárzással járó közvetlen átmenet történik a gerjesztett állapot és az alapállapot között, amely szintén változatlanul hagyja a spinállapotot. Ugyanakkor az optikailag gerjesztett állapotban a sugárzásos folyamat mellett a spinpopuláció az 1A_1 és az 1E szingulett állapotokon keresztül is lemehet az alapállapotba az ún. rendszerközi átmenet segítségével, amely a fononok által segített spin-pálya kölcsönhatás miatt lép fel. Az ODMR jelenség és az optikai spinpolarizáció kulcsa az, hogy az optikai gerjesztett állapotból az $m_s = \pm 1$ spinállapotok sokkal nagyobb valószínűséggel választják a szingulett állapotokon keresztüli lecsengési utat, mint az $m_s = 0$ spinállapot (2. ábra). A szingu-

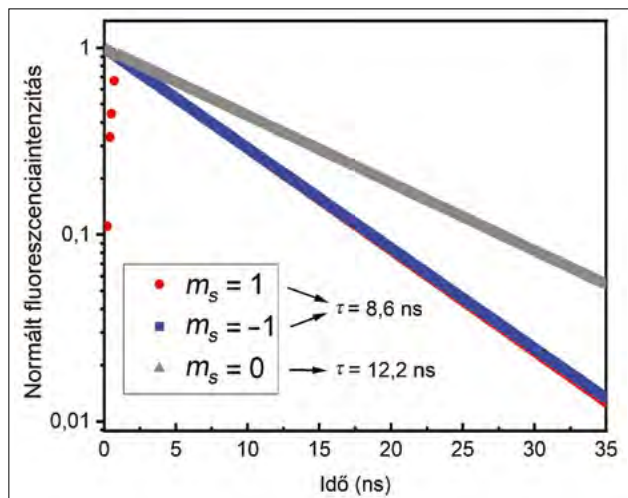
lett állapotból viszont dominánsan az alapállapot $m_s = 0$ spinállapotába szóródik az elektron. Emiatt lehet optikai pumpálással az $m_s = 0$ spinállapotot beállítani (ún. kvantumbit-inicializálás), és ez az elektronspin-polarizáció közel 100% hatásfokú szobahőmérsékleten is. Az optikai gerjesztett állapotból való lecsengés során a két út közül nagyjából 30%-kal kevesebb fotont bocsátanak ki az $m_s = \pm 1$ spinű elektronok, mint az $m_s = 0$ spinű elektronok, így a fluoreszcenciaintenzitásból következtetni lehet a spinállapotra (ún. kvantumbit-kiolvasás). Ennek a jelenségnek a mikroszkopikus mechanizmusát csak nemrég sikerült teljes mértékben megérteni [8]. A fent leírtakból az is egyenesen következik, hogy az $m_s = \pm 1$ spinállapothoz tartozó optikai élettartam rövidebb, mint az $m_s = 0$ spinállapothoz tartozó optikai gerjesztett állapotban.

Ha az elektronspin optikai pumpálással az $m_s = 0$ állapotba kerül, és emellé változó frekvenciájú mikrohullámú gerjesztést alkalmazunk, akkor a fluoreszcenciasugárzás nem változik meg mindaddig, amíg a mikrohullám energiája el nem éri az $m_s = 0$ és az $m_s = \pm 1$ spinállapotok közötti átmenet energiáját. Ha ezt a rezonanciafrekvenciát eléri – amely 2,87 GHz zérus külső mágneses tér mellett –, akkor a spin állapota megváltozik, és a kibocsátott fluoreszcencia intenzitása csökken. Ezt a fluoreszcenciaintenzitás-csökkenést méri az ODMR technika (3. ábra). Külső állandó mágneses tér hatására a Zeeman-effektusnak megfelelően felhasadnak a spinállapotok, és két rezonancia frekvenciának megfelelő fluoreszcenciasökkenés lesz megfigyelhető az ODMR-spektrumban. A negatív csúcsok egymástól való távolságából kiszámolható a külső állandó mágneses tér erőssége.

Jelenleg a mágneses tér mérésére alkalmazott eljárás az NV centrum ODMR-mérésén alapul; azonban 2021-ben az Ulmi Egyetem kutatói Fedor Jelezko csoportjában bemutattak egy kísérletet, ahol a spinállapotok élettartamát vizsgálták, és ebből határozták meg az elektronspin-rezonanciát [9]. A kísérlethez egy egyetlen NV centrumot tartalmazó gyémántmintát használtak, amelyet egy konfokális mikroszkópos összeállítás segítségével tudtak megvalósítani. Ez a technika kiküszöböli a fluoreszcenciaintenzitás változásán alapuló ODMR módszer számos problémáját, amely például a gerjesztő lézer teljesítményének fluktuációjából, illetve az NV centrum töltésének a megvilágítás hatására kialakuló megváltozásából származik.



3. ábra. ODMR-jel külső állandó mágneses tér nélkül (az intenzitás az APD-vel mért másodpercenkénti beütésszám). A piros vonal a mért adatokra illesztett Lorentz-görbét mutatja



4. ábra. A fluoreszcencia lecsengése a különböző spinállapotok esetén [5]

A mérési szekvencia a következőképpen épült fel: 1) az NV centrumot optikailag az $m_s = 0$ spinállapotba állították; 2) innen indítva az optikai gerjesztést a fluoreszcencia időbeli lecsengését mérték; 3) ha az $m_s = \pm 1$ állapotok lecsengésére voltak kíváncsiak, akkor a 2) mérés előtt egy mikrohullámú π impulzust is alkalmaztak egy, a mintához közel vitt antenna segítségével, hogy a spinpopulációt átvigyük az $m_s = 0$ állapotból az $m_s = \pm 1$ állapotba (4. ábra). Az ODMR-jelhez hasonló grafikont kaptak, ahol a rezonanciafrekvencián rövidül az élettartam, mert az $m_s = \pm 1$ spinállapotban az optikai gerjesztett állapot élettartama rövidebb. Mágneses tér jelenléte esetén a rezonanciafrekvencia Zeeman-effektus miatti felhasadása a mágneses térerősség lineáris függvénye, így a mérési adatokból kiszámolható a külső állandó mágneses tér erőssége.

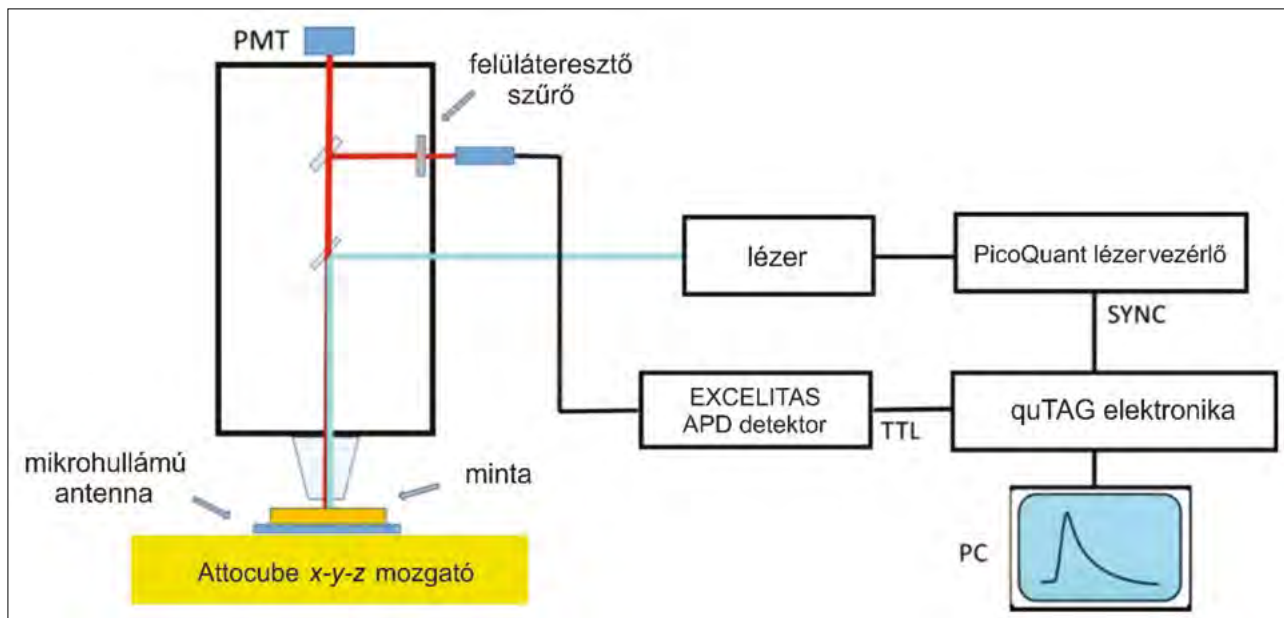
Ezt az eredményt felhasználva az „új generációs kvantummikroszkóp” működése, amit a német ipari (QuTools GmbH), valamint egyetemi (Ulmi Egyetem) partnerekkel fejlesztettünk ki, az NV centrum fluoreszcencia-élettartamának mérésén alapszik. Ezt a módszert már több mint két évtizede eredményesen használják az élettudományok területén, pl. a sejtek metabolikus állapotának jellemzésére, a vonatkozó kétdimenziós fluoreszcenciaélettartam-képek felhasználásával [10]. Ezt a fluoreszcencia-élettartamon alapuló képalkotásnak (angol betűszóval FLIM) elnevezett technikát tipikusan a szabad, illetve kötött állapotban lévő, autofluoreszcens nikotinamid-adenin-dinukleotidból (NADH, a sejtek belső energetikájának fontos vegyülete) származó fot emisszió élettartamának feltérképezésére használják különböző szövetmintákon vagy sejtenyészeteken [10]. A FLIM technika orvosolja az abszolút fluoreszcencia-intenzitás, vagy a fluoreszcenciaintenzitás-arányok (pl. FAD/NAH(P)H) hibás mérését, amely a fényforrás optikai paramétereinek (pl. hullámhossz, fénytéljesítmény, fókuszáltság, impulzushossz) változásából vagy a nem specifikus háttérfény intenzitásából adódik. A technika további előnye az, hogy a fényszórás fluoreszcencia-

intenzitás-torzító hatását lényegében kiküszöböli a mérés során, így különösen alkalmas vastagabb mintarétegek, biológiai minták vizsgálatára.

A fluoreszcencia-élettartam meghatározásához az időtartományban impulzusüzemű lézert alkalmaznak, mert ha a fluoroforok populációját (egy- vagy többfotonos módon) egy megfelelően rövid fényimpulzus gerjeszti, a fluoreszcenciajel intenzitása (egy adott, végig azonos színcentrumokaságon) az idővel exponenciálisan lecsökken. Elvileg meg lehetne kísérelni a fluoreszcencia-csökkenés rögzítését egyetlen gerjesztés-es emissziós jelciklus alapján is, azonban ezt gyakorlati problémák akadályozzák. A fő problémát az okozza, hogy a rögzítendő exponens jel időállandója (τ) nagyon kicsi, néhány száz pikoszekundumtól néhány nanoszekundum időtartományig tart. Ezt a jelet legalább 0,1 nanoszekundumonként kell mintavételezni, azonban a szükséges időbeli felbontást nehéz elérni a hagyományos elektronikus transziens-detektorokkal. A megoldást erre a problémára az időkorrelált egyfoton-számlálás (time-correlated single photon counting, TCSPC) jelenti, amelynek alapja az egymás utáni, ismétlődő egyfoton-kiolvasás. Az egyfoton-számlálás általában nagy sebességű APD (avalanche photodiode, lavinafotodióda) detektorral vagy PMT (fotoelektron-sokszorozó) detektorral történik. Az adatgyűjtés a TCSPC módszernél kiterjed számos gerjesztés-es emisszió ciklusra egy periodikus gerjesztést megvalósító forrás, például impulzusüzemű lézer alkalmazása mellett. Annak érdekében, hogy elkerüljük a kibocsátott fotonok felhalmozódását vagy átfedését, minden kibocsátott fotonhoz meg kell találni a megfelelő gerjesztési ciklust, amely a lézer frekvenciájának és teljesítményének a helyes beállításával érhető el. A sok ciklus alatt összegyűjtött fotonokból rekonstruálható a fluoreszcencia lecsengési görbéje. A felvett hisztogram ezután illeszthető egy vagy több exponenciális függvényre, amely tartalmazza a kívánt élettartam-paramétereket.

Konzorciumunk számos technikai és technológiai kihívással foglalkozik, amelyet a kvantummikroszkóp létrehozásához meg kell oldanunk, így például i) egyedi NV centrumok létrehozása kiváló minőségű gyémántban a felülethez közeli tartományban, ii) az NV centrumok helyének gyors beazonosítása a minta automatizált feltérképezésével a mikroszkópban, iii) a mágneses rezonancia optikai kiolvasásának megvalósítása hosszú ideig tartó mérések esetén, iv) az élettartamok felvétele és analízisa képpontonként. A célkitűzés megvalósításához az összes fejlett technikai megoldást integrálnunk kell a berendezésbe, és felhasználóbarát szoftverfelülettel rendelkező elektronikai alkatrészeket, berendezéseket kell igénybe vennünk az eszköz irányításához.

A kísérleteinkhez a mintákat az Ulmi Egyetemen készítették, amelyek NV színcentrumokat megfelelő koncentrációban tartalmazó tömbi gyémántminták voltak. A kvantummikroszkóp megvalósításához felhasználtuk a Wigner FK-nál lévő laborunkban a projekt megkez-



5. ábra. A megépített kvantummikroszkóp felépítése

désekor már rendelkezésre álló konfokális mikroszkóp-pontok, amelyet eredetileg optikailag detektált mágneses rezonancián alapuló (ODMR-) mérésekre terveztek. A projekt során a magyar ipari partner, az R&D Ultrafast Lasers Kft. első lépésben stabilizálta a referenciaméréseket biztosító konfokális ODMR-mikroszkóp működését úgy, hogy a gerjesztő, folyamatos (continuous wave, cw) működésű, szálcsatolt lézer kimeneti szálcsatlakozóját rögzítette a mikroszkópvázon, majd annak fényét a megfelelő optikák segítségével leképezte a konfokális mikroszkópba épített tülyukra, amely mögött eredetileg csak a fluoreszcenciaintenzitást mérő PMT detektor volt. Ezt követően az R&D Kft. FLIM-rendszerterve, valamint az általa megtervezett új optomechanikai részegységek felhasználásával a mikroszkópba integráltuk a FLIM-mérésekhez szükséges kiegészítő részegységeket, például az impulzusüzemű fényforrást, a szálcsatolt APD detektort, az egyéb elektronikákat stb. (5. ábra). A fejlesztés felgyorsítása érdekében kísérleti rendszerünkbe beépítettünk egy, a PicoQuant GmbH által kifejlesztett FLIM-mérésekhez adaptált, 507 nm-es hullámhosszon működő, ~20 ps fényimpulzusokat előállító, változtatható ismétlési frekvenciájú diódlézert, amely mind impulzusok (1–100 MHz), mind pedig folyamatos lézernyaláb előállítására alkalmas. A nagyobb átlagteljesítményű, folyamatos üzemű működéssel állítjuk be a gyémántban található NV centrumok elektronspinjeit alapállapotba a mérés elején. Az impulzusüzemű lézer általunk megválasztott ismétlési frekvenciája (5 MHz) alkalmas volt arra, hogy az NV színcentrum fluoreszcencia-élettartamát kiolvassa, hiszen ez utóbbi 10 nanoszekundum körüli értéket jelent, míg az impulzusonként vizsgált időtartomány az 5 MHz-es impulzus esetén 200 nanoszekundum.

A referenciaként szolgáló ODMR-mérések elvégzéséhez szükség volt még egy mikrohullámú antennára,

amely a megfelelő frekvenciájú és amplitúdójú elektromágneses jelet sugározza, továbbá a hozzá tartozó szoftvervezérelt elektronika megépítésére. A vezérlőszoftvert a Wigner FK munkatársai készítették az Ulmi Egyetem által korábbi években kifejlesztett, Qudi elnevezésű, nyitott forráskódú szoftver felhasználásával. A mikroszkópban alkalmaztunk egy foton-számláló APD detektort az időkorrelált egyfoton-számlálás megvalósításához. A német ipari partner (QuTools GmbH) által kifejlesztett, időkorrelált egyfoton-számlálás megvalósítására is alkalmas elektronikát (QuTag) is beépítettük a rendszerbe a megfelelő időkésleltetések BNC-kábellel történő beállítását követően. Az eszköz segítségével az impulzusüzemű lézer által keltett fotonok beérkezési ideje mérhetővé vált, az adatokat hisztogram formájában összegyűjtöttük, és a kívánt élettartam-mérések a megfelelő szoftveres kiértékelés után elvégezhetővé váltak.

A Wigner FK beszerzett egy Attocube gyártmányú, nagy precizitású x - y - z mozgatót is a FLIM rendszerű képalkotási funkció megvalósítására, amelynek mozgási, beállási ideje lényegesen kisebb, mint az egy képponthoz tartozó ODMR-, illetve FLIM-spektrumok, élettartam adatok (hisztogramok) felvételéhez szükséges időtartam. Gyakorlati szempontból ahhoz, hogy az NV centrum élettartamát monitorozzuk, a mikroszkóphoz csatolt detektornak a színcentrumtól származó fotonokat szelektíven kellett detektálnia. Ehhez a fluoreszcencia spektrális szűrésére volt szükség a detektor előtt, amihez egy felülateresztő szűrőt használtunk a főleg NV(0) színcentrumoktól származó fluoreszcenciajel ki-szűrésére.

A fejlesztés során ipari partnerként közreműködő R&D Ultrafast Lasers Kft. egy megfelelően megtervezett optika beépítésével elérte, hogy konfokális mikroszkóp PMT-t tartalmazó detektora és az időkorrelált egyfoton-számlálásra használt szálcsatolt APD detektor



6. ábra. Az R&D Ultrafast Lasers Kft. által a projekt céljaira fejlesztett 20 MHz-es Ti-zafír lézer kísérleti darabjáról készített fotó

párhuzamosan működjön. Ez lehetővé teszi a korábbi konfokális és az újonnan kifejlesztett FLIM-detektor és szoftverrendszer párhuzamos működését és alkalmazását a mintákon történő mérésekre és képalkotásra, ami jelentősen felgyorsítja az egyedi színcentrumok helyének beazonosítását, ezzel jelentősen lecsökkentve a mérésekhez szükséges munkaidőt.

Az ipari partner további, a projekthez kapcsolódó feladata volt még, hogy az első év végére összeállított konfokális FLIM-rendszer elkészültéig előkísérleteket végezzen egy (kétfotonos) FLIM képalkotásra alkalmas Zeiss gyártmányú mikroszkóprendszeren, amit korábban egy B&H gyártmányú FLIM-adatgyűjtő és képfeldolgozó rendszerrel egészítettek ki, és elsősorban élettudományi vizsgálatokra használták [11]. A projekt első hónapjaiban az R&D Kft. munkatársai betanították a Wigner FK kijelölt munkatársát a FLIM-adatok felvételére és az élettartam-adatok kiértékelésére (hisztogramok, fazorábra) valamint az eredmények értelmezésére. Kezdetben a mérésekhez egy, az R&D Kft. által korábban megépített, 76 MHz ismétlési frekvenciájú Ti-zafír lézert használtunk, melynek működési hullámhosszát a NV centrumokat tartalmazó nanogyémántok (ND), illetve tömbi gyémántok kétfotonos gerjesztési hullámhosszának megfelelően állítottuk be.

A Wigner FK-ban jelenleg az ulmi partner által előállított egyedi NV centrumokat tartalmazó gyémántmintákat teszteljük, valamint a fluoreszcenciámérésen alapuló képalkotási funkció (FLIM) szoftveres implementálása folyik a léptetési funkciók és a hisztogramadatok automatikus szoftveres kiértékelésének fejlesztésével.

Az R&D Ultrafast Lasers Kft.-nél jelenleg egy olyan 20 MHz-es ismétlési frekvencián működő, pikoszekundumnál rövidebb fényimpulzusokat előállító Ti-zafír lézerrendszer fejlesztésén és megépítésén dolgozunk, ami alkalmas az NV centrumokat tartalmazó gyémántminták egy-, illetve kétfotonos gerjesztésére is (működési hullámhossz: ~ 1010 nm) a jelenleginél (~ 1 mW) nagyobb átlagteljesítményekkel (6. ábra). A lézer emellett alkalmas további, a gyémántmintákban megtalál-

ható olyan színcentrumok gerjesztésére is (működési hullámhosszak: ~ 800 nm, illetve 920 nm), amelyek újabb mérés-technikai lehetőséget nyújthatnak ezen a területen [12].

A most bemutatott projekt is jól mutatja a KFKI-telephelyen működő kutatóintézetek és ipari partnerek egymásra utaltságát az alapkutatási eredmények gyakorlati alkalmazásában, az ehhez szükséges projektek sikeres adminisztratív és szakmai végrehajtásában, valamint a projektek vállalati önrésszel történő finanszírozásában.

Hivatkozások

1. Bitter F. (1949): The optical detection of radiofrequency resonance. *Physical Review*, 76, 833. DOI: 10.1103/PhysRev.76.833
2. Reddy N., Manson N., Krausz E. (1987): Two-laser spectral hole burning in a colour centre in diamond. *Journal of Luminescence*, 38, 46. DOI: 10.1016/0022-2313(87)90057-3
3. Gruber A., Dräbenstedt A., Tietz C., Fleury L., Wrachtrup J., von Borczyskowski C. (1997): Scanning confocal optical microscopy and magnetic resonance on single defect centers. *Science*, 276, 2012. DOI: 10.1126/science.276.5321.2012
4. Jelezko F., Gaebel T., Popa I., Gruber A., Wrachtrup J. (2004): Observation of coherent oscillations in a single electron spin. *Phys. Rev. Lett.*, 92, 076401. DOI: 10.1103/PhysRevLett.92.076401
5. Gopalakrishnan Balasubramanian, Chan I. Y., Kolesov R., Al-Hmoud M., Tisler J., Chang Shin, Changdong Kim, Wojcik A., Hemmer P. R., Krueger A., Hanke T., Leitenstorfer A., Bratschitsch R., Jelezko F., Wrachtrup J. (2008): Nanoscale imaging magnetometry with diamond spins under ambient conditions. *Nature*, 455, 648. DOI: 10.1038/nature07278
6. Maze J. R., Stanwix P. L., Hodges J. S., Hong S., Taylor J. M., Cappellaro P., Jiang L., Gurudev Dutt M. V., Togan E., Zibrov A. S., Yacoby A., Walsworth R. L., Lukin M. D. (2008): Nanoscale magnetic sensing with an individual electronic spin in diamond. *Nature*, 455, 644. DOI: 10.1038/nature07279
7. Wolf T., Neumann P., Nakamura K., Sumiya H., Ohshima T., Isoya J., Wrachtrup J. (2015): Subpicosecond diamond magnetometry. *Physical Review X* 5, 041001. DOI: 10.1103/PhysRevX.5.041001
8. Gali Á. (2019): Ab initio theory of the nitrogen-vacancy center in diamond. *Nanophotonics* 8, 1907. DOI: 10.1515/nanoph-2019-0154; Gali Á. (2023): Recent advances in the ab initio theory of solid-state defect qubits. *Nanophotonics*, 12, 359–397. DOI: 10.1515/nanoph-2022-0723
9. Stürner F. M., Liu Y., Colard P.-O., Markham M., Jelezko F. (2021): Magnetometry based on the excited-state lifetimes of a single nitrogen-vacancy center in diamond. *Appl. Phys. Lett.*, 119, 134001. DOI: 10.1063/5.0070639
10. Datta R., Heaster T. M., Sharick J. T., Gillette A. A., Skala M. C. (2020): Fluorescence lifetime imaging microscopy: fundamentals and advances in instrumentation, analysis, and applications. *J. Biomed. Opt.*, 25(7), 071203. DOI: 10.1117/1.JBO.25.7.071203
11. Kolonics A., Kawamura T., Szpöcs R., Radak Z. (2024): Combined NAD(P)H and lipofuscin FLIM revealed the development of metabolic syndrome in the liver of epigenetically altered rats. In: *Proc. SPIE 12849, Single Molecule Spectroscopy and Superresolution Imaging XVII*, 1284909 (12 March 2024); DOI: 10.1117/12.3005632
12. Krolopp Á., Fésüs L., Szpöcs G., Wikonkál N., Szpöcs R. (2024): A 20 MHz repetition rate, sub-picosecond Ti-sapphire laser for fiber delivery in nonlinear microscopy of the skin. *Life*, 14, 231. DOI: 10.3390/life14020231

KISVÁLLALKOZÁS NAGY VÁLLALKOZÁSOKBAN: MAGFÚZIÓS ÉS NEUTRONOS KÉPALKOTÁSI EGYÜTTMŰKÖDÉSEK A KFKI-TELEPHELYEN

G. Szabó István^{1,*}, Dunai Dániel², Kis Zoltán², Nagy Domonkos², Szepesi Tamás²

¹OPTIKA Mérnökiroda Kft., Budapest

²HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest

*E-mail: g.szabo.istvan@omi-optika.hu

Bevezetés

Bár a napjainkra már fogalommá vált KFKI betűszó a Csillebércen működő kutatóintézetekhez (HUN-REN Wigner FK, HUN-REN EK) közvetve kapcsolódóan jelenik már csak meg¹, magát a KFKI-szellemiség létezését e cikk első szerzőjeként messzemenően igazolni tudom: az idén épp 20 éves OPTIKA Mérnökiroda Kft. [1] (a továbbiakban OMI) ügyvezetőjeként 2004-ben optikai nyalábosztók ügyében jártam Ferencz Kárpátnál, a KFKI-telephelyen vákuumpárolgató labort működtető Optilab Kft. ügyvezetőjénél, és tudomást szerezve a lehetőségről, az OMI azóta folyamatos bérlőként lett otthonra „a telephelyen”.

Annak ellenére, hogy az OMI fő tevékenysége az ipari képfeldolgozási (machine vision) alkalmazásokhoz szükséges optikai eszközök – elsősorban professzionális LED-es megvilágítók – fejlesztése, gyártása és telepítése, a folyamatos telephelyi jelenlét megtermékenyítőleg hatott cégünknel a kutatási célú eszközök és berendezések fejlesztésére és gyártására. A fokozatosan elmélyülő (nem kis részben a helyi fórum szerepét betöltő napi közös ebédek által inspirált) személyes és szakmai kapcsolatok szerves folytatása lett az OMI megítéző tagsága az ELFT Ipari Fizikai Szakcsoportban, illetve a Magyar Magfúziós Technológia Platformban. Ezek a kapcsolatok egyre több szakmai együttműködést is eredményeztek, melyek során az OMI mint kisvállalkozás folyamatosan fejlődő eszköztárával számos kutatási projekt aktív részesevé válhatott, remélve, hogy szerény közreműködésünk hasznos egyedi optomechanikai eszközökkel tudta és tudja támogatni a KFKI-telephelyen működő intézetek

részvételét az igazán nagy tudományos vállalkozásokban (például a magfúziós kutatásokban, mint a TEXTOR, JET, EAST, Wendelstein 7-X, JT-60SA, ITER stb., valamint neutronos képalkotási témákban, mint például a BNC-beli RAD és NORMA projektekben). Fontos megjegyezni, hogy az elért eredmények elengedhetetlen feltétele (volt és remélhetőleg lesz is) a HUN-REN Magyar Kutatási Hálózathoz (korábban MTA-hoz) tartozó intézetek mellett a telephely más, jellemzően spin-off kisvállalkozásaival való szoros együttműködés is (pl. Adimtech Kft., Fusion Instruments Kft., Optilab Kft., Plósz Mérnökiroda Kft.).

Ebben az írásban a teljesség igénye nélkül kísérletet teszünk az elmúlt másfél évtized jelentősebb együttműködéseinek áttekintésére. Az időszak bájos történetisége a többszöri kutatóhálózati átszervezések okozta névváltozások követése az OMI nyilvántartási rendszerében (AEKI, RMKI, SZFKI, WIGNER FK, EK; MTA/ELKH/HUN-REN...). Lakonikus egyszerűséggel így számítógépes rendszerünkben a telephelyi intézetek és vállalkozások mappaelnevezései rendre KFKI-... kezdtűek, de az alábbiakban az egyes projektek intézeti résztvevőit a jelenlegi (lényegében jogutód) intézet nevéhez kötjük.

Magfúziós kísérletek támogatása

Optikai diagnosztikák a fúzióban

A magfúziós kutatások témája az egyik legnagyobb fizikai kutatási terület a világon. Európában és világszerte számos nagyberendezésben vizsgálják, hogyan lehet a 100 millió Celsius-foknál is forróbb plazmát hatékonyan összetartani és elszigetelni a környezetétől. A kísérletek

¹ KFKI Üzemeltető Kft., KFKI Sporttelep, „KFKI telephely”, „Csillebérc KFKI” buszmegállók stb.



G. Szabó István, Dr. Univ., okleveles villamosmérnök (BME), c. egyetemi docens, az OPTIKA Mérnökiroda Kft. (OMI) alapítója és ügyvezetője. A BME Atomfizika Tanszéken megalapozott alkalmazott optikai szakismereteit 1992-től egy MOM-utódcégnél távcsőfejlesztési területen hasznosította. 2004 óta az OMI keretein belül hazai és nemzetközi piacra szánt ipari és műszaki tudományos felhasználású optomechanikai eszközök és berendezések fejlesztését és gyártását vezeti, a munkába rendszeresen bevonva BME-diákokat is.



Dunai Dániel, PhD, fizikus, a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont főmunkatársa, az ITER optikai pelletdiagnosztikai prototípusfejlesztés projektvezetője. Szakterülete a plazmadiagnosztikák fejlesztése mágneses összetartású kísérleti berendezésekhez. Részt vesz több nemzetközi kutatócsoport munkájában, vezeti a DEMO fúziós erőmű tervezés optikai diagnosztika fejlesztését és az angliai MAST-U szférikus tokamak nyalábemissziós spektroszkópiai diagnosztikájának üzemeltetését.

célja a bonyolult plazmafizikai folyamatok megértése és a jövő fúziós reaktoraihoz is használható technológia kifejlesztése. A Nap magjánál akár tízszer forróbb plazmát azonban nem egyszerű bezárni és kontrollálni. A plazma magjában és a szélén egyaránt különböző instabilitások fejlődnek, amik hő- és részecskevesztést is jelentenek. Ahhoz, hogy a plazmában lejátszódó folyamatokat megérthessük, a lehető legrészletesebb módon, azaz a lehető legnagyobb térbeli és időbeli felbontással kell mérni a plazma paramétereit (sűrűség, hőmérséklet, áram, szennyezőkoncentráció stb.). A mai kísérleteket ezért teljesen körbeépítik diagnosztikákkal úgy, hogy végül maga a berendezés alig látszik tőlük. A berendezések építési költségének és az üzemeltető személyzetnek a jelentős részét a diagnosztikák viszik el. A fúziós plazmafizika egyik legsokrétűbb ága a diagnosztikák területe, hiszen itt a fizika szinte minden területe megjelenik. Vannak lézeres diagnosztikák, a mikrohullámú sugárzás visszaverődését mérő diagnosztikák, mágneses tekercsek, plazmába beérő egyszerű fémtű (Langmuir-szonda), röntgen- és neutron-sugárzást mérő diagnosztikák, atomnyaláb-diagnosztikák, és a felsorolást folytathatnák még. Egy kisebb fúziós berendezésen is több tucatnyi diagnosztika van, de a 2023-ban leállított, Oxford mellett található JET tokamakokon közel száz diagnosztika volt.

A diagnosztikák egy nagyon fontos része az, ami a fúziós berendezésből származó látható fényt méri. Ez a fény származhat a plazma külső és „hideg” tartományából, ahol a hőmérséklet elég alacsony ahhoz, hogy a rekombináció jelentős fényhozamot adjon. A plazma belső tartományai viszont annyira forrók, hogy onnan lágy-röntgen-tartományú sugárzást mérhetünk, míg ezek a területek a látható tartományban átlátszóak. A később bemutatott fejlesztések közül több is olyan kamerarendszerek optikai megoldásait tartalmazza, ahol viszonylag nagy látószöggel egy teljes plazma-keresztmetszetet

mérjük a plazma szélének fényét, amire egy példát majd a cikk 6. ábráján is láthatunk. A hírekben és közösségi médiában található videók és fényképek, melyek a fúziós plazmakísérletekről szólnak, zömmel az ilyen kamerarendszerekből származnak. Az általános áttekintés mellett azonban nagyon fontos a szerepük a plazmakamra falának túlhevülése ellen kialakított védelmi rendszerekben is. Egy kis érdekesség, hogy a JET tokamak működése alatt a látható kamerát üzemeltető és annak valós idejű képét a kisülés alatt a monitoron néző fizikus kezében egy kis piros gomb volt, amivel az egész kisülést leállíthatta.

Az optikai diagnosztikák egy másik ágában a plazma fényét spektrométerekbe vezetik, ahol valamilyen emissziós vonal intenzitását vagy az emissziós vonal kiszélesedését mérik. Az ilyen típusú mérésekből a plazmahőmérséklet, a szennyezőkoncentráció vagy a hidrogénizotópok aránya mérhető. Ha a plazmába bocsátott gyorsított atomnyaláb fényét mérjük, akkor a spektrumból a hőmérséklet mellett a plazma áramlási sebessége és a mágneses térre vonatkozó információ is kinyerhető. Egy ilyen spektrométerhez tervezett száloptika-rendszert is bemutatunk majd a következőkben, ami a Wendelstein 7-X sztellarátorhoz készült. A KFKI-telephelyen kutató fúziós közösség egyik fő fejlesztési iránya a plazmadiagnosztikák fejlesztése. Európa minden főbb fúziós berendezéséhez szállítottak mérőeszközöket, és többnyire az üzemeltetésben és a fizikai eredmények kiértékelésében is részt vesznek. A cikkünkben a nagy japán berendezéshez, a JT-60SA tokamakhoz tervezett objektív terveit is bemutatjuk. A diagnosztikák eredményei nemcsak a fizikai megértést szolgálják, hanem elengedhetetlen információkat szolgáltatnak a fúziós berendezések vezérlő-rendszereinek. Hasonlóan a repülőgépek pilótáit segítő rendszerekhez, az emberi beavatkozási sebességnél jóval gyorsabban beérkező mérési eredményeik sokaságát dolgozzák fel, és biztosítják a stabil plazmaműködést. A plazmainstabilitások sokfélék lehetnek, és néhányuk a berendezésre nézve végzetes is lehet a jövő erőműveinek mérettartományában. Az egyik leginkább kutatott terület a plazma szélén kialakuló instabilitás, amit a napkitörésekhez szoktak hasonlítani, és ami a másodperc ezredrésze alatt ki tud fejlődni – akár a teljes plazmaenergia 10%-ának az elvesztését eredményezve.

Azonban a tokamak típusú nagy fúziós berendezésekre a legnagyobb veszélyt az jelenti, ha a plazmaösszetartás egy másik, belső plazmainstabilitás következtében



Kis Zoltán, PhD, fizikus, 2006 óta tudományos főmunkatárs a HUN-REN EK-ban. Szakterülete: képkalkotás és Monte Carlo-szimulációk. A Budapesti Neutron Centrum hideg- és termikus neutronos képkalkotó berendezéseinek tudományos felelőse. Kidolgozta a prompt gamma aktivációs képkalkotás (PGAI) és a neutronradiográfia/tomográfia kombinációját. Több mint 150 tudományos publikáció társszerzője.



Nagy Domonkos okleveles gépészmérnök, a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont fejlesztőmérnöke. Az elmúlt 10 évben számos magfúziós kísérleti fejlesztésben vett részt gépészeti tervezőmérnökként. Többek között a nyalábe emissziós spektroszkópiai rendszerek és a diszrupciócsillapító rendszerek mechanikai és optomechanikai tervezése, építése és tesztelése fűződik a nevéhez.



Szepesi Tamás Zoltán, kísérleti fizikus, szakterülete a magas hőmérsékletű plazmafizika, a pellet-plazma kölcsönhatás és a videodiagnosztika. Számontevő tapasztalattal rendelkezik pelletbelövése kísérletek és megfigyelő rendszerek tervezése, illetve videodiagnosztikai adatok feldolgozása terén. A JT-60SA tokamak videodiagnosztika-fejlesztésének projektvezetője. Jelentős háttérrel bír innovatív tudományos eszközök (kompakt pelletbelövő, szakaszos- és folyamatos üzemű, tríciumkompatibilis hidrogénjég-forrás) fejlesztésében is.

hirtelen megszűnik, és a teljes plazma a másodperc század része alatt a határoló falelemekre áramlik. Az óriási hőterhelés mellett ebben a folyamatban fénysebességgel száguldó elektronnyalábok is keletkezhetnek, amik a falba csapódva óriási pusztítást tudnak végezni. Az ITER-ben egy új védelmi rendszert dolgoznak ki ennek a megoldására, amit shattered pellet injection (SPI), azaz törtjégpellet-belövésnek neveztek el. Ebben a megoldásban egy nagy, akár 800 m/s sebességű, kb. pezsgődugó méretű néhány kelvines, kriogén hőmérsékletre hűtött hidrogénjég-pelletet lőnek be a plazmába. A pellet a plazma széléhez közeli ferde fémlapra érkezik, ahol összetörik, és a plazmába már különböző nagyságú és sebességű töredékei érkeznek. Ezen tört jégfelhő tudja a plazmát mélységében is kellően lehűteni a jelenlegi tervek szerint. 2020-ban a Fusion Instruments Kft. elnyert egy ITER által kiírt pályázatot, aminek a keretében egy diagnosztikai koncepciót kellett kidolgoznia a gyorsan száguldó pellet repülési paramétereinek valós idejű követésére. A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont Fúziós Plazmafizika Laborja egy másik ITER-pályázat keretében a pelletfagyasztás és pellettörés fizikájának megértését és technológiájának fejlesztését tűzte ki célul. A következőkben néhány, az OMI által elkészített optikai eszközt mutatunk be, amiket a fenti ITER-pályázatok magvalósításához fejlesztettünk ki.

Az optikai pelletdiagnosztika (OPD) szálrendszere

A Fusion Instruments Kft. által kidolgozott optikai pelletdiagnosztika (OPD) részére épített 128 db, egyenként 400 μm magátmérőjű elemi szálból álló száloptikai rend-

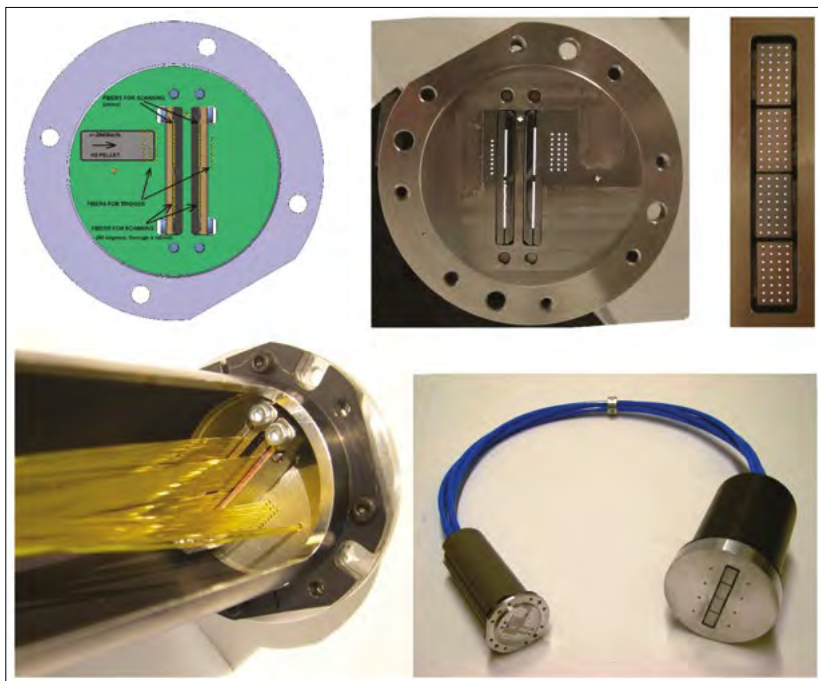
szer mindkét vége rendezett köteg: az egyik végen 4 db, 22-22 szálból vonalszkennerként elrendezett nyaláb, valamint elemi segéd- és triggerszálak fénye a másik végen 4 db 8×4 -es mátrixban elrendezett alakzatban jut egy Hamamatsu lavinafotodióda (APD) mátrixfelületére. Ez az egyedi vonalszkennerek az előtte $\sim 2800 \text{ km/h}$ sebességgel száguldó fagyott H_2 pellet kétirányú leképezését végzi, így adva információt a pelletkilövés sikeréről és a pellet repülési paramétereiről. A szálak kezelése és a szerelés rendkívüli összpontosítást és gondosságot követelt, melynek eredményeként hibamentes (törött szál nélküli) rendszert sikerült gyártani (1. ábra), Katona Ferenc MOM-gyökerű (lásd később) száloptikai szakértésének és türelmének köszönhetően.

Shattered pellet injection (SPI) labor

Az SPI laborban használt nagy sebességű ($\sim 100\,000 \text{ kép/sec}$) kamerák képalkotásához egyedi, nagy fényáramú LED-megvilágítások készültek az OMI kivitelezésében. A nagy sebességű kamerák a szokásosnál jóval erősebb – és ami legalább ennyire fontos – időben állandó fényforrást igényelnek, ami speciális eszközökkel valósítható meg. Ezek között említésre érdemes a 24000 lm fényáramú (260 W elektromos teljesítményű), villogásmentes, $200 \times 200 \text{ mm}$ -es homogén világító felülettel rendelkező típus, illetve a 6100 lm fényáramú (55W), 50 mm átmérőjű párhuzamos fényű reflektor (2. ábra). Megjegyzendő, hogy az OMI hasonló jellegű egyedi nagy fényerejű LED-megvilágítókat fejlesztett ki és szállított 2020-ban a szegedi ELI részére is.

Wendelstein 7-X sztellarátor (W7-X)

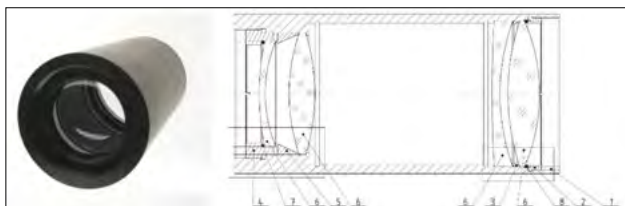
A Wendelstein 7-X (W7-X) [2] a világ legnagyobb sztellarátor típusú kísérleti fúziós berendezése, melynek célja a sztellarátor típusú fúziós reaktorok energiatermelésre való alkalmasságának igazolása. A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (EK) munkatársai 2017-ben telepítettek a W7-X berendezésre egy saját fejlesztésű alkálinyaláb-diagnosztikai rendszert [3]. A rendszer a plazmaszéli transzportfolyamatok, elsősorban a turbulencia vizsgálatát szolgálja [4]. A diagnosztika két fő egységből áll: a nyalábinjektorból és az optikai megfigyelőrendszerből. Az injektor semleges töltésű nátriumnyalábot lő a plazmába. A plazma alkotóelemeivel kialakuló ütközési folyamatok során mind a nátriumatomok, mind a plazmában lévő szennyezőatomok karakterisztikus hullámhosszú fényt bocsátanak ki. Ezt a fényt az optikai megfigyelő-rendszerrel a belövési tengelyre



1. ábra. Fent: a szkennelő és az APD detektormátrix felőli rendezett szálvégek. Lent: 400 μm -es elemi szálak és a kész szerelt köteg (tervező: Fusion Instruments Kft.)



2. ábra. 55 W-os LED reflektor és 260 W-os LED háttérvilágító (Forrás: OMI)

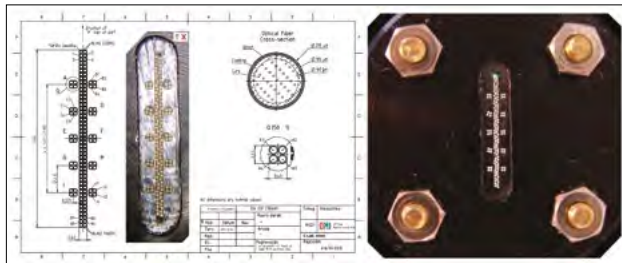


3. ábra. A Petzval-rendszerű objektív (forrás: OMI)

merőlegesen, két irányból tudjuk megfigyelni. Az alsó megfigyelőrendszer 2021-ben az OMI-val közösen lett kifejlesztve, melyben a megfigyelt tartományból a fényt egy egyedi objektív képezi le egy optikai szálrendszerbe [5]. Az optikai szálakon keresztül érkező fény spektrális felbontásából a plazma hőmérséklete is meghatározható.

Az említett optikai rendszer két egyedi kulcseleme készült az OMI keretein belül: egyrészt egy 340 és 930 nm között működő, azaz igen széles spektrális áteresztésű, 0,063-szoros nagyítású objektív (3. ábra), melynek feladata az optikai tengelyre merőleges ~ 160 mm méretű, 2800 mm távolságban lévő plazmasáv leképzése egy 8 m hosszú, 132 db, egyenként $160 \mu\text{m}$ magátmérőjű kvarc szálból képzett száloptikai köteg egyedi rendezett ún. „fiber plate” végén kialakított (4. ábra), kb. $10 \times 0,4$ mm-es sávra. A száloptikai köteg másik vége 132 db előszerelt SMA csatlakozóval rendelkezik, amiket a mérés során egy-egy spektrumanalizátorhoz csatlakoztatnak.

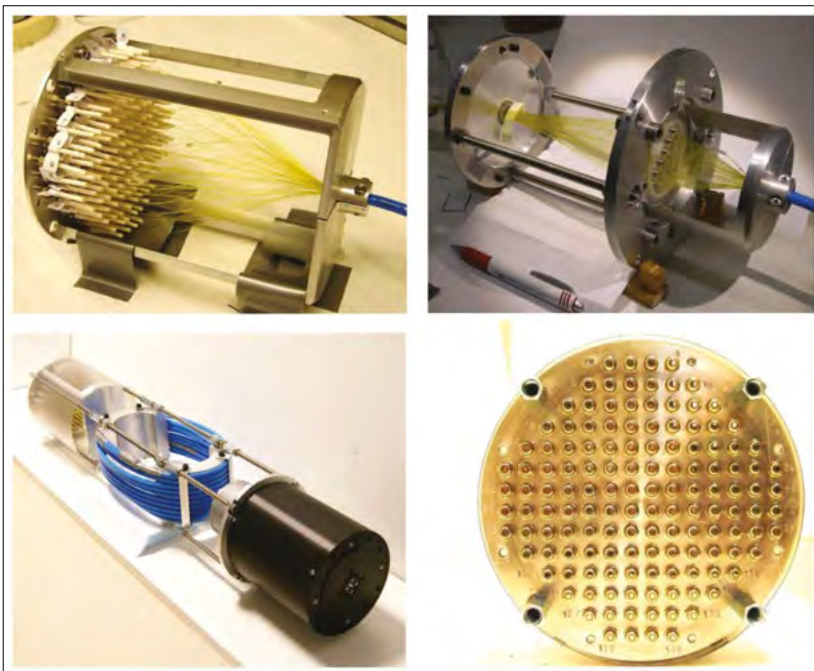
Az optikai tervezés Polnauer Lajosné munkája, aki eredetileg egy másik „legendás betűszó”, a MOM (Magyar Optikai Művek) tervezőjeként sajátította el a szakma fortélyait. A széles sávú áteresztési követelményeket csak a Petzval-rendszerű légréses objektív két gyűjtőlencsénél alkalmazott speciális kalcium-fluorid anyaggal lehetett teljesíteni, melynek megmunkálása jóval nagyobb (és sajnos külföldi) költséget igényelt. A szórólencsék és az antireflexiós rétegezés viszont teljes mértékben hazai műhelyekben készültek; a foglalat és a szerelés, bemérés OMI-munka.



4. ábra. Egyedileg rendezett 132 elemi szál a képsíkban: terv és tény

Az egyedi száloptikai köteg két fő kihívást jelentett: egyrészt az egyik végükön SMA csatlakozókkal szerelt, egyenként 8 m hosszú, $205 \mu\text{m}$ külső átmérőjű szálak kezelése és kötegbe rendezése, másrészt a 132 db szabad szálvég rendezett formában történő végszerelése a már említett fiber plate kb. $10 \times 0,5$ mm-es sávban elhelyezkedő furataiba, majd a készre szerelt egység felületének polírozása. A szálak szerelése komoly manuális precizitást, türelmet és figyelmet igényelt, nem beszélve a 8 m-es szálköteg németországi szállítását lehetővé tevő csévére tekert kialakításának kezeléséről. Nyugodt szívvel mondható, mindezekről a 5. ábra képei magukért beszélnek. Tekintettel arra, hogy a szerelés közben megsérült szálak cseréje szinte lehetetlen, igen fontos volt a sérülésmentes szerelés, ami mind a 132 szál esetében sikeres volt. A mechanikai előkészítés szoros együttműködéssel történt, a HUN-REN EK részéről Nagy Domonkos szakértő tervezői munkájával.

Megemlítendő még, hogy fentiekhez hasonló együttműködés keretében került sor még 2012-ben 10 db egyedi 30 fokos látószögű frontrekeszes objektív OMI-ban történő megtervezésére (szintén Polnauer Lajosné munkája) és legyártására a W7-X rendszer HUN-REN Wigner FK szakértői által, Kocsis Gábor projektvezetésével

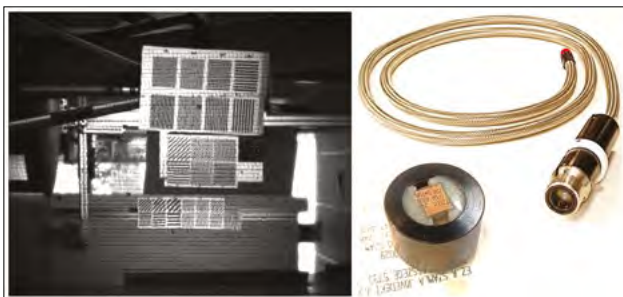


5. ábra. A belső szálrendezések és a kész rendszer a felcsévelt 8 m hosszú köteggel és a 132 SMA csatlakozóval



6. ábra. A W7-X plazmaképe (forrás: WIGNER RCP), és a 30 fokos látószögű objektív (forrás: OMI)

megvalósult videódiagnosztikai rendszerébe integrálva. Ezzel megvalósulhatott a sztellarátor teljes belső kamrafelületének és terének egyidejű és folyamatos képalkotása. Ezzel az objektívvel készült a W7-X első hidrogén-plazmájának emblemikus fotója (6. ábra).



7. ábra. A képalkotás tesztelése, az előszerelt képméret-konvertáló (taper) és a szerelt 3 méteres képtovábbító köteg a W7-X-be szánt objektívvel

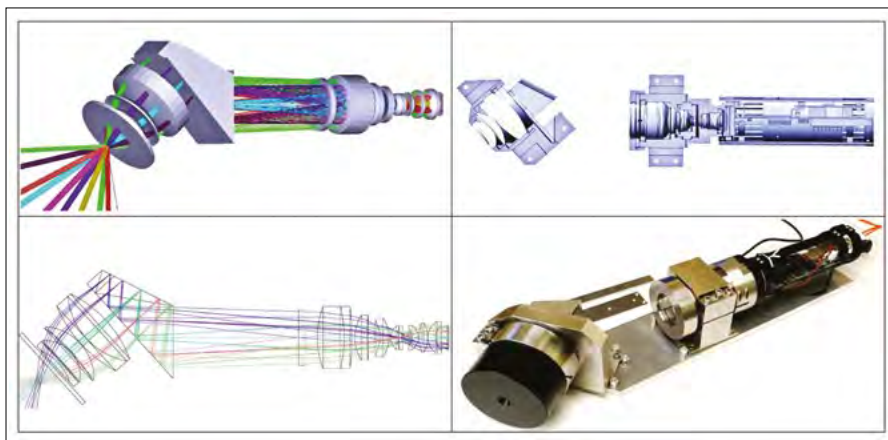
Végül 2024 tavaszának egyik izgalmas projektje volt az Adimtech Kft.-vel együttműködve a W7-X egyik kamerájának átalakítása, melynek során az eredeti 30 fokos objektív képét kellett egy 3 m hosszú, 1000×800 szálas, egyenként $10 \mu\text{m}$ átmérőjű elemi szálból álló rendezett képtovábbító száloptikai kötegbe csatolni egy képméret-konvertáló egység (taper) segítségével. A képtovábbító köteg és a $6 \mu\text{m}$ -es elemi szálaból álló $18,0 \times 14,4/10,0 \times 8,0$ képméret-konvertáló egyedi Schott-gyártmány, és nincs tudomásunk arról, hogy ilyen hosszúságú és felbontóképességű rendezett köteg előfordult-e korábban bármikor Magyarországon (7. ábra). Az objektív igen kis mélységélessége és a téglalap alakú apertúrák (taper, kötegvég) miatt a rendszer elemeinek beforgatása, élesre állítása és házagolós rögzítése tizedmilliméteres pontosságú beszerelési illesztést és igen aprólékos munkát igényelt, különösen a taper beragasztása során.

JT-60SA

A JT-60SA jelenleg a világ legnagyobb tokamak elven működő fúziós berendezése. Célja annak demonstrálása, hogy a fúziós reaktorokban elérhető nagy teljesítményű plazmákat hosszú ideig is képesek vagyunk fenntartani és szabályozni; ez az egyik első nagyon fontos mérföldkő a kereskedelmi fúziós erőművek felé. A HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont munkatársai 2019-ben egy saját fejlesztésű videódiagnosztikai rendszert szállítottak a JT-60SA számára [6] Szepesi Tamás projektvezetése mellett. A rendszer a Wigner FK-ban fejlesztett EDICAM intelligens gyorskamerára épül (Event Detection Intelligent Camera, eseményérzékelő intelligens kamera) [7], amelyet kifejezetten fúziós kísérletek megfigyelésére terveztek (9. ábra).

Az EDICAM rendszer sikeresen teljesítette a specifikáció minden pontját, és az első kísérleti naptól kezdve kiváló minőségű képeket szolgáltat a JT-60SA működéséről. A videódiagnosztika a tokamak első indításánál és az azt követő első mérési kampányában alapvető szerepet töltött be, hozzájárulását a kísérlet sikeréhez többször is hangsúlyozták a projekt vezetői.

A képalkotó diagnosztika kritikus fontosságú részét képezi az OMI részéről gondos tervezést és gyártást igénylő, szintén frontrekeszes egyedi optikai rendszer (8. ábra), melynek számos peremfeltételt kellett kielégítenie. Igen nagy látószög (80°) és az 520–720 nm-es tervezési tartomány mellett a nézet irányát férőhelykorlátok miatt 40 fokkal meg kellett törni, továbbá a fúziós kísérlet közelében várható ionizáló sugárzás miatt csak ragasztás nélküli, légréses optikai rendszer, illetve csak sugárzásálló párral rendelkező üveganyagok (mindössze 6 féle ilyen optikai üveg érhető el) használata volt megengedett (ez a berendezés egy későbbi üzemmódja során lesz fontos, amikor az optikai rendszert már a jóval költségesebb sugárzásálló üveganyagokból gyártják újra, annak újratervezése nélkül). A rendszer kötelező részét képezte a legfeljebb 5 mm átmérőjű apertúra (belépő pupilla) az első optikai felület előtt mintegy 17 mm távolságban, amely



8. ábra. JT-60SA objektív sugármenete, szerkezeti vázlata és a kész rendszer a rozsdamentes foglalással (forrás: OMI)



9. ábra. A JT-60SA EDICAM kamerával készült képe (forrás: JT-60SA), a prizma üveganyaga és a kész prizma

az egész diagnosztikai rendszert védő vízűtésű hőpajzson át az egyetlen betekintési lehetőséget jelenti a kísérlet belsejébe. A tervezés fontos aspektusa volt (hasonlóan a W-7X 10 db-os objektívjeihez) az optikai útban kialakított gyakorlatilag párhuzamos tartomány, ahol a sugarak tengellyel bezárt szöge $\pm 7^\circ$ -on belül van – ez szükséges a speciális, mindössze néhány nm széles áteresztési tartományú interferenciaszűrő számára.

Az optikai tervezés ez esetben is Polnauer Lajosné munkáját dicséri. A rendszer különleges alkotóeleme az optikai tengely kb. 140° -os megtörését lehetővé tevő ún. Bauernfeind-prizma (a prizma különleges jellemzője az a felülete, mely a beeső fénynyaláb szögétől függően egyszerre teljes visszaverődésű tükör, illetve áteresztő oldal), aminek végső változata igen kalandos úton valósult meg. A prizmánál általánosságban használt N-BK7 üveg alacsonyabb törésmutatója miatt az eredetileg tervezett 40° szög esetén a képmező egy részén nem teljesült volna a teljes visszaverődés feltétele, így a magasabb törésmutatójú, N-LAK10 üveg használata lett be tervezve. Annak azonban nincs sugárzásálló párja, így a valamivel kisebb törésmutatójú, de sugárzásálló párral rendelkező N-LAK9 üveganyag lett a végső változat, amivel viszont a prizmaszög 42° -ra módosult. A szükséges üvegtömb beszerzése azonban nehézségbe ütközött, mivel ezt a típusú optikai üveget a világ üveggyárai mind azonos névleges nyers tömbméretben gyártják (igazolva azt a tényt, hogy a műszaki, gazdaságossági szempontok földrészekről függetlenül hasonlóak), és ennek névleges 40 mm-es vastagsága nem adta volna ki a prizma magasság méretét. Sikert azonban elérni a német Schott gyár képviselőjén keresztül, hogy a raktári tömböket átméjék, és így tudtunk beszerezni egy 48 mm magas nyers tömböt. Ez az üveganyag lett kiküldve később a kínai gyártóhoz, majd a kész prizmát itthon beszereltük a rendszerbe, és végül a rendszert Japánba szállították (9. ábra).

HUN-REN EK Nukleáris Analitikai és Radiográfiai Laboratórium – Budapesti Neutron Centrum

A különböző neutronos mérőállomásokat üzemeltető Budapesti Neutron Centrum² (BNC) [8] egyike az ország legnagyobb nyílt kutatási infrastruktúráinak, ahol a képalkotás is elérhető roncsolásmentes vizsgálati típus. A radiográfia és a tomográfia a neutronok és a fotonok áthatolóképességét használja fel arra, hogy vizuális információt nyerjen egy tárgy belső szerkezetéről vagy a benne zajló dinamikus folyamatokról. Az elvégzett vizsgálatok alkalmazási területei széles skálát ölelnek fel az

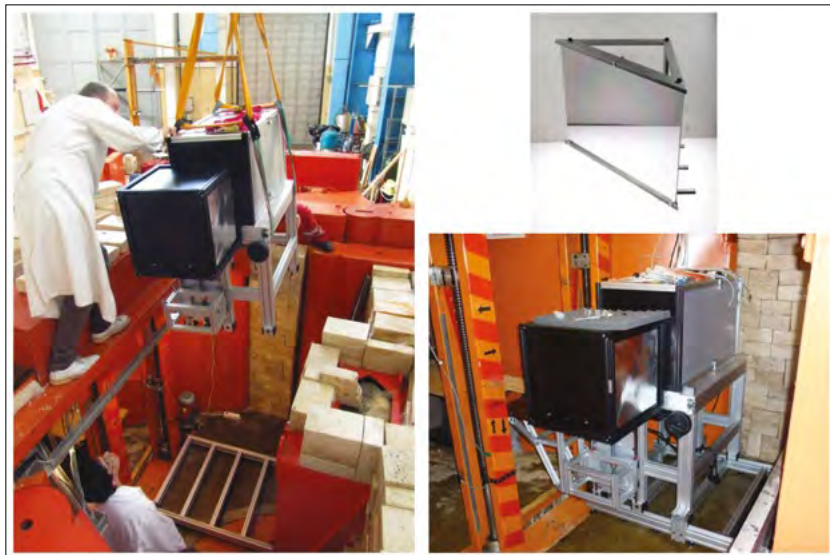
anyagtudománytól a kulturális örökség, a paleontológiától a porózus anyagok tanulmányozásáig. Különösen érdekes módszerfejlesztések is megvalósultak itt, pl. a Monte Carlo-szimulációkkal korrigált PGAA-elemzés, vagy szcintillátoranyagok fejlesztése. A kiválósági alapon nyalábidőre pályázó felhasználók kutatási feladatai megkövetelték mindkét képalkotó berendezés (RAD és NORMA) fejlesztését, több lépcsőben, Kis Zoltán szakmai irányításával.

RAD

A reaktorhoz közvetlenül kapcsolódó RAD (neutronos és röntgenes képalkotó) egy sokoldalú rendszer [9]. Szűrőkkel többféle energiaeioszlású neutronnyalábot (termikus, epitermikus és gyors neutronokat), továbbá röntgenberendezést is alkalmazhatunk a sugárzásos vizsgálatok egymást kiegészítő jellegét kihasználva. A 80-as évektől több évtizeden át sikeresen működő korábbi mérőberendezés cseréje 2014-ben intenzív szakmai együttműködéssel, OMI-tervezéssel és kivitelezéssel történt. Ennek során az alapoktól újratervezett mérőállomás teljesen digitálissá vált, változtatható térbeli felbontással és látómezővel, akár 3D tomográfias képalkotással.

A berendezés közvetlenül az aktív zóna közelében, a reaktor körüli 6 m átmérőjű biológiai védelem külső falának tövében található, egy 200 mm átmérőjű nyalábot biztosító neutroncsatornánál – ez a jellegzetes formája és a helyszínre történő bemelése nyomán kapta a „repülő disznó” munkanevet (10. ábra). A berendezésben lévő háromféle objektív távirányítással, távolról vezérelve, felváltva mozgatható be nagy pontosságú golyós megvezetésekben a szintén cserélhető nagy érzékenységű kamera elé, így biztosítva a különböző térbeli felbontás- és látómezőigények kiszolgálását. Az élességállítás szintén

² Sajnos a kutatóreaktor 2024 folyamán szervezési problémák miatt nem működik mint neutronforrás.



10. ábra. A RAD beemelés közben, illetve már a mérőhelyén a reaktorcsarnokban, valamint a 300×400 mm méretű kvarc hordozójú felületi tükör

léptetőmotoros távirányítással végezhető. A készülék az állítható magasságú és forgatható tárgyasztalnak köszönhetően alkalmas akár $250 \times 250 \times 250$ mm méretű tárgyak transzmissziós radiográfiai vagy tomografikus vizsgálatára is. A tervezés során számos kihívásnak kellett megfelelni, melyek közül kiemelendő a teljes berendezés nyalábbal párhuzamos mintegy 1 m tartományú mozgathatósága, reprodukálható visszaállítással, a precíz helyszíni szintezési és pozicionálási követelmények, az optikai kalibrálási követelmények kielégítése, a bel-

ső tér tökéletes fényzárása, a nagy méretű, mintegy 300×300 mm-es szcintillátorlemezek kezelése, a berendezés belső terének klimatizálása. A berendezés építése során külön követelmény volt a neutronnyaláb közelében csak mérsékelten felaktiválódó anyagok használata, különös tekintettel a mintegy 300×400 mm méretű kvarc hordozójú kicsatoló tükörré (10. ábra).

NORMA

A másik képalkotó berendezés a neutronvezető végén hideg neutronokat használó NORMA (Neutron Optics and Radiography for Material Analysis, neutronoptikai és anyagvizsgálati radiográfia) [9], ami része a kombinált NIPS-NORMA mérőállomásnak [10].

Míg a PGAA (prompt gamma neutron activation analysis, prompt gamma aktivációs analízis) elemanalitikai méréseket végző NIPS (neutron-induced prompt gamma-ray spectroscopy, neutronindukált prompt gamma-spektroszkópia) detektorrendszer világszínvonalú, vezető létesítményként működik, egyre több igény merült fel a nagyobb térbeli felbontású képalkotásra és az időfüggő folyamatok követésének képességére (pl. energiatermeléssel és -tárolással kapcsolatos problémák). Ezen a területen nagyobb térbeli felbontásra (néhányszor tíz mikrométertől akár 10 mikrométerig) és

változó expozíciós időre (tizedmásodperctől néhány tízmásodpercig) van szükség az üzemanyagcellák, illetve az elektromos akkumulátorok szerkezeti és működési jellemzőinek vizsgálatához. Ezzel szemben a képalkotás-vezérelt PGAA-mérésekhez elegendő a gyengébb térbeli felbontás rövidebb expozíciós idővel a felesleges felaktiválás elkerülése érdekében. Mindkét esetben fontos a lehető legnagyobb látómező biztosítása, az adott feladatnak megfelelő térbeli és időbeli felbontást (azaz expozíciós időket) alkalmazva. Ezek a feltételek együttesen egymásnak ellentmondó követelményeket jelentenek, ezért elengedhetetlen volt a rendszer paramétereinek optimalizálása. Mind a saját, mind a nemzetközi tapasztalatok azt mutatták, hogy a követelményeket nem lehet jól kielégíteni egyféle rendszerrel, ezért két feladatkörre optimalizált rendszer üzembe állítása történt meg OMI-tervezéssel és -kivitelezéssel.



11. ábra. A NORMA mintatartó mechanikai rendszere a kameratoronnyal, a cserélhető optikai előtéttekkel és a neutronblendével



12. ábra. A három sínen mozgatható cserélhető optikai előtét

A kivitelezés első fázisában 2011-től kezdődően telepítettünk egy mintatartó-mechanikát, léptetőmotoros x - y - z irányú ± 100 mm-es mozgató tartománnyal, $15\ \mu\text{m}$ visszaállási pontossággal a transzmissziós és PGAA-mérésekhez, valamint 360° -os forgatással a tomografikus felvételek készítéséhez. A pontossági és stabilitási feltételek kielégítéséhez egy robusztus piramisszerű kialakítás megvalósítása tűnt alkalmasnak. Az összeállítás optikai részeként egy, a nyalábból kimooghatható nagy érzékenységű kamerát és kicsatoló tükörrel ellátott kameraházat is telepítettünk. Második fázisként a mérőhely kiegészült 2014-ben egy távirányítású neutronkollimátor blendeegységgel, mellyel tetszőleges alakú neutronnyaláb állítható be a blendére szerelt neutronelnyelő Li-tartalmú lapokkal (11. ábra). A harmadik fázisra több éves műszaki előkészület után 2022-től kezdődően (és épp a jelen cikk írásakor záruló módon) került sor, melynek során új, sínrendszerre rögzített cserélhető kicsatolótükör-rendszer, motorosan vezérelhető függőleges kameramoogható (élességállítás-hoz), új, nagy felbontású kamera és optikák kerültek a berendezésbe (11. ábra). Mindezekkel a fejlesztésekkel érte el a rendszer a fentebb említett kiemelkedő térbeli felbontóképességeket, melyet három különböző felépítésű, sínen könnyen cserélhető optikai előtét valósít meg (12. ábra).

Összegzés

A fentiekben áttekintettük az elmúlt mintegy másfél évtized legmeghatározóbb együttműködési projektjeit, melyek a KFKI-telephely kutatóintézetei és az OPTIKA Mérnökiroda Kft. kisvállalkozás között megvalósultak. Nem érintettük a telephelyen töltött első időszak nem kevésbé izgalmas együttműködéseit (pl. TEXTOR tokamak, a kutatóreaktor-fedél periszkópkamerájának felújítása stb.) és számos kisebb volumenű munkát.

Jogosan merülhet fel a kérdés, hogy ennek a szimbiotikus viszonyznak, aminek a tárgyalt együttműködések is köszönhetőek, mi vagy kik a haszonélvezői. Talán nem

túlzó az a válasz – amit hiszünk és valunk –, hogy ez a telephelyi együttes jelenlét mind a kutatóintézetek, mind az ipari kisvállalkozások számára kölcsönös előnyt jelent: az intézetek számára helyben rendelkezésre állnak az egyedi igényeiket kielégíteni tudó erőforrások, a vállalkozások számára pedig ez a szakmai fejlődés mellett a fenntartható működésükhöz is hozzájárul. Ha ennek a rendszernek hosszú távon megvannak az alapjai, a rendszer máris több lesz, mint elemeinek összessége és az együttes effektustöbblet, a KFKI-szellemiség legnagyobb haszonélvezője maga az egész magyar tudomány lehet.

Köszönetnyilvánítás

Az emberi tényező természetesen megkerülhetetlen a tárgyalt tudományos-műszaki együttműködések esetében is, és ez különös tekintettel igaz a KFKI-telephelyen töltött, az OMI létezésével azonos eddigi 20 évre. A teljesség igénye nélkül külön köszönet illeti az alábbi intézményeket és személyeket: a KFKI Üzemeltető Kft.-t és munkatársait a telephelyi jelenlét biztosításáért; a kutatóintézeti kollégákat az érdeklődésekért és igényekért (a jelen cikk társszerzői mellett Kocsis Gábort, Petravich Gábort, Szentmiklósi Lászlót és Zoletnik Sándort); az OPTIKA Mérnökiroda Kft. jelenlegi és korábbi munkatársait (Baki Mihályt, Bujáki Krisztiánt, Kiss Mártont, Kovács Rékát, Radvánszky Rolandot, Pápai Lőrincet, Plenter Zsuzsannát, Simeta Györgyöt és Zsoldos Miklóst); a BME-s diákokat a tervezési és szerelési munkákban való részvételért (Beke Tamást, Ferenczi Ivettet, Havriló Balázst, Koncsár Pétert, Kovács Tamást, Réz Istvánt, Sütő Martint), valamint Katona Ferencet, Máté Lászlót, Plósz Bélát és Polnauer Lajosnét.

Irodalom

1. <https://omi-optika.hu>
2. <https://www.ipp.mpg.de/w7x>
3. Anda G., et al.: FED 2019, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2019.03.042>
4. Zoletnik S., et al.: RSI 2018, <https://doi.org/10.1063/1.5039309>
5. Nagy D., et al. (2023): J. Nucl. Eng., 4(1), 142–151; <https://doi.org/10.3390/jne4010010>
6. Szepesi T., et al.: FED 2020, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2020.111505>
7. Zoletnik S., et al.: FED 2013, <https://doi.org/10.1016/j.fusengdes.2013.01.054>
8. Kis Z., Szentmiklósi L., Belgia T., Balaskó M., Horváth L. Z., Maróti B. (2015): Neutron based imaging and element-mapping at the Budapest Neutron Centre. Phys. Procedia, 69, 40–47.
9. Kis Z. (2024): The redesigned neutron imaging facility, NORMA at BNC, Budapest. Review of Scientific Instruments, 95(7), 073702.
10. Kis Z., Szentmiklósi L., Belgia T. (2015): NIPS-NORMA station – A combined facility for neutron-based nondestructive element analysis and imaging at the Budapest Neutron Centre. Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., A 779(0), 116–123.

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIÁHOZ VEZETŐ ÚT – A 2024-ES FIZIKAI NOBEL-DÍJ

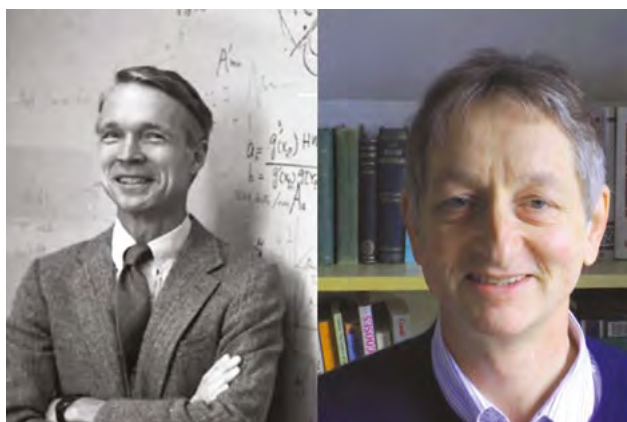
Somfai Ellák^{1,2}

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, Mesterséges Intelligencia Tanszék, Budapest

²HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest

E-mail: somfai.ellak@wigner.hun-ren.hu

A fizikának tekinthető tudományterületet kiterjesztő módon értelmezi az a vélekedés, hogy a fizika az, amit fizikusok csinálnak (Fermi szerint késő este). A 2024-es fizikai Nobel-díjat, amelyet John J. Hopfield és Geoffrey E. Hinton a mesterséges neuronhálók kidolgozásához szükséges alapvető felfedezésekért kapott (1. ábra), mégsem így kell érteni. A kezdeti lépések alapvetően kapcsolódtak mágneses rendszerekhez és ezek statisztikus fizikai modelljeihez – mint például a számos más komplex rendszer mintájának is tekinthető spinűvegekhez – amelyért Giorgio Parisi kapta részben a 2021-es fizikai Nobel-díjat.



1. ábra. John J. Hopfield és Geoffrey E. Hinton

Az embereket régóta foglalkoztatja az a kihívás, hogy „gondolkodó” gépeket készítsenek. Ennek egy korai megnyilvánulása volt a 18. században Kempelen Farkas sakkozógépe, a Török, amelyről csak utólag derült ki egyértelműen, hogy voltaképpen egy ember ült benne. Érdekes, hogy az emberi intelligencia rejtett felhasználása napjainkig sem tűnt el. Például az Amazon nemrég bezárt Just Walk Out (csak sétálj ki) bolti alkalmazottak nélküli, bekamerázott, a cég állítása szerint kizárólag mesterséges intelligencián alapuló üzleteiről is kiderült, hogy a tranzakciók több mint felét egy indiai call center munkatársainak is végig kellett néznie a megfelelő megbízhatóság eléréséhez.

Fontos mérföldkö volt az 1940-es években az első elektronikus számítógép megjelenése, amely jóval gyorsabban tudott sok jegyű számokat összeadni és szorozni,

sokszor mintázatfelismerésnek tekinthető feladatokat nemcsak az ember, de sok esetben a fejlettebb állatok is könnyedén megoldanak, érdemes a központi idegrendszert vizsgálni, hátha a biológiai rendszerek működési mechanizmusa gépi környezetbe is átültethető. Warren McCulloch és Walter Pitts az 1940-es években javasolt egy, az idegsejtek (neuronok) működését leíró egyszerűsített „perceptron” modellt, amely a sejtek állapotát binárisan (aktív vagy inaktív) közelíti. A következő időpillanatban a neuron (szintén bináris) állapotát a bejövő jelek súlyozott összege határozza meg. A tanulási folyamat a súlyok beállítását jelenti, amelyhez biológiai motivációt Donald O. Hebb szolgáltatott a javasolt biológiai tanulási mechanizmussal, miszerint az idegsejtek közötti szinaptikus kapcsolat erősödik, ha ezek tipikusan egyszerre aktívak.

Mivel az ilyen jellegű, sokszor mintázatfelismerésnek tekinthető feladatokat nemcsak az ember, de sok esetben a fejlettebb állatok is könnyedén megoldanak, érdemes a központi idegrendszert vizsgálni, hátha a biológiai rendszerek működési mechanizmusa gépi környezetbe is átültethető. Warren McCulloch és Walter Pitts az 1940-es években javasolt egy, az idegsejtek (neuronok) működését leíró egyszerűsített „perceptron” modellt, amely a sejtek állapotát binárisan (aktív vagy inaktív) közelíti. A következő időpillanatban a neuron (szintén bináris) állapotát a bejövő jelek súlyozott összege határozza meg. A tanulási folyamat a súlyok beállítását jelenti, amelyhez biológiai motivációt Donald O. Hebb szolgáltatott a javasolt biológiai tanulási mechanizmussal, miszerint az idegsejtek közötti szinaptikus kapcsolat erősödik, ha ezek tipikusan egyszerre aktívak.

Az 1950-es évek végén Frank Rosenblatt egy működő három rétegű ún. előrecsatolt hálózatot épített, amelyben a következő réteg bemenetei az előző réteg kimeneteiből kerülnek ki; nincs visszacsatolás. A berendezés a 20×20-as bemeneti fotodetektorréteg révén képi jel feldolgozására volt hivatott. A kezdeti lelkesedést lehűtötte az a tény, hogy egy perceptron csak lineárisan szeparábilis bemenetet képes megkülönböztetni: amikor a bemeneti sokdimenziós térben található olyan hipersík, amely szétválasztja a 0 és 1 kimenethez tartozó pontokat. Ennek következtében a perceptron például a „kizáró vagy” logikai műveletet sem tudja reprezentálni. Ennek

a súlyos kötöttségnek a felismerése gyakorlatilag megszüntette a mesterséges neuronhálók kutatását a 70-es években – annak ellenére, hogy a perceptronokból álló *hálózatok* esetén már nincs ilyen megkötés; ezek tanítása viszont abban az időben még nem volt megoldott.

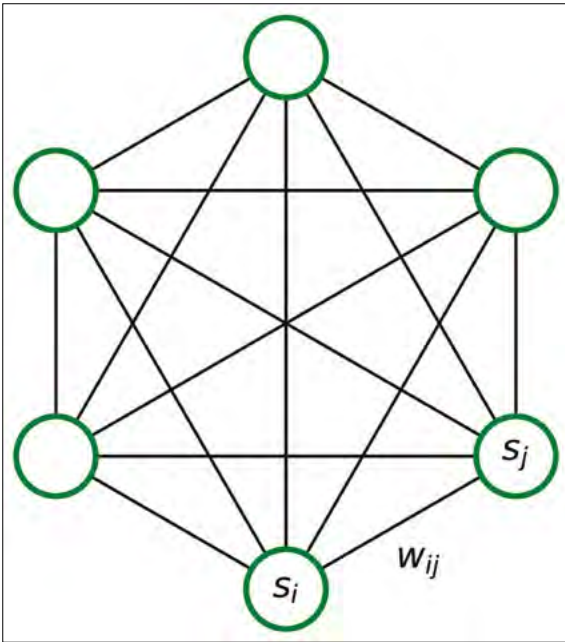
A következő jelentős előrelépés, az 1980-as években éppen John Hopfield nevéhez kötődik. Hopfield egy teljesen összekötött (teljes gráfot alkotó) hálózatot javasolt a következő dinamikával (2. ábra):

$$h_i = \sum_{j \neq i} w_{ij} s_j \quad \text{és} \quad s_i^{\text{új}} = \begin{cases} 1, & \text{ha } h_i > 0 \\ 0, & \text{ha } h_i \leq 0 \end{cases},$$

ahol az egyes neuronok állapotának frissítése független random folyamat. Ha w_{ij} , amely pozitív és negatív értékeket is felvehet, szimmetrikus, akkor az energiaként definiálható

$$E = -\frac{1}{2} \sum_{i \neq j} w_{ij} s_i s_j$$

mennyiség monoton csökken, és a rendszer egy stabil állapotba konvergál. A stabil állapotok egy-egy memóriaképnek tekinthetők, így a rendszer egy tartalomcímzett memóriát modellez: egy, a memóriaképhez közel álló kiindulópontból konvergál ahhoz. A modell szoros kapcsolatban áll a mágneses rendszerekkel, mint például a spinűvekkel; így például a memória kapacitása is analitikusan számolható a spinűvek elméletének felhasználásával.



2. ábra. Hopfield-háló. A zöld neuronok felelnek meg a memóriaegységeknek (bemenet és kimenet is)

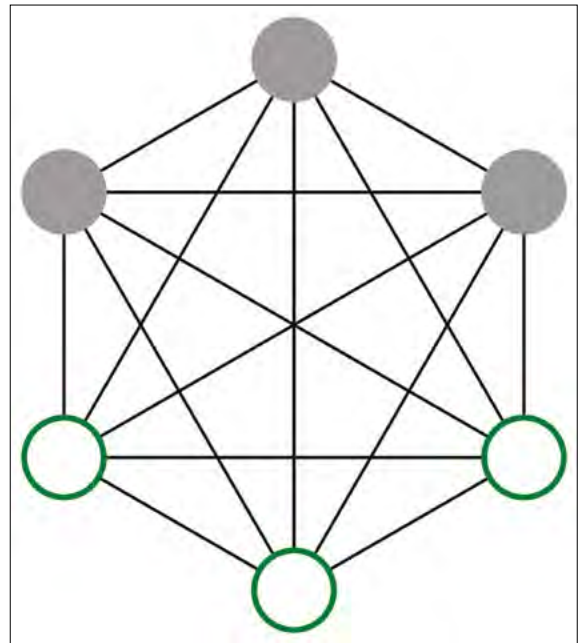
Mint ahogy hasonló statisztikus fizikai rendszerek esetében is tapasztalható, a modell kollektív viselkedése robusztus a részletek bizonyos fokú változtatására. Hopfield kiterjesztette a modellt folytonos értékű állapotokra, késleltetett, időben folytonos dinamikával, amelyben

a Heaviside-függvény szerepét egy folytonos nem lineáris függvény veszi át; mindez nem változtatott a modell kollektív viselkedésén.

Hopfield modellje stimulálóan hatott a mesterséges neuronhálók további kutatására. Geoffrey Hinton és Terrence Sejnowski egy „Boltzmann-gépnek” nevezett sztochasztikus változatot javasoltak, amelyben a háló minden $\mathbf{s} = (s_1, s_2, \dots, s_N)$ állapotához rendelt valószínűséget a Boltzmann-eloszlás adja:

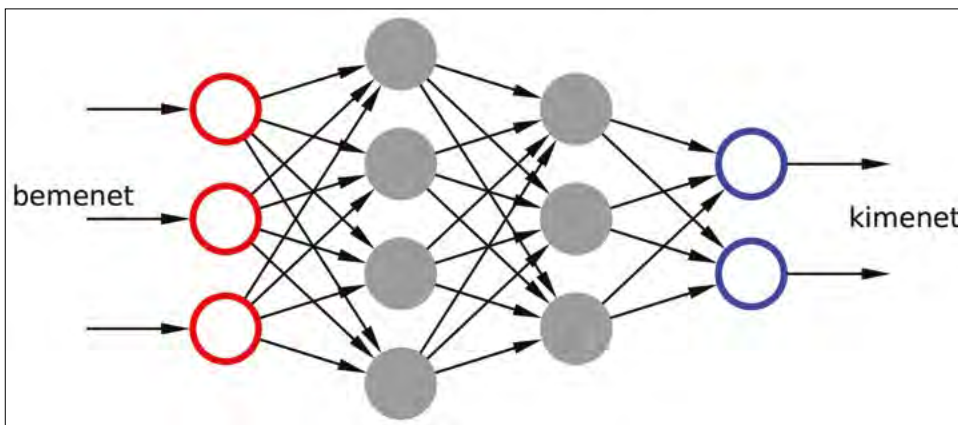
$$\mathbb{P}(\mathbf{s}) \sim e^{E/T}, \quad E = \frac{1}{2} \sum_{i \neq j} w_{ij} s_i s_j - \sum_i \theta_i s_i,$$

ahol T egy hőmérséklet-jellegű parameter, θ_i pedig egy lokális térnek felel meg. A w_{ij} csatolási, valamint a θ_i lokálistér-paraméterek nehézkesen ugyan, de beállíthatók („taníthatók”) arra, hogy a rendszer valószínűség-eloszlása minél közelebb legyen egy tanító halmazéhoz. A memóriakapacitást úgy növelték, hogy rejtett neuronokat adtak a rendszerhez: ezek hozzájárulnak az energiához, de figyelmen kívül hagyandók a megtanulandó minták azonosításában. Ez volt az egyik első olyan neuronháló, amely ún. rejtett vagy belső reprezentációt tudott tanítani olyan neuronok felhasználásával, amelyek sem a bemenetben, sem a kimenetben nem vettek részt (3. ábra).



3. ábra. Boltzmann-gép. A zöld neuronok felelnek meg az írható és olvasható memóriaegységeknek, a szürke neuronok rejtettek: a belső reprezentációért felelősek

A visszacsatolásokat is tartalmazó, sűrűgráf-struktúrájú hálók, mint a Hopfield-háló és a Boltzmann-gép, az asszociatív memóriát modellezzik. A praktikus felhasználások szempontjából ezeknél jóval lényegesebbek azok a előrecsatolt (angolul feed-forward) mesterséges neuronhálók, amelyek csupán egyirányú csatolásokat tartalmaznak, mint a már említett Rosenblatt-féle három rétegű perceptron. Ezen hálók egy függvényt valószínűsítanak



4. ábra. Előrecsatolt neuronháló. Piros a bemeneti, a kék a kimeneti, a szürke pedig a belső reprezentációért felelős rejtett neuronokat jelöli. A kapcsolatok egyirányúak, az információ terjedésében nincs visszacsatolás

meg: a bemeneti rétegbe vezetett értékek meghatározzák a kimeneti réteg eredményeit. Ez az architektúra (lásd 4. ábra) alkalmas a felügyelt gépi tanulás megvalósítására, amelyben a rendszer egy bemenet-kimenet párokból álló tanító halmaz alapján keresi azt a függvényt, amely a legkisebb hibával számolja ki a kimeneti értékeket. A cél nem is a tanító halmaz kimeneti értékeinek minél pontosabb rekonstrukciója, hanem az, hogy a tanító halmazban nem szereplő bemeneti értékekre is a megfelelő kimenetet számolja. Például egy arcfelismerő rendszerben a fénykép pixeleinek fényintenzitása adja a rengeteg bemeneti elemet, kimenetként pedig annyi neuront alkalmazunk, ahány embert szeretnénk felismerni; a legerősebben tüzelő neuron választja ki a választ. Ez gyakorlatilag egy nagyon sok dimenziós térben értelmezett, vektorértékű függvény illesztését (regresszióját) jelenti.

A tanítás („függvényillesztés”) azt jelenti, hogy azt a hibafüggvényt (angolul loss) minimalizáljuk a háló paramétereinek optimális beállításával, amely a tanító halmaz (x_n, y_n) bemenet-kimenet párojaira összegzi a háló által generált $f_w(x_n)$ eredmény és az elvárt y_n kimeneti érték közötti távolságot:

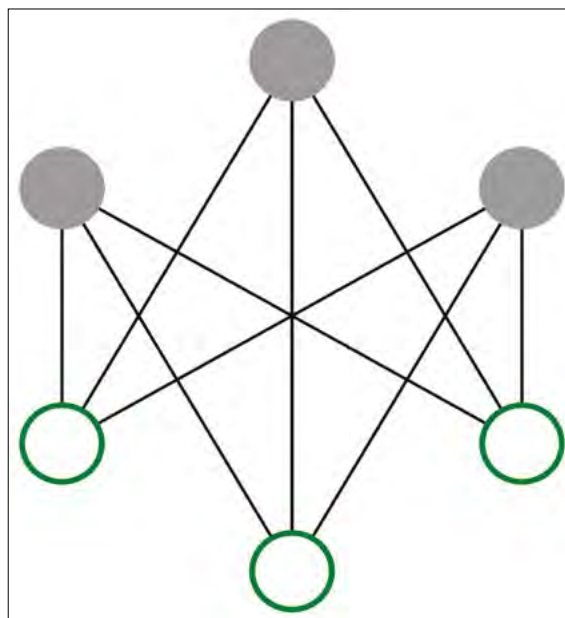
$$L(\mathbf{w}) = \sum_{(x_n, y_n) \in \text{tanító halmaz}} d(f_w(x_n), y_n),$$

ahol $d(\cdot, \cdot)$ a feladathoz legalkalmasabb távolságfüggvény, a $\mathbf{w}$ vektor pedig a háló paramétereit jelöli; ezek száma a jelenlegi legnagyobb modelleknél a 10^{12} -t meghaladhatja.

A hibafüggvény minimalizálása a paraméterek sokdimenziós terében nem könnyű feladat. Egy lehetséges megközelítés a „hegymászó” (angolul gradient descent) algoritmus valamilyen változata, amelyben az L függvény $\mathbf{w}$ szerinti deriváltja (gradiense) alapján választjuk ki a leggyorsabb csökkenés irányát, és teszünk egy kis lépést. A lépésközt, a „learning rate”-et heurisztikusan állítjuk be. Ilyen lépések egymásutánja egy lokális minimumhoz vezet el. A differenciálhatósághoz természetesen az f függvénynek folytonosnak kell lennie, így diszkrét jellegű problémák esetén is folytonos értékkel kell közelíteni a megoldást. A megoldáshoz szükséges

az L függvény $\mathbf{w}$ szerinti gradiensenek pontos, lehetőség szerint analitikus kiszámolása, ami nem triviális feladat.

Ebben az irányban jelentős előrelépés történt az 1980-as évek közepén, amikor David Rumelhardt, Hinton és Ronald Williams megmutatta, hogy hogyan lehet egy többrétegű előrecsatolt neuronhálót tanítani. Az L függvény gradiense a *backpropagation*-nak nevezett módszerrel számolták ki, amely a láncszabály következetes alkalmazása a sokszorosan összetett f_w függvény esetére. A backpropagationhoz hasonló módszereket mások is használtak korábban, viszont Hintonékhoz köthető az az áttörés, amely a többrétegű előrecsatolt neuronhálók tanítását tette lehetővé. A többrétegű, vagyis rejtett réteget is tartalmazó (tehát belső reprezentációt alkotó) neuronhálókról így demonstrálták, hogy az egyszerű perceptronnal ellentétben lineárisan nem szeparábilis problémákat is meg tudnak oldani.



5. ábra. Korlátozott Boltzmann-gép. Csak a különböző típusú neuronok között (tehát a zöld bemeneti-kimeneti memóriaegységek, és a szürke rejtett neuronok között) van csatlás

Ez megnyitotta az utat olyan mesterséges neuronhálók kidolgozása felé, amelyek hamarosan már hasznos feladatokat végeztek el. Yann LeCun nevéhez fűződik a konvolúciós neuronhálók (angol rövidítése CNN) megalakítása; itt az a kulcsgondolat, hogy olyan térben struktúrált bemenetet, mint például egy kép pixeleit, eltolásinvariáns módon érdemes feldolgozni. Ez nemcsak nagyban csökkenti a tanítandó paraméterek számát, és ezáltal gyorsítja a tanítás folyamatát, hanem robusztusabbá is teszi a feldolgozást. Yoshua Bengio a konvolúciós neuronhálókat összekapcsolta sztochasztikus rendszerekkel (mint például rejtett Markov-modellekkel). Ez lehetővé tette, hogy az 1990-es években amerikai bankok automatizálva olvassák a csekkekre írt kézírásos számokat. Ezekért, valamint a későbbiekben elért további eredményekért kapta Hinton, LeCun és Bengio a 2018-as (sokak által informatikai Nobel-díjnak tartott) Turing-díjat.

A gyakorlatban is elért sikerek ellenére a fejlődés a 90-es évek végére újra megtorpant, ugyanis a backpropagation exponenciálisan lassúnak bizonyult az összetettebb problémák megoldásához szükséges, az eddigi néhánynál jóval több belső réteget tartalmazó, ún. mélyhálók tanítására. A megoldáshoz Hinton a Boltzmann-géphez nyúlt vissza, pontosabban ennek egy korlátozott változatához, amelyben csak a különböző típusú (tehát a látható és a rejtett) neuronok között engedünk meg csatolást (5. ábra). A korlátozott Boltzmann-gép tanítása az eredeti modellel ellentétben sokkal egyszerűbbnek és gyorsabbnak bizonyult. Sikertült kidolgozni egy olyan módszert, amelyben a mélyhálók rétegeit egyenként előtanítják a korlátozott Boltzmann-gép segítségével; utána az így előtanított rétegeket a backpropagation már hatékonyan továbbtanítja az adott feladatra. Ez az áttörés alapozta meg a kétezres évek közepén a hatékony mélyhálók széles körű felhasználását.

A mesterséges neuronhálók robbanásszerű fejlődését sokan egy 2012-es eseményhez kötik. Az informatikában a kutatást és az algoritmusok tökéletesítését sok esetben nyilvános versenyek katalizálják. Ilyen volt a 2010-ben induló, évente megrendezett „ImageNet challenge”, amelyben azt kellett eldönteni, hogy egyes fényképek mit ábrázolnak. A milliós nagyságrendű tanító halmaz fényképei ezer különböző kategóriába sorolt objektumot ábrázolnak, és az ez alapján betanított algoritmusok egy százezres teszhalmazon mérték össze a tudásukat. Az első két év lassú fejlődése után 2012-ben ugrásszerű előrelépés következett: Hinton és két PhD-hallgatója, Alex Krizhevsky és Ilya Sutskever egy konvolúciós mélyhálóval úgy nyerték meg a versenyt, hogy a hibarátlójuk csak közel fele volt a második helyezettének. Két évvel később már csak konvolúciós mélyhálókra alapuló algoritmusok maradtak versenyben, minden más módszer kiszorult.

A mesterséges neuronhálók napjainkra már nemcsak a tudományban (mint például az idén kémiai Nobel-díjjal méltányolt fehérjeszerkezet-előrejelzések terén), hanem a mindennapi életben is sok helyen felbukkannak. A technológia fejlődését az utóbbi másfél évtizedben alapvetően a gépi tanuláshoz szükséges adatok mennyisége (mint az ImageNet is, vagy a most már 10^{10} szóból álló korpuszok) és a Moore-törvény szerint exponenciálisan növekvő számítási kapacitás határozta meg. Mindez azonban nem következett volna be azok nélkül a statisztikai fizikai rendszerekre épülő modellek nélkül, amelyek kidolgozásában Hopfieldnek és Hintonnak meghatározó szerepe volt. A fizika azonban nemcsak forrása, hanem aktív felhasználója is a mesterséges neuronhálónak; erről többet a *Fizikai Szemle* következő számában olvashatunk.

A TUDÁSOM EGY RÉSZÉ FÖLÖSLEGES LETT, DE IMMUNITÁST SZEREZTEM A BUTASÁGOK ELLEN – INTERJÚ A SZÉCHENYI-DÍJAS DR. SZABÓ GÁBOR FIZIKUSSAL

Panek Sándor

Szegedi Tudományegyetem, kommunikációs szakértő

E-mail: panek.sandor@szte.hu



Dr. Szabó Gábor

Iskolateremtő lézerfizikai munkájáért és meghatározó tudományos együttműködések kialakításáért idén Széchenyi-díjban részesült dr. Szabó Gábor fizikus, akadémikus, a Szegedi Tudományegyetem Fizikai Intézetének egyetemi tanára. Ötvenéves kutatói múlt van mögötte, a szegedi egyetem másodéves hallgatójaként kapcsolódott be a rövid impulzusú lézerek akkor induló kutatásába, és ma annak az ELI ALPS lézeres kutatóintézetnek az ügyvezetője, amely nagymértékben a szegedi egyetem kísérleti lézerfizikai műhelyének témáin alapul.

– **A mai tudásából mennyi tűnt volna sci-finek 1978 nyarán, amikor átvette a diplomáját?**

– A fizika alapjaiban nem változott meg, az összefüggések megmaradtak; a fizika nagy elméletei nem szoktak megdőlni, mert amihez elég sok kísérleti bizonyíték van, azt nem lehet megdönteni. Lehet pontosabb elméletet mondani helyette, de eredményül csak ki kell jönnie a kísérletnek. Ha a kvantummechanika ellentmondana a kiskocsi mozgásának, akkor a kvantummechanika helytelen lenne. Vannak viszont témák, amelyek valóban lehetetlennek tündek volna, és szinte minden eredmény ilyen, ami most itt körülvesz az ELI ALPS-ban. Akkoriban sejtése sem volt még senkinek, hogyan lehet ténylegesen petawattos lézert vagy attoszekundumos impulzusokat előállítani, hogy csak a saját szűkebb szakmámat nézzem. Ha kitágítjuk a képet, még több eredmény van, ami a megvalósítás szempontjából irreálisnak tűnt akkor. Ezek között az utóbbi évek elképesztő sebességű technikai fejlődése viszi a pálmát, de visszagondolva, ha valaki 1978 nyarán az internetről kezd el nekem beszélni, akkor megkérdeztem volna tőle, mennyit ivott.

– **Gyakran mondják, hogy bizonyos időszakonként a kutatónak teljesen új tudást kell megszereznie. Ön mi-ben érzi leginkább a tudomány fejlődését?**

– Szerintem a tudomány fejlődését egy még érdekesebb jelenség jellemzi: lassan érdektelenné válnak a diszciplínák határai. Már nem az számít, hogy ki a fizikus, ki a kémikus, hanem az a kérdés, hogy a kutató a probléma megoldásához rendelkezik-e a szükséges ismeretekkel. Felértékelődött a kutató problémamegoldó-képessége. Olyan világ felé haladunk, amelyben a tárgyi ismeretek kiguglizhatók, a problémamegoldást azonban nem lehet kinézni a keresőből. A diszciplínák egymásba érése egyfajta kényszer hatására jött létre; a fő ok az, hogy a társadalmat foglalkoztató nagy kérdések maguk lettek összetettek. Kénytelenek vagyunk egymással összefüggő jelenségekként szemlélni a világot, különben nem tudjuk megoldani a problémáit! Ezt a szemléletet sokfelé próbáltam javasolni, ahol pedig volt rá befolyásom, megvalósítani is. Hadd mondjam el, büszke vagyok arra, hogy a Szegedi Tudományegyetemen az általam még rektorként elindított interdiszciplinaritásnak komoly következményei kezdenek kialakulni a kutatási programokban. Ami talán a leginkább kézzelfogható, mert szervezeti keretei is vannak, az a SZTE Interdiszciplináris Kutatásfejlesztési és Innovációs Kiválósági Központja, amely az országban egyedülálló módon gyűjti össze és támogatja az egyetem legkiválóbb kutatóit és kutatási projektjeit.

– **Hisz abban, hogy a nagy környezeti problémák tudományos projektekkel megoldhatók?**

– Mondjuk úgy, hogy ezeknek nincsen tudomány nélküli megoldása. Egyedül a tudomány képes a már említett komplex problémamegoldásra. Tekintsük azt a komplett rendszert, amit Földnek hívnak. A klímaváltozásról nem is gondolnák az emberek, hogy akár házak kezdeknek

összedőlni a hatására. Kínában már komoly problémát okoz, mert gyors terjeszkedéssel viszonylag nagy házakat építettek olyan területekre, ahol a szárazság miatt megváltoztak a talaj mechanikai tulajdonságai. Az ördög sem gondolta volna húsz évvel ezelőtt, hogy a klímaváltozás miatt megreped a falunk.

Hogyan lehet megkeresni az emberiség helyét ebben a rendszerben úgy, hogy a legkevesebb kárt okozza? Ez borzasztó összetett kérdés, nincs egyszerű megoldása; csakis több diszciplína együttes tudásával lehet megközelíteni. Nem mondhatom azt, hogy fizikus vagyok, tehát nem értek a beton szilárdságához. Egyszerre kell ismerni az építőanyagokat, és tudni, milyen hatások érvényesülnek a légkörben; miért nincs eső, vagy miért volt idén viszonylag csapadékos telünk. A fizika oktatása jó lehetőségeket ad arra, hogy konkrét példákkal érzékeltesük, hogy miről is van szó. Én például, amikor az ártatlannak tűnő Coriolis-erőről beszélek a mechanikakurzusban, ezt mindig összekötöm azzal, hogy a Coriolis-erő mit tesz a légkörrel!

Először is az Ekman-transzportnak nevezett jelenség miatt az észak-dél irányú szél olyan tengeráramlást indít be, amely a felszín alatt kelet-nyugat irányba fordul, ezzel megváltoztatja az óceán hőmérséklet eloszlását. Azt még csak értenénk, hogy ennek hatása van Dél-Amerika időjárására, és a táplálékláncon keresztül a tenger élővilágára. Az sem igazán meglepő, hogy egy erős El Niño-év például Peruban szárazságot és rossz halászati szezonot jelent. Az viszont már távolról sem ilyen magától értetődő, hogy ennek mi köze ahhoz, hogy milyen lesz a tél Észak-Európában. Pedig van; a troposzférikus és sztratoszférikus áramlási rendszereken keresztül létrejön a nagyon is érzékelhető hatás. A dolog persze nem egyszerű. Hogy pontosan mi a következmény, attól is függ, hogy a tél elejéről vagy a végéről beszélünk. Paradox módon javul a kiszámíthatóság, például az erős El Niño és La Niña-években a télre vonatkozó hosszú távú prognózisok megbízhatóbbá válnak.

Azt hiszem, ebből a példából is világos, hogy globális kihívásokkal csak akkor tudunk valamit kezdeni, ha képesek vagyunk azon túllépni, hogy első ránézésre az okoktól távolinak tűnnek a hatások. A meglevő tudást újra kell rendezni és új perspektívából közelítve megpróbálni megragadni a probléma lényegét. Ugyanakkor azt a hibát sem szabad elkövetni, hogy egy komplex rendszerben egyszerre mindent vizsgálni kezdünk. Ismernünk kell a kérdések hierarchiáját, különben egyfolytában körbe-körbe járunk.

– **A társadalmat hogyan győzné meg, arról, hogy bízzák a tudományra a megoldást?**

– Manapság a tudományos kutatáshoz pénz kell, a kutatók pedig nem mondhatják az adófizetőknek, hogy adjátok ide a pénzt, és ne törődjete azzal, hogy mit teszünk vele, mert mi nagyon okosak vagyunk. Igen, alap, hogy a kutató okos, de azt nem lehet mondani, hogy akkor aztán senki ne törődjön azzal, hogy mit csinálunk. Az elszámo-

lásnak két módja van. Lehet olyan alapkutatót csinálni, amelynek fő célja a tudomány gyarapítása, de akkor azt világszínvonalon kell tenni. A másik mód az, ha olyan gyakorlati problémákat oldunk meg, amelyek fontosak az emberiség számára.

– Önnek mint kutatónak mi a véleménye a társadalmi szerepvállalásról? Milyen legyen ez a társadalmi szerepvállalás akkor, ha a társadalom nem igyekszik a tudomány nagyon meggyarapodott eredményeit megismerni?

– Ez nehéz kérdés, egy kicsit túl is lép a tudomány határain; itt megjelenik a kutató személyisége is. Itt már az a kérdés, hogy szakember-e vagy értelmiségi. Azt szoktam ezzel kapcsolatban mondani, hogy eléggé hálátlan sors értelmiséginek lenni. Számomra ugyanis az értelmiségi az, aki felelősséget érez a környezete és a társadalom iránt, még akkor is, ha ezt nem kérte tőle a társadalom. Ezt a szerepet nem lehet abbahagyni, még akkor sem, ha a társadalom adott esetben furcsa dolgokat csinál. Ha minden értelmiségi azt mondaná, hogy feladom, mert a társadalom nem érdemli meg, annak hamar látszanának a következményei. A társadalom még úgy is hajlamos saját érdekeivel ellentétes irányba fordulni, hogy néhány értelmiségi azért a maga helyén ésszerűen próbál érvelni.

– Akkor is értelmiséginek érezte magát, amikor a nyolcvanas években, ahogy egy előadásában mondta, egy bádogos felszerelésével dolgozva készített nitrogénlézert?

– Könnyű a helyzetem, mert egy olyan családból jöttem, ahol ezt láttam magam körül. Szüleim példája (orvos édesapám tipikus értelmiségi volt) alapján nekem ez a minta annyira kézenfekvő volt, hogy nem gondolkoztam sokat rajta. Fizikusként úgy végeztem el azt a bádogosmunkát, hogy evidens volt, értelmiségi akarok lenni, és ezt azon keresztül tudom megvalósítani, hogy jó fizikus vagyok. Úgy gondoltam, az ember hasznára kell, hogy legyen a környezetének. Ha mással nem, azzal, hogy jó a szakmájában.

– Mit gondol, a tudományos ismeretek mennyisége eljuthat-e olyan pontra, amikor a tudományt széles körben már nem lehet követni?

– A tudományos ismeretek halmozódását az utóbbi időben különösen azért nehéz követni, mert elképesztő mennyiségű számárság szennyezi az értékes tudást. A közösségi média iparszerűen gyártja ezeket, és a válogatással nehéz megbirkózni. Ami engem illet, szerencsés vagyok, mert a szociális média nélkül szereztem tájékozódóképességet az ismeretek között; jó valószínűséggel tudom kiszűrni, ami butaság. A fiatalok azonban védtelenek. Tegyük hozzá, én megfizettem az árát, mert közben a tudásom egy része teljesen fölöslegessé vált. Hogy ezt egy példával szemléltessem, a tudományba az volt a belépő, hogy a kutató ismerje egy szakterület irodalmát. Óriási erőfeszítéssel olvastunk mindent; utá-

najártunk, mert nem lehetett kiguglizni. Milyen is volt akkor a tudás? Mondjuk, beszélgettünk a csapattal egy nitrogénlézeres problémáról, és akkor valaki feldobta, „emlékszem, hogy három évvel ezelőtt olvastam Bruno Godard egy cikkét – amiben különben egy hiba is volt –, ami erről szólt”. Akkor aztán valaki elment a könyvtárba, és megkereste a cikket, ami szerencsés esetben meg is volt Szegeden. Az irodalom ismerete akkor értékes tudás volt, ma pedig már önmagában nem sokat ér, hiszen egy cikk megtalálásához fel sem kell állni a számítógép előtt. Az viszont rendkívül fontos számomra, ami megmaradt belőle. Beülök a Google elé, és egy témából kidob húszt cikket, de ezek közül mindjárt látom, melyik a zagyaság. Ez az immunitás borzasztó fontos, és nem tudom, hogyan tud kialakulni ma a fiatalokban, mert a szakirodalom elmélyült olvasásának mennyiségét lecsökkentette a könnyű keresés.

– A kutató egyre több adattal dolgozik. Mit gondol, ez a világ még mindig befogható racionálisan?

– Jól meg kell nézni, pontosan mit is jelent ez a nagy adatmennyiség. Nem akarok túlságosan beletévedni a mesterséges intelligencia világába, de én külön problémának látom, hogy az adatokból mindenféle kritika nélkül további adatokat gyártunk. Ez időnként egyszerűen csak tovább növeli az adathalmazt, amely finoman szólva minimum egy szénaboglya, de istállómaradéknak is nevezhetném. Az igazán érdekes kérdés az, hogy a dupla exponenciális sebességgel növekedő adathalmaz oda vezet-e, hogy a mesterséges intelligencia úrrá lesz rajtunk, és 10–15 év múlva már emberi ésszel nem is tudjuk áttekinteni magunk körül a világot. A folyamatnak ugyanis nagyon könnyen lehet ilyen eredménye is. Remélem persze, hogy a mesterséges intelligencia hasznos eszközzé válik, sőt a metaadat, vagyis az adatról szóló adat is hasznos lesz. Optimista jóslat, de lehet, hogy a mesterséges intelligencia egy első szintű feldolgozást végez majd, és ezután a kutató az adat feldolgozott részében tudja majd vizsgálni, hogy mi is rejlik ott.

– Ahol nincs adat, ott nincs tudomány. Ezt ön jelentette ki egy innovációs eseményen, bizonyos morajt okozva a hátsó sorokban. Tartja még?

– Bár az Edwards Demingtől származó bonmot „In God we trust. All others must bring data.” eredetileg a gazdaságra vonatkozott, a fizikára szerintem még inkább érvényes. Üssük fel a görögöknél *A fizika kultúrtörténetét*, Simonyi Károly remek könyvét! A görög tudományban logikailag már szinte minden eszköz megvolt a megismeréshez. Egyik kedvencem, Arkhimédész gondolatmeneitben az összes részlet a helyén van. Csak hát, éppen az adatoknak nem volt meg a kellő tisztelete. A görögök abban látták a tudomány szépségét, hogy gondolkodunk, míg a méréssel csak bepiszkítjuk a kezünket. Legalábbis erősen változó volt a tekintélye annak, amit a tapasztalat alapján fogalmaztak meg. Newton mondta ki először, hogy mérések nélkül nem írható le egy jelenség. Addigra

a tudományba beépült az emberi gondolkodás; a logika remek eszköznek bizonyult, de alapvető fontosságú volt annak a felismerése, hogy kiindulni mégiscsak a vizsgált rendszerekről szerzett adatokból lehet. Itt került igazán a helyére a nyugati típusú megismerés, és ilyen értelemben kitarokt amellet, hogy adat nélkül nincs tudomány.

– Egy egyetemi beszélgetésen szó szerint azt nehezményezte, hogy elsős hallgatói közül sokan nem tudják kimondani, ha nem értenek egy jelenséget. Mit is ért értes alatt?

– Kezdjük onnan, hogy az ember gyerekkorában utánnoza tanu! Az iskolában a tanítás jó része azon alapzik, hogy a gyerek utánozza a tanítóját – hozzáteszem, baj volna, ha nem így lenne. Legalábbis az én időmben akaratlanul utánoztuk még a tanár hangsúlyozását is. Valahol tizenegynéhány éves kortól kezdi saját rendszerbe rakni az ismereteket az ember; például arányosságokat vesz észre, és átgondolja a problémát, hogy a torony magasságát meg lehet becsülni egy háromszög alapján. Ekkor egyszer csak elkezd kérdezni: de miért? Szerencsés esetben a középiskolában a diák a matematika tanulással eljut oda, hogy igényli, sőt szellemi élménynek tartja a bizonyítást. Én a matematika és főleg a matematikai gondolkodásmód tanítását azért tartom fontosnak, hogy eszközünk legyen a bizonyításhoz. Emlékszem, 15–16 éves koromban mekkora élmény volt, amikor megértetem a teljes indukció bizonyításának a logikáját.

Megérteni csodálatos élmény! Ha ez megtörténik, azt is felismerhetjük, ha még nem értünk egy jelenséget, és nem tudunk pontos magyarázatot adni rá. Tudom, hogy idő hiányában a fizikatanár nem vezethet le mindent, időnként azt kell mondania a diákoknak, hogy higgyék el, a bizonyítás levezethető. A nagy dilemma az, hogy meddig lehet eljutni egy osztállyal az absztrakt gondolkodás irányában. Tudomásul kell vennünk, hogy a nagy elvontságú gondolkodásra nem mindenki képes. Ez nem jelent értékminősítést, csak annyit mondok, hogy az absztrakt gondolkodás különleges emberi képesség. Ennek hiányában kudarcra ítélt kísérlet megérteni azokat az elvont gondolatmeneteket, amelyekre a modern fizika épül. A probléma lényegét az általam igen nagyra tartott Károlyházi Frigyeszt idézve tudnám megvilágítani: „a tudományos gondolkodás végérvényesen kinőtte az idegrendszer ösztönös tudását”. Ha mégis megpróbálja az oktatási rendszer, az a kornak azon az eltúlzott önbizalmán alapul, hogy ma már okosabbak vagyunk, mint régebben – pedig dehogy vagyunk.

Akkor mi a megoldás? Ha a diáknak van megértés-élménye – amit azonban csak az érdekesen bemutatott, egyszerű jelenségek körében szerezhet meg – akkor elfogadja azt is, hogy a középiskolában elérhetetlenül mély alapokra csak utalás történik. Ehhez azonban az is szükséges, hogy a tanár szakmailag hiteles legyen, hogy a tanuló elhiggye, hogy azért lép át valamin, mert így tartja célszerűnek, és nem azért mert fogalma sincs róla.

– Egy másik nyilvános beszélgetésen azt kifogásolta, hogy az oktatásban keveset hagyatkoznak a számítógépes modellezésre. Idézem: „gyakran olyan a fizika-oktatás, mintha nem találták volna fel a számítógépet”. Milyen viszonyban van ez a jelenségek értésével?

– Ezzel már elérkeztünk az egyetemi oktatáshoz. Itt, ha jól használjuk a számítógépes modellezést, el lehet érni, hogy gondolkodásunk a jelenség lényegi kérdésére összpontosítson. Annak idején Kalmár László professzor analíziselőadására is bejártam a szegedi egyetemen. Amúgy nekünk nem ő tanította az analízist, mégis bejártam hozzá. Elég idős volt már, és meglehetősen csapongott, de mivel igen művelt ember volt, éppen ez a csapongás tette érdekessé a kurzusát. Az ő mondása volt, hogy deriválni egy lovat is meg lehet tanítani. Én is fölöslegesnek tartom, hogy egy fizikushallgatónak a többszörösen összetett függvény deriválása papíron elvégzett feladata legyen, hiszen itt pusztán az a kérdés, hogy eléggé figyel-e az ember. A gép minden további nélkül elvégzi ma már szimbolikusan is, ez tehát nem különösebben értékes tudás. Az már sokkal értékesebb, hogy mire is használjuk ezt a műveletet. A szimulációs programok írása fegyelmzett gondolkodásra is szoktat, ott nincs olyan parancssor, ahová azt lehetne beírni, hogy hát, izé. Én legalábbis úgy éltem meg fiatalon, hogy a kódíráshoz nagyon világos értes kell. Fiatal kutatóként az 1980-as években az egyik fő témám a lézerek működését leíró egyenletek megoldása volt. A számítógép kapacitása korlátozott minket, ezért programozás közben egyfolytában azon trükköztünk, hogy a numerikus probléma megoldása során hogyan lehet fizikai megfontolásokkal a szűk keresztmetszeteket megkerülni. Engem végig arra tanított a számítógépek használata, hogy a fizikára figyeljek, ugyanis azzal tudunk időről időre előnyt szerezni, hogy a fizikai alapokat megőrizve optimalizáltuk a program futását.

– Érdekel, az 1980-as években milyen számítógépet használt.

– Nagy élményem volt, amikor 1980-ban egy Commodore PET 4008-as került hozzánk; emlékszem, 8 kilobyte memóriája volt. Egy-egy programom egy napot futott ezen a gépen. Hamar kénytelen voltam rájönni, hogy Szegeden nincs nap kis áramszünetek nélkül, úgyhogy tenni kellett valamit. Volt az intézetben egy egyenáramú hálózat, ami akkumulátortelepről ment, arra csináltattam a műhelyben egy konvertert, és innentől az én gépemnek az egyenáramú hálózatról állítottuk elő a 220-at. Akkor már egy hétig futtatott egy programom. Az 1980-as években rendszerint éppen mindig kinőttük a gépet, ami rendelkezésre állt. Amikor hozzájutottunk egy jobb géphez, és eggyel jobb megoldást kaptunk, még egy cikket tudtunk írni. Eközben azért voltak önellenőrző futtatások igazi nagy gépeken is. A göttingeni tartózkodásaim egyik nagy élménye volt, hogy ellenőrizhettem egy programcsomagot, amit a lézerelektrodák közötti elektromos tér homogenitásának kiszámolására írtam. Manapság ezt egy ügyesebb hallgató egy-két hét alatt

meg tudja csinálni bármelyik végelem-projektben. Én magát a végelem-módszert is megírtam magamnak, és ezt le tudtam ellenőrizni egy igazi nagy gépen Németországban. Megjegyzem, mindenféle papírokat kellett írni ahhoz, hogy a vasfüggönyön túlról jövő kutatóként leülhessek az IBM 3090-es szuperszámítógép konzolja elé. Az engedély explicite tartalmazta, hogy nem jogosít fel a vektoregység használatára. Bár korábban azt sem tudtam mi a vektoregység, az első, amit elkezdtem megtanulni, hogy hogyan kell(ene) használni. Miután már tudtam, hogy hogyan kell dolgozni vele, kiderült, hogy nincs rá szükségem.

– **Visszatérve az eredeti kérdésre: ön szerint mi a szerepe a modellezésnek, a számítógépes szimulációnak az egyetemi fizikaoktatásban?**

– A problémát abban látom, hogy a helyzet nem sokat változott a régi szép vagy nem annyira szép időkhöz képest. Amikor én hallgató voltam, váltig küszködtünk a differenciálegyenletek kézi megoldásával; fölírtuk az egyenletet, aztán megállapítottuk, hogy valójában csak speciális körülmények között tudjuk megoldani. Azóta már szinte mindent meg tudunk oldani akár asztali számítógépekkel, tehát sokkal bátrabban lehetne az egyenletekhez nyúlni, mert azzal most már nem kell foglalkozni, hogy van-e analitikus megoldásuk. (Természetesen néhány kézenfekvő példát – pl. csillapított rezgés – az analitikus megoldásra illik bemutatni.) Ma egészen másfajta veszélyek leselkednek hallgatóinkra. Ezt talán egy példával tudnám illusztrálni. Egy ipari együttműködésünk során az ipari partner profi csapata az egyik legsebésebb körben használt végelem-módszer segítségével kiszámította, hogy egy adott geometriájú áramlási térben a gázban levő koromszemcsék milyen pályákon mozognak. Az eredmények látványosak voltak, de azért bujkált bennem a kisördög, és megkértem, hogy küldjék el a program leírásából azt a részt, ami megadja, hogy hogyan kell számolni a gáz által a szemcsére kifejtett erőt. Alaposabban megnézve a dolgot kiderült, hogy a program olyan formulát használ amely 1 mikronnál nagyobb részecskékre érvényes, miközben a mi részecskéink 100–200 nm-sek voltak. Ma a hallgatókat inkább arra kell felkészíteni, nyúljanak bátran a numerikus módszerekhez, csak számítógépek erdejé ne takarja előlük el a fizikát.

– **Az imént pótolhatatlannak nevezte a kutatói problémamegoldást. Mit gondol, a mesterséges intelligencia sem tudja majd ezt pótolni?**

– A problémamegoldásnál fontos a mintázatok felismerése; ezt kétségkívül jól csinálja a mesterséges intelligencia. Nem is jól, hanem nagyon türelmesen. Az MI szemléltetésére kedvenc példám egy általános iskolai osztálytársam, akit az osztály bohócának tartottunk. Az illető – nevezzük Horváth Jósának – udvariasan fogalmazva nem volt a legeléesebb kés a fiókban; kevésbé udvariasan irtozatosan buta volt. Képzeli most el Horváth Jósát tökéletes memóriával és végtelen türelemmel, aki

nem felejt el semmit, és bármikor képes tanulni! Első közelítésben ez a mesterséges intelligencia: egyfolytában tud tanulni, éjjel-nappal tud adatokat nézni. Már-már hajlamosak vagyunk azt képzelni, hogy gondolkodik, holott ezen a szinten még biztosan nem teszi. Itt azért álljunk meg egy pillanatra, és nézzünk magunkba: mi tényleg állandóan gondolkodunk? Nyilván nem. Saját tevékenységünk jó része sem gondolkodás, hanem rutinok végrehajtása. Mi több, ez nemcsak abban nyilvánul meg, hogy amikor járunk, nem gondoljuk végig minden lépés előtt, hogy melyik izmunkat hogy fogjuk mozgatni, hanem igaz a társadalmi érintkezésre is. A mesterséges intelligencia is remekül tud születésnap üdvözlőlevelet vagy szerelmeslevelet írni, mert ezek eléggé egyszerű mintázat alapján születnek. Amikor szerelmet vallunk, és azt hisszük, hogy igen, ez eredeti volt, gondoljunk arra, hogy azon a napon Magyarországon született még másik két-háromszáz nagyon hasonló levél. A problémamegoldás nyitja tehát másutt van – bár én magam nem tudom pontosan megmondani, hol. Egy kiváló jogász-professzor-asszonnyal beszélgettem nemrég, aki arról faggatott, hogy a mesterséges intelligencia csinálhat-e szabadalmat. Azt feleltem, ha meg tudja mondani, hogy a szabadalomban pontosan mit jelent az, hogy feltalálói mozzanat, akkor tudok majd válaszolni erre a kérdésre.

– **Térjünk át az új fizikára! A 2023. évi fizikai Nobel-díj az ön által vezetett ELI ALPS lézeres kutatóintézet fókuszához, az attoszekundumos tudományhoz kapcsolódik. Az egyik díjazott, régi munkatársuk, Anne L’Huillier francia-svéd fizikus az ELI ALPS tudománytörténeti sétányának mérföldköavatásán a terület alkalmazásainak fontosságáról beszélt. Mit gondol, melyek lesznek ezek?**

– Máris vannak fontos alkalmazásai, gondoljunk a nanotudományra: a nanorendszerekben a kis méretek miatt igen gyorsak az alapfolyamatok. Ha meg akarjuk érteni, milyen időbeli folyamatok történnek, akkor nagyjából ezt a nagyságrendet kell megcéloznunk, erre pedig az attoszekundumos fizika máris eszközöket nyújt. Hadd mondjak másik példát is, ami talán meglepő lesz. Számomra egyre több érv szól amellett, hogy az attoszekundumos fizikának az élettudományokban lehet igazán komoly alkalmazása. Szent-Györgyi Albert már az 1960-as évek elején ráértett erre, amikor megsejtette, hogy az életjelenségek alapjainak megértéséhez szükség lesz a töltésmozgások megértésére. Az elektronokhoz kötődő töltésmozgás éppen az attoszekundumos időskálán zajlik. Az attoszekundumos impulzusokhoz pontosan az a lágy röntgensugár-hullámhossztartomány tartozik, amit vízáblaknak szokás nevezni. Az elektromágneses spektrum többi hullámhosszát a víz pár nanométer alatt elnyeli, még a sejtbe sem jut be a fény, hiszen a sejt átmérőjének töredéke ez a behatolási mélység. A vízáblakban viszont a víz átengedi, de a szénvegyületek elnyelik a lágy röntgenfényt. Így válik az alkalmassá a biológiai minták tanulmányozására. Ez a vízáblak az attoszekundumos

felhasználás egyik fontos területének ígérkezik. Nálunk, az ELI ALPS-ban a MIR középínfravörös lézerrendszerrel keltett attoszekundumos fény hullámhossza már ebbe a vízablakba esik. Különben a tudomány logikája alapján az áttörés rendszerint ott következik be, ahol az ember nem gondolja. Úgyhogy az attoszekundumos tudománynak is lehet még számos olyan alkalmazása, ami-re most én nem gondolok.

– Ön kezdeményezője volt annak, hogy a Szegedi Tudományegyetemen 2020-ban megalakuljon a Nemzeti Lézeres Transzmutációs Laboratórium. Miután ön az ELI ALPS ügyvezetője lett, Osvay Károly vitte tovább a projektet, és azóta igazolták, hogy nem túl nagy lézerekkel is kelthető stabil neutronforrás. A projekt ma annyira ígéretes, hogy a 2018-as fizikai Nobel-díjas Gérard Mourou, a lézeres transzmutáció egyik ötletgazdája az SZTE-hez csatlakozott kutatóprofesszornak. Ez kezdetben nem tűnt kétséges sikerű projektnek?

– Toshiki Tajimától és Gérard Mourou-tól származott az ötlet, hogy lézerrel elegendően nagy számú neutron generálható, és ezt transzmutációra lehetne használni. Toshiki Tajima a doktoranduszaival foglalkozott is a témával, egy poszt doktora pedig akkor már körülbelül két éve dolgozott rajta Irvine-ban. Egyszóval látszott, hogy a lézeres neutronkeltés mögött van szimuláció, ami ígéretes eredményeket mutat. Amikor a döntés megszületett, hogy Magyarország beszáll a kutatásba, már workshopok szóltak róla. Franciaországban például, ahol mi is ott voltunk, viszonylag sokan, 30–40 ember vett részt a szakma különböző területeiről. Ilyen értelemben ez nem egy teljesen frissen felvetődő téma volt, bár a kísérleti munkák még nem kezdődtek el. Ehhez kellett a kormánydöntés, amit Palkovics László miniszterként kezdeményezett. Akkoriban már világos volt, hogy Magyarország a nukleáris technológiára szavazott, így helyénvaló volt, hogy a transzmutációhoz illeszthető kutatást indítsunk. A témának nagy tekintélyt adott, hogy egy Nobel-díjas és egy másik, majdnem Nobel-díjas fizikus volt az ötletgazda.

Amikorra világossá vált, hogy lesz támogatás egy kísérleti programra, már nem az volt a kérdés, hogy lézerrel lehet-e neutron generálni. A 2010-es évek környékén már születtek eredmények, amiből lehetett látni, hogy ha erős lézerrel jól beledurrantanak egy céltárgyba, akkor abból neutronok jönnek ki – néha nem is kevés. Csak hogy ezek a kísérletek olyan lézerekkel folytak, amelyek nyilvánvalóan nem alkalmasak arra, hogy forrásként működjenek. A kérdés az volt, hogy a neutronkeltés megye-

kisebb lézerekkel is. Lehet-e elfogadható hatásfokkal neutronnyalábot keltetni? Ilyen eredmény azelőtt nem volt. Ez volt az egyik első döntési pont a projektben. Kijöhetett volna az is, hogy nem működik jó hatásfokkal a rendszer, és nem érdemes továbbmenni. A szegedi ELI-ben – talán egyedül a világon – működött olyan lézerrendszer, amellyel ezt ki lehetett próbálni. Ma már látjuk, hogy elegendően nagy számú neutron tudunk keltetni. Gérard Mourou továbbra is promóveálja és támogatja a projektet, valamint a kutatásban is aktív. Fontos szerepe van a különböző nemzetközi együttműködésekben is: ő hozta létre a kapcsolatot az ELI ALPS és a Szegedi Tudományegyetem, valamint a genfi Transmutex nukleáris mérnöki cég között. A munka érdemi részét Osvay Károly kutatócsoportja végezte, az ő eltökéltsége és motiváltsága elengedhetetlen volt ahhoz, hogy a projekt bizakodva várja a továbblépést.

– Mit gondol, ha van új fizika, lesz új nyelve is? Nyelvújítás is szükséges, hogy a modern fizikáról magyarul lehessen beszélni és publikálni?

– Ha a modern fizikát magyar nyelven tanítani akarjuk, akkor szükség van arra, hogy az új szakkifejezések megjelenjen a magyar neve. Kérdés persze, hogy milyen mértékben kívánunk együtt élni azzal, hogy nem fordítjuk le őket. Elég sok olyan kifejezés van, aminek vagy nincs pontos magyar megfelelője, vagy nagyon szerencsétlen fordításuk van. Hadd hozzam példának a csörpölt impulzuserősítést, vagyis azt a technikát, amellyel egy rövid lézerimpulzust megnyújtunk, majd erősítés után összenyomunk. Angolul chirped pulse amplification a neve, de a chirpnek angolul sincs túl sok értelme, egyszerű hangutánzó szó, ciripelést, csiripelést jelent. A szót a radarok kapcsán használták először 1951-ben; a Bell Telephone Laboratories egy belső memójában így szólt az említése: „not with a bang but a chirp”, vagyis „nem nagy durranás, csak kis ciripelés”. Ez eredetileg T. S. Eliot „The Hollow Men” (Az üresek) című versének egy sorából való, amelyik így hangzik: „Not with a bang but a whimper”. Így már van értelme, de a magyarban egy kicsit azért gyökörtelen a szó; le lehetne fordítani ciripelésnek, bár a jelenség neve akkor sem lenne szerencsésebb, ha „ciripelt impulzuserősítésnek” használnánk. Én legalábbis nem kísérleteznék vele a szaksajtóban. A szabályokkal kikényszerített, erőszakos magyarosításnak nem vagyok híve, de magamra nézve is elfogadom, hogy a tudomány művelőinek igenis komoly felelőssége van abban, hogy a magyar szaknyelv folyamatosan fejlődjön, mert enélkül maga a nyelv sem maradhat fenn.



ELI ALPS, Szeged

A FIZIKAI SZEMLE LXXIV. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<i>Ajtai Tibor, Bozóki Zoltán, Csete Mária, Erdélyi Miklós, Földi Péter, Füle Miklós, Geretovszky Zsolt, Hopp Béla, Osvay Károly, Tóth Zsolt, Szabó Gábor:</i> Lézeres kutatások a Szegedi Tudományegyetem Fizikai Intézetében.	295	<i>Gabányi Krisztina:</i> Az aktív galaxismagok	242
<i>Angeli István, Csige István, Fenyvesi András, Kereszturi Ákos, Kiss Árpád Zoltán, Molnár József, Rácz Richárd, Szarka Máté, Zilizi Gyula:</i> Úrkutatással kapcsolatos tevékenységek az ATOMKI-ban	196	<i>Gyürky György, Kiss Gábor Gyula:</i> A csillagok magfizikája (nem csak) az ATOMKI gyorsítói mellől	190
<i>Asbóth János:</i> Kvantumtechnológia: a második kvantumos forradalom gyümölcse	109	<i>Hegedűs Máté, Kis Viktória, Kovács Zsolt:</i> A fogzománc szerkezeti és mechanikai tulajdonságai	56
<i>Bacsárdi László, Kis Zsolt:</i> Hazai eredmények a kvantumhálózatok fejlesztésében.	124	<i>Homonnay Zoltán:</i> Lehet egy térbeli dimenzióval több?	348
<i>Bakos József:</i> Visszaemlékezések Krausz Ferenc Nobel-díjával kapcsolatban.	2	<i>Horváth Dezső:</i> Mi az antianyag és hova tűnt?	369
<i>Bali Enikő:</i> Az ásványtársulások és fluidumzárványok szerepe a geotermális kutatásokban	39	<i>Horváth Gábor, Hegedűs Dénes Zsolt, Slíz-Balogh Judit:</i> A súlylökés és a kalapácsvetés világcsúcsrangsorainak változása, ha figyelembe vennék a Föld forgását és az atléták magasságát	329
<i>Barócsi Attila, Bokor Nándor, Bordács Sándor, Erdei Gábor, Gádoros Patrik, Holló Csaba, Koppa Pál, Kornis János, Lenk Sándor, Maák Pál, Papp Zsolt, Sarkadi Tamás, Simon Ferenc:</i> Lézeres kutatások a BME TTK Fizikai Intézetében.	312	<i>Jaloveczki Gábor, Jaloveczki József, Tallér Árpád:</i> Egy kevéssé ismert biliárdjáték, a műlökés	344
<i>Battistig Gábor:</i> Az ionsugaras adalékolás és analitika alkalmazása a félvezetőtechnológiában, avagy, Gyulai József munkásságának hatása a KFKI-ban és utódintéze- teiben	88	<i>Jegenyész Nikolett, Tamási János, Gali Ádám, Szipőcs Gergely, Kolonics Attila, Szipőcs Róbert:</i> Új generációs kvantum- mikroszkóp fejlesztése egy magyar-német EUREKA- együttműködésben	412
<i>Bíró László Péter, Pécz Béla:</i> Gyulai József öröksége a funkcionális anyagok tudományában	73	<i>Kertész Zsófia, Haszpra László, Molnár Mihály:</i> Fókuszban a levegőminőség	205
<i>Bíró László Péter, Tapasztó Levente, Nemes-Incze Péter:</i> Pásztázószondás módszerek az MFA-ban	74	<i>Kincses Dániel:</i> Az erős kölcsönhatás vizsgálata mini ös- robbanásokon keresztül a CERN-ben.	366
<i>Czitrovsky Aladár, Veres Miklós, Nagy Attila Tibor:</i> Lézer- fejlesztések és alkalmazások a KFKI-ban és annak utód- intézeteiben	318	<i>Kiss Csaba:</i> A Naprendszer infravörös fényben.	219
<i>Csik Attila, Hunyadi Mátyás, Vad Kálmán:</i> A mikro- és na- novilág megismerése anyagvizsgálati módszerekkel .	208	<i>Kiss L. László:</i> Keressük a Föld égi mását!	226
<i>Dálya Gergely:</i> Gravitációs hullámok több frekvencián	266	<i>Kovács András:</i> Mágnesek meteoritokban.	45
<i>Dombi Péter:</i> Fókuszban a hazai lézeres kutatások – Be- vezetés	294	<i>Krasznahorkay Attila:</i> Új részecske kísérleti kimutatása az ATOMKI-ban	193
<i>Dombi Péter:</i> Krausz Ferenc – magyar Nobel-díj az extrém nemlineáris optikáért	16	<i>Krizsán Gergő, Turnár Szabolcs, Polónyi Gyula, Almási Gábor, Tóth György:</i> Nagy energiájú terahertzes kutató- sok a Pécsi Tudományegyetemen.	306
<i>Dombi Péter:</i> Krausz Ferenc Nobel-díja és a kapcsolódó ha- zai kutatások.	1	<i>Kun Emma:</i> Neutrínó csillagá szat.	255
<i>Dombi Péter, Kroó Norbert, Szipőcs Róbert, Veres Miklós:</i> Femtoszekundumos lézeral alkalmazások a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban	302	<i>Kunné Sohler Dorottya:</i> Az ATOMKI jelene és jövője a modern kísérleti mag szerkezeti kutatásokban	187
<i>Dombrádi Zsolt:</i> 70 éves a HUN-REN Atommagkutató Intézet – Bevezetés.	181	<i>Lábár János, Pécz Béla:</i> Transzmissziós elektronmikrosz- kópia az MFA-ban.	84
<i>Domokos Péter:</i> Régi ismerősök új szerepben: atomok a kvantumtechnológiában	110	<i>Lévai Géza:</i> ATOMKI: A születéstől a kamaszkorig (~1970) – Interjú.	182
<i>Fülöp Péter:</i> A lövésből származó anyagmaradványok tör- vényszéki vizsgálata	339	<i>Németh Péter:</i> Aszteroidabecsapódások során keletkező összetett gyémántszerkezetek	50
<i>G. Szabó István, Dunai Dániel, Kis Zoltán, Nagy Domonkos, Szepesi Tamás:</i> Kisvállalkozás nagy vállalkozásokban: fúziós plazmafizikai és neutronos képalkotási együtt- működések a KFKI-telephelyen.	418	<i>Ormos Pál:</i> Kroó Norbert köszöntése 90. születésnapján ...	293
		<i>Palcsu László, Lisztes-Szabó Zsuzsa, Benkó Zsolt, László Elemér:</i> Kronológia különböző időléptékekben.	199
		<i>Pan Csien-vei:</i> Egy globális kvantumhálózat felé.	120
		<i>Pásztor Gabriella:</i> Boldog 70. születésnapot, CERN! ..	365
		<i>Pásztor Gabriella:</i> Felfedező részecskefizika a CERN-ben: az elektromos bozonoktól a titokzatos sötét anyagig	381
		<i>Pei Wenna:</i> A neutrínók fizikája.	375
		<i>Petrik Péter, Fried Miklós, Lohner Tivadar:</i> Optikai mód- szerek az MFA-ban	80
		<i>Plachy Emese:</i> Csillagfejlődés és csillagpulzáció.	233
		<i>Pósfai Mihály:</i> Bevezetés a tematikus blokkhoz	38
		<i>Slíz-Balogh Judit, Márai Attila, Sári Pál, Horváth Gábor, Barta András:</i> A Kordylewski-porholdak asztropolari- metriája	20

<i>Sulik Béla, Juhász Zoltán, Herczku Péter, Biri Sándor, Rácz Richárd: Gyorsítókkal az atomfizikától az űrkémiaiáig</i>	211
<i>Szabados László: Univerzoom – Bevezető</i>	217
<i>Szikszai Zita, Major István, Horváth Anikó: Örökségtudomány</i>	202
<i>Szipőcs Róbert: Az izolált attoszekundumos impulzusok előállítását megalapozó lézerfizikai fejlesztések a kilencvenes évek közepén a Bécsi Műszaki Egyetemen</i>	12
<i>Szipőcs Róbert: Bevezető</i>	401
<i>Temesi Ottó, Gulyás Gábor, Varga Lajos: Az anyagtudományi kutatások ipari jövője: az innováció hétköznapi lépései a gyakorlatban a tudomány, a technológia és az ipar határán</i>	402
<i>Tóth Csaba, Varró Sándor: A sokfotonos fémfelületi folyamatoktól az alagútemisszióig az attoszekundumos fényimpulzusokig: a 2023. évi fizikai Nobel-díj előzményei a KFKI/SZFKI-ban</i>	6
<i>Trócsányi Zoltán: Részecskefizikai kutatási lehetőségek a CERN tervezett gyorsítógyűrűjén</i>	388
<i>Varjú Katalin, Dombi Péter, Börzsönyi Ádám: Az ELI ALPS Lézeres Kutatóintézet</i>	299
<i>Veres Péter, Horváth István: Gammakitörések</i>	249
<i>Vukics András: A kvantumkilogramm. A tömegegység újradefiniálása az SI 2019-es felülvizsgálatában</i>	115

REFLEKTORFÉNYBEN

<i>Dombi Péter: Interjú Kroó Norberttel</i>	24
<i>Ferencz Kárpát: Emlékeim Krausz Ferenc újáról a Nobel-díjig – I. rész</i>	62
<i>Ferencz Kárpát: Emlékeim Krausz Ferenc újáról a Nobel-díjig – II. rész</i>	92
<i>Panek Sándor: A tudásom egy része fölösleges lett, de immunitást szereztem a butaságok ellen – interjú a Széchenyi-díjas dr. Szabó Gábor fizikussal</i>	429
<i>Rácz Péter: Az ultragyors plazmonikus fotoemisszió vizsgálata</i>	129
<i>Somfai Ellák: A mesterséges intelligenciához vezető út – a 2024-es fizikai Nobel-díj</i>	426
<i>Szipőcs Róbert: Az első csörpölt tükör megtervezése és elkészítése Budapesten</i>	272
<i>Újfalussy Balázs: Közvetlenül is igazolták Wigner Jenő 90 éves feltevését, Wigner-kristályt figyeltek meg elektronmikroszkóppal</i>	326

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>A fizika tanítása a Szemlében – Bevezetés</i>	145
<i>Baranyai Klára: Az ellipsziszről (már csak?) fizikaórán</i>	28
<i>Bartos-Elekes István: Krausz Ferenc 2016-ban a XXVI. nagyváradi Schwartz Lajos Emlékverseny meghívott előadója volt</i>	27
<i>Beszeda Imre, Stonawski Tamás, Mákos Annamária: A humor a fizikaoktatás szolgálatában</i>	96
<i>Beszeda Imre, Stonawski Tamás, Poór Ádám: A valós helyi idő, azaz az elfelejtett napidő</i>	285
<i>Borbélyné Bacsó Viktória: Innovatív tehetséggondozás és pályaaorientáció</i>	215
<i>Csatári László: Mikrokontroller (nem csak) a fizika tanításában</i>	165
<i>Fürjes Bálint, Dóra Balázs, Simon Ferenc: Az elektromágneses sugárzás távolhatása, avagy mire jó a Poynting-vektor, illetve tudunk-e a fénynél gyorsabban haladó jeleket előállítani?</i>	102

<i>Goertz Amélie, Gombási Róbert, Kadlecsek Ádám, Szeide-mann Ákos: A visszafordíthatatlan Cartesius-bűvár</i>	134
<i>Horváth Dezső, Jarosievitz Beáta, Oláh Éva Mária, Sükösd Csaba: Hogyan váljunk szuperhősökké a CERN-ben?</i>	395
<i>Király Beáta: Hercegnőtorta ismeretterjesztő módra</i>	213
<i>Komáromi Annamária: Magyarországon is létrejött az ESERO iroda</i>	358
<i>Koncz Károly, Simon Péter: 43. Mikola Sándor Országos Középiskolai Tehetségkutató Fizikaverseny – Beszámoló</i>	352
<i>László István: George Green és a Green-függvény</i>	160
<i>Misurda Orsolya, Simon Ferenc: Hogyan építsünk rádió-távcsövet házilag?</i>	280
<i>Nagy Piroska Mária, Szoldatics József: Az elektromos tér szemléltetése a CouDraw program segítségével</i>	139
<i>Oláh Éva, Stonawski Tamás: A STEM- és STEAM-pedagógia a fizikaoktatásban</i>	146
<i>Schnider Dorottya, Hömöstre Mihály: Kompetenciafejlesztő fizikatanítás: vezetőképesesség-vizsgálat Arduinóval – egy fizikaórai projekt</i>	153
<i>Sükösd Csaba, Bokor Nándor: Relativisztikusan mozgó állólóhullám</i>	66
<i>Sükösd Csaba: Miért körpályához közeli (kis excentricitású) pályán keringenek a bolygók a Nap körül?</i>	31
<i>Vígh-Kiss Erika Rozália: Látogatás a CERN-ben</i>	392

HÍREK-ESEMÉNYEK

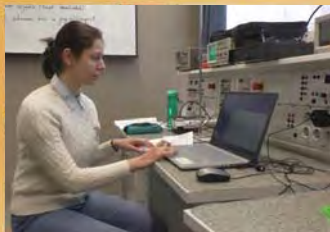
<i>Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat küldöttgyűlése</i>	292
<i>Németh Géza: Staar Gyula, a Természet Világa egykori főszerkesztője 80 éves</i>	327
<i>Trócsányi Zoltán: H. David Politzer 75 éves</i>	364

MEGEMLÉKEZÉS

<i>Faigel Gyula, Pusztai Tamás: Gránágy Lászlóra emlékezünk</i>	35
<i>Fürjes Péter, Simon Ferenc, Volk János: Gordon Moore öröksége</i>	169
<i>Groma István, Rácz Zoltán, Zimányi Gergely: Györgyi Gézáról búcsúzunk</i>	173
<i>Hamvas György, Trócsányi Zoltán: Trajmar Sándor (1931–2023)</i>	35
<i>Härtlein Károly, Dallos Györgyi, Lázi Márta, Füstöss László: Orosz László emlékezete (1947–2023)</i>	107
<i>Horváth Dezső: Peter Ware Higgs, 1929–2024</i>	290
<i>Kovács József, Szabó M. Gyula: Jankovics István (1943–2023)</i>	34
<i>Szabó Róbert, Radnai Gyula, Radnai Márton: Pavlics Ferenc és tanára, Varga Árpád</i>	169
<i>Ujvári Sándor: Mester András (1952–2023)</i>	71

KÖNYVESPOLC

<i>Bene Gyula: Bokor Nándor: Tér-idő-geometria</i>	179
<i>Radnóti Katalin: Az élet titkai és a kvantummechanika</i>	70



Országos Szilárd Leó Fizikaverseny



A XXVIII. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny meghirdetése

Az Országos Szilárd Leó Fizikaverseny célja a fizika – és ezen belül is a nukleáris és a modern fizika – iránt érdeklődő tehetséges tanulók felfedezése.

A Magyar Nukleáris Társaság, a paksi Energetikai Technikum és Kollégium, a Szilárd Leó Tehetséggondozó Alapítvány, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, valamint a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Nukleáris Technikai Intézete meghirdeti a XXVIII. Országos Szilárd Leó Fizikaversenyt.

Nevezhetnek a határon innen és túl magyar nyelven fizikát tanuló, középfokú oktatásban részt vevő diákok iskolái a jelentkezési lap kitöltésével és e-mailen történő elküldésével a sukosd@reak.bme.hu címre. A versenyen történő részvétel részletes feltételei megtalálhatók a verseny honlapján: <https://szilardverseny.hu/orszagos-verseny/verseny-meghirdetese>. A jelentkezési lap letölthető: <https://sukjaro.hu/SzilardVerseny/JelentkezesiLap.xlsx>

Nevezési díj nincs, a nevezés határideje: **2025. január 15.**

Az első forduló időpontja: **2025. február 17., 14:00–17:00,**
helyszíne: a benevezettek iskolája.

A második (döntő) forduló időpontja: **2025. április 25–27.**
(péntek déltől vasárnap délig),
helyszíne: Paks, Energetikai Technikum és Kollégium



A döntőbe az első fordulóban legjobb eredményt elért húsz *szenior*, és tíz *junior* kategóriájú tanulót hívja be a versenybizottság. A verseny honlapja – <https://szilardverseny.hu> – tartalmazza a kategóriák meghatározását, segítséget a felkészüléshez és a díjazást.

A verseny mindkét fordulójában 10-10 elméleti/számítási feladatot kell a versenyzőknek megoldaniuk. A döntőben ezenkívül még kísérleti és számítógépes szimulációs feladatot is kapnak a versenyzők.

A döntőbe jutott versenyzők helyezésüknek megfelelően értékes jutalmakat kapnak. Több magyar egyetem is felvételi többletpontokat ad a versenyen jó helyezést elért diákoknak.

Várjuk a kihívást vállaló, tehetséges fiatalok jelentkezését!

A versenybizottság nevében

Dr. Sükösd Csaba, a BME c. egy. tanára,
a versenybizottság vezetője



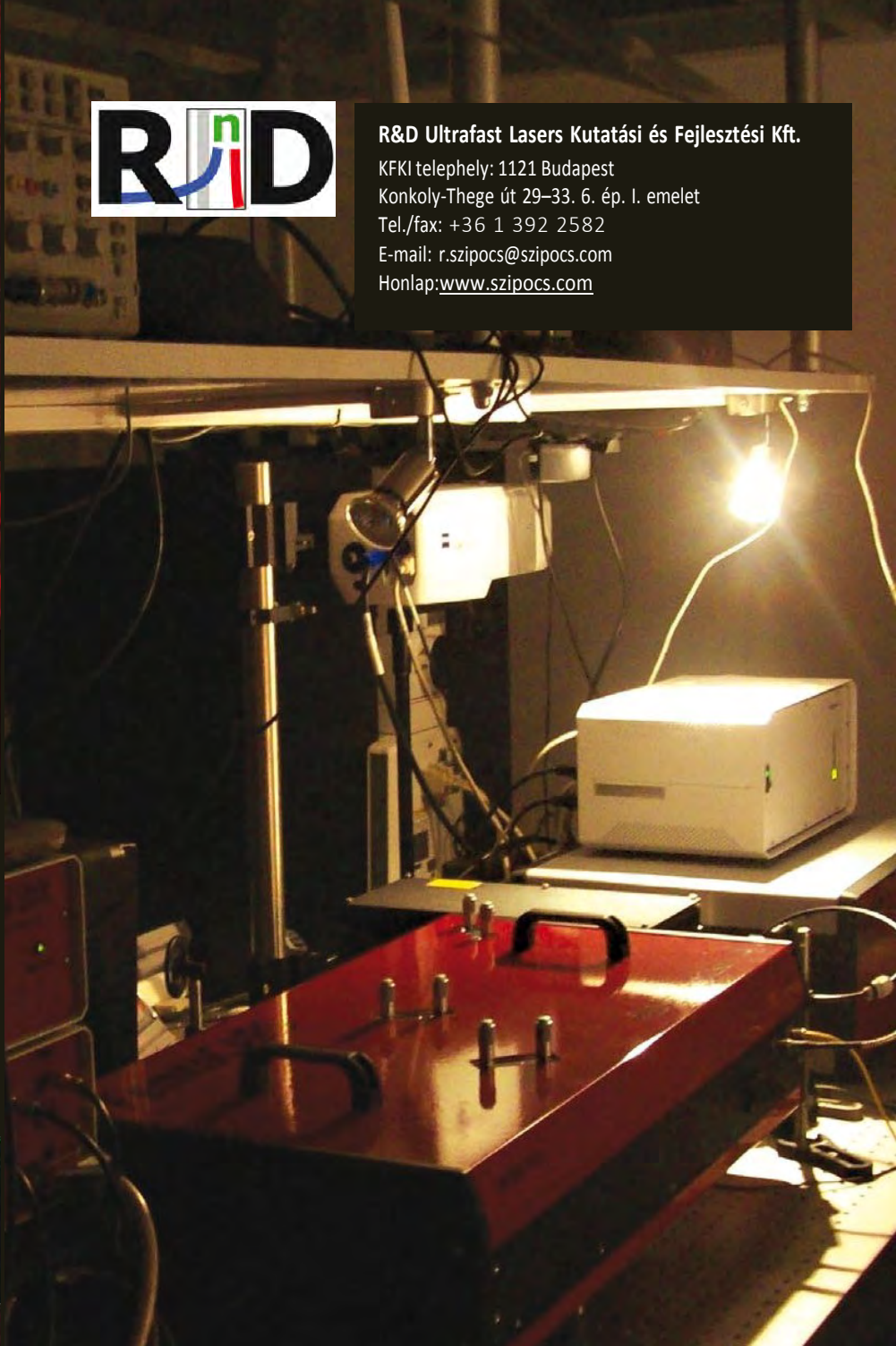
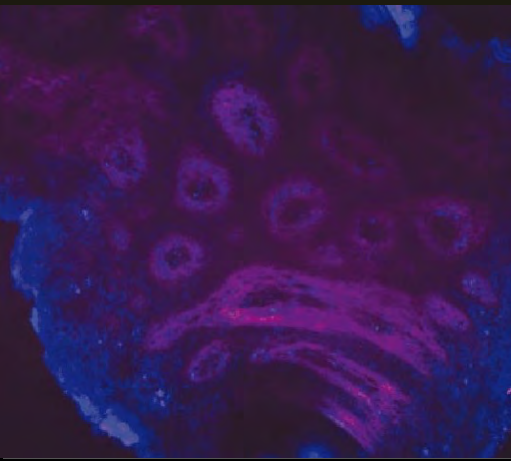
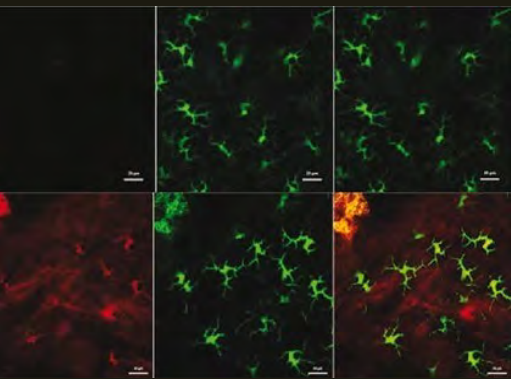
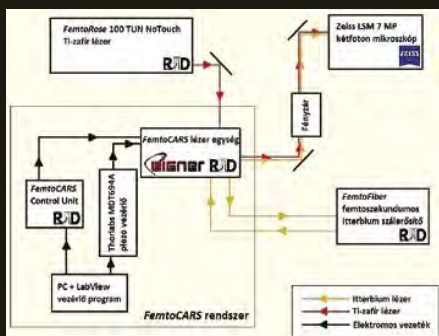
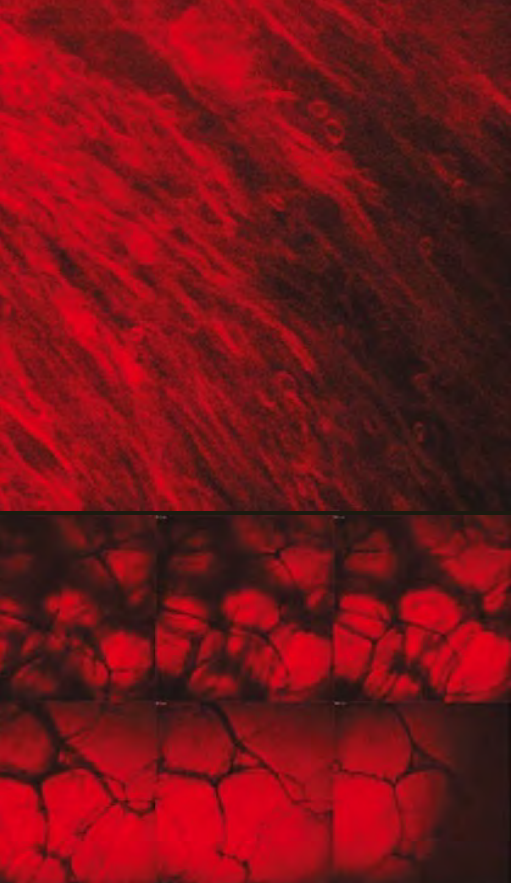
KULTURÁLIS ÉS INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM





R&D Ultrafast Lasers Kutatási és Fejlesztési Kft.

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



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

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

Egyéb kapcsolódó termékeink, szolgáltatásaink:

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