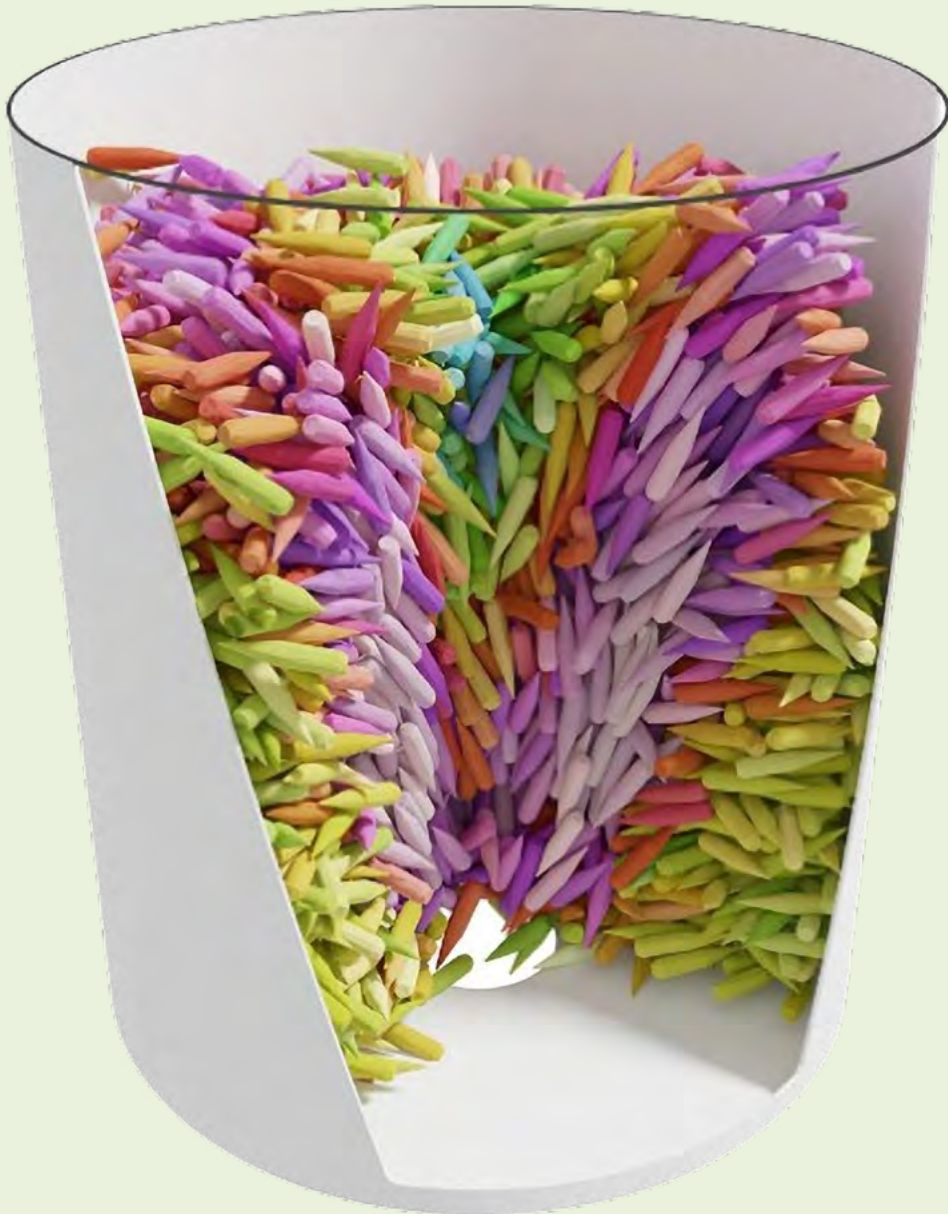


fizikai szemle

MTA 200 kaleidoszkóp



Lágy anyagok

2025/12

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

SZERKESZTŐSÉG

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

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG

Asbóth János, Biró László Péter, Csengeri Kamilla, Czitrovsky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Jármai-Szabó Ferenc, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Pásztor Gabriella, Sándor Bulcsú, Simon Ferenc, Simon Péter, Sódor Ádám, Sükösd Csaba, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

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

Kiadja és terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat,
1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III.
Telefon/fax: (1) 201-8682
Felelős kiadó: Újfalussy Balázs főtítkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

<http://fizikaizsemla.elft.hu>,
e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

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



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató. Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán. Az egyes számok ára: 1800,- Ft (a dupla számoké 3600,- Ft) + postaköltség.

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

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



A címlapon:

Elnyújtott alakú szemcsék silóban – rekonstruált CT-felvétel (készítette Nagy Viktor), lásd

Börzsönyi Tamás, Somfai Ellák cikkét a 423. oldalon

TARTALOM

KALEIDOSZKÓP

Ábrahám Péter: Mérőföldkövek a hazai fizika és csillagászat modern kori történelméből 401
A Magyar Tudományos Akadémia idén ünnepli alapításának 200. évfordulóját. Ez alkalomból a Fizikai Tudományok Osztályának minden tudományos bizottsága kiválasztott néhány olyan eredményt vagy eseményt, amelyek megítélésük szerint fontosak, emlékeztetéseket diszciplínájuk modern kori (értve ezen hozzávetőleg a XX. század második felét) történelmében. Ezeket a mérőföldköveket fűzi időrendbe ez az írás.

LÁGY ANYAGOK – TEMATIKUS SZÁM

Vendégszerkesztő: Salamon Péter

Salamon Péter: Lágy anyagok a fizikában – Bevezető 409

Szomor Zsombor, Bereczki Dóra, Fürjes Péter: Cseppek mikrofluidikai rendszerekben 410
A cikk áttekintést ad a csepपालपी mikrofluidikai rendszerek működéséről, a kétfázisú folyadékok mikroszatornában történő áramlásáról, a monodiszperz mikrocseppek előállításának módszereiről és fontos alkalmazásairól.

Salamon Péter, Máthé Marcell Tibor: Felületi instabilitások és elektromechanikai jelenségek ferroelektromos nematikus folyadékkristályokban 415
A szerzők bemutatják a nemrég felfedezett ferroelektromos nematikus folyadékkristályok különleges tulajdonságait, melyek egyedülálló módon kombinálják a molekuláris irányrendezettséggel csatolt spontán elektromos polarizációt és a folyékony halmazállapotot.

Jákli Antal: Ionos folyadékkristály-gumik lehetséges alkalmazásai a mechatronikában és akkumulátorokban 420
A cikk az ionos folyadékkristályos elasztomerek szerkezetét és működését tárgyalja, amelyek egyszerre mutatnak folyadékkristályos rendezettséget és gumyszerű mechanikai tulajdonságokat.

Börzsönyi Tamás, Somfai Ellák: Különböző alakú szemcsék: mi folyik könnyebben, a rizs, a lencse vagy a borsó? 423
A szerzők azt vizsgálják kísérletekkel és szimulációkkal, hogy a szemcsék alakja miként befolyásolja egy szemcsés anyag folyási tulajdonságait.

NOBEL-DÍJ 2025

Makk Péter, Csonka Szabolcs: A 2025. évi fizikai Nobel-díjról 427
A 2025. évi fizikai Nobel-díjat három, a szupravezetéssel és kvantumszámítással foglalkozó fizikus, James Clarke, Michel H. Devoret és John M. Martinis a „makroszkopikus kvantumalagutazás és egy elektromos áramkörben lévő kvantált energiaszintek felfedezéséért” kapták. Ebben a cikkben a Nobel-díjhoz kapcsolódó kutatásuk alapjait ismertetjük.

TANÍTÁS

Csikós Viktória: Futurum Lucens – Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, Pécs 430
A 2024. október 25. és 28. között lezajlott 65. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató ismertetése olvasható.

MEGEMLÉKEZÉS

Bokor Nándor: Edwin F. Taylor (1931–2025) 432

KÖNYVESPOLC

Hartmann Péter: Donkó Zoltán, Vass Máté: Alacsony hőmérsékletű plazmafizika, HUN-REN Wigner FK, 2025 434

A Fizikai Szemle LXXV. évfolyamának tartalomjegyzéke 435

KALEIDOSc OPE

P. Ábrahám: Milestones from the modern history of Hungarian physics and astronomy
SOFT MATTER

P. Salamon: Soft matter in physics – Introduction

Zs. Szomor, D. Bereczki, P. Fürjes: Droplets in microfluidic systems

P. Salamon, M. T. Máthé: Surface instabilities and electromechanical phenomena in ferroelectric nematic liquid crystals

A. Jákli: Potential applications of ionic liquid crystal rubbers in mechatronics and batteries

T. Börzsönyi, E. Somfai: Differently shaped grains: what flows more easily, rice, lentils or peas?

NOBEL PRIZE 2025

P. Makk, Sz. Csonka: About the 2025 Nobel Prize in physics

TEAcHING PHYSICS

V. Csikós: Futurum Lucens – Physics Teacher Convention and Equipment Presentation, Pécs

COMMEMORATION

N. Bokor: Edwin F. Taylor (1931–2025)

BOOK REVIEW

P. Hartmann: Zoltán Donkó, Máté Vass: Low-temperature plasma physics, 2025

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap

group
m v m



MÉRFÖLDKÖVEK A HAZAI FIZIKA ÉS CSILLAGÁSZAT MODERN KORI TÖRTÉNELMÉBŐL

Ábrahám Péter, szerkesztő

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Budapest

E-mail: abraham.peter@csfk.org

A Magyar Tudományos Akadémia, a magyarság egyik legfontosabb szellemi intézménye, 2025-ben ünnepli alapításának kétszázadik évfordulóját. Ebből az alkalomból a Magyar Tudományban publikált tematikus összeállítással bemutatkozik az Akadémia XI. osztálya, a Fizikai Tudományok Osztálya. Az osztály hét tudományos bizottsága egyenként vagy összefogva bemutatja szűkebb szakterületének kialakulását, magyarországi fejlődését és jövőképét. A részletes áttekintésekkel párhuzamosan minden tudományos bizottság kiválasztott néhány olyan eredményt vagy eseményt is, amelyek megítélésük szerint fontosak, emlékeztetnek diszciplinájuk modernkori (értve ezen hozzávetőleg a XX. század második felét) történelmében. Ezeket a mérföldköveket fűzi időrendbe a jelen írás a Fizikai Szemle olvasói számára. Nem rigorózus válogatásról van szó, nem tudománytörténeti igényű feldolgozásról, hanem egy szubjektív pillanatfelvételtől, amely azonban mégis megmutatja – mint cseppben a tengert – a modern magyar fizika évtizedeit, gazdagságát, eredményeit, melyekre méltán lehetünk büszkéek. A tudományterületek kaleidoszkópszerű kavargása a fizika sokszínűségét de mégis egységességét hivatott érzékeltetni az olvasó számára. Az összefoglalók szerzői a bekezdések végén vannak feltüntetve.

A Fizikai Tudományok Osztálya teljes bemutatkozó írása a Magyar Tudomány 2025. decemberi számában olvasható. Az 1989–2019-es időszakban a fizika kiemelkedő magyarországi kutatási irányzatairól teljes áttekintést adó tanulmány olvasható az MTA Fizikai (XI.) Osztályának honlapján (https://mta.hu/data/11_Osztaly/Dokumentumok/30_ev_kiemelkedo_eredmenyei_fizika_200403.pdf)

1954

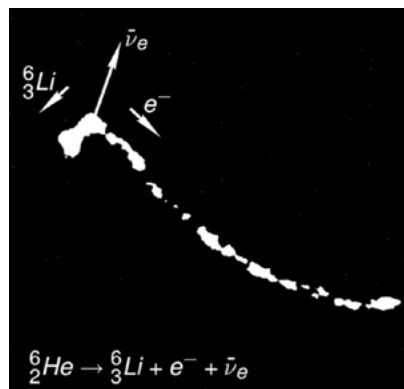
A sűrűségfukcionál-elmélet, amely Thomas, Fermi és Dirac munkásságáig nyúlik vissza, sikeres kutatási témája volt a Gombás Pál körül a Budapesti Műszaki Egyetemen szerveződött kutatócsoportnak (Thomas–Fermi–Dirac–Gombás-modell a korreláció tárgyalására). A kvantummechanika szerint a Schrödinger-egyenlet megoldásához az – általában sokváltozós – hullámfüggvényt kell megkeresni. Hohenberg és Kohn azonban bebizonyította, hogy a csak három változót tartalmazó elektronsűrűség felhasználásával a kvantumos rendszer leírása sokkal egyszerűbb. A sűrűségfukcionál-elmélet elvben egzakt leírást tesz lehetővé, nem ismert azonban a teljes energia-

fukcionál két tagja: a kinetikus és a kicserélődési-korrelációs fukcionálok. Az első közelítő, a sűrűség $1/3$ -dik hatványával arányos kicserélődési potenciált Slater alkalmazta. Tőle függetlenül a „Gombás-iskola” kutatója, Gáspár Rezső szintén a sűrűség $1/3$ -ik hatványával arányos potenciált javasolt, de más együtthatóval. Később erre $X\alpha$ módszerként hivatkoztak, ahol $\alpha = 1$ (Slater) és $\alpha = 2/3$ (Gáspár) közötti értéket használtak. Gáspár cikkét 2000-ben újra kiadták angol nyelven, azzal a javaslatlall, hogy a sűrűségfukcionál-elmélet alapegyenleteit ezután Slater–Gáspár–Kohn–Sham-egyenleteknek hívják. A sűrűségfukcionál-módszerért 1998-ban Kohn Nobel-díjat kapott.

Gáspár Rezső: Über eine Approximation des Hartree-Fock-schen Potentials durch eine universelle Potentialfunktion. *Acta Phys. Acad. Sci. Hung.*, 3 (1954) 263; *Journal of Molecular Structure*, 501–502 (2000) 1–5.

László István

1956



1956 őszén Debrecenben, az MTA Atommagkutató Intézetében Szalay Sándor ötlete alapján Csikai Gyulának sikerült kimutatnia, hogy a ${}^6\text{He}$ -atommag radioaktív béta-bomlása során egy

nem ionizáló részecske is kilép a magból. A neutrínó létezését 1930-ban Pauli vetette fel, majd egy új *gyenge* kölcsönhatást bevezetve 1934-ben Ferminek sikerült származtatnia az addig érthetetlen béta-energiaspektrumot. Az eredmény azonban felvetett egy új kérdést: a kirepülő neutrínó impulzusának jelentkeznie kell a bomlás után a mag visszalökődésben. 1938-ban Halpern felvetette a ködkamra alkalmazásának lehetőségét, de a maradék-mag-visszalökés kimutatása sokáig váratott magára. Végül 1956 szeptemberében az ATOMKI-ban kifejlesztett precíziós ködkamrában sikerült úgy szinkronizálni a ${}^6\text{He}$ előállítását, ködkamrába juttatását, a ködkamra

expanzióját és sztereofényképek készítését, hogy a fényképeken megjelent a visszalökött mag vastag nyoma és a kilépő elektron által keltett vékony, szaggatott nyom is. A kísérlet helyszínét, az ATOMKI főépületét az Európai Fizikai Társulat (EPS) 2013-ban „az EPS Történelmi Emlékhelyévé” nyilvánította.

Csikai Gyula: Photographic evidence for the existence of the neutrino. *Il Nuovo Cimento*, 5(4) (1957) 1011.

Angeli István, Lévai Géza

1960

Két programadó cikkében Marx György és Menyhárd Nóra áttekintette a neutrínókkal végezhető csillagászati és asztrofizikai kutatások perspektíváit, amiket évtizedekkel később több Nobel-díjas felfedezés igazolt. A szerzők a legnagyobb esélyt a Napban zajló nukleoszintézis során keletkező neutrínók kísérleti észlelésének adták, részletes számítással a $H \rightarrow D$, $C \rightarrow N$, $H \rightarrow Li$ és $H \rightarrow B$ szintézispályákból származó neutrínófluxusra. A napneutrínók felfedezése 1969-ben meg is történt. A földi kőzetekben előforduló radioaktív elemek (^{238}U , ^{232}Th , ^{235}U , ^{40}K) bomlási soraiból származó antineutrínó-fluxust $106/s/cm^2$ -re becsülték. Megadták az észlelésére használható inverz béta-bomlási reakciók listáját is, de a kísérleti kimutatás csak 2005-ben történt meg, az aktív kutatási területté fejlődött neutrínó-földtudomány kezdeteként. A Naprendszeren kívüli neutrínóforrások esetében kiemelték, hogy az antianyagból álló égitesteket egyértelműen azonosítani lehetne azok neutrínófluxusa révén. Megemlítették a forró korai univerzum hűlésekor és a szupernóva-robbanásból kiszabaduló neutrínók észlelésének esélyét is, ez utóbbi 1987-ben sikerült az SN 1987A szupernóvából. Javaslatot tettek a kozmikus sugarak által a légkörben keltett neutrínók tanulmányozására is. A neutrínófajták irányfüggésének kimutatása 1998-ban sikerült. Marx György 1972-től 2002-ig betöltötte a Nemzetközi Neutrínó Konferencia Bizottság elnöki posztját, ahol búcsúbeszédében a neutrínófizikának az emberiség számára legjelentősebb sikereként a Nap szerkezetére és működésére vonatkozó elméleti modelleket minden részletében igazoló megfigyeléseket emelte ki.

Menyhárd Nóra, Marx György: Über die Perspektiven der Neutrino Astronomie. *Mitteilungen der Sternwarte Budapest*, No. 48 (1960)

Patkós András

1966

Az űrkutatás kezdete és az első lézer 1960-as megépítése által megnyílt új lehetőségek továbbgondolásával Marx György 1966-ban megjelent úttörő cikkében visszatért az 1960-ban „Az űrutazás energiaproblémái” címmel írt német nyelvű tanulmányának kérdésfeltevéséhez. Megvizsgálta annak a lehetőségét, hogy sikerülhet-e a lézerek koncentrált energiáját űrrepülő meghajtására használni azáltal, hogy a lézerek által létrehozott nagy fénynyomást egy tárgynak a fénysebességhez közeli gyorsítására alkalmazzák. Felhasználta, hogy a fény-

nyomás a lézerintenzitással arányos, és felvetette azt a lehetőséget, hogy egy kicsiny, 1 grammnál is kisebb tömegű tárgyat a Naprendszeren kívülre gyorsítsanak földi lézerekkel. Ötletét 50 évvel később Steven Hawking is átvette, amikor felvetette az alfa Centauri csillaghoz küldendő űrmisszió lehetőségét. Bár laboratóriumokban megvalósították már vékony fóliák nagy gyorsítását, a fényvitorlás űrhajó még messze van a megvalósíthatóságtól.

Marx György: Interstellar vehicle propelled by terrestrial laser beam. *Nature*, 211 (1966) 22–23.

Földes István

1967

Az 1960-as évek vége kulcsfontosságú időszak volt a kritikus jelenségek és fázisátmenetek elméletének fejlődésében, a kutatók ekkoriban igyekeztek megérteni a termodinamikai mennyiségek szinguláris viselkedését a kritikus pontok közelében. A hélium-4 egyedülálló anyag, amely atmoszférikus nyomáson folyékony marad egészen az abszolút nulla hőmérsékletig, és csak jelentős külső nyomás hatására szilárdul meg. Két cseppfolyós fázist mutat: a hélium I-et, amely egy normális folyadék, és a szuperfolyékony viselkedésű hélium II-t. Az átmenet a hélium I-ből a hélium II-be „lambda-átmenet” néven ismert, amely 2,17 K hőmérsékleten, 1 atmoszféra nyomáson következik be, és a fajhő éles csúcsával jellemezhető, amely a görög lambda (λ) betűre emlékeztet. Korábbi elméleti próbálkozások – például Feynman folyékony héliumra vonatkozó partíciós függvénye – már kimutatták a másodrendű lambda-átmenetet, de a divergenciák pontos természete és a fluktuációk szerepe továbbra is aktív kutatási terület maradt. Szépfalussy Péter és Menyhárd Nóra külföldi együttműködőkkel közösen írt két tanulmánya jelentősen előrelépést jelentett, és komoly nemzetközi visszhangot keltett a cseppfolyós hélium lambda-átmenetének megértésében.

Ferrell R. A., Menyhárd N., Schmidt H., Schwabl F., Szépfalussy P.: Dispersion in second sound and anomalous heat conduction at the lambda point of liquid helium. *Phys. Rev. Lett.*, 18, 891.

Palla Gergely, Szolnoki Attila, Takács Gábor

1969

A molekulafizikai (más néven kvantumkémiai) kísérleti és elméleti vizsgálatok célja általában az atomok helyzetének és az elektronszerkezet, valamint az ezekből következő, a molekulákra jellemző spektroszkópiai tulajdonságok meghatározása. Molekuladinamikai számításokban szükség van az atomokra ható erőkre és a molekulák rezgési állapotainak meghatározásában az ún. erőállandókra vagy Hess-mátrixra. Korábban az energiát numerikus deriválással határozták meg, ez az eljárás azonban pontatlan és időigényes volt. Pulay Péter azt javasolta, hogy az energia első deriváltját analitikus módszerrel határozzák meg, és javaslatát számos példán keresztül valamint általa írt számítógépes programokkal

igazolta. A közleményben bemutatott eljárást azóta Pulay-erőmódszernek nevezik, és a téma egyik szaktekintélye, Henry Schaefer III szerint ha a tudomány fejlődését a jelentős mérföldkövek jelzik, akkor Pulay eredménye szupermérföldkő. Ennek köszönhető, hogy ma már minden kereskedelmi forgalomban kapható számítógépes programban megvan a rezgési spektrum számításának a lehetősége, és rutinnak számít a szerkezetkutatásban, hogy az infravörös és a Raman-színképek kiértékelésében a számított spektrumokra is támaszkodnak.

Pulay Péter: Ab initio calculation of force constants and equilibrium geometries in polyatomic molecules. I. *Theory. Mol. Phys.*, 17 (1969) 197–204.

László István

1970

Angeli István atommagsugár-vizsgálatai az ATOMKI-ban és a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén folytak több évtizeden keresztül, mígnem a szakterület legjelentősebb összefoglaló cikkeiben csúcsozodtak ki. A 14 MeV-es neutronokkal mért totális neutron-hatáskeresztmetszetek tömegszámfüggésében mutatkozó periodikus változás értelmezésére munkatársaival kidolgozta az optikai modell félklasszikus változatát, amit a NASA is alkalmaz az űrhajósok és műszerek által kapott sugárdózis becslésére. Később az atommagsugár tömegszámfüggésében finomszerkezetet fedeztek fel, ami az atommag héjszerkezetére és deformációjára utal. Az 1998-ban az *Acta Physica Hungarica*-ban közölt magsugár-táblázat megjelenése után Bécsből, a Nemzetközi Atomenergia Ügynökségtől futárposta hozott egy kutatási szerződést. Ennek alapján 1999-ben megjelent egy részleges táblázat, amely az elektronszórási és müonikus atom segítségével mért abszolút sugarakat tartalmazta. Ettől kezdve Angeli István adatai megkerülhetetlenek minden olyan tanulmányban, amelyeknek köze van a magsugárhoz. 2025 januárjában a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség konferenciát szervezett az atommagsugár-vizsgálatok jövőbeli stratégiájának meghatározására és összehangolására.

Angeli István, Csikai Gyula: Total neutron cross sections and the nuclear Ramsauer effect. *Nuclear Physics*, A158 (1970) 389.

Cseh József, Lévai Géza

1971

A gravitáció geometriai leírásán alapuló általános relativitáselmélet forradalmasította az univerzumból alkotott képünket. Ez az elmélet a relativisztikus asztrofizika alapjává vált, főbb jóslatait, az univerzum tágulását, a fekete lyukak és a fénysebességgel terjedő gravitációs hullámok létezését a későbbiekben a többi fizikai elmülethez viszonyítva is nagyon pontos megfigyelések erősítették meg. A magyar kutatók a hetvenes évek elején kapcsolódtak be az általános relativitáselméleti kutatásokba. Nemzetközileg is kiemelkedők a Perjés Zoltán által alapított elméleti iskola eredményei, főként a tengelyszimmetrikus

és stacionárius téridők vizsgálatában. Perjés Zoltán legnagyobb hatású munkája az Einstein–Maxwell-egyenletek egy vagy több, forgó, egységnyi specifikus töltésű forrásának stacionárius, külső gravitációs és elektromágneses mezőit írja le. Ezt a konfigurációt Werner Israel és Alan Warren Wilson is tárgyalta 1972-ben, így az eredmény Perjés–Israel–Wilson- (PIW-) megoldásként vált ismertté. James Hartle és Stephen Hawking rámutatott arra, hogy aszimptotikusan sík esetben a PIW-téridőnek csupasz szingularitása van, azonban azóta sikerült ezt megfelelő belső megoldással eltüntetni. A PIW-megoldást máig széles körben alkalmazzák, több általánosítása született mind szuperszimmetrikus, mind heterotikus hürleléti kontextusban.

Perjés Zoltán: Solutions of the coupled Einstein–Maxwell equations representing the fields of spinning sources. *Phys. Rev. Lett.*, 27 (1971) 1668–1670.

Gergely Árpád László

1972

A mágneses magrezonanciában jól ismert spinechó jelenséget neutronokra alkalmazva Mezei Ferenc 1972-ben feltalálta a neutrons spinechó (NSE) elvét, amelyet kísérletileg is igazolt a csillebérci kutatóreaktor egyik neutronnyalábján összeállított műszerekkel. Ezután kidolgozta a NSE-spektrometria módszerét, és a grenoble-i nagy fluxusú reaktornál megépítette az első neutron spinechó-berendezést. A jelenség azon alapszik, hogy a polarizált neutronok mágneses térben történő precessziója során az egyes spinek szögelfordulásának különbsége a mintán való neutronszeróródás előtti és utáni állapotban a szeróródási folyamat során végbemenő neutronsebesség változástól függ. Így a nagy pontosságú sebességváltozás mérése a hagyományos módszerekhez képest több nagyságrenddel jobb energiafelbontást biztosít a kondenzált anyagok rezgési állapotainak, vagyis az atomi-molekuláris és nanokölcsönhatások tanulmányozásában. A NSE világszerte a kondenzált anyagok kutatásának nélkülözhetetlen eszközévé vált a biológiától a mágnességig. A módszer kivételosen nagy energiafelbontása tette lehetővé például a szuperfolyékony héliumban fellépő elemi gerjesztések élettartamának meghatározását, a ferromágnesek Curie-pont körüli kritikus jelenségeinek tisztázását, a folyadék-üveg fázisátmenetek relaxációs mechanizmusának felderítését, a biológiai makromolekulák konformációs dinamikájának megfigyelését és a polimerláncok „hernyózó” mozgását leíró modell (PG de Gennes, Nobel-díj, 1991) kísérleti igazolását.

Mezei Ferenc: Neutron spin echo: A new concept in polarized thermal neutron scattering. *Z. Phys.*, 255 (1972) 146.

Rosta László

1974

Az 1960-as évek szilárdtestfizikájának fő iránya a rendezett, szimmetriatörően alapuló állapotok (például ferro- és antiferromágnesek, kristályok, klasszikus szupravezetők) megértése volt. 1973-ban Anderson felvetette,

hogy a feles spinű szigetelő mágneses anyagokban a Heisenberg-féle kvantumfluktuációk megakadályozhatják a hosszú távú antiferromágneses rend kialakulását, és a spinek inkább spin-szingulett párokat alkotnak, amelyek folyamatos kvantumos rezonanciában állnak egymással (rezonáló vegyértékkötés, RVB). Fazekas és Anderson 1974-es közös munkájukban, háromszögrácson vizsgálva az Ising- és Heisenberg-modellek átmenetét bizonyították, hogy a rendszer az Ising-határ közelében nem a Néel-féle antiferromágneses rendet veszi fel, hanem folyadékszerű, koherens kvantumállapotot képez, amely kiterjeszthető a Heisenberg-tartományra is. Az RVB-elmélet egy új paradigmát teremtett, a kvantumos rendezetlenséget és a kvantumspinfolyadék-állapotokat helyezve előtérbe. Jelentősége különösen abban rejlik, hogy bevezette a spin és töltés szétválásának koncepcióját: az erősen korrelált rendszerekben az elektronok spinre („spinonok”) és töltésre („holonok”) bomolhatnak, meghaladva a klasszikus Fermi-folyadék-megközelítést. Az RVB elősegítette a topologikus kvantumállapotok és az egzotikus gerjesztések (anyonok) fogalmainak kidolgozását, amelyek alapjai lehetnek a topológiai kvantumszámításnak. Az RVB-állapotot napjainkban több anyagcsaládban, például kagomerácsú mágnesekben és háromszögrácsú organikus vegyületekben is intenzíven kutatják.

Fazekas P., Anderson P. W.: On the ground state properties of the anisotropic triangular antiferromagnet. *Philosophical Magazine* 30 (1974) 423–440.

Penc Karlo

1976

A neutron-szupertükrök elvét Mezei Ferenc vezette be 1976-ban. Ezek a bonyolult multiréteges szerkezetű tükrök neutronok polarizálására vagy nagy hatékonyságú nyalábvezetők kiépítésére használhatók, az első teszttükrök a KFKI-ban készültek. A szupertükrök segítségével átlagosan ötször nagyobb neutronnyaláb-intenzitást lehet a neutronforrásokból a neutronszórásra használt mérőberendezésekben a mintára vezetni. A szupertükrös polarizátorokat és neutronvezetőket a világ 60–70 neutronkutató centrumában használják, és azok 30%-át Magyarországon állították elő, eddig 8 milliárd Ft exportárbevételt hozva.

Mezei Ferenc: Novel polarized neutron devices: supermirror and spin component amplifier. *Comm. on Physics* 1 (1976) 81.

Mezei Ferenc

1979

A szerves molekulákból felépülő kvázi-egydimenziós rendszerek elméleti és kísérleti kutatása, amelyet a szobahőmérsékleten szupravezető anyagok előállításának reménye is hajtott, a múlt század hetvenes éveinek egyik legizgalmasabb területévé vált. Az elméleti kihívást az jelentette, hogy a Cooper-párok keltésével járó szupravezető-instabilitás mellett ugyanolyan erős az elektron-lyuk párok által okozott instabilitás, amely korrelált

szigetelő állapotot eredményezne. Menyhárd Nóra és Sólyom Jenő egy 1973-ban megjelent úttörő cikkükben megmutatták, hogy az egydimenziós kölcsönható elektronrendszerben a kétféle instabilitásra vezető, egymással versengő, a perturbációszámítás magasabb rendjeiben egyre szingulárisabbá váló járulékokat a térelméletből és a fázisátalakulások elméletéből kölcsönzött renormálási eljárással lehet kezelni, ha azt a szilárdtestek elektronrendszerét jellemző körülményeknek megfelelően módosítjuk. Sólyom Jenő korszakalkotó cikke e módszer részletes bemutatását tartalmazta, és a beszédes „g-ology” módszer néven terjedt el. Később Zawadowski Alfréd kezdeményezte az eljárás alkalmazását a mágneses szennyezőket tartalmazó fémek viselkedésének megértésére, és a módszernek a sűrűségmátrixon alapuló változata kiemelt szerepet játszott az egydimenziós mágneses rendszerek tanulmányozásában is. A BME-n és a Wigner FK-ban ma is intenzíven foglalkoznak ilyen módszerekkel vizsgálható problémákkal, mint az általánosított Gibbs-sokaság vizsgálata nemegyensúlyi kvantumrendszerekben, a Wigner-kristály kialakulása szén nanocsövekben vagy a rendezetlen spinláncok tulajdonságai.

Sólyom Jenő: The Fermi Gas Model of One-dimensional Conductors. *Advances in Physics*, 28(2) (1979) 201–303.

Dóra Balázs

1981

Az 1970-es évek közepén indult el a kvázi-egydimenziós anyagok kutatása. Az egyik legfontosabb új jelenség a csúszó töltéssűrűség-hullám- (TSH-) vezetés volt: egy bizonyos kritikus elektromos tér felett az áram gyorsabban nő a feszültséggel, mint az Ohm-törvény diktálná, és ugyanakkor a mintára kapcsolt egyenfeszültség változó áramot is generál. A részben magyar eredetű GZC modell a nemlineáris vezetést elektronok által formált sűrűség-hullámok kollektív viselkedésével magyarázta, amihez hasonló csak a szupravezetőkben valósul meg. A modell választ adott a sűrűség-hullám áramával arányosan növekvő frekvenciájú váltóáramú komponens megjelenésére, és annak frekvenciáját a sűrűség-hullám hullámhosszából vezette le. Ez a modell a TSH-t merev testként kezelte, és a kritikus tér felett számos megfigyelésre magyarázatot adott. Későbbi megfigyelések arra utaltak, hogy a TSH hullámhossza a hely függvényében változik, így a modellt ki kellett terjeszteni, mivel a TSH nem merev, hanem deformálható. A deformációkhoz kapcsolódó memóriaeffektusok, relaxációs folyamatok és frekvenciafüggő vezetési jelenségek közül sokat elsőként vizsgáltak a KFKI-ban működő kutatók. Ez a kísérleti és elméleti kutatókat összefogó csoport szervezte a terület első nemzetközi konferenciáját, rajtuk keresztül egy kelet–nyugat találkozási pont jött létre a világ vezető tudósai számára. A 70-es és 80-as években több Nobel-díjas fizikus emiatt látogatott el Magyarországra olyan kutatók is, akik később Nobel-díjat kaptak. A töltéssűrűség-hullámok kutatása a hazai szilárdtestfizikai kutatások kibontakozásának jelentős állomása volt.

Grüner G., Zawadowski A., Chaikin P.: Nonlinear conductivity and noise due to charge-density-wave depinning. *Phys. Rev. Lett.*, 46 (1981) 511.

Mihály György

1983

Az *ab initio* (elsőelvű) kvantumkémiai számolások eredményeinek értelmezéséhez olyan fogalmakat kell használni, amelyek könnyen megfeleltethetők ismert kémiai fogalmaknak. Ilyen fogalmak az atomok töltése, a kötésrend (egyes, kettős stb. kötés) és az atom vegyértéke a molekulában. Azonban nem mindig egyértelmű ezen mennyiségek definíciója az adott molekulára kapott számítási eredmények függvényében. Mayer István bevezette a töltés operátorát, és jól definiálható fogalmakat vezetett be a kötésrendre és a vegyértékre is. A közlemény kiemelkedően idézett alapművé vált.

Mayer István: Charge, bond order and valence in the *ab initio* SCF theory. *Chemical Physics Letters*, 97 (1983) 270–274.

László István

1986

Az Interkozmosz nemzetközi együttműködés Vega–1 űrszondája történelmet írt, amikor március 6-án magyar részvétellel készült műszerein keresztül először pillanthatta meg ember egy aktív üstökös magját. A kóma mélyén, sűrű porfelhő mögött rejtőző mag megfigyelése lehetővé tette a mag pontos lokalizálását, így az ESA néhány nappal később érkező Giotto űrszondája képes volt az üstökös legmélyébe hatolni és ott méréseket végezni. A Vega szondák irányítását úttörő technológiával a fedélzeti kamerák felvételei alapján végezték. A televíziós rendszer elektronikáját, amelynek egyik mikroszámitógépe az üstökös felismerését és követését, a másik a képfelvételt irányította, a KFKI RMKI munkatársai fejlesztették. Az intézet kutatói tervezték és vezetésükkel készült el a közepes energiájú töltött részecskéket mérő TÜNDE spektrométer is, továbbá a KFKI két intézete jelentősen hozzájárult az alacsonyabb energiájú részecskéket detektáló PLAZMAG berendezés építéséhez is. Az 1986-os Halley-megközelítések eredményeinek a *Nature* folyóirat egy teljes különszámot szentelt. A Vega misszió örökségére építve 2014-ben, a Rosetta program keretében megtörtént az első leszállás egy üstökös mag felszínére; a közeljövőben pedig egy olyan üstököst fogunk meglátogatni, amely korábban még sohasem járt a Nap közelében, ezért változatlan állapotban őrzi a Naprendszer őanyagát. A Vega a magyar űrkutatás első nagy sikere volt, megalapozva a magyar űrfizikusok nemzetközi elfogadottságát, későbbi eredményeiket és sikereiket.

Sagdeev R. Z., Szabó F., et al.: Television observations of comet Halley from Vega spacecraft. *Nature*, 321 (1986) 262.

Németh Zoltán, Tátrallyay Mariella

1987

Az amerikai–brit–holland IRAS infravörös űrtávcső égfelmérése a légköri elnyelés miatt a földfelszínről el-

érhetetlen 12–100 mikrométer közötti távoli infravörös hullámhossztartományban alapjaiban változtatta meg a csillagközi és a csillagok körüli porra vonatkozó addigi ismereteinket. Az IRAS adatbázisa szabadon elérhető volt, de újdonsága miatt komoly kihívás volt az infravörös mérések értelmezése. Balázs Lajos, az MTA Csillagászati Kutatóintézet kutatója Leidenből hozta haza az első IRAS-adatokat, amelyeken kollégáival felfedeztek egy óriási kiterjedésű, mintegy 10 fok átmérőjű gyűrűs szerkezetet a Cepheus csillagkép irányában. Magyarázatauk szerint a gyűrű egy táguló buborék fala, forrása pedig a Cepheus OB2 csillaghalmaz nagy tömegű csillagainak csillagszele, majd szupernóvaként való felrobbanása. Az eredmény jelezte, hogy a magyar csillagászat kilépett a hagyományos optikai tartományból, és kezdte birtokba venni az infravörös, rádió- és gamma-hullámhosszakat is. Ehhez a későbbiekben nagy lökést adott Magyarország együttműködése az Európai Űrügynökséggel, majd 2015-ben a teljes jogú ESA-tagság. Ezután az intézet részesévé vált az ESA Herschel missziójának, megújította az asztroszeizmológiai és csillagaktivitási kutatásokat a Kepler, a TESS, a Cheops méréseivel, sikerrel használja a James Webb-űrtávcsövet, teljes erővel készül a PLATO- és ARIEL-korszakra, aratja a Gaia-program gyümölcszeit, és használja saját nanoműholdját, a GRBAlpha-t.

Kun M., Balázs L. G., Tóth I.: Giant infrared bubble in Cepheus. *Astrophysics and Space Science*, 134(2) (1987) 211–217.

Ábrahám Péter

1991

A kísérleti szilárdtestfizikában mindig alapvető irány az új anyagok előállítása, hiszen azok számos speciális jelenség hordozói. Ilyen az új szén nanoszerkezetek 1990-es években kezdődött kutatása, amelyek szerkezetének alapja az egyrétegű grafit, azaz a grafén. A grafénből gömbfelületet hajtogatva a C₆₀ fullerént kapjuk, egy tengely mentén feltekerve pedig az egyfalú nanocsöveket. Felfedezésüket rövid időn belül két Nobel-díjjal jutalmazták (fullerének: Kroto, Curl és Smalley 1996, grafén: Geim és Novoselov 2010). A fullerének szilárdtest-fizikai jelentősége már 1991-ben egyértelművé vált, amikor a C₆₀ alkálifémekkel képzett sóiban 30 K körül szupravezetést találtak. Ennek az eredménynek a megjelenésekor rendeztek a KFKI-ban egy tudománytörténeti jelentőségű szemináriumot, ahol vegyészek, szerkezetkutató és spektroszkópiai szakemberek ismertették a nemzetközi publikációkból ismert eredményeket, és vették számba az új terület lehetőségeit. Kihhasználva a kutatóhelyek szinergiáit, a kutatás fókuszába főleg a szerkezet új jelenségekhez vezető változtatásai kerültek: a polimerszerkezetű fulleridsók fázisátalakulásai (SZFKI–BME–SUNY Stony Brook), a szén nanocsövek katalitikus növesztése és pásztázó alagútmikroszkópos leképezése (MFA–SZTE–Namuri Egyetem), az optikai vizsgálatokat és alkalmazásokat lehetővé tevő átlátszó nanocsőrétegek (SZFKI – University of Florida), a grafén esetében pedig az atomi pontosságú módszerekkel kivágott félvezető és

mágneses élű grafén nanoszalagok és a nanoméretű grafénfénnyűródések különleges optikai tulajdonságai (MFA). Világszínvonalú infrastrukturális beruházásokkal párosulva (alacsony hőmérsékletű pásztázó alagútmikroszkópia, közeli terű infravörös mikroszkópia), a nagy presztízsű folyóiratokban publikált kutatási eredmények jelentős nemzetközi visszhangot keltettek. A grafén vizsgálatának kiterjesztése a kétdimenziós, atomi vastagságú rétegekből álló anyagok kifejlődéséhez vezetett, amiben a mai napig jelentős szerepet játszanak a magyar kutatók. Szeminárium a szén nanoszerkezetekről. KFKI, 1991.

Kamarás Katalin

1994

Az 1980-as évek nyilvánvalóvá vált, hogy az akkor előállítható legrövidebb lézertény-felvillanások (ún. femtoszekundumos lézerimpulzusok) megkerülhetetlenek az elektronok leggyorsabb mozgásainak vizsgálatában. Az ilyen, a másodperc milliomodrézének a milliárdodrézével összemérhető rövidségű lézerimpulzusokat nagyon nehéz a laboratóriumban kezelni: már 1-2 métert megtéve a levegőben 2-3-szorosra nyúlhat az időtartamuk. Ezt felismerve alkotta meg 1993-ban Krausz Ferenc és Szipőcs Róbert társfeltaláló az ún. fáziskorrigáló lézertükröt (más néven csörpölt tükröt), amit Ferencz Kárpát készített el csillebérci laboratóriumában. Az MTA intézetében készült lézertükrök birtokában végezte el 2001-ben Krausz Ferenc Bécsben világraszóló kísérleteit. Nem túlzás, hogy a hungarikumnak tekinthető új technológiának, a csörpölt tükröknek köszönhetően sikerült megalapozni az attofizika tudományterületét – amelyet aztán a 2023-as fizikai Nobel-díjjal ismertek el.

Szipőcs R., Ferencz K., Spielmann Chr., Krausz F.: Chirped multilayer coatings for broadband dispersion control in femtosecond lasers. *Opt. Lett.*, 19, (1994) 201–203.

Dombi Péter

1995

A kollektív mozgás (flocking) jelensége széles körben megfigyelhető a természetben, a madárrajok szinkronizált repülésétől a halrajok úszásán át, számos állatcsoport vándorlási mintázatáig. A Vicsek Tamás és munkatársai által 1995-ben az „önhajtott szereplők” kollektív mozgásának kvantitatív megértésére kidolgozott modell idővel az önszerveződő szinkronizált mozgások leírásának alaplővé vált. Az ún. Vicsek-modell intuitív képet ajánl annak a megértésére, hogy miként alakulhat ki pusztán lokális interakciókból olyan kollektív viselkedés, „rendezettnek” tűnő makroszkopikus mozgás, amelyet egyébként nehezen tudnánk megérteni, hogy miként lehetséges egy külső irányított vezetés hiányában. A modell nemzetközi sikerét a jelentős nemzetközi visszhang mellett az is jelzi, hogy Vicsek Tamás megkapta a nagy tekintélyű Onsager-díjat. Vicsek Tamás iskolateremtő tevékenységének eredményeképpen jött létre a Biológiai Fizika Tanszék is az ELTE-n, ami világviszonylatban is az első ilyen jellegű tudományos műhely volt. A 25 éve

alapított műhely számos jelentős sikert ért el, mind a biológiamotivált statisztikus fizikai problémák, mind a hálózatzelméleti kutatások terén.

Vicsek T., Czirók A., Ben-Jacob E., Cohen I., Shochet O.: Novel type of phase transition in a system of self-driven particles. *Phys. Rev. Lett.*, 75 (1995) 1226–1229.

Palla Gergely, Szolnoki Attila, Takács Gábor

1996

Napjainkban a hétköznapi életben széles körben alkalmazzák a Gábor Dénes által 1948-ban felfedezett holográfiát. Azonban ezek az alkalmazások elsősorban a látható fény hullámhossztartományába esnek, ami a leképezhető legkisebb objektumok méretét a mikrométeres tartományra korlátozza. A módszernek a nanométer alatti objektumokra, az atomokra való kiterjesztésére közel ötven évig kellett várni. A holográfia alkalmazását atomok leképezésére az MTA Szilárdtestfizikai Kutatóintézetének két kutatója, Tegze Miklós és Faigel Gyula dolgozta ki röntgensugárzás felhasználásával. Az első kísérleti eredményüket 1996-ban mutatták be a *Nature* folyóiratban. A módszert ezután a világ több laboratóriumában is alkalmazták és fejlesztették. Maguk a szerzők is jelentős eredményeket értek el a napjainkig folytatott ilyen irányú kutatásaikban. Az első, közel 2 hónapig tartó mérés a gyakorlati alkalmazás szempontjából túl hosszú volt. Ezt úgy fejlesztették tovább, hogy ma a másodperc milliárdod része százazred részének (10^{-14} sec) ideje alatt tudnak 3D információt kapni egy mintáról. Ez megnyitja az utat fizikai, kémiai és biológiai folyamatokban létrejövő szerkezeti változások követésére. Az így szerzett felismerések különleges minőségű anyagok, jobb gyógyszerek stb. kifejlesztésére vezethetnek. A holográfia története jellemző példa az alapkutatások jelentőségére, és mutatja, hogy azok nem azonnali alkalmazásokhoz vezetnek, de hosszú távon igen nagy hatással vannak hétköznapi életünkre is.

Tegze M., Faigel G.: X-ray holography with atomic resolution. *Nature*, 380 (1996) 49.

Faigel Gyula

1996

A pulzáló változócsillagok – köztük az idős populációhoz tartozó RR Lyrae csillagok – kitűnő asztrofizikai laboratóriumok, és felhasználhatók a Tejútrendszer és extragalaxisok szerkezetének és fejlődésének felderítésére. Ehhez sokszor nagyon fontos kémiai összetételük ismerete is. Jurcsik Johanna és Kovács Géza az MTA Csillagászati Kutatóintézetében 1996-ban olyan módszert dolgozott ki, amellyel lehetőségessé vált RR Lyrae csillagok fizikai paramétereinek, köztük a fémtartalom (a héliumnál nehezebb elemek mennyisége) meghatározása pusztán a csillagok fényváltozása alapján. Ennek jelentősége, hogy elkerülhető az időben és műszerezettségben költséges spektroszkópiai megfigyelés, elég a gyors és nagy tömegben rendelkezésre álló fényességmérési adatokra hagyatkozni. A fénygörbe alakját leíró matematikai (Fourier-)

paraméterekre alapuló módszert többször kalibrálták, és számos csillagra és több égboltfelmérésben (Gaia, Pan-STARRS, ZTF) használják a mai napig. Nemcsak az eredeti képleteket alkalmazzák és idézik rendszeresen azóta is, hanem a formulák különböző modern fotometriai rendszerekre adaptált változatai is elterjedtek. Az eredmény mutatja a HUN-REN CSFK Konkoly-Thege Miklós Csillagászati Intézet (és jogelődjei) világszerte elismert meghatározó szerepét a pulzáló változócsillagok vizsgálata terén.

Jurcsik J., Kovács G.: Determination of [Fe/H] from the light curves of RR Lyrae stars. *Astronomy and Astrophysics*, 312 (1996) 111–120.

Szabó Róbert

1999

Barabási Albert László és Albert Réka 1999-ben javasolták azt a később róluk elnevezett modellt, amely egy lehetséges magyarázatot ad arra, hogy miként alakulhatnak ki nagyon heterogén, ún. skálafüggetlen hálózatok. Ezen hálózatok jellemzője, hogy a csomóponthoz vezető kapcsolatok száma hatványfüggvény-eloszlást követ, azaz a hálózatban kevés olyan csomópont (hub) található, amelynek rendkívül sok kapcsolata van, míg a csomópontok többségének viszonylag kevés a kapcsolata. Ilyen hálózatok széles körben megfigyelhetők természetes, technológiai és társadalmi rendszerekben, beleértve a világhálót és az online közösségeket is. Felismerték azt is, hogy egy ilyen hálózat nem egy statikus struktúra, hanem dinamikus változó szerkezet, aminek döntő hatása van a megfigyelt topológia tulajdonságaira is. Fontos gyakorlati következtetés volt, hogy a skálafüggetlen hálózatok rendkívül ellenállóak a véletlenszerű hibákkal szemben, ugyanakkor rendkívül sebezhetőek a hubok elleni célzott támadásokkal szemben. Az eredmények rendkívül nagy hatást váltottak ki a statisztikus fizikával, illetve alkalmazott matematikával foglalkozók között, és hozzájárultak ahhoz, ahogy a hálózatok kutatása ma már önálló tudományos diszciplínának tekinthető. Barabásit a nemzetközi közösség a terület egyik alapítójának tekinti, amit számos nemzetközi díj is fémjelez. Barabási később az „emberi tevékenységek dinamikáját” vizsgálva rámutatott arra, hogy az emberi tevékenységi mintázatok nem véletlenszerűen oszlanak el az időben, hanem ún. „bursty” dinamikát mutatnak, azaz rövid, intenzív tevékenységi időszakokat hosszú inaktivitási periódusok követnek.

Barabási A.-L., Albert R.: Emergence of scaling in random networks. *Science*, 286, 509–512.

Palla Gergely, Szolnoki Attila, Takács Gábor

2000

A kvark-gluon plazma (QGP) kutatása a CERN SPS gyorsítónál az 1980-as évek végén indult. Nehéz atommagok ütközéseinek megfigyelésével arra keresték a választ, vajon létrejön-e olyan extrém állapot, ahol a kvarkok és gluonok már nincsenek „bezárva” összetett részecskébe, a hadronokba (pl. proton, neutron). A jelentős ha-

zai hozzájárulással épült és működtetett NA49 és más kísérletek eredményei, köztük a keletkezett részecskék termodinamikai egyensúlyt mutató energiaeloszlásai és számarányai, bizonyos konkrét, „ritka” típusú kvarkokat tartalmazó részecskék feldúsulása, valamint a szögeloszlások folyadékdinamikai elven magyarázható egyenletlenségei mind arra utaltak, hogy az ütközések során létrejövő anyag nem a megszokott hadronikus közegeg. Zimányi József a hidrodinamikai és termodinamikai leírásban, Vesztergombi György pedig az SPS-program kereteinek kialakításában és az NA49 kísérlet vezetésében játszott meghatározó szerepet; a magyar csoportok pedig számos kulcsfontosságú berendezés megépítésén és működtetésén dolgoztak, kiértékelési eljárások fejlesztésében vettek részt. 2000-ben a CERN bejelentette, hogy „az anyag új állapota jött létre”, de igazán erős bizonyítékokat a Brookhaveni Nemzeti Laboratórium RHIC gyorsítója szolgáltatott, ahol lényegesen nagyobb energiákon tanulmányozták az aranyatommagok ütközéseit. A javarészt Vesztergombi György és Zimányi József kezdeményezésére magyar részvétellel működő kísérletek (PHOBOS, PHENIX, később STAR) 2005-re olyan új jelenségeket azonosítottak, amelyek a QGP egyértelmű ismérvei: a nagy energiájú hadronok elnyomása (jet quenching), a direkt fotonok jelenléte, valamint az elliptikus anizotropia és kvarkszám szerinti skálázási tulajdonságai. Ezek kimutatták, hogy ez az új anyag erősen kölcsönható, és szinte ideális folyadékként viselkedik, nagyon alacsony viszkozitással. A CERN LHC-nél a hangsúlyos magyar részvétellel működő CMS és ALICE kísérletek tovább erősítették ezeket az eredményeket, még magasabb hőmérsékleten és sűrűségeen vizsgálva a QGP-t.

PHOBOS Collaboration: The PHOBOS perspective on discoveries at RHIC. *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 28–101.

PHENIX Collaboration: Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration. *Nucl. Phys. A* 757 (2005) 184–283.

Csanád Máté, Veres Gábor

2002

Az 1990-es évekig nem volt intenzív sugárforrás a mikrohullámú és infravörös tartomány közötti terahertzes tartományban ($1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$). Abban az évtizedben jelentek meg az ultrarövid impulzusú (piko- és femtoszekundumos) lézerek alapuló terahertzes impulzuselőállítás módszerek, így az ún. optikai egyenirányítás is. A Pécsi Tudományegyetem fizikusai 2002-es cikkükben egy radikálisan új, ún. döntött impulzusfrontú terahertzes sugárzást előállításra tették javaslatot, amellyel sokkal hatékonyabbá vált a terahertzes sugárzás előállítása. Az elrendezés lényege, hogy a kiterjedt lézernyalábban a terahertzes impulzust keltő impulzusfront szokatlan módon nem merőleges a lézernyaláb haladási irányára, és emiatt a keltett sugárzás más irányban terjed mint a lézernyaláb. Ez a szintén hungarikumnak te-

kinthető, forradalmian új eljárás kiemelkedően fontos módszer lett a nagyenergiájú terahertzes impulzusok előállítására. A módszer segítségével a korábban optikai egyenirányítással előállított terahertzes impulzusok energiáját százmilliószorosan lehetett megnövelni. Ma világszerte e módszert alkalmazzák legelterjedtebben nagy energiájú terahertzes impulzusok előállítására számos anyagvizsgálati és részecskegyorsítási alkalmazásban.

Hebling János, Almási Gábor, Kozma Ida, Kuhl Jürgen: Velocity matching by pulse-front tilting for large-area THz-pulse generation. *Optics Express*, 10 (2002) 1160.

Almási Gábor

2007

Az MTA Konkoly-Thege Csillagászati Intézetében kezdeményezett, majd a magyarországi Fornax 2002 Kft.-vel megépített HATNet (Hungarian-made Automated Telescope Network) távcsőhálózat sikeresen megfigyelte az ADS 16402 kettőscsillagrendszerben egy addig ismeretlen exobolygó átvonulását az egyik csillag korongja előtt. Az Arizonában és Hawaiiin működő távcsövek méréseit Bakos Gáspár, a program vezetője, ekkor már a Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics kutatójaként irányította. A felfedezett bolygó, a HAT-P-1b tömege $0,53 M_{\text{Jupiter}}$, de a sugara ($1,36 R_{\text{Jupiter}}$) jóval nagyobb az előzetesen várt értéknél, az egyik első példát szolgáltatva az ún. felfúvódott forró jupiterekre. Mind az alacsony sűrűség, mind a kettős rendszerbeli környezet alapvető kérdéseket vetett fel a bolygókeletkezéssel kapcsolatban. A felfedezés demonstrálta, hogy lehetséges kisebb méretű robotikus távcsövekkel nagyon pontos bolygótranszit-megfigyeléseket végezni, intelligens algoritmusok felhasználásával. A sikerben fontos szerepe volt a TFA trendkorrekciónak, illetve a box-fitting tranzitkereső algoritmusnak, amelyeket a Csillagászati Intézetben Ko-

vács Géza fejlesztett ki. A későbbiekben a HATNet nagy számban fedezett fel exobolygókat, és a nemzetközi földfelszíni exobolygó-kutatások egyik legfontosabb projektjévé vált.

Bakos G. Á., Noyes R. W., Kovács G., et al.: A large-radius, low-density exoplanet transiting one member of a stellar binary. *The Astrophysical Journal*, 656(1) 552.

Ábrahám Péter

2011

A fotoakusztikus spektroszkópia a fényabszorpció és a hanghullámkeltés közti fizikai kapcsolatot használja ki akár kis koncentrációjú gázkomponensek in-situ detektálására. Az eljárás lényege, hogy a mintába juttatott modulált fény elnyelődése hőmérséklet-ingadozást, ez pedig periodikus nyomásváltozást okoz, amely mikrofon vagy akusztikus rezonátor segítségével detektálható. A Szegedi Tudományegyetemen működő kutatócsoport az 1990-es évektől kezdve kiemelkedő szerepet játszott a módszer fejlesztésében: a diódlézer- és kvantumkaskád lézer-alapú eszközökkel akkor is detektálható egy molekula, ha a gázelegynek csak egymilliárdod részét teszi ki. Az eljárás ipari és környezetvédelmi alkalmazásai sokrétűek: többek között gépjárművek emissziójának elemzésére, kémiai gyártófolyamatok valós idejű monitorozására vagy mezőgazdasági eredetű gázok kibocsátásának nyomon követésére is használható. A Szegeden épített fotoakusztikus mérőrendszereket széles körben használják a földgáziparban és pl. utasszállító repülőgépek csomagterébe is telepítették azokat. Legújabb kutatásaik célja a fotoakusztikus rendszerek továbbfejlesztése akusztikus, illetve optikai metaanyagok alkalmazásával.

Bozóki Z., Pogány A., Szabó G.: Photoacoustic instruments for practical applications: present, potentials, and future challenges. *Applied Spectroscopy Reviews*, 46 (2011) 1–37.

Bozóki Zoltán



LÁGY ANYAGOK A FIZIKÁBAN – BEVEZETŐ

Salamon Péter

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

E-mail: salamon.peter@wigner.hun-ren.hu

A Nobel-díjas fizikus, Pierre-Gilles de Gennes szerint [1] a lágy anyagok (angolul *soft matter*) kategóriájába soroláshoz két fő tulajdonság szükséges: a komplexitás és a rugalmasság. A lágy anyagok egy nagyon tág csoportosítása azon kondenzált anyagoknak, melyek a szilárd kristályokhoz képest sokkal könnyebben deformálhatók, azaz a jellemző rugalmas modulusuk több nagyságrenddel kisebb, körülbelül MPa alatti. Ide sorolják a nyírási sebességgel növekvő vagy csökkenő viszkozitású nem newtoni komplex folyadékokat és azokat, melyek a viszkozus folyási képességük mellett rugalmas tulajdonságokkal is rendelkeznek, azaz viszkoelasztikusak.

A lágy anyagok érdekes példái a többfázisú rendszerek: a szuszpenziók, kolloidok (folyadék-szilárd), emulziók (folyadék-folyadék), habok (folyadék-gáz) és a szemcsés anyagok (gáz-szilárd). További példák az óriásmolekulájú anyagok, polimerolvadékok vagy oldatok, biológiai rendszerek. Ide sorolhatók a könnyen deformálható térhálós szerkezettel rendelkező makromolekuláris anyagok, az elasztomerek, gumik is.

Tipikus lágy anyagok a folyadékkristályok, melyek skálája számos különböző szerkezetű fázison át az egyszerű molekuláris irányrendezettséggel rendelkező anizotrop folyadéktól a bonyolult szerkezetű gél állagú anyagokig terjed. A lágy anyagok gyakran befolyásolhatók elektromos, mágneses mezőkkel vagy fénnel, rezponzivitásukat a gyakorlatban alkalmazzák, például elektrooptikai eszközökben, kijelzőkben, aktuátorokban vagy szenzorokban. Vizsgálatuk sokszor inter- vagy multidiszciplináris megközelítést igényel, mivel a viselkedésük megértéséhez nem elég a fizika eszköztára, hanem kémiai, esetleg biológiai szakértelem is szükséges. Gyakran kis energiákkal, akár termikusan gerjeszthetők, és sok esetben nemlineáris viselkedés, mintázatképződés figyelhető meg bennük.

A *Fizikai Szemle* aktuális számának egyik fő témája a lágy anyagok fizikája. Szerzőink cikkeit a következőkben szemléljük.



Salamon Péter a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. Aktívan kutatott területei: lágy anyagok, a folyadékkristályok fizikája, nemlineáris jelenségek, mintázatképződés, topológiai defektusok, reológia és mikrofluidika anizotrop komplex rendszerekben.

Szomor Zsombor, Bereczki Dóra és Fürjes Péter cikkében betekintést nyerhetünk a mikrofluidikai rendszerek, pontosabban a csepp alapú mikrofluidika világába, mely a lágy anyagok egy fontos osztályával, az emulziókkal kapcsolatos. A szerzők közérthetően bemutatják a kétfázisú folyadékkrendszerek mikroszatomnában történő áramlásának érdekes jelenségeit, és megtudhatjuk, hogy hogyan valósítható meg a monodiszperz mikrocseppek sorozatgyártása. A cikk kitér a mikrofluidikai rendszerek, chippek fő élettani vonatkozású alkalmazási területeire, melyek a téma kiemelt fontosságát adják.

Salamon Péter és Máthé Marcell Tibor cikke bemutatja a nemrég felfedezett ferroelektromos nematikus folyadékkristály-fázist és annak különleges tulajdonságait. Megtudhatjuk, hogy a molekuláris rendezettségéhez csatolt spontán elektromos polarizációval rendelkező folyadék felülete hogyan válik fraktálössé és labirintusszerűvé elektromos mezőben. Kiderül a cikkből, hogy a ferroelektromos nematikus cseppecskék milyen körülmények között viselkednek a rajzó rovarokhoz hasonlóan, és hogy mi köze van ennek a piezoelektromossághoz.

Jákli Antal írása a folyadékkristály-alapú elasztomerek, gumik új típusát mutatja be, melyek alacsony feszültség hatására is képesek jelentős mértékű alakváltozást mutatni. A cikkből kiderül, hogy hogyan lehet a folyékony folyadékkristályokra jellemző molekuláris irányrendezettséget csatolni egy lágy gumi mechanikai tulajdonságaihoz, aminek következtében az anyag alakváltozást szenved elektromos mező, vagy hőmérsékleti hatások jelenlétében. Megismerhetjük a trükköt, ami a néhány volt hatására létrejövő alakváltozást teszi lehetővé, illetve azt, hogy ezen anyagok miként használhatók hajlításszenzorokként és szárazelemekben.

Végül Börzsönyi Tamás és Somfai Ellák cikkéből megtudhatjuk, hogy miben különbözik a folyadékok és a szemcsés anyagok folyása. A szerzők bemutatják, hogy milyen módon lehet jellemezni numerikus szimulációkkal és kísérletekkel a szemcsés anyagok nyírását és kitérnek a szemcsék alakjának fontosságára, melytől függően a nyírás hatására irányrendezetség alakul ki az anyagban. A cikkből kiderül, hogy egy siló alsó nyílásán kifolyó szemcsék esetén milyen paraméterek befolyásolják a dugulás valószínűségét, és választ kaphatunk a címben feltett kérdésre, hogy mi folyik gyorsabban: a rizs, a lencse vagy a borsó.

Irodalom

1. Pierre-Gilles de Gennes: Soft Matter. *Nobel Lecture*, December 9, 1991.

CSEPPEK MIKROFLUIDIKAI RENDSZEREKBEN

Szomor Zsombor^{1,2}, Bereczki Dóra^{1,2}, Fűrjes Péter^{1,*}

¹HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont, Budapest; ²Óbudai Egyetem ATDI, Budapest

*E-mail: furjes.peter@ek.hun-ren.hu

Mikrofluidikai rendszerek

Napjainkban az anyagtudomány, az elektronika, az optika, valamint a biológia, az orvostechika és a farmakológia közötti tudományos határvonalak egyre inkább elmosódnak. A mikrotechnológiában elért figyelemre méltó tudományos eredmények és az ennek köszönhető egyre komplexebb és merészebb mérnöki megoldásokon alapuló mikrorendszerek nagyban hozzájárulnak az orvosi diagnosztika, vagy akár gyógyszerhatóanyag-fejlesztés és -tesztelés területén tapasztalható paradigmaváltáshoz. A betegágy melletti (point-of-care, POC) diagnosztikai tesztek gyors ütemben terjednek, köszönhetően a mikroelektromechanikai rendszerek (micro-electromechanical systems, MEMS) – ezen belül is a biokémiai érzékelők és a mikrofluidikai rendszerek – folyamatos fejlődésének. A chipméretben adaptált detektálási módszerek teljesítőképességének (érzékenysége, specifikitása, áteresztőképessége) javulása lehetővé teszi, hogy a kompakt POC diagnosztika a nagylaboratóriumi eszközökön alapuló megoldások versenytársává váljon. A modern, miniatürizáción alapuló eszközök fejlesztése során természetesen elengedhetetlen a mikroszkopikus mérettartományokban lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok alaposabb megértése, és tervezése. A mikro- vagy akár nanoskálás jelenségek részletes, kísérleti feltérképezésében szintén nagy segítséget nyújtanak a MEMS technológiák alkalmazásával megvalósítható mikrorendszerek. A funkcionális tervezést pedig egyre nagyobb teljesítményű, végelem-módszereken (finite element method, FEM) alapuló modellek támogatják.

A folyadékok mikroszkopikus méretű környezetben történő manipulációját és elemzését megvalósító – speciális geometriával rendelkező csatornákat, kamrákat tartalmazó – áramlási rendszereket mikrofluidikai eszközöknek nevezzük. Ez a tudományterület meglehetősen új, és a kapcsolódó alkalmazások interdiszciplináris jellege miatt különösen nagy kihívást jelent a tapasztalható kapcsolt fizikai és kémiai folyamatok követése és megértése. Az ilyen mérettartományokban játszódó jelen-

ségek gyakran különböznek a makroszkopikus világban megfigyelhetőktől. A mikrofluidikai rendszerek esetén különös figyelem irányul a folyadékok és a – főképpen a sejtméretekre jellemző 2–20 μm átmérőtartományba eső – részecskés szuszpenziók viselkedésének tanulmányozására, különösen akkor, ha ezek diagnosztikai célokra használt biológiai minták kezelésével kapcsolatosak. Az ilyen rendszerek alkalmazásának egyik legfontosabb területe az orvosi diagnosztika, ahol ezek a minimális mennyiségű (20–100 μl) vérből és más testfolyadékokból végzett elemzések mintaszállító és -előkészítő eszközei – lab-on-a-chip [1].

Ezenkívül kiemelt figyelmet érdemel a sejt kultúrák, szövetek kezelése is, amely az élő sejtek manipulációját, lokalizálását, illetve azok tápfolyadékkal való ellátását, gyógyszerhatóanyaggal való kezelését, valamint élettani vizsgálatát is megoldja – organ-on-chip [2, 3]. Az ilyen mikrorendszerek lehetővé teszik akár egyetlen sejt izolálását is, amit egy számára kialakított, speciális kémiai mikrokörnyezetben lehet tanulmányozni – például célzott gyógyszerhatóanyag-vizsgálatok során.

Áramlási mintázatok a mikrofluidikában

A mikrofluidikai rendszerekben tapasztalható áramlási mintázatok alapján érdemes elkülöníteni az egyfázisú folytonos és a fázishatárokkal elválasztott több fázisú, cseppező áramlásokat. A folytonos mikrofluidikai rendszerek esetén a folyadékáramok párhuzamos áramlása figyelhető meg, ahol az áramlás lamináris, vagyis réteges, és a különböző folyadékok jórészt a határfelületükön,



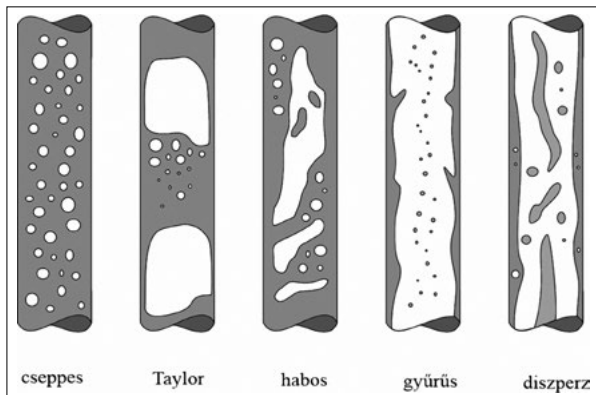
Bereczki Dóra a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki Karán szerzett MSc végzettséget vegyészmérnök szakon. Jelenleg az Óbudai Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Doktori Programjának hallgatója, kutatási tevékenységét a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (EK-MFA) Mikrorendszerek Laboratóriumában végzi, ahol mikrofluidikai alapú sejtanalitikai és gyógyszerhatóanyag-vizsgálati platformok, lab-on-a-chip rendszerek kutatásával foglalkozik.



Szomor Zsombor a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Villamosmérnöki Karán szerzett MSc végzettséget egészségügyi mérnök szakon. Jelenleg az Óbudai Egyetem Anyagtudományi és Technológiai Doktori Programjának hallgatója, kutatási tevékenységét a HUN-REN Energiatudományi Kutatóközpont (EK-MFA) Mikrorendszerek Laboratóriumában végzi, ahol cseppező mikrofluidikai alapú sejtanalitikai alkalmazások fejlesztésén és mikroáramlási jelenségek számítógépes áramlástanai modellezésén dolgozik.



Fűrjes Péter a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem mérnök-fizikus és MBA szakán végzett, majd fizika tudományterületen szerzett PhD-fokozatot. Fő kutatási területe komplex mikrorendszerek – BioMEMS, lab-on-a-chip, organ-on-chip eszközök – fejlesztése analitikai, orvosi diagnosztikai, terápia-monitorozási alkalmazásokhoz. A HUN-REN Energiatudományi kutatóközpont (EK-MFA) Mikrorendszerek Laboratóriumának vezetője, a BME címzetes egyetemi docense. Eurosensors Fellow, a Eurosensors konferenciák irányító testületének tagja, az Európai Nanoelektronikai Társaság (AENEAS) tudományos bizottságának és az Xecs-Eureka klaszter műszaki szakértő csoportjának tagja.



1. ábra. A főbb áramlási típusok kétfázisú mikrofluidikai rendszerekben [5]

diffúzió útján keverednek [4]. Ezzel szemben a cseppek mikrofluidika a különálló, zárt fázistér fogatokat alkotó folyadékcsseppek kezelésére specializálódik.

Az áramlási csatornában különféle geometriai és áramlási körülmények között kialakuló kétfázisú áramlások legjellemzőbb típusait az 1. ábra mutatja. Cseppek (vagy buborékos) áramlás esetén a diszperz fázis apróbb cseppekként oszlik el a folytonos közegben, amelyek mérete jelentősen kisebb a csatorna átmérőjénél. A Taylor (avagy dugós) áramlásban a diszperz fázis olyan nagyobb, henger alakú buborékokat képez, melyek kitöltik a csatorna keresztmetszetét, ezzel időszakosan megszakítva az elsődleges fázis folytonosságát. A Taylor-áramlás módosulásával megjelennek kisebb cseppek a nagyobb buborékok mögött, ami a habosodó áramlás jellemzője. Ez pedig továbbvezethet a habos áramláshoz, ahol ezek a kisebb cseppek összeolvadnak, sűrű, buborékokból álló habot hozva létre. A hártás áramlásban a két fázis nem válik szét cseppekre, hanem egymással párhuzamosan, megszakítás nélkül áramlik végig a csatornában. Ennek egyik speciális esete a gyűrűs áramlás, amikor a másodlagos fázis a csatorna középvonalában halad, miközben a folytonos fázis teljesen körülveszi azt, így egyfajta gyűrűs szerkezetet létrehozva. Végezetül a diszperz áramlás esetén a kisebb buborékok vagy cseppek a folytonos fázisban lebegnek, de nem képeznek jól elkülönülő struktúrákat.

Mikrofluidikai rendszerek alkalmazásával a kialakuló mintázat, illetve a cseppek mérete a geometriai és áramlási paraméterekkel kontrolálható, mozgatusuk során nem változik, így akár pontosan meghatározott térfogatú mikroreaktor-tartályok hozhatók létre, amelyek lehetővé teszik a kémiai reakciók precíz kivitelezését, a folyadékok elemzését és ezzel nagymértékben párhuzamosított laboratóriumi vizsgálatok végrehajtását a lab-on-a-chip rendszerekben.

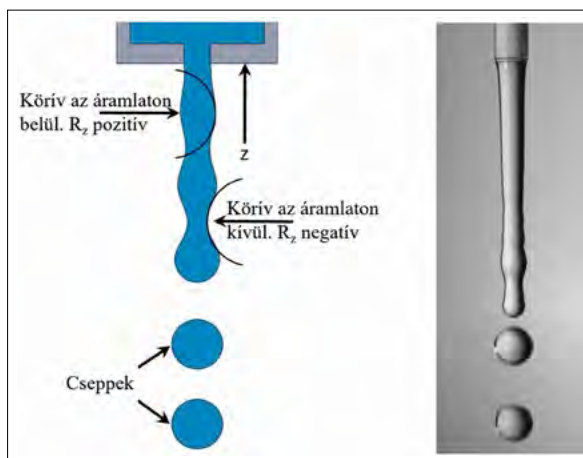
A cseppképződés folyamata

A cseppek folytonos áramlásból való kialakulásának, leválásának jelensége a Laplace-nyomásnak tulajdonítható, amely a görbült felületek által eredményezett nyomáskülönbségből ered. Ezt a nyomáskülönbséget a felületi

feszültség hozza létre [6], és annak mértéke a Young-Laplace-egyenlet (1) segítségével határozható meg:

$$\Delta P = P_{\text{belső}} - P_{\text{külső}} = \gamma (2/R_z), \quad (1)$$

ahol ΔP a nyomáskülönbség, $P_{\text{belső}}$ a belső, $P_{\text{külső}}$ a külső felületen kialakuló nyomás, valamint R_z a felület görbületi sugara és γ a felületi feszültség. A Young-Laplace-egyenlet rávilágít arra, hogy a folyadéksugár szűkületeinél (a hullám mélypontjain) a felületi feszültség elősegíti az keresztmetszet csökkenését, míg a tágulati helyeken a cseppek kialakulását, a folyadéknak befűződését. Csepp alakban kisebb érintkezési felület alakul ki a fázisok között, ami energetikailag kedvezőbb állapotot eredményez. Ez magyarázza, miért csöpög a csap, miért bomlanak szét cseppekre a zuhanyrózsából kilépő vízsugarak. Kezdetben a folyadéksugár sima, de ahogy távolodik a csaptól, kis perturbációk jelennek meg, amelyek hullámokként terjednek. Végül a sugár megszakad, és vízcseppeket formál. Ez jelenség a Plateau-Rayleigh-instabilitás, amely a folyadékáram cseppekre történő szétválását magyarázza [7]. A jelenséget a 2. ábra szemlélteti.

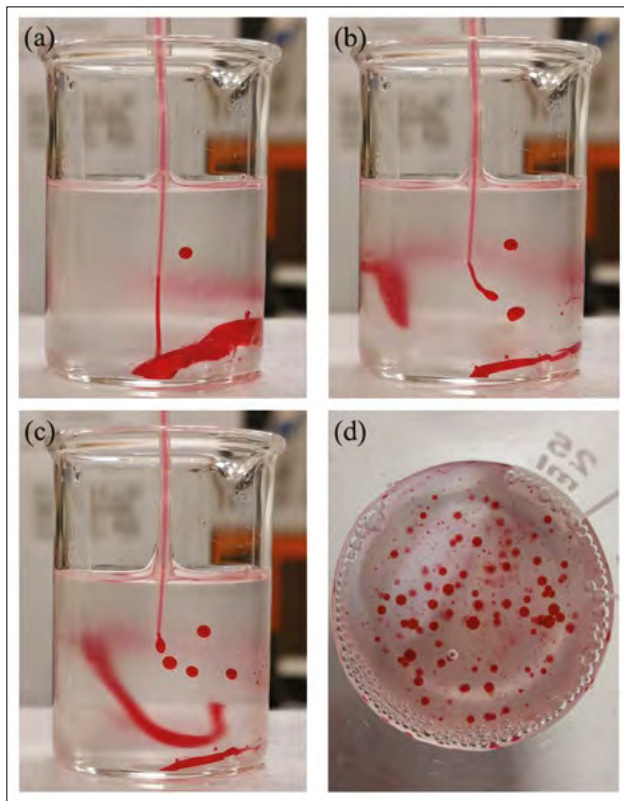


2. ábra. A Plateau-Rayleigh-instabilitás. A folyadéksugár felületén kialakuló kis zavarok vagy perturbációk hullámformában terjednek a sugár mentén. Az instabilitás akkor válik hatékonnyá, ha a hullámok (szinuszos komponenseinek) hullámhossza nagyobb, mint a folyadéksugár kerülete

A csepp leválása előtt egy nyak képződik, amelynek átmérőjében a Plateau-Rayleigh-instabilitás következtében oszcilláció alakul ki, ezt kapilláris hullámnak nevezzük. A kapilláris hullámok a két fázis közötti határfelületen alakulnak ki, és kizárólag a felületi feszültség befolyásolja őket. A hullám amplitúdója növekszik az áramlás irányában, és a határfelületen a sebessége megközelíti a folyadék sebességét. A Plateau-Rayleigh-instabilitás egy egyszerű kísérlettel is bemutatható, ahol felületaktív összetevővel stabilizált szilikonolajban ételfestékkel színezett vízcseppeket hozunk létre folyamatos keverés mellett. Ezt a kísérletet a 3. ábra mutatja be.

Az áramlásokat jellemző paraméterek

A mikrofluidikai rendszerek egyik fő sajátossága, hogy a kis karakterisztikus méretek miatt a felületi és viszkozus



3. ábra. A Plateau–Rayleigh-instabilitás demonstrációja a laboratórium-ban: (ételfestékekkel színezett) vízcseppek leszakadása a folyadéksugárról forgó, kevertetett szilikon olajban. Az olajhoz felületaktív molekulákat keverve stabil emulzió alakítható ki

erők dominálnak. Ennek következtében folytonos áramlási rendszerekben többnyire lamináris áramlás alakul ki, amely a folyadékrétegek párhuzamos, egymást nem keresztező elmozdulásával jellemezhető. Az áramlás általános tulajdonságainak leírására számos dimenziómentes hasonlósági mérőszám használható. A Reynolds-szám, Re (2) a tehetetlenségi és viszkozus erők arányát, a közeg belső sűrűdési tulajdonságait jellemző paraméter, ami a folyadékok kinematikai viselkedését írja le. Magas Reynolds-szám esetén (csőben általában ~ 2000 felett) turbulens áramlásról beszélünk, amikor a kinematikai jellemzők lokálisan is gyorsan (és kaotikusan) változnak. A Reynolds-szám alacsony értékeinél (~ 10 alatt) az áramlás lamináris marad – mikrofluidikai rendszerekben ez az érték általában nem haladja meg az 1-et. A következő képlettel írható fel [8]:

$$Re = \rho v L / \mu, \quad (2)$$

ahol ρ a folyadék sűrűsége, v az (átlagos) áramlási sebesség, μ a folyadék dinamikai viszkozitása, L pedig a jellemző karakterisztikus méret, ami áramlási csövek esetén az átmérő.

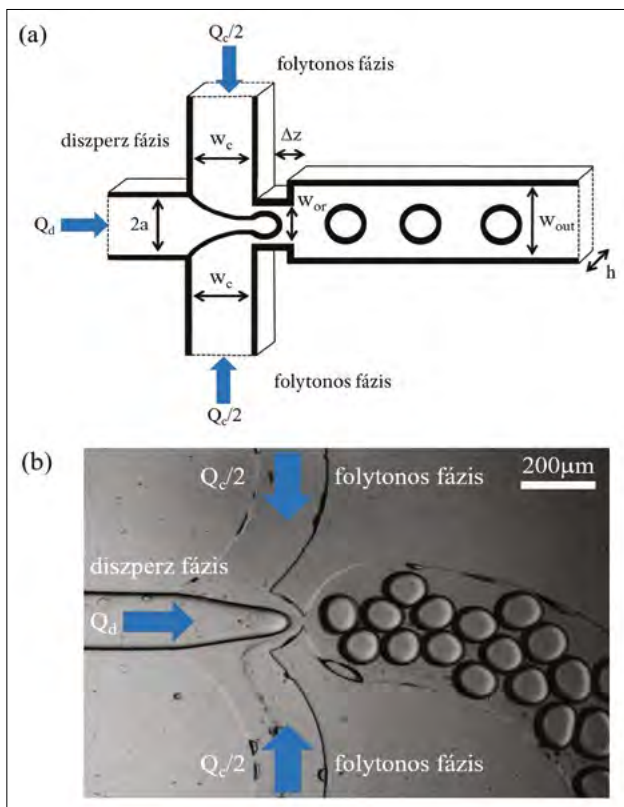
A kapilláriszám, Ca (3) a felületi feszültség és a viszkozus erők közötti kapcsolatot írja le. Ezen kívül magában foglalja a geometria, az áramlási sebesség és a felületi feszültség összefüggéseit is, így változásával egy mikrofluidikai rendszer viselkedése jól jellemezhető [9].

$$Ca = \frac{\mu_c a \Delta U}{\gamma \Delta z} = \frac{\mu_c Q_c a}{\gamma h \Delta z} \left(\frac{1}{w_{or}} - \frac{1}{2w_c} \right), \quad (3)$$

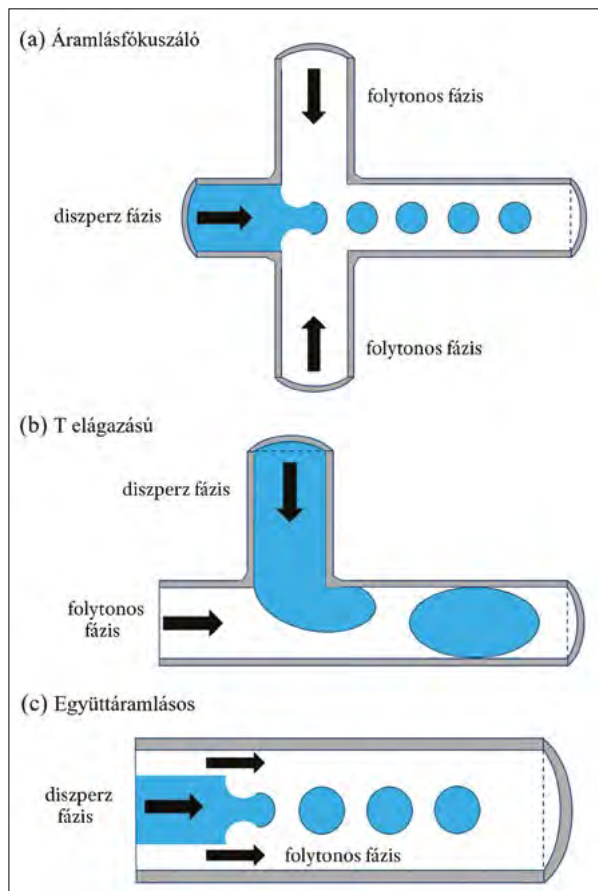
ahol μ_c a folytonos fázis dinamikai viszkozitása, a a diszpergált fázis beömlő csatornaszélességének fele, γ a két fázis közötti határfelületi feszültség, $\Delta U / \Delta z$ a szűkültre vonatkozó effektív alakváltozási sebesség, Q_c a folytonos fázis térfogatárama, h a csatorna magassága, Δz a diszpergált fázis csatornakimenete és a szűkület közti távolság, w_{or} a szűkület keresztmetszeti szélessége, w_c pedig a folytonos fázis bemeneti csatornáinak szélessége, ahogy azt a 4. ábra mutatja.

A kétfázisú áramlási rendszer ilyen leírásával a hidrodinamikai paraméterek cseppképződésre gyakorolt hatása is elemezhető. Ha a kapilláriszám alacsony, vagyis a felületi feszültség hatása dominál, akkor kisebb cseppek képződnek, mivel a felületi feszültség stabilizálja a folyadék határfelületét. Magasabb kapilláriszám esetén viszont a viszkozus erők dominálnak, ami nagyobb cseppek kialakulását eredményezheti. A térfogatáram növelése vagy a csatorna geometriájának (pl. keresztmetszetének) módosítása közvetlenül befolyásolja a kapilláriszámot, így ezen paraméterek segítségével szabályozható a cseppképződési dinamika: a cseppek mérete és kialakulási frekvenciája is.

Amint azt a kapilláriszám elemzése során is kiemeltük, a mikrofluidikai rendszerekben a cseppképződési folyamatot nagymértékben meghatározza a csatorna kialakítása, geometriája. Az 5. ábra a leggyakoribb cseppgenerálásra alkalmas csatornatípusokat mutatja be,



4. ábra. A kapilláriszám kiszámításához figyelembe vett paraméterek (a) és a cseppgenerálás folyamata mikrofluidikai rendszerben (b)



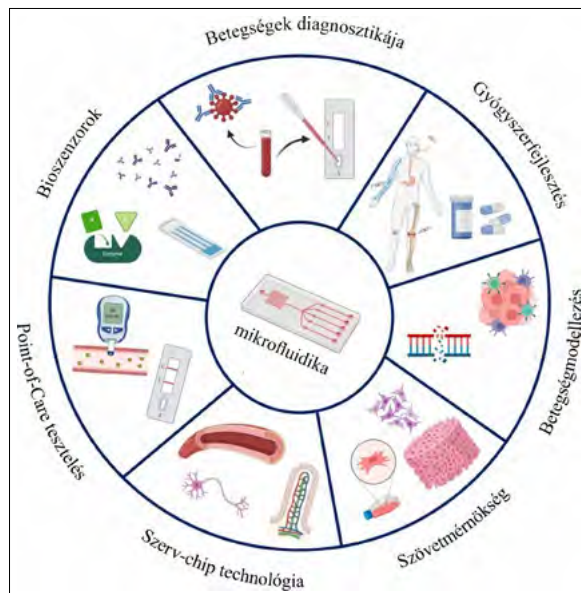
5. ábra. A legelterjedtebb, cseppgenerálásra alkalmas csatornatípusok mikrofluidikai rendszerekben: (a) áramlásfókuszáló, (b) T elágazású, (c) együttáramlásos [10]

amelyeknél a geometriai paraméterek jelentősen befolyásolhatják a kapilláriszám értékét és ezen keresztül a cseppek méretét, keletkezési gyakoriságát is.

Az áramlásfókuszáló (5a. ábra) elrendezés egy mikrofluidikai rendszerekben gyakran alkalmazott konstrukció, ahol a diszperz közeg a központi csatornán érkezik, és két oldalról a folytonos fázis áramlik hozzá. A cseppek ebben a találkozási zónában képződnek, és méretük szabályozható az áramlási sebességek arányával, vagy a diszperz fázis nyomásának változtatásával. Szintén széles körben használt a T elágazású csatorna (5b. ábra), ahol a két fázis különböző irányból csatlakozik a kimeneti csatornába: az egyik megoldás szerint a folytonos fázis vízszintesen áramlik, míg a diszperz fázis merőlegesen érkezik – létezik azonban fordított konfiguráció is. Az együttáramlásos (5c. ábra) rendszerben a diszperz fázis egy kapillárison keresztül jut be a folytonos fázisba, és a cseppek vagy a kapilláris szájánál, vagy annak belsejében, a hordozó közegben képződnek.

A cseppek mikrofluidikai rendszerek alkalmazásai

A mikrofluidikai rendszerek élettani vonatkozású felhasználási területe a bioszenzorokon alapuló diagnosztikától a sejt- és szövetvizsgálati platformokon át a betegségmodellek elemzéséig és a gyógyszerhatóanyagok teszteléséig, fejlesztéséig terjed, ahogy azt a 6. ábra mutatja.



6. ábra. A mikrofluidikai rendszerek fő élettani vonatkozású alkalmazási területei napjainkban [11]

Ezek között a cseppeket – mint zárt kémiai mikro-környezetet – hasznosító talán legjelentősebb megoldást a sejtek nagy áteresztőképességű vizsgálatát lehetővé tevő analitikai platformok jelentik, ahol a többfázisú mikrofluidikai rendszerben elérhető cseppméret különösen előnyös az egyedi sejt szintjén végzett célzott hatóanyag-elemzések szempontjából.

Ahhoz, hogy a sejteket tanulmányozhassuk, a megfelelő konténerben kell elhelyezni, majd le kell lassítani és csapdába kell ejteni azokat. A cseppgenerálás dinamikájával, illetve a cseppek és a bennük elhelyezett sejtek csapdázásával és válogatásával több kutatócsoport is foglalkozott az elmúlt években, aktív és passzív megoldásokat is alkalmazva [12]. Az aktív csapdázási és válogatási módszerek alapulhatnak optikai vagy akusztikus jelenségeken, de elektroforetikus és magnetofoforetikus erők hasznosításán is. A passzív módszereket alkalmazó megoldások a mikrofluidikai csatornarendszerek komplex geometriai szerkezetén alapulnak, kiaknázva a speciális mikroszkopikus alakzatok (konténerek, kapillárisok vagy periodikus oszloprendszerek) környezetében kialakuló lokális hidrodinamikai erőket. Ezek a passzív, hidrodinamikai jelenségeken alapuló módszerek megbízhatóbbnak bizonyulnak olyan körülmények között, ahol az állandó külső energiaellátás nehézkes lenne.

A cseppkonténerek befogása után különböző vizsgálatok végrehajtására nyílik lehetőség, például megfigyelhetjük a sejtek kémiai behatásokra adott élettani válaszait, vagy elemezhetjük mikrokémiai reakcióikat [13]. Ekkor egy-egy csepp egy-egy mikrométerű reaktortér fogatnak felel meg, ezáltal jelentősen csökkentve a felhasznált reagensek mennyiségét, a kísérletek sebességének és párhuzamosíthatóságának javulása mellett.

A cseppek mikrofluidikai rendszerek olyan alkalmazási területei, ahol a létrehozott cseppek kémiai mikroreaktorként vagy sejtkonténerként szolgálnak, különleges figyelmet érdemelnek. Ezek a mikrorendszerek jelenthetik napjainkban az egyik leghatékonyabb eszközt a sejtpopulációk funkcionális viselkedésének nagy hatékonysággal és sebességgel történő vizsgálatára [14]. A cseppek belsejében kialakított, tervezett kémiai összetételű mesterséges mikrokörnyezet lehetőséget nyújt arra, hogy egyedi sejtek válaszreakcióit tanulmányozzuk, így sejtszintű megfigyelések végezhetők. Ezekben az *in vitro* sejtvizsgálati platformokban a mikrofluidikai rendszer biztosítja a tápfolyadék és a vizsgálandó hatóanyagok kontrollált bejuttatását, cseréjét, illetve esetenként integrált érzékelőrendszerek segítségével a sejtek élettani vizsgálatát is. A sejtek elszigetelése és zárt mikrotérfogatban történő csapdázása révén a kutatók megfigyelhetik és elemezhetik viselkedésüket, ideértve a sejtnövekedést, az ingerekre adott válaszokat, valamint az egymással vagy kémiai reagensekkel való kölcsönhatásokat.

A mikrofluidikai rendszerekben, így a cseppeken belül zajló fizikai és kémiai folyamatok megértéséhez, előzetes tervezéséhez és hatékonyabbá tételéhez egyre fontosabb a számítógépes szimuláció alkalmazása. Kutatócsoportunk munkájának fontos részét képezi a folyadékdinamikai jelenségek modellezése és elemzése, mely segítségével választ kaphatunk arra, hogyan lehet a mikrocsontrák geometriáját, az áramlási sebességeket és az alkalmazott anyagok tulajdonságait úgy összehangolni, hogy a cseppek belsejében előre tervezett kémiai összetétel alakuljon ki. Ez a mikrokörnyezet biztosítja az oldott hatóanyagok meghatározott eloszlását, ami a pontos és megbízható kísérletek alapfeltétele, például a sejtpopulációkkal végzett gyógyszerhatékonysági tesztek esetén. A komplex többfázisú modell kialakításában és elemzésében végelem-módszeren (FEM) alapuló szimulációs háttér (itt a COMSOL Multiphysics szoftver) van segítségünkre, amely alkalmas a mikrokonténerek belsejében lezajló keveredési jelenségek számítására [15]. A digitális modellek érvényességét természetesen laboratóriumi mérésekkel ellenőrizzük, ahol a cseppgenerálás folyamata és a létrehozott csepp-populáció is nagysebességű képfeldolgozással vizsgálható. Fluoreszcens festékek alkalmazásával és az intenzitástérképek elemzésével

a koncentrációprofilok is optimalizálhatók, lehetővé téve pontosabb gyógyszeradagolási és diagnosztikai vizsgálatok kidolgozását.

A mikrocseppekben történő izoláció nemcsak pontosabb biológiai elemzést tesz lehetővé, hanem nagy áteresztőképességű kísérletek elvégzését is, ami hatékonyan támogatja a sejtes folyamatok és biokémiai reakciók részletes vizsgálatát jól kontrollált körülmények között. Erre lehet példa a PCR (polimeráz láncreakció) technológián alapuló DNS-amplifikáció cseppek mikrofluidikai rendszerekben való megvalósítása, ezzel csökkentve a reagens mennyiségét, a szennyeződések kockázatát, javítva a hőciklusok precizitását, a reakció pontosságát és hatékonyságát [16, 17]. A cseppgenerációs technika használata lehetővé teszi nagy tömegű, de mégis egyedi reakciók végrehajtását, elősegítve nagy áteresztőképességű, gyorsabb, megbízhatóbb és költséghatékonyabb diagnosztikai alkalmazások tervezését.

Összefoglalás

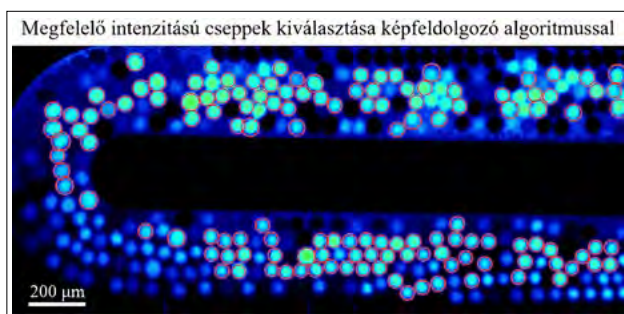
A cseppalapú mikrofluidikai rendszerek olyan komplex, mikroszkopikus áramlási szerkezetek, amelyek egyszerre oldják meg a mintaoldat – mint diszperz fázis – tervezett méretű, különálló reakciókamrákként vagy sejtkonténerként funkcionáló cseppekre bontását, csapdázását, válogatását és megfigyelését. A cseppek kialakulását és manipulációját lehetővé tevő fizikai jelenségek jól megfigyelhetők a mikroszkopikus mérettartományokban, hiszen itt a hidrodinamikai viselkedést főleg a felületi erők dominálják. Az áramlást alacsony Reynolds-szám jellemzi, így a folyadékok áramlása általában lamináris, ennek köszönhetően a cseppek precízen irányíthatók a csatornában. A viszkozus erők és a felületi feszültség befolyásolják, a Plateau-Rayleigh-instabilitás indukálja a cseppek formálódását, kialakulását. Ezen mikrofluidikai rendszerek precíz kialakítása lehetővé teszi a folyadékok és cseppek pontos kezelését, bennük a tervezett kémiai környezet kialakítását. Ezáltal a cseppek mikroreaktorként és sejtkonténerként szolgálhatnak, így akár sejtszintű folyamatok is hatékonyan vizsgálhatók, magas szintű párhuzamosítás mellett. Ennek megfelelően ezek az eszközök különösen hasznosak lehetnek a gyógyszerkutatásban, a diagnosztikában és a szintetikus biológiában.

Köszönetnyilvánítás

A közlemény megírását, illetve a kapcsolódó kutatómunkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alap (NKFIA) támogatta az INBIOM TKP2021-EGA-04 (Innovatív bioérzékelési módszerek egészségügyi alkalmazásokhoz) projekten keresztül.

Irodalom

1. Patrick Tabeling (2023): Introduction to Microfluidics. Oxford University Press, 2, ISBN: 9780192845306



7. ábra. Mikrocsepp-populációban kialakuló BSA (borjúszérum-albumin) koncentrációeloszlásnak vizsgálata fluoreszcens mikroszkópia és MATLAB szoftverben végzett képelemzés alkalmazásával [15]

2. Thomas Moragues, Diana Arguijo, Thomas Beneyton, Cyrus Modavi, Karolis Simutis, Adam R. Abate, Jean C. Baret, Andrew J. deMello, Douglas Densmore, Andrew D. Griffiths (2023): Droplet-based microfluidics. *Nature Reviews Methods Primers*, Art. No. 32.
3. Dan Liu, Meilin Sun, Jinwei Zhang, Rui Hu, Wenzhu Fu, Tingting Xuanyuan, Wenming Liu (2022): Single-cell droplet microfluidics for biomedical applications. *Royal Society of Chemistry*, 147, 2294–2316.
4. Nam T. Nguyen (2011): Micromixers: Fundamentals, Design and Fabrication. Micro and Nano Technologies. ISBN: 978-1437735208
5. Geoffrey F. Hewitt, George Yadigaroglu (2018): Modelling Strategies and Two-Phase Flow Models. Zurich Lectures on Multi-phase Flow, 39–77.
6. Glenn M. Walker, David J. Beebe (2002): A passive pumping method for microfluidic devices. *Lab on a Chip*, 2, 131–134.
7. Jens Eggers (1997): Nonlinear dynamics and breakup of free-surface flows. *Reviews of Modern Physics*, 69, 865.
8. Edward M. Purcell (1977): Life at low Reynolds number. *American Journal of Physics*, 45, 4.
9. Wingki Lee, Lynn M. Walker, Shelley L. Anna (2009): Role of geometry and fluid properties in droplet and thread formation processes in planar flow focusing. *Physics of Fluids*, 21, 2.
10. David Hess, Tianjin Yang, Stravos Stavarkis (2019): Droplet-based optofluidic systems for measuring enzyme kinetics. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 412, 3265–3283.
11. Ghazaleh Gharib, Ismail Bütün, Zülâl Muganli, Gül Kozalak, İlayda Namli, Seyedali S. Sarraf, Vahid. E. Ahmadi, Erçil Toyran, Andre J. van Wijnen, Ali Koşar (2022): Biomedical applications of microfluidic devices: A review. *Biosensors*, 12(11) 1023.
12. Daniel R. Gossett, Westbrook M. Weaver, Albert J. Mach, Soojung C. Hur, Henry T. K. W. Tse, Wohee Lee, Hamed Amini, Dino D. Carlo (2010): Label-free cell separation and sorting in microfluidic systems. *Analytical and Bioanalytical Chemistry*, 397, 3249–3267.
13. C. Chen, Y. Zhao, J. Wang, P. Zhu, Y. Tian, M. Xu, L. Wang, X. Huang (2018): Passive mixing inside microdroplets review. *Micromachines*, 9, 160.
14. Ott Scheler, Karol Makuch, Pawel R. Debski, Michal Horka, Artur Ruszczak, Natalia Pacocha, Krzysztof Sozański, Oli P. Smolander, Witold Postek, Piotr Garstecki (2020): Droplet-based digital antibiotic susceptibility screen reveals single-cell clonal heteroresistance in an isogenic bacterial population. *Nature Scientific Reports*, 10, 3282.
15. Zsombor Szomor, Nafisat Gyimah, Tamás Pardy, Péter Fürjes (2025): Three-dimensional finite element modelling of chemical environment in droplet-based microfluidic systems for drug therapy applications. *Physics of Fluids*, 37, 7.
16. Z. Szomor, Eszter L. Tóth, Péter Fürjes (2023): 3D Finite Element Modelling of heat transfer in continuous flow two-phase droplet microfluidic systems using on-chip thermal control. In: 29th International Workshop on Thermal Investigations of ICs and Systems (THERMINIC), 1–4.
17. Beatriz Oliveira, Bruno Veigas, Aexandra R. Fernandes, Hugo Águas, Rodrigo Martins, Elvira Fortunato, Pedro V. Baptista (2020): Fast prototyping microfluidics: Integrating droplet digital lamp for absolute quantification of cancer biomarkers. *Sensors*, 20(6), 1624.

FELÜLETI INSTABILITÁSOK ÉS ELEKTROMECHANIKAI JELENSÉGEK FERROELEKTROMOS NEMATIKUS FOLYADÉKKRISTÁLYOKBAN

Salamon Péter[®], Máthé Marcell Tibor
¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
[®]E-mail: salamon.peter@wigner.hun-ren.hu

A termotrop folyadékkristályok rendezettséggel bíró folyékony vagy lágy anyagok, melyek legtöbbször hoszszúak, rúd alakú szerves molekulákból állnak. A folyadékkristály-fázisok az illető anyagtól függő hőmérséklettartományokban figyelhetők meg a szilárd kristályos és a rendezetlen izotrop folyadék fázisok között, ezért gyakran mezofázisoknak, azaz köztes fázisoknak is hívják őket. Napjainkig több mint 50 különböző szerkezetű mezofázist fedeztek fel, melyek közül a legismertebb a nematikus (1. ábra). A gyakorlati alkalmazás szempontjából is a nematikus fázis a legfontosabb,

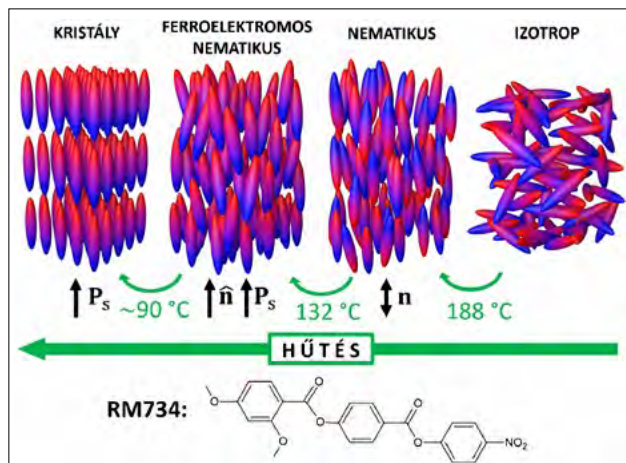
mivel a folyadékkristályos kijelzőkben, monitorokban, televíziókban ezt használják. A nematikus folyadékkristály hosszú távú orientációs rendezettséggel bír, a molekulák hossz tengelyei egy lokális átlagirány körül fluktuálnak (1. ábra). Ezt az átlagirányt direktornak nevezzük és egy helyfüggő egységvektorral jelöljük: $\mathbf{n}(\mathbf{r})$. A nematikus fázist alkotó molekulák legtöbbször aszimmetrikusak, így a dipólusmomentumuk nem nulla, azaz rendelkeznek molekuláris töltésmegosztással. A fázis maga viszont olyan, hogy átlagosan ugyanannyi dipólus mutat egy irányba, mint ellenkezőleg, ezért a dipó-



Salamon Péter a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. A következő kutatási területeken aktív: lágy anyagok, a folyadékkristályok fizikája, nemlineáris jelenségek, mintázatképződés, topológiai defektusok, reológia és mikrofluidika anizotrop komplex rendszerekben.



Máthé Marcell Tibor a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos munkatársa, frissen szerzett doktori címet az ELTE Fizika Doktori Iskolában. Kutatómunkája során elsősorban a lágy anyagok és a komplex anizotrop rendszerek fizikájával foglalkozik, kiemelve a felületi instabilitásokat, keresztfektusokat és az elektrooptikai jelenségek vizsgálatát.



1. ábra. Egy tipikus ferroelektromos nematikus folyadékkristály (RM734) fázisai, átmeneti hőmérsékletei és molekulaszervezete. A molekulákat jelölő ellipszoidok piros és kék részei pozitív és negatív töltésekre utalnak

lussűrűség kiátlagolódik. Ebből következik a nematikus fázis inverziós szimmetriája: $\mathbf{n}(\mathbf{r}) = -\mathbf{n}(\mathbf{r})$.

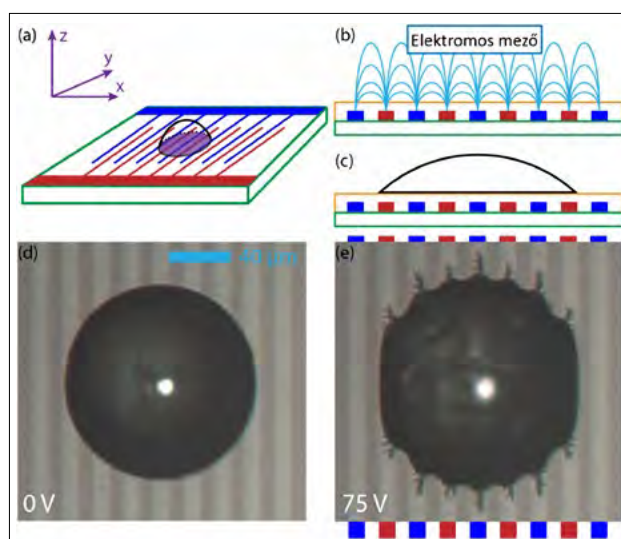
Max Born 1916-ban publikált [1] elméleti munkájában leírt egy a nematikushoz hasonló olyan folyadékkristály fázist, melyben a dipólusmomentumok egy irányba rendeződnek (1. ábra), és ez az anyag makroszkopikus spontán polarizációjához vezet. A gyakorlatban azonban több mint száz évig nem sikerült ilyen anyagot előállítani. 2017-ben egymástól függetlenül két kutatócsoport [2, 3] is szintetizált olyan anyagokat, melyekről 2020-ban alakult ki a tudományos konszenzus [4], hogy a makroszkopikus spontán elektromos polarizációval rendelkező ferroelektromos nematikus fázist mutatják. Ezen felfedezés jelentősége óriási, mivel egy teljesen újfajta anyagállapot megismerését tette lehetővé, ami egy homogén egykomponensű anyagban kombinálja a háromdimenziós folyékonyt és az orientációs rendezettséghez csatolt spontán polarizációt. Ferroelektromos folyadékkristályokat már korábban is előállítottak. Ezek legismertebb típusa a királis szmektikus-C*, melyben a molekulák rétegekbe rendeződnek, és a rétegekben belül a direktor nullánál nagyobb szöget zár be a rétegnormálissal. Ekkor a spontán polarizáció a dőlés irányában, a rétegekkel párhuzamosan jelenik meg, de a fázis csavarszerkezete miatt körbefordul és így kiátlagolódnak. A szmektikus-C* fázis továbbá nem tekinthető három dimenzióban folyékonynak, mivel a rétegnormális irányában az anyag szilárdként viselkedik, mindemellett a lokális spontán polarizációja is több mint egy nagyságrenddel kisebb, mint a ferroelektromos nematikusoknak.

Az új ferroelektromos nematikus folyadékok jellemző spontán polarizációja ($|P_s| \approx 1\text{--}10 \mu\text{C}/\text{cm}^2$) meghaladja sok ferroelektromos kristályt és közelítőleg tíze-de a legerősebb ferroelektrikumok, pl. a lítium-niobát értékeinek. Az efféle anyagok effektív mérhető relatív permittivitása az $\varepsilon \sim 10000$ -es tartományba esik, ami több mint két nagyságrenddel nagyobb a hagyományos nematikusok jellemző értékeinél [5]. Ebből az következik, hogy az anyag rendkívül érzékeny az elektromos

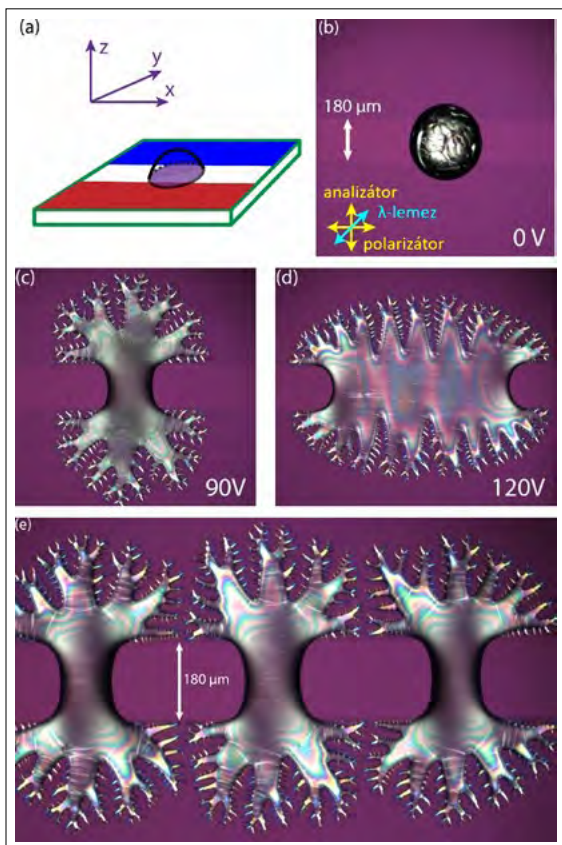
mezőkre. A poláris direktor 180°-os átorientálása ezredmásodperc alatti kapcsolási idővel lehetséges 0,1 V/ μm elektromos mezővel [4], ami a kijelzőkben vagy az egyéb elektrooptikai eszközökben történő hasznosítást vetíti előre. Az elektromos mezővel történő átorientálás a poláros kölcsönhatás miatt küszöb nélkül történik [6]. Az új anyagfajta óriási elektroeológiai effektust is mutat, azaz a viszkozitása nagy mértékben növelhető elektromos mező segítségével [7]. További érdekesség, hogy a ferroelektromos nematikus folyadékból nagyon könnyű hosszú szálat húzni, ami az anyag kezelésénél szembetűnő. Ez azért furcsa, mert ellentmond a Rayleigh–Plateau-instabilitásnak, ami miatt a csapból kifolyó víz is cseppekre szakad. Kiderült, hogy a szálat az anyag belső elektromos mezője stabilizálja a Maxwell-feszültség által, és a szálat tovább stabilizálhatók a végeik közti potenciálkülönbség külső növelésével [8].

A ferroelektromos nematikus fázis szimmetriája nélkülözi az inverzió műveletét, ezért a poláris direktor esetén $\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r}) \neq -\hat{\mathbf{n}}(\mathbf{r})$. Az inverziós szimmetria hiánya olyan jelenségek fellépését teszi lehetővé, mint például az optikai másodharmonikuseltérés, aminek során a min-tán átmenő fény egy része kétszeres frekvenciájú fénné alakul. Az effektust jellemző nemlineáris optikai együtt-ható megközelíti az erős optikai másodharmonikuseltérő szilárd kristályok, pl. a lítium-niobát értékeit [9]. A jelenség elektromos mezővel való hangolhatósága új lehetőségeket ad összefonódott állapotú fotonpárok keltésére kvantumoptikai alkalmazásokban [10]. A különleges szimmetria miatt továbbá furcsa kereszteffektusok válnak lehetővé, például a hőmérséklet-gradiensben fellépő forgatónyomaték [11] vagy áramlás [12].

Felvetődött a kérdés, hogy a ferroelektromos nematikus folyadékok szabad felszíne instabillá válik-e elektromos mezőkben, analóg módon a mágneses mezőbe helyezett mágneses ferrofluidokban megfigyel-



2. ábra. Ferroelektromos folyadékkristály-csepp (RM734) felületi instabilitása fésűs felületi elektródákon: (a) a kísérlet térbeli vázlata, (b, c) oldalnézeti ábra az elektromos mezővel és a cseppel, (d, e) a csepp felületi mikroszkópos képe 0 és 75 V alkalmazása mellett



3. ábra. Ferroelektromos folyadékkristály-csepp (RM734) felületi instabilitása elektródapáron: (a) a kísérlet térbeli vázlata, (b–d) polarizációs mikroszkópos képek a feszültség függvényében, (e) osztódás után egymást taszító cseppek

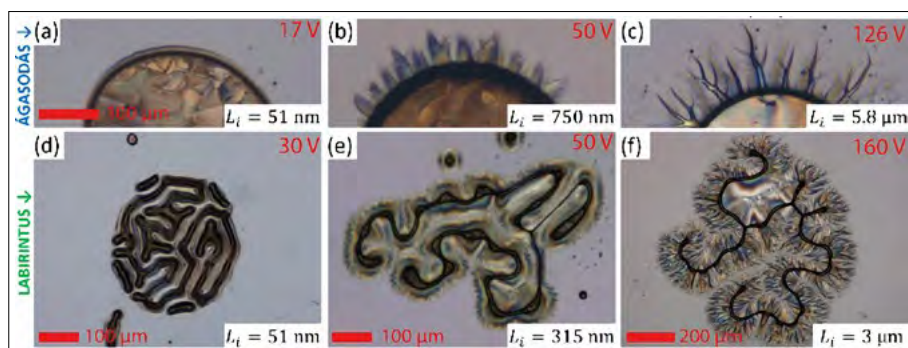
hető Rosensweig-féle instabilitáshoz. További ötletként felmerült, hogy ki lehet-e használni a ferroelektromos nematikusok óriási permittivitását olyan digitális mikrofluidikai alkalmazásokban, ahol apró folyadékcseppek mozgatása felületi elektródák segítségével történik a dielektro-nedvesítés jelensége miatt. Ez utóbbi effektus azon alapul, hogy az anyagnak energetikailag megéri minél nagyobb elektromos mezőben lenni, így a folyadék felületi elektródákon jellemzően több száz volt feszültséggel a Maxwell-feszültség segítségével teríthető, mely az anyag effektív kontaktszögének csökkenésével jár. A jelenség erőssége a folyadék és a külső közeg (levegő) permittivitásának hányadosával arányos, ezért a hasznosítása ferroelektromos nematikus folyadékkal az óriási permittivitás miatt több nagyságrenddel alacsonyabb feszültségeken várható.

Ferroelektromos nematikus cseppeket helyeztünk fésűs elrendezésű átlátszó (indium-ón-oxid, ITO) felületi elektródákra és feszültséget alkalmazva vizsgáltuk az anyag viselkedését (2. ábra). Az elektródákra egy vékony

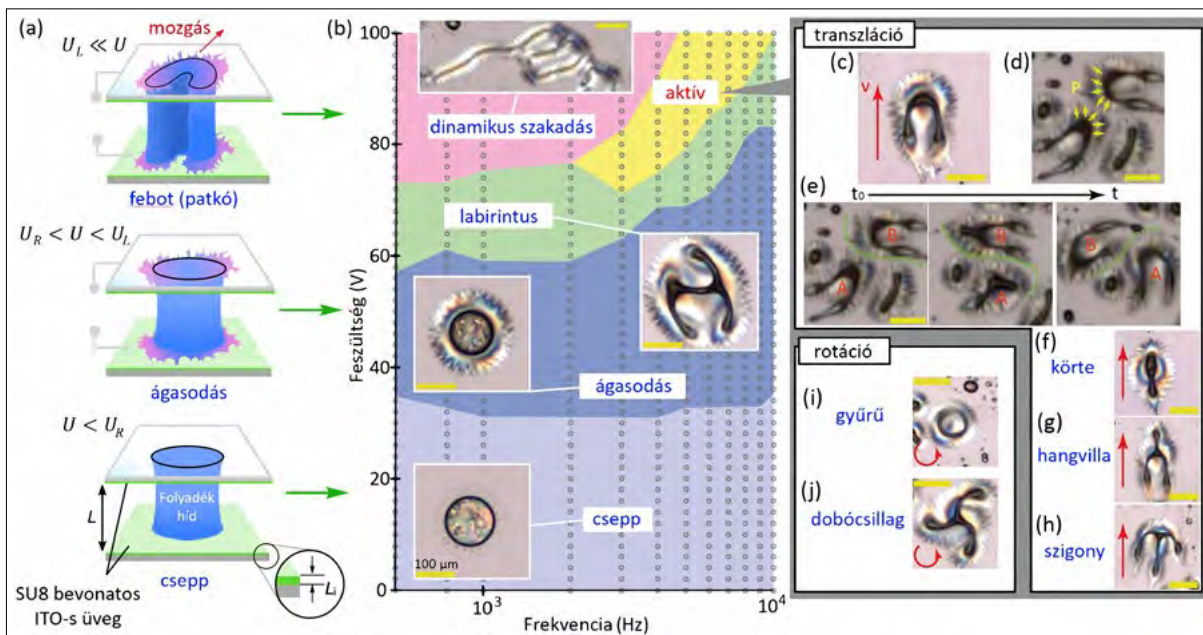
szigetelőréteget (SU8 polimert) vittünk fel annak érdekében, hogy síkká tegyük a felszínt, és meggátoljuk az elektrokémiai reakciókat. Azt tapasztaltuk, hogy a csepp egyenletes területe helyett ágszerű nyúlványok nőnek ki a felületből az elektródák fölött [13] (2e. ábra). Tovább vizsgálódva szélesebb felületi elektródapárokra helyeztük a cseppeket (3. ábra). Egy éles küszöbfeszültség felett ebben az esetben is megfigyeltük a folyadéknyúlványok kialakulását, melyek nagyobb feszültség mellett fraktál-szerű ágas szerkezetet alkotnak (3c. ábra). Tovább emelve a feszültséget a csepp megnyúlva elterül (3d. ábra) és a feszültség hirtelen ki-bekapcsolásával több egymást taszító cseppre osztható (3e. ábra). Polarimetrikus mikroszkópos mérések eredményei arra utaltak, hogy a direktor és így a spontán polarizáció a nyúlványok csúcsaival párhuzamos, ami megmagyarázza a cseppek taszító kölcsönhatását.

A jelenséget tovább vizsgáltuk párhuzamos sík elektródák közé helyezett cseppekben (folyadékhidakban), ahol további instabilitások fellépését tapasztaltuk (4., 5. ábra) [14, 15]. Az eddig taglalt ágasodás után, nagyobb feszültségeken és ugyancsak éles küszöb felett a csepp alakja hirtelen teljesen megváltozik, és egy labirintusszerű alakot vesz fel (4d–f. ábra). Ez a jelenség analóg a mágneses ferrofluidokban is megfigyelhető Rosensweig-féle labirintusos instabilitással. A kísérleteink azt mutatták, hogy az instabilitások kialakulásában kulcsszerepet játszik az elektródákat borító szigetelőréteg és annak L_i vastagsága (4. ábra). Szigetelőréteg nélkül nem lépnek fel az instabilitások, és nagyobb L_i esetén az ágasodás nyúlványai hosszabbak, ami a labirintusszerkezet morfológiáját is befolyásolja. A végeselem-módszerrel végzett szimulációink azt mutatták, hogy az instabilitások fő hajtóereje az elektródákkal párhuzamos elektromos térkomponens megjelenése volt, ami a szigetelőréteg, a folyadék és a levegő találkozási vonalában a legerősebb, egyfajta csúcshatásként [14].

Kiderítettük, hogy tovább növelve a feszültséget, egy meghatározott frekvencia- és feszültségtartományban bekövetkezik egy harmadlagos instabilitás, amikor a labirintusos instabilitás által deformált alakú cseppek elkezdene mozogni. A mozgó cseppeket „febot”-oknak („ferroelektromos robot”) neveztük el. A febotok többnyire translációs mozgást végeznek a tükörszimmet-



4. ábra. A szigetelőréteg L_i vastagságának hatása az ágasodásra és a labirintusos instabilitásra



5. ábra. Sík elektródák közé szorított ferroelektromos nematikus cseppek elektromos mező által keltett felületi instabilitásai. (a) Sematikus térbeli ábrázolás. (b) Morfológiai fázisdiagram. (c) Tipikus patkó alakú „ferroelektromos robot – febot” az aktív tartományban. (d, e) Febotok ütközése. (f–j) Különböző formájú febotok

ria-tengelyük irányában. Legtöbbször patkó alakúak (5c. ábra), de megfigyeltünk egyéb formákat és rotációs mozgást végző egyedeket is (5f–j. ábra). A felületükön lévő nyúlványok taszítása miatt két febot találkozásakor azok nem olvadnak össze, hanem ütköznek, ezért irányuk megváltozik.

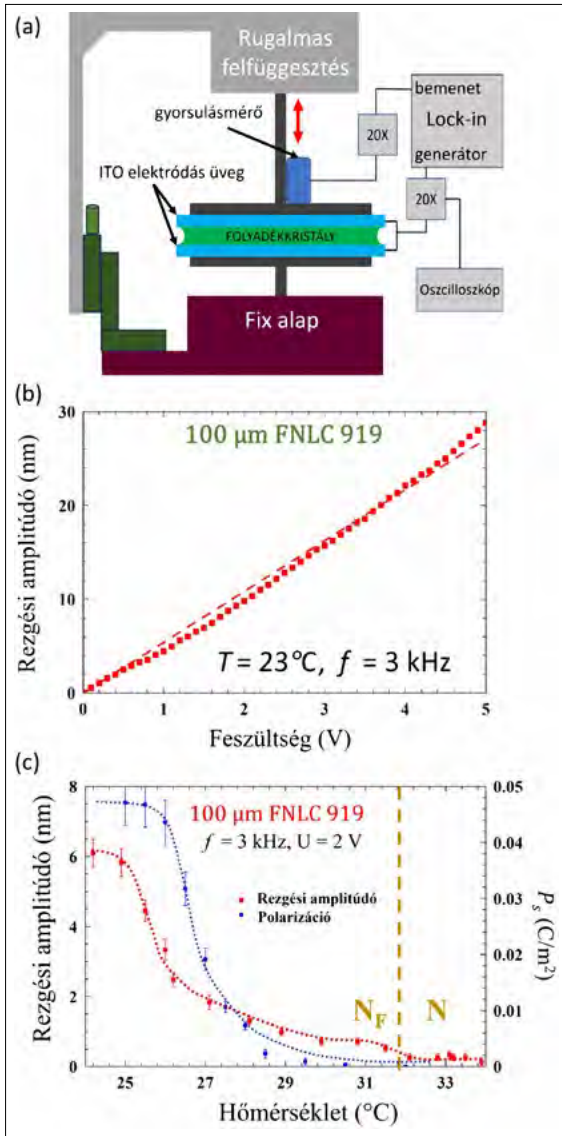
A febotok sokasága kölcsönható aktív részecskerendszerként viselkedik, melyben a febotok olyan dinamikus organizmusokra hasonlítanak, mint a rajzó rovarok, mikrobák vagy mikrorobotok [15]. Az aktív cseppecskék statisztikai elemzése azt mutatta, hogy a mozgás szabályozható az alkalmazott feszültséggel, ami a rendszer lehetséges alkalmazását jelenti új típusú mikrofluidikai eszközökben.

A kísérletezés során arra lettünk figyelmesek, hogy a febotok mozgását erős hangkibocsátás kíséri. Különböző f frekvenciájú szinuszos feszültséget a mintára kapcsolva a spektrális elemzés azt mutatta, hogy a kibocsátott hang tartalmaz f és $2f$ frekvenciájú komponenseket, és az előbbi (első harmonikus) amplitúdója lineárisan, míg az utóbbi (második harmonikus) kvadratikusan függ a feszültségtől. Ez arra utalt, hogy a hangkibocsátás mögött a ferroelektromos nematikus folyadékban fellépő lineáris és kvadratus elektromechanikai jelenségek, azaz a piezoelektromosság és az elektrostrikciónak állnak.

Szimmetriaelvekből következően minden ferroelektromos anyag rendelkezik piezoelektromos tulajdonságokkal, ezért a ferroelektromos nematikus fázisban tapasztalható lineáris elektromechanikai effektus csak azért furcsa, mert a szóban forgó anyag folyadék. A 6a. ábrán vázolt berendezés segítségével megmértük a piezoelektromos csatolási együtthatót az FNL919 nevű folyadékkristályban, ami már szobahőmérsékleten mutatja a ferroelektromos nematikus fázist [16]. Ehhez

az anyagot két ITO elektródával ellátott üveglap közé tettük, melyek közül az alsó mereven rögzített volt, a felső lapot pedig egy olyan rugalmas felfüggesztéshez erősítettük, mely csak függőleges irányú elmozdulást engedett. A mintára váltófeszültséget kapcsoltunk, és mértük a felső lap rezgési amplitúdóját egy gyorsulásmérő segítségével. A 6b. ábrán látható, hogy a feszültség függvényében a rezgési amplitúdó lineáris függést mutat, amiből megadható az elektromos mező és a mechanikai deformáció közötti effektív piezoelektromos csatolási együtthatónak egy alsó becslése. 6 kHz alatti frekvenciák esetén ez nagyobbra adódott, mint 1 nC/N, ami eléri a szilárd piezoelektromos anyagok értékeit. A rezgési amplitúdó hőmérsékletfüggésén (6c. ábra) jól látható, hogy az elektromechanikai hatás csak a ferroelektromos nematikus (N_F) fázisban figyelhető meg, és korrelál a spontán polarizációval. A nematikus (N) fázisban mindkettő mennyiség eltűnik.

A piezoelektromos csatolási együttható egy tenzormennyiség, melynek különböző komponenseit egymástól függetlenül megmérni további kísérleti erőfeszítéseket igényel. A ferroelektromos nematikus anyagok elektromechanikai válaszában pontosabb megértése lehetővé tehet egy újfajta energiakonverziót, és új utat nyithat a folyadéaktuátorok, mikropozicionálók és elektromosan hangolható optikai lencsék kifejlesztéséhez. Az inverziós szimmetria hiánya miatt egyes kristályokhoz, polimerekhez és biológiai anyagokhoz hasonlóan ezekben a különleges folyadékokban is felléphet direkt és inverz piezoelektromos hatás is. A direkt effektus esetén az anyag periodikus deformációjával kelthetünk elektromos áramot. Ezt jelenleg vizsgáljuk, az előzetes eredmények összhangban vannak az inverz piezoelektromosság esetén tapasztaltakkal.



6. ábra. (a) Az inverz piezoelektromosság mérésére alkalmas kísérlet vázlata. (b) Az FNLC919 ferroelektromos nematikus folyadékkristály lineáris elektromechanikai válasza. (c) Elektromechanikai válasz a hőmérséklet függvényében a nematikus (N) és a ferroelektromos nematikus (N_F) fázisban

Visszatérve a febotok mozgásához, úgy gondoljuk, hogy a jelenség az anyag erős elektromechanikai tulajdonságai miatt következik be. Egy feszültségperióduson belül, nagy sebességű képalkotással vizsgálva a febotokat az látható, hogy a mozgási tartományban (magasabb frekvencián) az anyagnak nincs ideje relaxálni az egyensúlyi alakjához, ezért a kontakvonal elmozdulhat. A kerület mentén a kicsi elmozdulások függenek a lokális elektromos mezőtől, amit a környező anyagforma befolyásol. Ha a febotnak csak egy tükörszimmetria-tengelye van, akkor annak irányában várható nettó elmozdulás.

Végezetül megemlítjük, hogy a fentebb olvasható előzetes várakozásunkat, a ferroelektromos folyadékok nagyon alacsony feszültséggel történő terítését, elektro-ndvesítését az elektródát borító szigetelő vékonyrétegek miatt nem sikerült megfigyelni. Már a néhány nanométer vastag szigetelő is jelentősen csökkenti a ferroelektromos

anyagon eső feszültséget annak alacsony impedanciája miatt, nem is beszélve a szigetelőréteg miatt fellépő instabilitásokról. Legújabb kísérleteink azt mutatják, hogy a szigetelőréteg elhagyásával 2 V feszültség is elegendő egy csepp teljes elterítéséhez, azaz a kontaktszögének nulla közelébe viteléhez.

Köszönetnyilvánítás

A szerzők hálásak Jákli Antal közreműködéséért, aki állandó támogatást nyújtott a munkájuk során. A szerzők köszönik az alábbi projektek anyagi támogatását: NKFIH FK142643 és 2023-1.2.1-ERA_NET-2023-00008.

Irodalom

1. M. Born (1916): Über anisotrope Flüssigkeiten: Versuch einer Theorie der flüssigen Kristalle und des elektrischen Kerr-Effekts in Flüssigkeiten. *Sitzungsber. Preuss. Akad. Wiss.*, 30, 614.
2. H. Nishikawa, K. Shiroshita, H. Higuchi, Y. Okumura, Y. Haseba, S. Yamamoto, K. Sago, H. Kikuchi (2017): A fluid liquid-crystal material with highly polar order. *Advanced Materials*, 29, 1702354.
3. R. J. Mandle, S. J. Cowling, J. W. Goodby (2017): A nematic to nematic transformation exhibited by a rod-like liquid crystal. *Physical Chemistry Chemical Physics*, 19, 11429.
4. X. Chen, et al. (2020): First-principles experimental demonstration of ferroelectricity in a thermotropic nematic liquid crystal: Polar domains and striking electro-optics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117, 14021.
5. N. Sebastián, M. Čopič, A. Mertelj (2022): Ferroelectric nematic liquid-crystalline phases. *Phys. Rev. E* 106, 21001.
6. M. T. Máthé, N. Éber, Á. Buka, H. Nishikawa, F. Araoka, A. Jákli, P. Salamon (2025): Reorientation of ferroelectric nematic liquid crystals under out-of-plane electric and magnetic fields. *J. Mol. Liq.*, 428, 127525.
7. H. Nishikawa, P. Salamon, M. T. Máthé, A. Jákli, F. Araoka (2025): Giant electro-viscous effects in polar fluids with paraelectric-modulated antiferroelectric-ferroelectric phase sequence. *Giant*, 22, 100356.
8. M. T. Máthé, K. Perera, Á. Buka, P. Salamon, A. Jákli (2024): Fluid ferroelectric filaments. *Advanced Science*, 11, 2305950.
9. M. Lovšin, L. Cmok, C. J. Gibb, J. Hobbs, R. J. Mandle, A. Mertelj, I. Drensek-Olenik, N. Sebastian (2025): Ferroelectric fluids for nonlinear photonics: Evaluation of temperature dependence of second-order susceptibilities. *ArXiv* 2509.11835.
10. V. Sultanov, A. Kavčič, E. Kokkinakis, N. Sebastián, M. V. Chekhova, M. Humar (2024): Tunable entangled photon-pair generation in a liquid crystal. *Nature*, 631, 294.
11. T. Tóth-Katona, I. Jánossy, P. Salamon, A. Jákli (2025): Light-induced thermomechanical reorientation and helicity flipping in ferroelectric nematic phase. *Commun. Mater.*, 6, 225.
12. M. T. Máthé, Á. Buka, A. Jákli, P. Salamon (2022): Ferroelectric nematic liquid crystal thermomotor. *Phys. Rev. E* 105, L052701.
13. M. T. Máthé, B. Farkas, L. Péter, Á. Buka, A. Jákli, P. Salamon (2023): Electric field-induced interfacial instability in a ferroelectric nematic liquid crystal. *Sci. Rep.*, 13, 6981.
14. M. T. Máthé, H. Nishikawa, F. Araoka, A. Jákli, P. Salamon (2024): Ramification and labyrinth instabilities in a ferroelectric nematic fluid exposed to electric fields. *J. Mol. Liq.*, 413, 126047.
15. M. T. Máthé, H. Nishikawa, F. Araoka, A. Jákli, P. Salamon (2024): Electrically activated ferroelectric nematic microrobots. *Nat. Commun.*, 15, 6928.
16. M. T. Máthé, M. S. H. Himel, A. Adaka, J. T. Gleeson, S. Sprunt, P. Salamon, A. Jákli (2024): Liquid piezoelectric materials: Linear electromechanical effect in fluid ferroelectric nematic liquid crystals. *Adv. Funct. Mater.*, 34, 2314158.

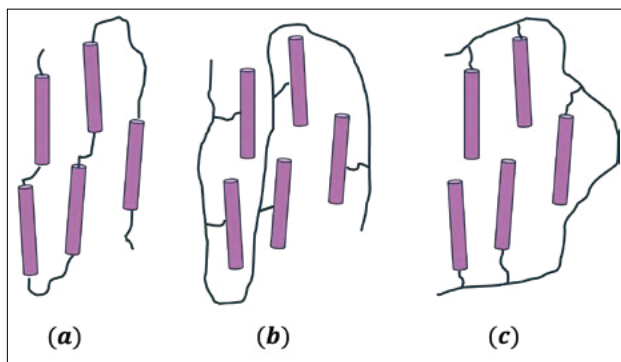
IONOS FOLYADÉKKRISTÁLY-GUMIK LEHETSÉGES ALKALMAZÁSAI A MECHATRONIKÁBAN ÉS AKKUMULÁTOROKBAN

Jákli Antal^{1,2}

¹Department of Physics, Kent State University, Kent, OH 44242, USA; ²HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
E-mail: ajakli@kent.edu

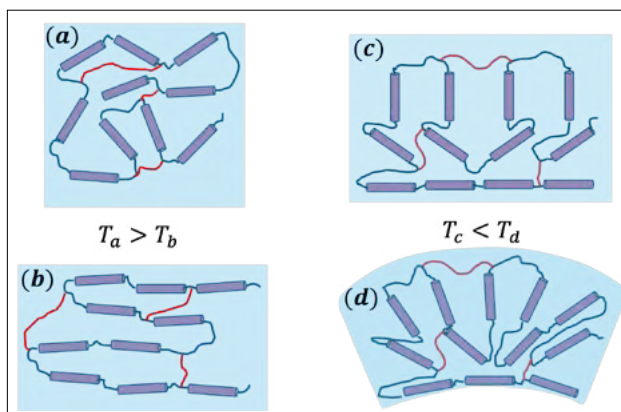
A folyadékkristályok olyan hosszúkas vagy korong alakú szerves molekulákból álló anyagok, melyeknek tulajdonságai a kristályos anyagok és az izotrop folyadékok között vannak. A folyadékkristályok legismertebb alkalmazása a lapos kijelző, amely az ún. nematikus (N) fázisban üzemel. A nematikus fázisban a molekulák a kristályokhoz hasonlóan hosszú távú irányrendezettséget mutatnak, miközben a molekulák térbeli helyzete rendezetlen, akárcsak a folyadékokban, tehát az anyag háromdimenziós anizotrop folyadéknak is tekinthető. Az irányrendezettséget a molekulák átlagos irányával, az ún. *direktorral* jellemezzük. A molekulák rendezettségét, azaz azt, hogy az egyes molekulák iránya átlagban mennyire van közel a direktorhoz, a rendparaméterrel (S) írjuk le. A rendparaméter a hűtés során általában növekedik: a rendezetlen izotrop fázisban $S = 0$, míg egy tökéletesen rendezett nematikus fázisban $S = 1$. A folyadékkristályok mechanikai, optikai és elektromos tulajdonságai is irányfüggőek. Következésképpen az olyan fizikai paraméterek, mint a mechanikai feszültség, viszkozitás, dielektromos permittivitás, hőtágulási együttható és a törésmutató másodrendű tenzora, is azok.

A folyadékkristály-állapotokat létrehozó molekulák (*mezogének*) kis molekulasúlyúak, melyek molekulatömege általában 200 g/mol és 500 g/mol között mozog. Ezeket a mezogéneket azonban fel lehet fűzni hajlékony polimer szálakra úgy, hogy megtartsák a nematikus rendezettségüket, miközben az anyag mechanikai tulajdonságai jelentősen megváltoznak: viszkózus folyadékból viszkoelasztikussá válnak. Az alapján, hogy hogyan kapcsolódnak a mezogének a polimerszálakhoz, megkülönböztetünk főláncú („main-chain”), és oldalláncú („side-chain”) folyadékkristály polimereket. Az utóbbin belül az oldalláncú mezogének oldalról („side-on”) vagy a végükön („end-on”) kapcsolódhatnak a polimerláncához. A folyadékkristály polimerek sematikus szerkezeteit az 1. ábrán mutatjuk be.



1. ábra. Folyadékkristály polimerek szerkezetei. (a) Főláncú folyadékkristály polimer; (b) Oldalláncú folyadékkristály polimer; (c) Végkapcsolódású oldalláncú folyadékkristály polimer. A lila hengerek jelölik a mezogéneket. A fekete vonalak mutatják a polimerláncokat

Amennyiben a polimerláncokat nagyjából 8–12 mezogénnel összekötjük (*cross-linking*), akkor folyadékkristály gumit (szaknyelven: elasztomert) kapunk [1]. Az elasztomerek rugalmas tulajdonságúak és nem olvadnak meg magas hőmérsékleten sem. Ahogy de Gennes 1975-ben elméletileg megjósolta [2], a folyadékkristály elasztomerek, miközben megtartják irányrendezettségüket – melyet külső elektromos vagy mágneses térrel

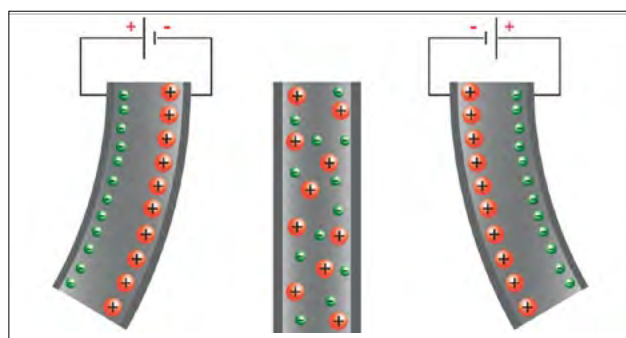


2. ábra. Folyadékkristály elasztomerek szerkezete és alakváltozásai hőmérséklet-változás hatására. A piros vonalak jelzik a keresztkötéseket. (a) Magas hőmérséklet (T_a , izotrop fázis). A mezogének iránya véletlenszerű, és az adott számú molekulát tartalmazó térfogatelem kocka alakú. (b) Alacsony hőmérséklet (nematikus fázis). A mezogének irányrendezettek, és az adott számú molekulát tartalmazó térfogatelem téglatest alakú. (c) Hibrid irányrendezett (felső lap: homeotrop, alsó lap: planáris) film azon a hőmérsékleten (T_c), ahol a keresztkötések létrejönnek. A térfogatelem téglatest alakú. (d) Hibrid irányrendezett film (felső lap: homeotrop, alsó lap: planáris) a keresztkötések létrejötténél magasabb hőmérsékleten (T_d). A térfogatelem hajlított téglatest alakú



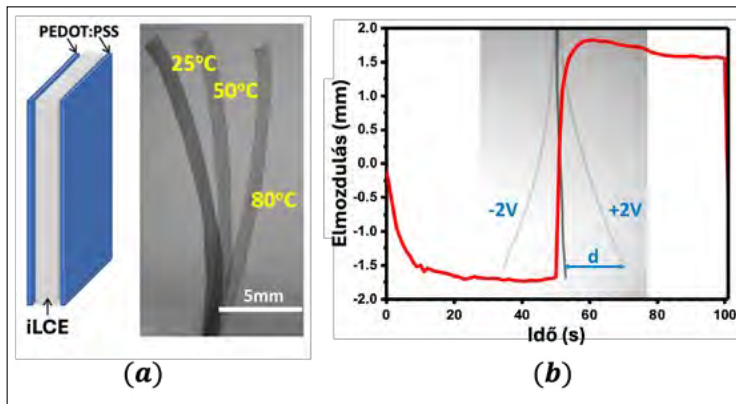
Jákli Antal a fizikai tudományok doktora, az Eötvös Loránd Tudományegyetem fizikus szakán szerzett diplomát. Jelenleg a Kent Állami Egyetem Fizika Tanszékén egyetemi tanár és a Wigner Fizikai Kutatóközpont részmunkaidős tudományos tanácsadója. Kutatási területe a lágy anyagok fizikája. Ezen belül elsősorban a hajlított törzsű és poláros folyadékkristályok, valamint folyadékkristály polimerek és gumik tulajdonságait kutatja. Jelenleg ferroelektromos nematikus folyadékokkal és ionos folyadékkristály elasztomerekkel foglalkozik. Eddig több mint 350 tudományos cikkben, 25 szakadalomban, 10 könyvfejezetben és 1 könyvben társszerző.

könnyű megváltoztatni – a szerkezet és az elasztomer makroszkopikus szerkezete között is erős csatolást mutatnak. Ennek a csatolásnak a leglátványosabb megnyilvánulása az, hogy az elasztomer alakja függ a hőmérséklettől; nevezetesen az anyag az izotrópból a nematikus fázisba hűtés során megnyúlik, ahogy azt a 2a., b. ábrán mutatjuk. A termikus aktiválás nemcsak megnyúlás-összehúzódnás, hanem meghajlás formájában is jelentkezhet, ha a folyadékkristály elasztomer film két oldalán a direktor iránya különbözik (2c., d. ábra), hiszen az anyag hőtágulási együtthatója is irányfüggő. A termikus aktiválás mellett a folyadékkristály elasztomerek fényel, valamint mágneses és elektromos terekkel is aktiválhatók [3, 4], bár az utóbbihoz általában nagyon nagy terekre van szükség (akár 30–50 V/ $\mu\text{m-re}$).



3. ábra. Egyenfeszültség hatása az ionos polimerfilmek alakjára (schematikus illusztráció). A piros (zöld) gömbök jelzik a nagyobb (kisebb) méretű pozitív (negatív) töltéseket

A kis terek hatására létrejövő elektromos aktiválásra a megoldást az ionos elektroaktív polimereknél (iEAP) találták meg először [5]. Ehhez az izotrop polimerbe olyan ionos folyadékot diszpergálnak, amelyben a pozitív és negatív ionok mérete eltérő. Ahogy a 3. ábrán mutatjuk, ha egyenfeszültséget vagy alacsony frekvenciájú váltófeszültséget kapcsolunk az ilyen ionos polimerfilm két lapja közé, a pozitív ionok az egyik, a negatív ionok pedig a másik elektróda fele mozdulnak el. A felhalmozódó nagyobb méretű ionok nagyobb térfogatot foglalnak el, így azon az oldalon a film kifelé, míg a másik elektróda közelében befelé hajlik. Az ilyen

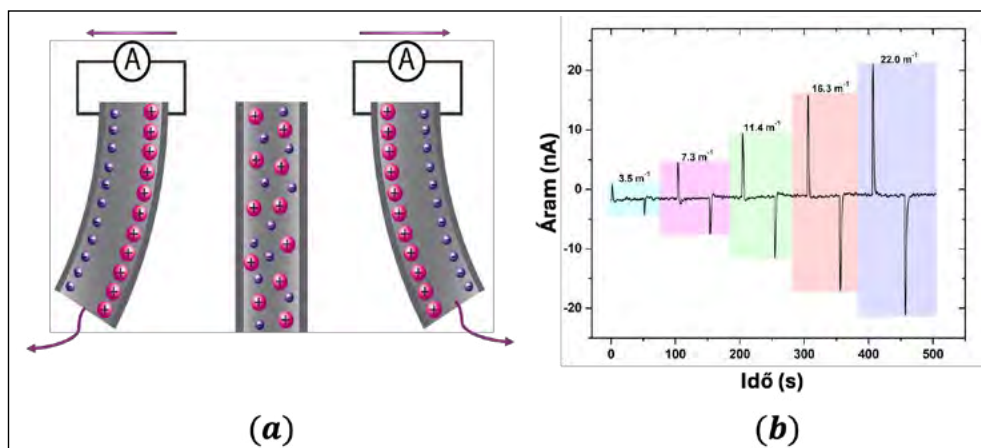


4. ábra. Egy 0,2 mm vastag, 2 mm széles és 15 mm hosszú hibrid irányrendeztettségű ionos folyadékkristály elasztomer (iLCE) szalag termikus és elektromos aktiválása. (a) PEDOT:PSS elektromos vezető polimerfilmek közé befogott iLCE szalag alakjai különböző hőmérsékleteken. (b) Ugyanezen szalag szabad végének időbeni elmozdulása 2 V amplitúdójú és 0,1 Hz periódusú négyyszögjel hatására. A grafikon háttérben levő képek a szalag alakját mutatják +2 V és -2 V alatt. (Az ábra a [6] hivatkozás 2. ábrájának felhasználásával készült.)

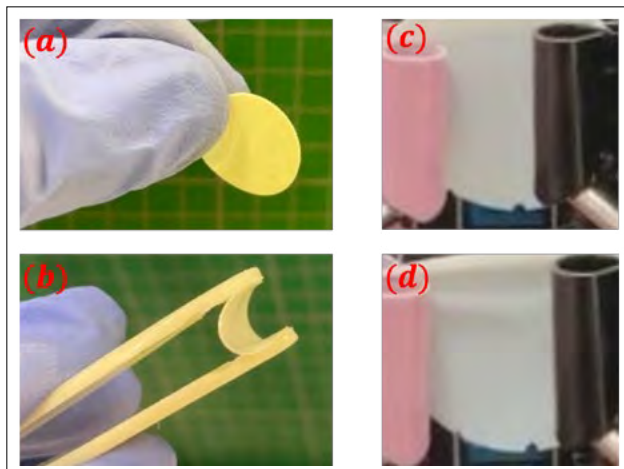
anyagok akár néhány volt feszültség hatására nagy szögben meghajlíthatók, bár a folyamat általában lassú.

Az Akroni Egyetem munkatársaival együtt végzett kutatásaink az mutatták, hogy az ionos folyadékok használata folyadékkristály elasztomerekben a hasonlóan nagy hajlások mellett az iEAP-nál nem látható tulajdonságokat is lehetővé tesz [6]. Először is – ahogy az 1c., d. ábrán mutatjuk – ha az ionos folyadékkristály elasztomer (iLCE) film egyik felén a direktort párhuzamosan (planárisan) rendezzük a felülettel, míg a másikon arra merőlegesen (homeotropikusan) rendezzük be, akkor az ellentétes felületeken megjelenő különböző hőtágulások miatt a film az elektromos mellett termikusan is hajlítható. Erre kísérleti példát a 4a. ábrán láthatunk.

Másodszor, a különböző irányrendeztettségű folyadékkristály elasztomerfilmek különböző mértékben hajlanak meg. Így, ha térben változó irányrendeztettséget hozunk létre, akkor térben változó görbületű alakzatokat érhetünk el egyetlen elektródapárral is. Ennek például a



5. ábra. A flexoionos effektus illusztrációja. (a) Az effektus működési elve: különböző méretű ionok eloszlása és a mozgásuk eredményeképpen megjelenő elektromos áram egy iLCE szalagban különböző hajlításának hatására. (b) Az indukált áram időfüggése különböző görbületű, 0,1 Hz-es négyyszögjel-hajlítások hatására. (Az ábra a [7] cikk 6b. és 2b. ábrájának a felhasználásával készült.)



6. ábra. Lítiumsóval kevert ionos folyadékkristályos elasztomer elektrolitkorongok. (a) A korong méretének és alakjának bemutatása két ujj között. (b) Az iLCE korong hajlíthatóságának illusztrációja. (c) Egy másik iLCE korong két csipesz között nyugalmi állapotban. (d) A (c) ábrán látható korong két csipesz között megnyújtott állapotban. Megjegyezzük, hogy az (a) és a (b) ábrán látható iLCE anyag összetétele és színe kissé különbözik a (c) és a (d) ábrán mutatott iLCE anyagétól. (Az (a) és a (b) képek a [11] cikk 5e. és 5f. ábrájának felhasználásával készültek.)

robotikában vehetjük hasznát, ahol adott alakú tárgyakra specializálódott robotokat mozgathatunk bonyolult elektromos terek nélkül. Itt jegyezzük meg, hogy a folyadékkristály elasztomerek elasztikus jellemzői közel állnak a biológiai szövetekéhez, azaz sokkal inkább kompatibilisek az emberrel, mint a mai kemény robotok.

Az előző elektroaktív alkalmazás fordítottja, a hajlítás hatására létrejövő ionos mozgás (flexoionos effektus) is megvalósítható, hiszen a hajlítás hatására a nagyobb ionok a kifelé hajló felület irányába mozognak el (5a. ábra). Kísérleteink [7, 8] azt mutatták, hogy 15 mm hosszú, 2 mm széles és 0,2 mm vastag film hajlításával kb. 20 nA áramot lehetett keltetni (5b. ábra). Miután az indukált áram a felülettel arányos, fontos eredmény, miszerint 1 m²-es felület hajlítgatásával is kevesebb, mint 1 mA áramot lehet generálni. A flexoionos effektus tehát inkább csak szenzorokban használható. Nanoamperes jelek laboratóriumban könnyen, viszont olcsó műszerekkel csak erősítés után mérhetők.

Megvizsgáltuk azt is, hogy ionos folyadékkristály elasztomerek használhatók-e elektrokémiai szerves tranzistorok elektrolitjaiként [9]. Azt találtuk, hogy remekül használhatók, és -1 V kapufeszültség (*gate voltage*) alkalmazásával milliószoros jelerősítés érhető el. Ezek a paraméterek már lehetővé teszik a nagy pontosságú hajlászérzékelést [10].

Végezetül azt vizsgáltuk, hogy ionos folyadékkristály elasztomerek használhatók-e szárazelemekben [11].

Ennek vizsgálata végett az iLCE-hez lítiumsót adtunk, és azt találtuk, hogy az iLCE-k több szempontból is különleges akkumulátorokat eredményeznek. Egyrészt – a szokásos szilárd elektrolitokkal szemben – az irányrendezett gumi kiváló kontaktust hoz létre az elektródákkal. Ez megakadályozza a lítiumdendritek kialakulását, ami csökkentené az akkumulátorok kisütési ciklusainak a számát. Kísérleteink azt mutatták, hogy az egyes iLCE elektrolitokat tartalmazó elemek 300 kisütési ciklus után is megtartották eredeti kapacitásuk 96%-át. Másrészt – a folyadékkristály elasztomer melegítés hatására összehúzódik, azaz megakadályozza, hogy a túlmelegedett akkumulátor felrobbanjon. Harmadrészt, az iLCE elektrolitok hajlékonyak és nyújthatók (6. ábra).

Köszönetnyilvánítás

A szerző hálás Salamon Péternek és Farkas Lászlónak a kézirat gondos átolvasásáért és hasznos tanácsaikért.

Irodalom

1. M. Warner and E. M. Terentjev, *Liquid Crystal Elastomers*, 1st ed. Clarendon Press, Oxford, 2006.
2. P. G. de Gennes, C. R. Hebd (1975): *Seances Acad. Sci., Ser. B* 281, 101.
3. C. Ohm, M. Brehmer, and R. Zentel (2010): Liquid crystalline elastomers as actuators and sensors. *Advanced Materials*, 22(31) 3366–3387.
4. T. J. White, D. J. Broer (2015): Programmable and adaptive mechanics with liquid crystal polymer networks and elastomers. *Nat. Mater.*, 14, 1087.
5. Y. Bar-Cohen (2004): *Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential and Challenges*. SPIE Press, Bellingham.
6. C. Feng, C. P. H. Rajapaksha, J. M. Cedillo, C. Piedrahita, J. Cao, V. Kaphle, B. Lussem, T. Kyu, and A. Jákli (2019): Electro-responsive ionic liquid crystal elastomers. *Macromol. Rapid Commun.*, 1900299.
7. C. P. H. Rajapaksha, M. D. T. Gunathilaka, S. Narute, H. Albehaijan, C. Piedrahita, P. Paudel, C. Feng, B. Lüssem, T. Kyu, A. Jákli (2021): Flexo-ionic effect of ionic liquid crystal elastomers. *Molecules*, 26, 4234.
8. C. Feng, C. P. Hemantha Rajapaksha, A. Jákli (2021): Ionic elastomers for electric actuators and sensors. *Engineering*, 7, 581.
9. C. P. Hemantha Rajapaksha, P. R. Paudel, P. M. S. G. Kodikara, D. Dahal, T. M. Dassa-nayake, V. Kaphle, B. Lüssem, A. Jákli (2022): Ionic liquid crystal elastomers-based flexible organic electrochemical transistors: Effect of director alignment of the solid electrolyte. *Appl. Phys. Rev.*, 9, 011415.
10. A. Alyami, C. P. H. Rajapaksha, P. R. Paudel, V. Kaphle, S. G. Kodikara, B. Lüssem, A. Jákli (2024): Bending sensor using ionic liquid crystal elastomers as solid electrolyte of organic electrochemical transistors. *Liq. Cryst.*, 51(2), 297–304.
11. Z. Siddiquee, H. Lee, W. Xu, T. Kyu, A. Jákli (2025): Plasticized ionic liquid crystal elastomer emulsion-based polymer electrolyte for lithium-ion batteries. *Batteries*, 11, 106.

fizikaiszemle.eft.hu

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

KÜLÖNBÖZŐ ALAKÚ SZEMCSÉK: MI FOLYIK KÖNNYEBBEN, A RIZS, A LENCSE VAGY A BORSÓ?*

Börzsönyi Tamás^{1,*}, Somfai Ellák^{1,2}

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest

²Eötvös Loránd Tudományegyetem, Mesterséges Intelligencia Tanszék, Budapest

*E-mail: borzsosnyitamas@wigner.hun-ren.hu

Szemcsés anyagok folyásával sok helyen találkozhatunk akár a természetben, vagy különféle ipari folyamatokban [1]. Mindannyian öntöttünk már rizst, borsót, lencsét vagy babot a konyhában, és megfigyelhettük, hogy az elnyújtott alakú vagy lapos részecskék folyás közben irány szerint rendeződnek (1. ábra). Rögtön adódik a kérdés: vajon ez a rendeződés hogyan befolyásolja az anyag folyási tulajdonságait, azaz melyik alakú részecske folyik könnyebben? Ennek megválaszolásához több különböző kísérletet is elvégezhetünk. Gondolhatunk a szemcsés anyag nyírási deformációval szembeni ellenállásának mérésére, illetve tesztelhetjük, hogy melyik típusú anyag folyik ki gyorsabban egy silóból, vagy dugul be nagyobb valószínűséggel, amikor egy kisebb nyíláson kell átfolylnia.



1. ábra. Búzaszemek irányrendeződése folyás közben

A folyadékok és a szemcsés anyagok folyásának összevetése

A közönséges folyadékok áramlása esetén – első közelítésben – a σ nyírófeszültség arányos a $\dot{\gamma}$ nyírási rátával (ami egyszerű esetben a sebességgradiens-tenzor releváns eleme), de független a nyomástól. Ebben az esetben az anyag nyírással szembeni ellenállását a viszkozitás jellemzi, amelyet a nyírófeszültség és a nyírási ráta hányadosaként ($\eta = \sigma/\dot{\gamma}$) definiálunk. Ez egy anyagi paraméter,

ami egyszerű (ún. newtoni) folyadékok esetén független a nyomástól és a nyírási rátától, komplex folyadékoknál viszont függeni szokott a nyírási rátától, leggyakrabban annak növelésével csökken (*shear thinning fluids*), ilyenek a híg szuszpenziók, pl. a festékek és a vér is. Ritkább esetben a viszkozitás a nyírási ráta emelésével növekedhet (*shear thickening fluids*), ilyenek a sűrűbb szuszpenziók, és előfordul a viszkozitás ugrásszerű növekedése is (*discontinuous shear thickening*), amire egy sokak által ismert példa a kukoricakeményítő sűrű szuszpenziója, amelynek felszínén gyorsan lépkedve akár járni is lehet, de ha megállunk, akkor lassan elsüllyedünk benne [2]. Ez a jelenség tulajdonképpen már át is vezet a szemcsés rendszerek viselkedésének témakörébe, mivel a nyírással szembeni ellenállás hirtelen megnövekedése azzal van összefüggésben, hogy a sűrű szuszpenzióban gyors deformáció hatására az egymás melletti részecskék egymáshoz képest elmozdulva összeérnek és közvetlen fizikai kontaktusba kerülnek – úgy, ahogy az egy folyadék nélküli szemcsés anyagban történik. Lassabb deformáció esetén a folyadéknak van ideje átfolyni az egymáshoz képes elmozduló részecskék között, így az anyag át tud rendeződni anélkül, hogy kialakulnának a részecskék közötti közvetlen kontaktusok. Emiatt az anyag a nyírással szemben kisebb ellenállást mutat.

A tisztán szemcsékből álló anyag viselkedése jelentősen különbözik a folyadékokétól. Ebben lassú folyás esetén a szomszédok közötti közvetlen kontaktusok folyamatosan jelen vannak, és rajtuk súrlódó erők lépnek fel μ_p súrlódási együtthatóval. A csúszó kontaktusokon fellépő súrlódási erők arányosak a nyomóerővel, de nem függenek a csúszási sebességtől. Így lassú folyás esetén – első közelítésben – a σ nyírófeszültség a p nyomással lesz arányos, viszont független lesz a nyírási rátától. Ezért lassú szemcsés áramlásban a disszipáció jellemzésére a kutatók az úgynevezett effektív súrlódást szokták használni, amely a nyírófeszültség és a lokális nyomás hánya-

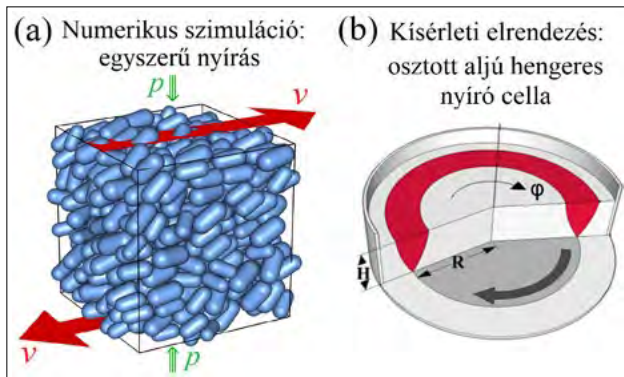
* A cikk a *Europhysics News* (2025) 56(3), 24–27. alatt megjelent írás kibővített változata.



Börzsönyi Tamás fizikus, az MTA doktora. Tanulmányait (diploma, PhD) az ELTE-n végezte. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban dolgozik tudományos tanácsadóként, a Komplex Folyadékok Osztály vezetője. Kutatásaiban a szemcsés anyagok és a komplex folyadékok (szuszpenziók, folyadékkristályok) folyási jelenségeit és fázisátmeneteit vizsgálja.



Somfai Ellák fizikus, az MTA doktora. Diplomáját az ELTE-n, PhD-fokozatát a Michigani Egyetemen szerezte. 2013 óta dolgozik a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban, jelenleg tudományos tanácsadóként; továbbá az ELTE Informatikai Kar oktatója. Érdeklődési területe a statisztikus fizikai rendszerek és a szemcsés anyagok numerikus modellezése, valamint a gépi tanulás alkalmazásai.



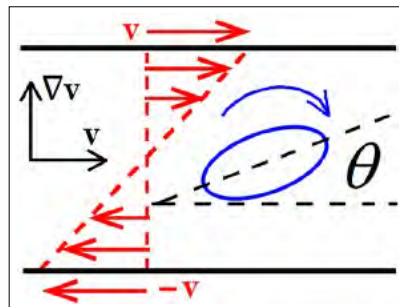
2. ábra. (a) Numerikus modell: egyszerű nyírásnak kitett, kapszula alakú részecskékből álló szemcsés rendszer. (b) Kísérleti elrendezés: osztott aljú hengeres nyírócella, benne a szemcsés anyagban kialakuló nyírási zóna pirossal jelölve

dosa $\mu_{\text{eff}} = \sigma/p$ [1]. Ez a folyadékoknál bevezetett viszkozitáshoz hasonlóan egy nyírási ráta- és nyomásfüggetlen anyagi paraméter, aminek segítségével jellemezhetjük az anyag nyírással szembeni ellenállásának szemcsealaktól való függését is. Fontos megjegyezni, hogy gyorsabb áramlások esetén, ahol a részecskék közötti rugalmatlan ütközések a disszipációban egyre nagyobb szerepet játszanak, az anyag effektív sűrűsége már nem független a nyírási rátától, hanem növekvő tendenciát mutat vele. Visszatérve a lassú folyás esetéhez, az effektív sűrűsége μ_{eff} meghatározása természetesen gömb alakú részecskékre a legegyszerűbb, de mind numerikusan, mind kísérletileg meghatározható egyszerű nem gömb alakú részecskék esetében is, mint például az ellipszoidok vagy a kapszulák (lekerekített végű rudak).

A numerikus szimulációkban a kutatók gyakran használnak részecskealapú diszkrét elem-modelleket (DEM), ahol a sűrűdásos részecske-részecske kontaktusok bizonyos közelítésekkel modellezhetők. Az ilyen szimulációkban egy állandó nyomás alatt lévő rendszert egyszerű nyírásnak kitéve mérhető a különböző alakú szemcsékből álló rendszerek effektív sűrűsége (2. ábra). Kísérletekben célszerű az úgynevezett osztott aljú hengeres nyírócellát használni, ahol egy nyírási zóna jön létre (a 2b. ábrán pirossal jelölve). Ez úgy alakul ki, hogy a rendszer középső részét lassan forgatjuk a szemcsés réteg alatt elhelyezett forgó tányér segítségével, miközben a külső rész áll. Ebben az esetben a rendszer deformációval szembeni ellenállására a folyamatos nyírás fenntartásához szükséges forgatónyomaték méréseiből következtethetünk (2b. ábra).

Elnyújtott alakú részecske egy nyírásnak kitett folyadékban – Jeffery-forgás

Egy nyírásnak kitett folyadékba helyezett, elnyújtott alakú, kemény részecskét

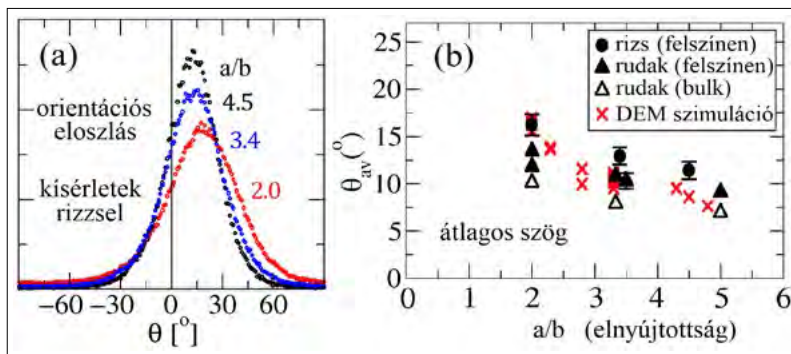


3. ábra. Egy nyírásnak kitett folyadékba helyezett, elnyújtott alakú, kemény részecske forgásának (bukfencezésének) illusztrációja

vizsgálva (3. ábra) azt találjuk, hogy lamináris áramlás esetén a részecske periodikusan modulált sebességgel forog (bukfencezik), ahogyan azt Jeffery több mint 100 évvel ezelőtt leírta [3]. Ez azt jelenti, hogy a részecske forgása felgyorsul, amikor a hosszirány kb. párhuzamos a folyási tér gradiensevel (∇v), és lelassul, amikor a hosszirány párhuzamossá válik az áramlás irányával (v). Ez azt eredményezi, hogy egy nyíró áramlásnak kitett, elnyújtott alakú részecskéket tartalmazó híg szuszpenzióban – már a részecskék közötti kölcsönhatás nélkül is – a részecskék irány szerinti rendeződése figyelhető meg, pusztán azért, mert forgás közben több időt töltenek az áramlási iránnyal párhuzamosan, mint arra merőlegesen.

Száraz szemcsés anyag folyása – kölcsönható részecskék

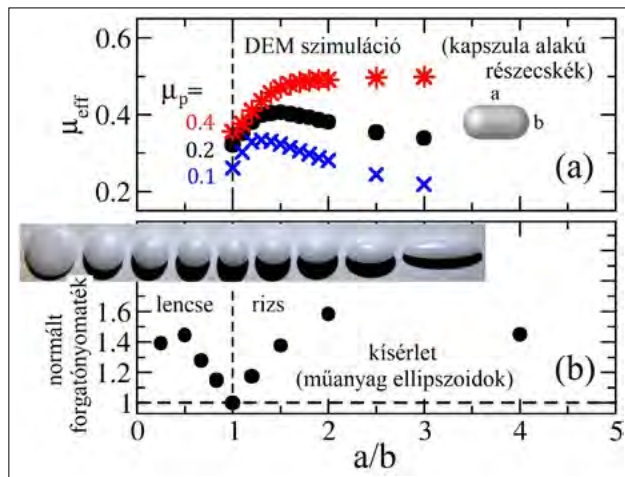
Visszatérve a száraz szemcsés anyagok esetére, ahol a részecskék közvetlen kontaktusban vannak egymással, a folyás során a szomszédos részecskék közötti véletlenszerű ütközések kissé módosítják a fent leírt képet, és ahhoz vezetnek, hogy a részecskék forgása zajos jellegű lesz. Ennek következtében az orientációs eloszlás módosul, és a részecskék átlagos iránya kissé el fog térni a folyásiránytól (lásd a 4a. ábrát és a *Fizikai Szemle* egy korábbi számában megjelent, ezzel a kérdéssel részletesebben foglalkozó cikket [4]). A részecskék elnyújtottságának növelése erősebb orientációs rendeződést, de kisebb nyírási orientációs szöget von maga után (4b. ábra) [4, 5].



4. ábra. (a) Az elnyújtott alakú részecskék irány szerinti eloszlása egy nyírásnak kitett szemcsés rendszerben. (b) A részecskék átlagos iránya a folyás irányához képest a részecskék a/b elnyújtottságának függvényében [4, 5]. A kísérleti adatokat vagy a felszíni részecskék detektálásával vagy pedig röntgentomográfiás (CT) mérések segítségével a szemcsés réteg belsejéből (bulk) kaptuk

Az effektív sűrűdés függése a részecskék alakjától

Hogyan befolyásolja akkor az elnyújtott alakú részecskék nyíró áramlásban megfigyelt komplex dinamikája a szemcsés anyag effektív sűrűdését a gömb alakú részecskék esetéhez képest? A kérdésre nem egyszerű a válasz. Kapszula alakú részecskékkal végzett numerikus (DEM) szimulációk azt mutatták, hogy tipikus sűrűdési együtt-hatójú részecskék ($\mu_p \geq 0,3$) esetén az effektív sűrűdés (μ_{eff}) a részecskék a/b elnyújtottságával¹ növekszik [6], így a hosszabb szemcsékből álló anyag nyírással szembeni ellenállása nagyobb, mint a kevésbé hosszú vagy gömb alakú részecskékből álló (5a. ábra). Azonban az effektív sűrűdés alakfüggése csúszósabb részecskék ($\mu_p \leq 0,3$) esetén összetettebbé válik, mivel ezeknél mind a DEM szimulációkban (5a. ábra), mind pedig sima felületű műanyag (POM) ellipszoidokkal végzett laboratóriumi kísérletekben (5b. ábra) nem monoton görbék figyelhetők meg. A kísérletekben mind rizsszerű, mind lencseszerű forgásellipszoidokat vizsgáltunk, és hasonló viselkedést kaptunk: a gömbtől csak kicsit eltérő (például $a/b \approx 2$ vagy 0,5 méretarányú) részecskékből álló szemcsés anyagok nagyobb ellenállást mutatnak a nyíró deformációval szemben, mint a gömbökből vagy a nagyon anizometrikus részecskékből álló anyagok [7]. Ezt a nem monoton függést több tényező együttes hatása alakítja ki, amelyek közül fontos a térkitöltés, a nyírás hatására kialakuló orientációs rendeződés és a részecskék közötti kontakterők nagyság és irány szerinti eloszlása, amelyek mind függenek a μ_p mikroszkopikus sűrűdési együtthatótól és az a/b részecskealaktól [8, 9].



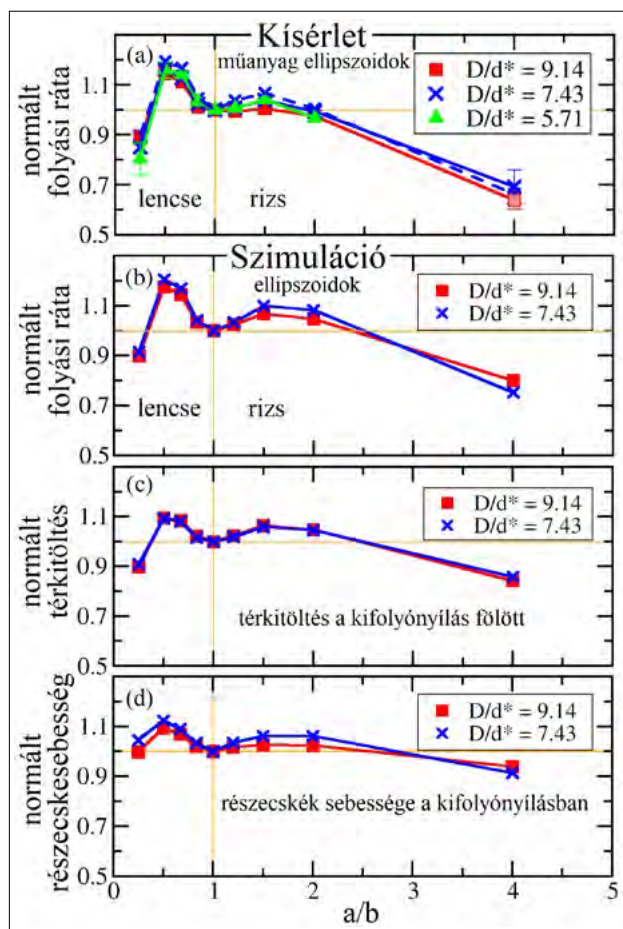
5. ábra. (a) A szemcsés anyag effektív sűrűdése μ_{eff} a részecskék alakjának (a/b méretarányának) függvényében $\mu_p = 0,4, 0,2$ és $0,1$ sűrűdési együtthatójú kapszulákkal végzett numerikus (DEM) szimulációkban [6]. (b) A nyíró áramlás fenntartásához szükséges forgatónyomaték az osztott aljú hengeres nyírócellában műanyag (POM) ellipszoidokkal végzett kísérletekben a részecskék alakjának (a/b méretarányának) függvényében [7]

¹ Ha forgásszimmetrikus részecskékre a -val a forgástengely-irányú hosszúságot, b -vel az arra merőleges méretet jelöljük, akkor hosszúság, például kapszula vagy rizs alakú részecskékre az elnyújtottság $a/b > 1$, míg lapos, például lencsealak esetén $a/b < 1$.

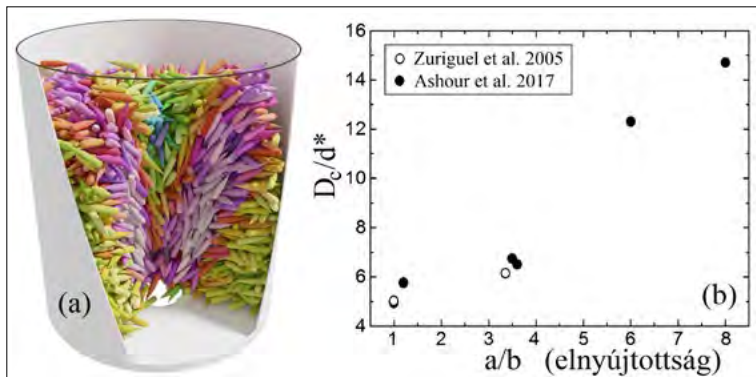
Szemcsés anyag silóban

Egy silóban tárolt szemcsés anyag esetében feltehetjük a kérdést, hogy a szemcsék alakja hogyan hat a silóból történő kifolyás sebességére vagy – kis nyílásméret esetén – a bedugulás valószínűségére. A kifolyási sebesség esetében ismét nem monoton görbét figyeltünk meg, mind a DEM szimulációkban, mind pedig a laboratóriumi kísérletekben (6a., b. ábra). Azt tapasztaltuk, hogy a kissé megnyúlt vagy kissé lapos részecskék esetében nagyobb folyási rátát mérhetünk, mint a gömb alakú, vagy pedig a nagyon anizometrikus részecskék esetében [7]. Ez ellentmondásnak tűnik, mivel – ahogy fentebb leírtuk – egy nyíró áramlásban pontosan ezek a részecskék mutatták a legnagyobb ellenállást a nyíró deformációval szemben, tehát esetleg azt várhatnánk, hogy ezek folynak majd ki leglassabban a silóból.

Ennek a látszólagos ellentmondásnak a feloldásához figyelembe kell vennünk, hogy egy ellipszoidokból álló szemcsés anyag térkitöltése (mind rendezetlen állapotban, mind a folyás következtében rendeződve) a folyási rátához hasonlóan nem monoton módon függ a részecs-



6. ábra. A silóból kifolyó szemcsés anyag folyási rátája a részecskealak (a/b méretarányának) függvényében [7]. A különböző alakú részecskék térfogata ugyanakkora, egy d^* átmérőjű gömb térfogatával megegyező. A különböző színnel jelölt adatsorok különböző D/d^* normált nyílásmérethez tartoznak. Mind a négy mennyiséget a gömbre ($a/b = 1$) mért értékkel normalva ábrázoltuk



7. ábra. Röntgentomográfiás (CT-) felvétel alapján rekonstruált bedugult szemcsés anyag egy kis kifolyónyílású silóban [11]. (b) A kritikus kifolyónyílás mérete (aminél nagyobbak esetén a szemcsés anyag nem dugul be) a részecskék elnyújtottságának (a/b arányának) függvényében [12, 13]. Itt d^* az ún. ekvivalens átmérő, ami nem gömb alakú részecskék esetén a velők azonos térfogatú gömb átmérőjét jelenti

kék alakjától [7, 10]. Tehát amint azt a 6c. ábrán láthatjuk, enyhén megnyúlt vagy enyhén lapos részecskék esetén egységnyi térfogatban több szemcsé van, mint gömbök vagy nagyon anizometrikus részecskék esetén. Ezt belátva talán már nem annyira meglepő, hogy ilyen részecskék esetén a silóból nagyobb folyási rátát kapunk, és ugyanakkor épp ezek az anyagok mutatnak nagyobb ellenállást a nyíró deformációval szemben. A folyási rátát tekintve (6b. ábra) azt is láthatjuk, hogy ennek a nem monoton jellege erőteljesebb, mint a térkitöltés nem monoton jellege, azaz a térkitöltés részecskéaktól való függése egyedül nem magyarázza meg teljesen a folyási rátát leíró görbe alakját. A folyási ráta azonban két mennyiség szorzataként adódik, ami egyrészt a térkitöltés, másrészt pedig a részecskék sebessége a kifolyónyíláson történő átesés pillanatában. Amint azt a 6d. ábrán láthatjuk, a részecskesebesség szintén nem monoton jellegű, és a 6c., d. ábrákat összevetve látható, hogy a két mennyiség kb. egyforma mértékben járul hozzá a folyási ráta 6b. ábrán látható nem monoton jellegéhez. A részecskék sebességével kapcsolatban tudni kell, hogy a kifolyónyílás irányába tartva növekszik (mivel az áramlás konvergens), de egy bizonyos tartományig csak nagyon lassan növekszik. Ez a kifolyónyílás fölötti közelítőleg parabola alakú tartomány az ún. dinamikus boltívképződés tartománya, ahol a folyást akadályozó erőláncok folyamatosan születnek és szakadnak át. Ha a részecske ezen a tartományon túljut, akkor jelentősen elkezd gyorsulni, és a kifolyónyíláson már gyakorlatilag szabadadással jut keresztül. Emiatt tehát a kifolyónyíláson mérhető áthaladási sebesség ennek a boltívképződési tartománynak a magasságától függ, ami viszont függhet a részecskék alakjától. Mivel a folyási rátát a dinamikus boltívképződés határozza meg (a folyadékokkal ellentétben), a szemcsés anyagok esetén a kifolyási ráta közel független a kifolyónyílás feletti anyagmennyiség magasságától. Ez a magyarázata annak is, hogy a homokórában majdnem az utolsó pillanatig állandó a szűkületen áthaladó homok folyási rátája.

A következő kérdés, hogy miként befolyásolja a részecskék alakja egy kis nyíláson átfolyó szemcsés anyag

esetén a rendszer bedugulásának a valószínűségét. Ezt a különböző részecskékre a következőképpen szokás összehasonlítani. Megmérjük, hogy a folyás során két egymást követő bedugulás között mennyi anyag folyt ki. A mérést sokszor elvégezve adódik egy átlagos anyagmennyiség. A kifolyónyílás D átmérőjét növelve ez az átlagos anyagmennyiség egyre nagyobb ütemben növekszik, majd egy bizonyos kritikus átmérőnél (D_c) látszólag végtelen nagygyá válik. Ez azt jelenti, hogy ettől nagyobb nyílások esetében gyakorlatilag nem történik bedugulás. A kritikus átmérő részecskemérettel normált értékét a részecskéalak függvényében ábrázolva azt látjuk, hogy D_c/d^* (és ezzel szoros összefüggésben a bedugulás valószínűsége) növekszik

a részecskék elnyújtottságának növelésével (7. ábra). Itt d^* az ún. ekvivalens átmérő, ami a részecskével azonos térfogatú gömb átmérőjét jelenti, vagyis a grafikonon az azonos térfogatú részecskék bedugulási valószínűségét hasonlítjuk össze az alakjuk függvényében.

Irodalom

1. B. Andreotti, Y. Forterre, O. Pouliquen (2013): Granular media: between fluid and solid. Cambridge University Press.
2. E. Brown, H. M. Jaeger (2014): Shear thickening in concentrated suspensions: phenomenology, mechanisms and relations to jamming. *Rep. Prog. Phys.*, 77: 046602.
3. G. B. Jeffery (1922): The motion of ellipsoidal particles immersed in a viscous fluid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing papers of a mathematical and physical character*, 102(715): 161–179.
4. T. Börzsönyi, B. Szabó, E. Somfai, J. Török (2018): Elnyújtott alakú részecskék rendeződése nyíró áramlásban. *Fizikai Szemle*, (2018)4, 118.
5. T. Börzsönyi, B. Szabó, G. Törös, S. Wegner, J. Török, E. Somfai, T. Bien, R. Stannarius (2012): Orientational order and alignment of elongated particles induced by shear. *Phys. Rev. Lett.*, 108: 228302.
6. D. B. Nagy, P. Claudin, T. Börzsönyi, E. Somfai (2020): Flow and rheology of frictional elongated grains. *New Journal of Physics*, 22(7): 073008.
7. B. Fan, T. Pongó, R. Cruz Hidalgo, T. Börzsönyi (2024): Effect of particle shape on the flow of an hourglass. *Phys. Rev. Lett.*, 133: 058201.
8. E. Azéma, F. Radjaï (2012): Force chains and contact network topology in sheared packings of elongated particles. *Phys. Rev. E*, 85(3): 031303.
9. M. Botton, E. Azéma, N. Estrada, F. Radjaï, A. Lizcano (2013): Quasistatic rheology and microstructural description of sheared granular materials composed of platy particles. *Phys. Rev. E*, 87: 032206.
10. A. Donev, I. Cisse, D. Sachs, E. A. Variano, F. H. Stillinger, R. Connelly, S. Torquato, P. M. Chaikin (2004): Improving the density of jammed disordered packings using ellipsoids. *Science*, 303: 990.
11. V. Nagy, E. Somfai, R. Stannarius, T. Börzsönyi (2023): Flow of asymmetric elongated particles. *J. Stat. Mech.*, 113201.
12. A. Ashour, S. Wegner, T. Trittel, T. Börzsönyi, R. Stannarius (2017): Outflow and clogging of shape-anisotropic grains in hoppers with small apertures. *Soft Matter*, 13: 402–414.
13. I. Zuriguel, A. Garcimartín, D. Maza, L. A. Pugnaloni, J. M. Pastor (2005): Jamming during the discharge of granular matter from a silo. *Phys. Rev. E*, 71(5): 051303.

A 2025. ÉVI FIZIKAI NOBEL-DÍJRÓL

Makk Péter[®], Csonka Szabolcs

BME Természettudományi Kar, Fizika Tanszék Budapest

[®]E-mail: makk.peter@ttk.bme.hu

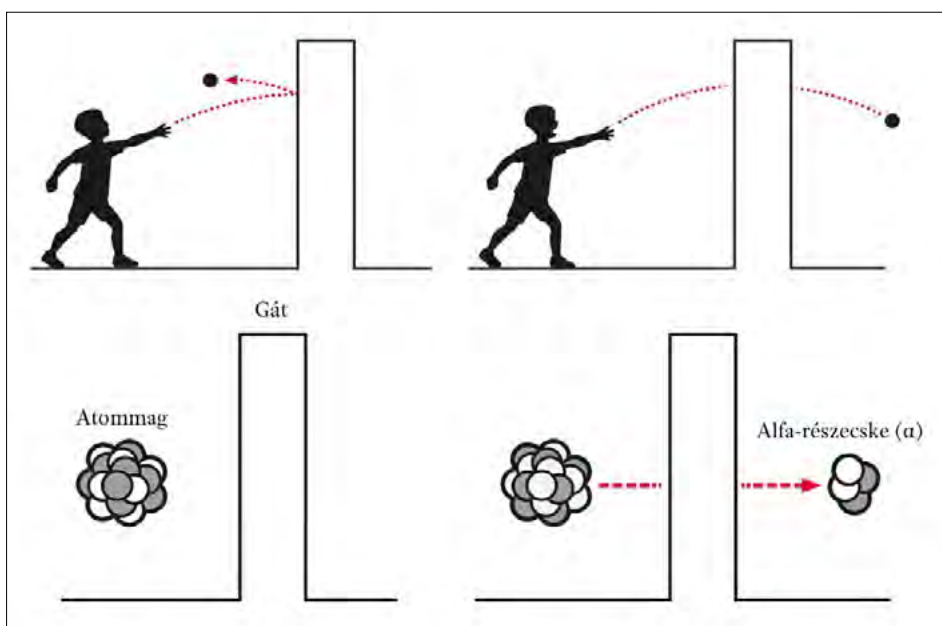
A 2025-ös fizikai Nobel-díjat három, a szupravezetéssel és kvantumszámítással foglalkozó fizikus kapta: James Clarke, Michel H. Devoret és John M. Martinis. Az indoklás szerint a „makroszkopikus kvantumalagutazás és egy elektromos áramkörben lévő kvantált energiaszintek felfedezéséért” kapták. Ebben a cikkben a Nobel-díjhoz kapcsolódó kutatásuk alapjait fogjuk végigvenni.

Az idei évben ünnepeljük a kvantummechanika felfedezésének századik évfordulóját. A kvantummechanika első sikerei az atomok kvantált energiaszintjeinek megértéséhez köthetők. Ez áttörést hozott a fizikában, és a periódusos rendszer megértése mellett a szilárd anyagok számos tulajdonságának megértéséhez vitt közelebb minket. Ebben a száz évben hozzászoktunk a kvantummechanika furcsa koncepcióihoz, még ha a klasszikus fizikai gondolataink közé nehéz is ezeket beilleszteni. De a sok-sok kísérlet, amit az elmúlt száz évben végeztek, illetve a minket körülvevő elektronikai eszközök is a kvantummechanika helyességét igazolták. Elfogadtuk, hogy egy részecske lehet ún. szuperpozícióban, két vagy több állapotban is egyszerre, és csak egy mérési folyamat során dől el, hogy ezekből az állapotokból melyikbe kerül be meghatározott valószínűségekkel.

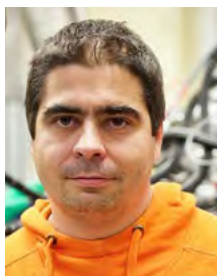
Azt gondoltuk azonban, hogy a kvantummechanika csak az apró objektumok, például a részecskék és a molekulák világát írja le, makroszkopikus objektumok nem mutatnak kvan-

tumos viselkedést. A kvantumos viselkedésnek – például egy szuperpozíció megőrzésének – feltétele, hogy a mikroszkopikus rendszert jól szeparáljuk a külvilágtól, mivel a részrendszerek közötti, illetve a környezettel való kölcsönhatás során a kvantumos viselkedés elveszhet. A kétréskísérletet sikerült elektronokkal és kisebb molekulákkal elvégezni, de makroszkopikus tárgyak, mondjuk egy focilabda interferenciáját még senki se figyelte meg, mivel az ilyen makroszkopikus objektumok erősen kölcsönhatnak a környezettel.

A kvantummechanika egyik meglepő jelensége a kvantummechanikai alagutazás (1. ábra). Egy potenciálgáton a klasszikus fizika szerint akkor tud egy részecske áthaladni, ha a kinetikus energiája nagyobb, mint a gáton áthaladáshoz szükséges potenciálisenergia-szükséglet. A kvantummechanika szerint azonban egy részecske akkor



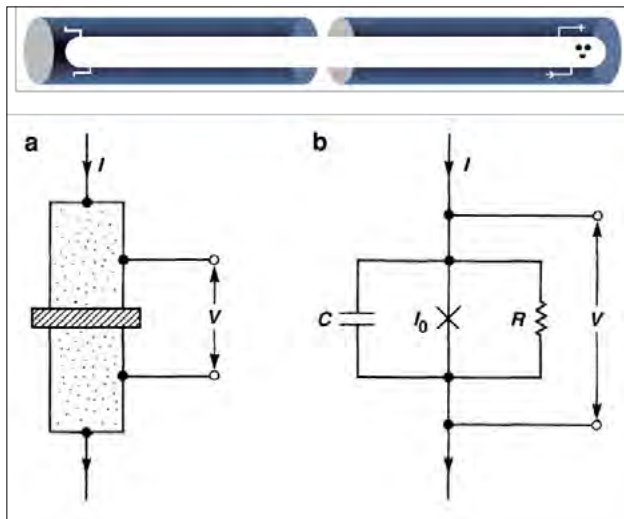
1. ábra. Kvantumos alagutazás. A felső sor a klasszikus és a kvantumos potenciálgáton való szóródás különbségét mutatja, míg az alsó sor az alfa-bomlást szemlélteti. (Forrás: Nobel-bizottság)



Makk Péter a BME Fizika Tanszék docense, tanszékvezető-helyettese, a MTA-BME „Korrelált van der Waals Heterostruktúrák” Kutatócsoport vezetője. Posztdoktori kutatásait a bázei egyetemen végezte, ami után Marie Curie-ösztöndíjasként tért haza. Sok egyéb pályázata mellett nemrégiben elnyerte az ERC Consolidator pályázatát. Kutatási területe magában foglalja a szupravezető-elektronika mellett a spintronikát és az új fázisok vizsgálatát kétdimenziós anyagokban.



Csonka Szabolcs a BME Fizika Tanszék docense és tanszékvezetője, illetve a Szupravezető Nano-elektronika Lendület Csoport vezetője. A Bázei Egyetemen töltött Marie Curie-ösztöndíjas posztdoktori kutatásai alatt kezdett foglalkozni a félvezető-szupravezető heterostruktúrákkal, majd hazatérve egy ERC Starting Grant segítségével kezdte el kiépíteni a minták készítéséhez és méréséhez szükséges infrastruktúrát. Később a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium keretein belül vezette a szupravezetőqubit-kutatásokat. Az elmúlt évet az Aacheni Egyetemen töltötte Humboldt-ösztöndíj keretében.



2. ábra. Josephson-átmenetek. A felső sor a kollektív állapotot jellemző kiterjedt hullámfüggvényt szemlélteti. Az alsó sor egy Josephson-átmenet egyszerűsített és összetettebb áramköri helyettesítő képét mutatja. (Forrás: Nobel-bizottság)

is át tud haladni a potenciálgáton valamilyen valószínűséggel, ha az energiája kisebb, mint a potenciálgát magassága. Az áthaladás általában egy kis esélyű folyamat, amelyiknek a valószínűsége a potenciálgát magasságától és a szélességétől is függ. Az alagutazás jelenségén alapul az STM (pászttázó alagútmikroszkóp), ahol egy nagyon hegyes tű és egy mintafelület között alagutaznak át az elektronok a vákuumon keresztül. Ezzel a módszerrel atomi felbontású képeket lehet készíteni vezető minták felületéről. Számítógépeinkben és mobiltelefonjainkban is jelen van ez az effektus. Az alagutazás a bennük található tranzisztorok működésében jelentős problémát is okoz: olyan vékony szigetelő rész választja el a különböző tartományokat az áramkörben, hogy ezen az elektronok alagutazással át is juthatnak (a kapu elektródából a csatornába). Végül egy utolsó példa az alagutazásra a radioaktív alfa-bomlás. Itt az atom vonzó potenciáljából tud kis valószínűséggel kialagutazni egy alfa-részecske, és itt az alagutazási valószínűség határozza meg a bomlási időt.

Az idei díjazottaknak azonban egy kézzel fogható méretű szupravezető áramkörben sikerült kimutatniuk a kvantumviselkedést, többek között az alagutazás jelenségét.

A szupravezetést 1911-ben fedezték fel, amiért a felfedezője, Heike

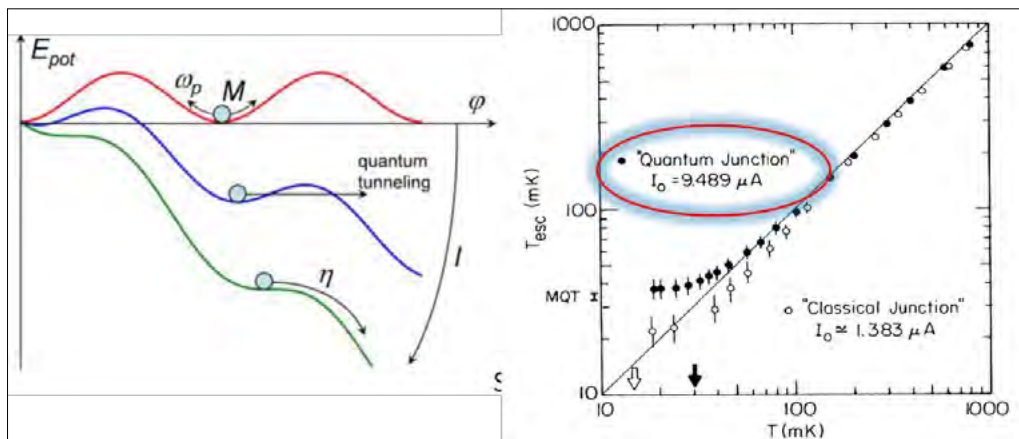
Kamerlingh Onnes 1913-ban meg is kapta a fizikai Nobel díjat. Mérései során azt mutatta meg, hogy bizonyos fémek ellenállása egy kritikus hőmérséklet alatt nullává válik, azaz úgy lehet rajtuk áramot áthajtani, hogy ehhez nem tartozik disszipáció. A szupravezetés megértéséért még három további Nobel-díjat osztottak ki (1972, 1973, 2003). A szupravezetőkben az elektromos vezetésben részt vevő elektronok párokba, ún. Cooper-párokba rendeződnek. Ezen párok feltöréséhez extra energia szükséges, és kis energiával a szupravezetőkben nem hozhatók létre gerjesztett állapotok. Ezért is lehet relatíve jól elválasztani a szupravezető rendszereket a környezetüktől.

Egy makroszkopikus szupravezető mintában rengeteg elektronpár található (mondhatjuk nagyvonalúan, hogy $\sim 10^{23}$). Ezen nagy mennyiségű részecske kvantummechanikai kezelése lehetetlen feladatnak tűnik. Meghökkenítő módon azonban a szupravezetőkben az elektronpárok kollektív viselkedést mutatnak, „együtt mozognak”. Így a teljes rendszert leíró kvantummechanikai objektum, a hullámfüggvény egyetlen (térben akár változó) komplex számmal, egy amplitúdóval és egy fázissal írható le. Ez a fázis akkor válik fontossá, ha például két szupravezetőt tekintünk, amit egy vékony szigetelő réteg választ el egymástól. Az így létrejött szupravezető alagútátmenetet Josephson-átmenetnek hívjuk, aminek magyarázatáért Josephson kapta meg a Nobel-díjat 1973-ban. Arra számítanánk, hogy ha két szupravezetőt egy vékony szigetelő köt össze, akkor ezen keresztül nem folyik áram, de az elektronpárok nemcsak átalagutazni képesek a két szupravezető közt, de még ellenállás se tartozik ehhez a folyamathoz – a két szupravezető közt is egy szuperáram folyik.

A Josephson-átmeneteken folyó áramot az ún. Josephson-egyenletekkel lehet jellemezni:

$$I = I_c \sin(\varphi), \quad d\varphi/dt = (2e/\hbar) V,$$

ahol φ a két szupravezető elektróda fázisának különbsége, I_c az ún. kritikus áram, azaz a maximum áram, amit



3. ábra. Balra: a potenciális energia a fázis függvényében egy Josephson-átmenetre, különböző áramú meghajtásokra. A fázisrészecskét a kék golyó szemlélteti. A kritikus áramnál kisebb meghajtás esetén a részecske alagutazással is kijuthat a potenciálgödörből. Jobbra: a kijutás gyakoriságát jellemző effektív hőmérséklet, az áramkör valódi hőmérsékletének függvényében. Az effektív hőmérséklet alacsony hőmérsékletű platója a kvantumos alagutazás bizonyítéka. (Forrás: M. H. Devoret, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 55, (1985) 1908.)

át lehet hajtani az átmeneten feszültségesés megjelenése nélkül. A második egyenlet azt mondja, hogy ha a fázis állandó, akkor nem jelenik meg feszültség az átmeneten, avagy fordítva: időben változó fázis esetén feszültség jelenik meg az átmeneten. Ezek a Josephson-átmenetek sok területen fontos szerepet töltenek be: a foton-detektorokban, jelen vannak a mágneses tér mérésében (ún. SQUID műszer), a metrológiában (voltsztenderd), illetve a kvantumszámítógépekben, ahogy a cikk végén erre ki fogunk térni. A Josephson-átmenetekben általában két alumíniumréteget választ el egy vékony alumínium-oxid szigetelő (2a. ábra). Mivel a két fémréteg nagyon közel helyezkedik el egymáshoz, nem elhanyagolható kapacitással is rendelkezik egy ilyen átmenet. Ezen Josephson-átmenetek elektronikai helyettesítő képe a 2b. ábrán látható, ahol a Josephson-egyenletekkel leírt átmenet mellett megjelenik egy párhuzamos kapacitás, illetve egy ellenállás is. Az utóbbi az I_c -nél nagyobb árammehajtás esetén jellemzi az átmenet viselkedését. A csomóponti törvényt felírva, illetve a második Josephson-egyenletet használva, egy differenciálegyenletet kapunk az átmeneten átfolyó áramra:

$$I = I_c \sin \varphi + \frac{2e}{\hbar} \frac{d\varphi}{dt} + C \frac{2e}{\hbar} \frac{d^2 \varphi}{dt^2}.$$

Ez az egyenlet egy potenciálban mozgó, súrlódó tömegpont egyenletével analóg, ahol a jobb oldal második tagja adja a súrlódást, illetve bevezethető az

$$U(\varphi, I) = \frac{\hbar I_c}{2e} \left(1 - \cos \varphi - \frac{I}{I_c} \varphi \right)$$

potenciál is. Ez a potenciál egy oszcilláló és egy lineáris függvény összege, amit a 3. ábrán ábrázoltunk három különböző külső árammehajtás esetében.

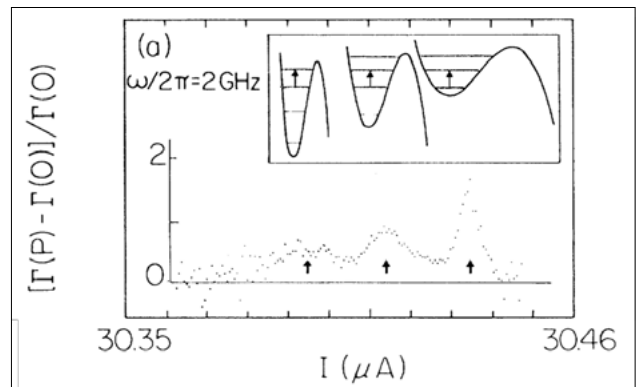
Ha a „fázisrészecske” stacionárius állapotban van, azaz a fázis időben állandó, akkor a második Josephson-egyenlet szerint az átmeneten nem esik feszültség. Ez történik nulla külső árammehajtás esetén (3. ábra, piros görbe), amikor is a részecske az egyik minimumban van. Ha a külső áramot növelni kezdjük, a potenciál megdől (kék görbe). $I = I_c$ esetén a potenciálban már nincsenek lokális minimumok, és a részecske le fog gurulni a potenciállejtőn (zöld görbe). A fázis ekkor változni fog, és a második Josephson-egyenlet szerint feszültség jelenik meg az átmeneten. A köztes helyzetben, pl. a kék görbe esetén a részecske a potenciálgödör alján van. Azonban, ha a külső hőmérséklet elég nagy, termikus gerjesztéssel át tud jutni a potenciálhegyen, és ezt követően le fog csúszni a lejtőn – ha elegendően kicsi a súrlódás, hiszen nagy súrlódás esetén megrekedhet a következő minimumban.

Itt érkeztünk el a Nobel-díjas kísérlethez. A mérés során az vizsgálták, hogy egy enyhén megdöntött potenciálból milyen valószínűséggel tud a részecske kiszabadulni. Ezt úgy vizsgálták, hogy az áramot lassan növelve azt az áramértéket keresték, amelynél nem nulla feszültség jelenik meg az átmeneten. A kísérletet többször elvégezve az átlagos kiszabadulási idő meghatározható (egy adott

áramnál), és ebből lehet egy T_{esc} effektív hőmérsékletet meghatározni, amit különböző külső (valódi) hőmérsékletek mellett mértek meg (3. ábra, jobb oldal). Látható, hogy ahogy az áramkör hőmérsékletét csökkentették, a kijutás valószínűsége csökkent, és ezzel együtt az effektív hőmérséklet is, ami jó egyezést mutatott a hűtőrendszer hőmérsékletével. Ez egészen alacsony hőmérsékletekig igaz, ott azonban azt találták, hogy hiába hűtik tovább a mintát, az effektív hőmérséklet nem csökkent. Ennek az oka, hogy ebben a tartományban már nem a termikus aktiváció, hanem a kvantumos alagutazás határozza meg a kiszabadulási rátát, amelynek a valószínűsége a hőmérséklettől független. Vegyük észre, hogy hasonlóan a korábban tárgyalt esethez, itt egy (fiktív) részecske próbál átjutni egy potenciálgáton, az átjutást a Josephson-átmeneten megjelenő feszültséggel lehet kimutatni. Itt azonban az alagutazás egy absztrakt térben történik, egy makroszkopikus áramkört leíró kvantumos mennyiség alagutazik át egy gáton. Ennek az alagutazásnak ugyanakkor a kézzelfogható méretű áramkörön jól megfigyelhető hatása van: az alagutazást megelőzően a szupravezető áramkörben megjelenik egy véges ellenállás.

Egy másik kísérletük a rendszer kvantumos természetének egy másik aspektusát is megmutatta. Ugyanis egy potenciálgödörbe zárt részecske esetén a potenciálgödörben kvantált energiaszintek jelennek meg (4. ábra). Itt is ez történik, a fázispotenciálban kvantált energiaszintek jelennek meg, azaz a rendszer egy mesterséges atomként viselkedik. Így egy jól meghatározott frekvenciájú elektromágneses sugárzással besugározva az átmenetet a fázisrészecske egy magasabb energiájú állapotba gerjeszthető. A magasabb energiájú állapothoz nagyobb alagutazási valószínűség tartozik. Így az alagutazási eseményeket vizsgálva, a kvantált energiaszintek meghatározhatók voltak.

A későbbi kísérletek során az is világossá vált, hogy a fázis mint a térbeli koordináta analógiája egy igen jó kép. Hasonlóan a kvantummechanikában ismert határozatlansági relációhoz, ami azt mondja meg, hogy egyide-



4. ábra. A potenciálgödörből való kiszökési ráta az árammehajtás függvényében (ami a potenciál alakját hangolja) 2 GHz-es besugárzás jelenlétében. A betétábrán az látható, hogy a sugárzás bizonyos áramok esetén a potenciálban átmeneteket tud gerjesztetni. A gerjesztés után a részecske „kisebb potenciálgátat” lát, és nagyobb rátával tud kialagutazni. (Forrás: John M. Martinis, et al., *Phys. Rev. Lett.*, 55, (1985) 1543.)

júleg nem lehet tetszőleges pontossággal meghatározni egy részecske pozícióját és impulzusát, egy szupravezetőnél a fázis és a részecskeszám (a Cooper-párok száma) tölt be hasonló szerepet.

A most Nobel-díjjal kitüntetett kísérletek komoly fejlesztéseket igényeltek. A méréseket millikelvines hőmérsékleten kellett végezni úgy, hogy mindenféle zavaró hőmérsékleti sugárzástól és egyéb zajforrástól megvédjék a rendszert. A lemenő kábelek zajszűrésére egy új eljárást dolgoztak ki (rézporos szűrők), amit ma is használnak a legtöbb kvantumtechnológiával foglalkozó laborban.

James Clarke, Michel H. Devoret és John M. Martinis eredményei messze túlmutatnak ezeken a kísérleteken. A Josephson-átmenetek a mai kvantumbitek egyik meghatározó platformjának, a szupravezető qubiteknek alapjává váltak. Az egyik első kvantumbit-architektúra pont a potenciálvölgyben megjelenő kvantált energiaszintekből használta az alsó kettőt a kvantumbit létrehozására. Ezt fázisqubitnek nevezik. A későbbi qubitarchitektúrákban a Josephson-átmenetet más áramköri elemekkel is kiegészítették, például egy szupravezető szigettel vagy egy extra kapacitással vagy induktivitással. Ezekről a

Fizikai Szemle 2025/7–8. tematikus számában lehet részletesen olvasni. Ezek a qubitek hatalmas fejlődésen mentek keresztül, és ma már a nagy techcégek (Google, IBM stb.) a terület vezetői. Az idei díjazottak közül Martinis és Devoret is a Google kvantumos kutatásaiban vett, illetve vesz vezető részt.

A kvantumtechnológiai kutatások Magyarországon is aktívak. A BME Kvantumelektronika Csoportja – melynek vezetői a jelen cikk szerzői – vizsgált például olyan Josephson-átmeneteket, ahol egy grafénréteg adja az átmenetet a két szupravezető közt, és itt is megfigyelték a makroszkopikus kvantumos alagutazás jelenségét. A Josephson-átmenetekhez hasonlóan viselkednek a vékony szupravezető vezetékek is, ahol szintén megfigyeltük a kvantumos alagutazást (T. Elailaly et al., *ACS Nano*, 17(6), (2023), 5528–5535.). Ezekről a kutatásokról is a *Fizikai szemle* 2025/7–8. számában lehet olvasni.

Végül, a BME Fizikai Intézete immáron sokadik éve rendezi meg a Nobel-díjas kísérletek szakkörét (<https://felvi.ttk.bme.hu/hu/nobeldijas>), ahol például a szupravezetés jelenségét is lehet vizsgálni. Ezekre az alkalmakra szeretettel várunk minden középiskolást!

A FIZIKA TANÍTÁSA

FUTURUM LUCENS – FIZIKATANÁRI ANKÉT ÉS ESZKÖZBEMUTATÓ, PÉCS

Csikós Viktória
Veres Péter Gimnázium, Budapest
E-mail: csikos.viktoria@verespg.hu

2024. október 25. és 28. között sikeresen lezajlott a 65. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, amelynek mottója ebben az évben: FÉNYes jövő. Ennek megfelelően a központi téma a lézerek működése és széles körű alkalmazási lehetősége volt. A továbbképzés helyszínül a pécsi Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma szolgált. Az intézmény lehetőséget biztosított az előadások, eszközbemutatók, műhelyek és fakultatív programok egy helyen történő megtartására. A szálláshelyek közel voltak, a programok helyszíne néhány percnyi sétával elérhető volt.



Csikós Viktória 2020-ban szerezte diplomáját az Eötvös Loránd Tudományegyetemen középiskolai matematika-fizika tanár szakon. Azóta a Békásmegyeri Veres Péter Gimnáziumban tanít, ahol 2021 óta osztályfőnökként, 2024-től pedig a fizika-informatika munkaközösség vezetőjeként dolgozik. 2024-ben megkezdte doktori tanulmányait az ELTE Fizikatanári Doktori Iskolájában. A diploma megszerzése óta minden évben rendszeres résztvevője a Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatónak, 2025 nyarán pedig a GIREP Nemzetközi Fizikatanári Konferenciáján is részt vett Leidenben.

A program szervezését idén is az Eötvös Loránd Fizikai Társulat Oktatási Szakosztályának vezetősége és a társulat titkársága végezte, valamint az ideai továbbképzés pécsi házigazdájaként Kilián Balázsné Raics Katalin látta el a helyi koordinációs feladatokat. Katalinnal együtt számos pécsi kolléga is részt vett a rendezvény előkészítésében és lebonyolításában. Ezúton is köszönjük áldozatos munkájukat.

Október 25. péntek

A 65. Fizikatanári Ankét megnyitójára pénteken délután került sor, a megnyitó eseményt Moróné Tapody Éva vezette. Köszöntötte a megjelent kollégákat, Nyisztor Zsol-



Reflexió hologram

tot, az iskola igazgatóját, *Osztásné Varga-Pál Viktóriát*, a városi hivatal Kulturális és Népiéleti Osztályának vezetőjét és *Ormos Pál* professzort, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat elnökét. Mindhárman köszöntötték a megjelent tanárokat, kollégákhoz szóló kedves szavaikat hallhattuk.

A megnyitón a szokásokhoz híven átadták a Mikola Sándor-díjat és a Vándorplakettet. Ebben az évben a Mikola Sándor-díjat *Rudolf Tamásné Marika* vehette át az általános iskolai kategóriában, valamint *Szeidemann Ákos* a középiskolai kategóriában. A díjakat az ELFT elnöke adta át. A Vándorplakettet hagyomány szerint a tavalyi díjazott, *Borbélyné Bacsó Viktória* adta tovább; ebben az évben *Komáromi Annamária* kapta. Ezt követően *Gelencsér András* előadását hallgathattuk meg a fenntartható fejlődésről, majd a vacsora elfogyasztása után az Oktatási Hivatal munkatársai, *Sipos Imre* és *Csajági Sándor* voltak vendégeink, akikkel *Kirsch Éva* moderálásával hasznos szakmai beszélgetést folytathattunk a fizikaoktatás jelenlegi helyzetéről.

Október 26. szombat

A nap elején az eszközkiállításon bemutatkozó kollégák berendezték asztalaikat, majd bemutatkoztak. Ezután a reggeli órákban két előadást hallgathattunk meg. Először *Sánta Imre* adott elő a LEGek a Tudományban – a LÉZER címmel, majd *Hömöstre Mihály* cselekvésközpontú tanóráinak részleteibe nyerhettünk betekintést. A következő előadások a délelőtti folyamán zajlottak. *Detre Örs Hunor*: Az óriás űrtávcsövektől a zsebszatelletekig és *Kun Ferenc*: A tojáshéjtól az űrszemétig címmel tartották meg mindenki számára érdekességekkel teli előadásait. Délután az eszközkiállítást tekinthették meg a kollégák, sok színes, új módszertani ötletet ismerhettünk meg.

A délután folyamán hagyományteremtő jelleggel indultak el az utcai kísérletek, melynek során vállalkozó kedvű kollégáink, *Molnár Milán*, *Pál Zoltán* és *Sebestyén Zoltán* érdekes kísérleteket mutattak be az iskola udvarán és az épület előtt. A kísérletek nemcsak a továbbképzés résztvevői számára voltak izgalmasak és szolgáltak új ötletekkel. A program minden érdeklődő számára nyitott volt, lehetőséget biztosítva ezzel a tudományos ismeretek szélesebb körű megosztására.



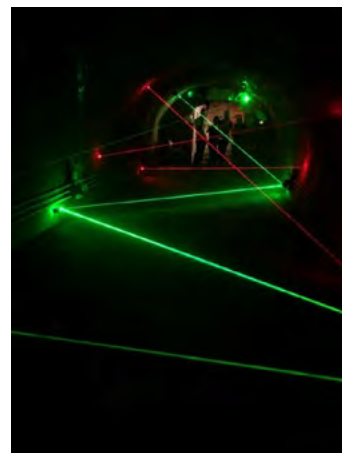
Sebestyén Zoltán kísérletet mutat be

Eszköztárunkat a délutáni műhelyfoglalkozásokon tovább bővíthettük. Ebben az évben különösen nagy számú műhelyt tartottunk meg, a két nap alatt összesen 32 különféle előadásból választhattunk. Szombaton az alábbi műhelyfoglalkozásokon vehettünk részt: *Bakosné Novák Andrea*: Kézzelfogható hullámok; *Barsy Anna*: AI a fizikaórán, Redmenta-ötletek; *Beszeda Imre*: A szilvalekvár viszkozitása; *Borbélyné Bacsó Viktória*: STEM & ART Science On Stage-tapasztalatok; *Burkovics Márton* és *Kosztó Péter*: AI-praktikák az osztályteremben és azon kívül; *Csikós Viktória*, *Antalné Csorba Katalin*, *Varga Szabolcs*: Játékosítás a fizikatanításban; *Farkas Oszkár*: Kutat-e a kutatótanár?; *Horváth Zoltán*: Űrkutatás, csillagászat és robotika – oktatási program; *Jéhn János*: A PHET és más szimulációs programok használata; *Kovács Eszter*: Beszámoló az ESA robotika-workshopjáról; *Piláth Károly* és *Vitkóczy Fanni*: A világ infravörös szemmel; *Schnider Dorottya*: Kutatási naplóval támogatott fizikaprojektek; *Stonawski Tamás*: Hányan építették a Kheopsz-piramist?; *Szeidemann Ákos*: Projektérettségi és az oda vezető egyik lehetséges út; *Zátonyi Sándor*: A síktükrös trükkös képalkotása.

A vacsorát követően a pécsi kollégák szervezésében egy közös vetélkedőn vehettünk részt, amelyen csapatokba rendeződve oldhattunk meg játékos, rendkívül kreatív feladatokat. A vetélkedőt követően a házigazdák esti fogadásra invitáltak bennünket, ahol a résztvevők kötetlen beszélgetések keretében oszthatták meg tapasztalataikat és szakmai megfigyeléseiket.

Október 27. vasárnap

A napot négy izgalmas előadás meghallgatásával kezdtük. *Jarosievtz Beáta*: Van-e fény az alagút végén?; *Sükösd Csaba*: Hogyan bújik ki a foton az atomból?; *Kirsch Éva*: A 3 dimenziós marslakó és *Zimányiné Horváth Vera*: 2 400 000 000 000 000 000 000 attoszekundum az ELI ALPS Lézeres Kutatóintézetéről. Az előadások utáni szünetben ismét lehetőség volt az eszköz- és poszterkiállítás megtekintésére, valamint a helyet adó intézmény Lézerpincéjének meglátogatására. A Lézerpince az itt dolgozó kollégák tízéves munkájának eredménye. Rendkívül változatos és színvonalas, a fényt kihasználó, többek között lézert



Optikai kísérlet



Ujvári Sándor kísérleti bemutatója

felhasználó kiállítást nézhettünk meg. A délutánt az alábbi műhelyfoglalkozásokon való részvétellel folytattuk: *Hódos László Roland*: Kísérletek a fizikai optikából; *Horváth Norbert*: Tehetséggondozás műonázpor alatt; *Hömostrei Mihály, Bottka Benedek*: Mérnöki kompetenciák fejlesztése tanulói mérőkísérletekkel; *Izsa Éva*: Káosz a Dynamic Solverben; *Jéhn János*: Kísérletek és feladatok a Terrán napelemes modulhoz; *Matics Martin*: Szakköri feladatok; *Nagy Anett*:

MI a fizikaórán; *Simon Péter*: A

Mikola Verseny pécsi döntőjének méréseiről; *Sebestyén Zoltán*: Nem élhetünk mágnesség nélkül; *Slezsák Zsolt*: Egy fizikaverseny fél évszázada; *Szász János Péter*: Profi, de egyszerű áramkörszimuláció fizikaórán; *Tarján Péter*: Színes kísérletek; *Vadász Gergely*: Microbit, játék fizikatanároknak; *Hömostrei Mihály*: Tanulási napló; *Vitkóczy Fanni, Herendi Borbála*: PhysCards Krakkó.

A vacsorát követően egy vendégek számára is nyitott program következett, a 10 perces kísérletek. Nyolc kolléga készült szórakoztató bemutatóval. *Beszeda Imre* és *Stonawski Tamás*: Kétréses interferenciakísérlet; *Horváth Norbert*: 100 dolláros kísérlet; *Molnár Milán*: Lát-tam, vettem, továbbítottam; *Nyerges Gyula*: Fekete láng; *Pál Zoltán*: Lézershow; *Tarján Péter*: Színek a csőben és *Ujvári Sándor*: Te is meg tudod csinálni fantáziánévvel ellátott 10 perces kísérleteit láthattuk.

Október 28. hétfő

Az Ankét zárónapján *Pálfalvi László*: Az atommag ereje a gyógyításban; *Lukács András*: Molekuláris mozi – biológiai folyamatok megfigyelése ultragyors lézerekkel és *Borbély Venczel*: Kalandozások a holográfiával című előadásokat hallgathattuk meg. Utolsó programként a műhelyfoglalkozások, eszközkiállítások és 10 perces kísérletek versenyének ünnepélyes eredményhirdetése

következett. A 65. Országos Fizikatanári Ankétot és Eszközbemutatót *Sükösd Csaba*, az ELFT elnökségi tagja rövid beszéddel zárta.

Végül mindannyiunk nagy örömeire megtudhattuk a következő évi ankét helyszínét. A 2025-ös Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató Kecskeméten lesz.

A műhelyek díjazottjai:

1. díj: *Zátonyi Sándor*,
2. díj: *Bottka Benedek – Hömostrei Mihály, Jéhn János, Stonawski Tamás*.
3. díj: *Bakosné Novák Andrea, Beszeda Imre, Herendi Borbála-Vitkóczy Fanni, Sebestyén Zoltán, Szeidemann Ákos*.

A Gábor Dénes-különdíjat elnyerte:

Nagy Anett, Hódos László Roland.

Az eszközkiállítás díjazottjai:

1. díj: *Piláth Károly*,
2. díj: *Pál Zoltán, Pertis Szabolcs, Szász János Péter*,
3. díj: *Horváth Zoltán*.

A 10 perces kísérletek 1. helyezettje:

Ujvári Sándor.

A 65. Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató támogatói: MVM Paksi Atomerőmű Zrt., Pécs Megyei Jogú Város Önkormányzata, Ciszterci Rend Nagy Lajos Gimnáziuma, Körber Hungária Kft., Novofer Zrt., Pécs-Baranyai Kereskedelmi és Iparkamara, Pécsi Orgonaépítő Manufaktúra Kft, Semilab Félvezetőfizikai Laboratórium Zrt., TECHNOORG-LINDA Kft., Tenkesdekor Stúdió és Nyomda, Terrán Tetőcserép Gyártó Kft., Trüffel Cukrászda, Z Elektronika Kft., Universitas Quinqueecclesiensis Alapítvány.

MEGEMLÉKEZÉS

EDWIN F. TAYLOR (1931–2025)

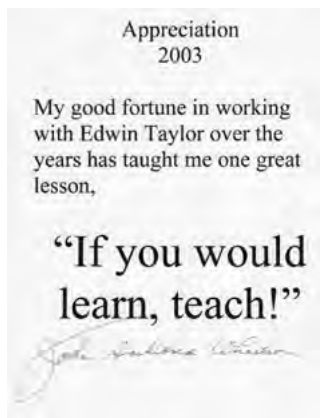
Bokor Nándor

BME Természettudományi Kar, Fizika Tanszék, Budapest; E-mail: bokor.nandor@ttk.bme.hu

2025. április 22-én, életének 94. évében elhunyt Edwin F. Taylor, akit a magyar fizikusok és fizikatanárok generációi elsősorban mint a „Téridőfizika” című könyv (Gondolat Kiadó, 1974, illetve Typotex Kiadó, 2006) társszerzőjét ismerik.

Taylor az Oberlin College-ban szerzett fizikusi diplomát 1953-ban, majd a Harvardon PhD-fokozatot, ahol

témavezetője Nicholaas Bloembergen volt. A doktori cím megszerzése után a Wesleyan University tanársegédje lett. Az 1962/63-as tanévet a Princeton Universityn töltötte alkotói szabadságon. Ottani találkozása John Archibald Wheelerrel alapjaiban befolyásolta szakmai pályafutását. Az az előadásjegyzet, amelyet Wheeler első éves fizikushallgatónak tartott kurzusára és saját kreatív



A legendás szerzőpáros egyik tagja nagyrabecsülését fejezi ki a másik tagnak: ez a papírlap Taylor dolgozószobájának falát díszítette egészen a haláláig

di stílusával a teljesen laikus közönség számára is lehetővé teszi a speciális relativitáselmélet mély megértését.

Taylor félig-meddig már az 50-es években elkezdődött a fizika oktatása és a tankönyvírás mellett. Első tankönyve, az „Introductory Mechanics”, amit még princetoni tartózkodása előtt írt, 1963-ban jelent meg a Wiley & Sons kiadónál. Mégis a John Wheelerrel való találkozás volt az, amely megérlelte és megszilárdította a döntését: kutatás helyett a felsőfokú fizikaoktatás fejlesztése, módszertanának átgondolása, tankönyvek írása lesz szakmai hivatása. Mivel a Princetontól kész kutatási terv nélkül tért vissza a Wesleyan Universityre, nem hosszabbítottak vele szerződést. Szerencsére az MIT frissen alakult oktatásmódszertani csoportjának vezetője, Jerrold Zacharias felkérte, csatlakozzon hozzájuk, és vegyen részt új, friss szemléletű egyetemi tankönyvek és módszerek kifejlesztésében. Ennek keretében Taylor az elsők között volt, akik szoftveres modellezéssel segítették a hallgatókat a fizikai elméletek, pl. a relativitáselmélet és a kvantummechanika megértésében.

Még az 1960-as évek közepén kezdett el dolgozni Anthony French-csel egy kvantummechanika-tankönyv megírásán, ez a könyv végül 1978-ban jelent meg „An Introduction to Quantum Physics” címmel (a Norton & Co. kiadónál), az „MIT Introductory Physics Series” sorozatban. Az 1990-es években figyelme az általános relativitáselmélet oktatása felé fordult. Így született meg a legendás Taylor–Wheeler szerzőpáros második zseniális könyve, a „Téridőfizika” folytatásának is tekinthető

ötleteire építve írt, adta az alapját annak a tankönyvnek, amely aztán világhírt hozott a szerzőpárosnak. A „Spacetime Physics” („Téridőfizika”, első kiadás: Freeman, 1966, átdolgozott kiadás: Freeman, 1992) azóta is a ritka csodák egyike. Nemcsak gyakorló fizikusok, egyetemi hallgatók, fizikatanárok nemzedékei számára szolgál referenciaanyagként, újból és újból elővehető élvezetes, tudásfelfrissítő olvasmányként, de egye-

„Exploring Black Holes” (Addison Wesley Longman, 2000). Wheeler 2008-as halálát követően Taylor évekig dolgozott az „Exploring Black Holes” új kiadásán (ebben szerzőtársként Edmund Bertschinger segítette). Az átdolgozott kiadás végül nem jelent meg nyomtatásban, a szerzők ehelyett 2018-ban a teljes könyvet ingyenesen hozzáférhetővé tették az interneten. A könyv fejezeteként letölthető a www.eftaylor.com/exploringblackholes/ oldalról.

1998-ban Taylor elnyerte az American Association of Physics Teachers legnagyobb elismerését, az Oersted Medalt. (A kitüntetés presztízsére jellemző történet, hogy Richard Feynman a Challenger-katasztrófát kivizsgáló Rogers Bizottság tagjaként a bizottság vezetőjének szóló levelét úgy írta alá, hogy magát a Nobel-díj, az Einstein-díj és az Oersted-érem kitüntetettjeként – valamint politikailag teljesen tudatlanként – jelölte meg.)

Taylor 2013. július 11-én nagy sikerű előadást tartott az ELTE-n az Eötvös Loránd Fizikai Társulat szervezésében, „Completing John Wheeler’s Vision: Undergraduate General Relativity” címmel. (Lásd az ehhez kapcsolódó interjút a Fizikai Szemle 2013/6. számában.) Az előadás után megkapta a társulat emlékplakettjét.

Az „Exploring Black Holes” átdolgozott kiadását 2018-ig csiszolgatta. Ezt követően fizikával már csak hobbiszinten foglalkozott, de szellemi frissessége, szenvedélyes érdeklődése a politika, a művészetek, a tudományok iránt mindvégig megmaradt.

Felesége és odaadó társa, Carla Kirmani-Taylor, hosszú betegségét követően 2025. április 11-én hunyt el, alig 11 nappal Edwin halála előtt. Összekevert hamvaikat 2025. július 26-án – végső kívánságuknak megfelelően – massachusettsi otthonuktól nem messze, szűk családi körben egy hajóról az óceánba szórták.

Végül egy személyes, de egyben közérdekű megjegyzés. Edwin Taylor életének utolsó két évtizedében barátsága mellett azzal is kitüntetett, hogy szakmai archívumának kezelője lehetek. A „Téridőfizika” és az „Exploring Black Holes” c. könyvek keletkezéstörténete iránt mélyebben érdeklődő olvasók a bokor.nandor@ttk.bme.hu emailcímen vehetik fel velem a kapcsolatot.



Bokor Nándor egyetemi docens a BME-n szerzett villamosmérnök-diplomát 1993-ban, majd ugyanott fizikából PhD-fokozatot 1999-ben. Munkájában – az optika számos területén végzett kutatásai mellett – legszívesebben a fizika, azon belül kiemelten a relativitáselmélet oktatásának pedagógiai kérdéseivel foglalkozik. Ez utóbbi témában számos publikációja jelent meg a *Fizikai Szemlében*, valamint a *Physics Education* és a *European Journal of Physics* folyóiratokban.



Edwin Taylor előadása az ELTE-n 2013. július 11-én

DONKÓ ZOLTÁN, VASS MÁTÉ: ALACSONY HŐMÉRSÉKLETŰ PLAZMAFIZIKA, HUN-REN WIGNER FK, 2025

Hartmann Péter

HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Szilárdtestfizikai és Optikai Intézet, Budapest
E-mail: hartmann.peter@wigner.hun-ren.hu

A hazai fizikus- és mérnökképzésben meglehetősen kevés figyelem irányul a plazmafizika területére. Nagyenergiás plazmákkal találkozhatnak az asztrofizika iránt érdeklődők a Naprendszer és a napszelet bemutató előadásokon. Energetikai szakokon a forró plazmák részét képezik a magfúziós energia-termeléssel és részecskegyorsítással kapcsolatos tanulmányoknak. Az alacsony hőmérsékletű plazmák azonban, amelyeket a legmodernebb high-tech iparban (pl. a mikroelektronika és napelem gyárakban, és a lézertechnológiában) alkalmaznak, szinte teljesen hiányoznak kurzuskínálatból. Ezen hiányt igyekezett pótolni Donkó Zoltán „Alacsony hőmérsékletű plazmafizika” című tantárgya, amely 2013-ban indult a BME kínálatában, majd akkreditálták az ELTE TTK-n is. Az előadásfóliák tartalmát egységesen összefoglaló előadásjegyzetre hamar igény jelentkezett a hallgatóság részéről, amely igény adta a kezdőleketet a Donkó Zoltán és Vass Máté szerzőségével megjelent „Alacsony hőmérsékletű plazmafizika” című tankönyv megírásához. A kötet idén jelent meg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont által kezdeményezett és gondozott „All Colors of Physics – Sokszínű fizika” könyvsorozat második könyveként. Donkó Zoltán 35 év tapasztalattal rendelkezik az elektromos gázkisülések kísérleti és numerikus módszerekkel való kutatásában, míg Vass Máté 10 évvel ezelőtt, TDK-s diákként csatlakozott a csoporthoz. Máté affinitása az analitikus elméleti fizikához és az absztrakt matematikához nagyban hozzájárult a jelen tankönyv koherenciájához.

Az alacsony hőmérsékletű plazmák – eltérően a csillagokban és fúziós reaktorokban található magas hőmérsékletű társaiktól – eltérnek a termikus egyensúlytól. Ezekben a rendszerekben az elektronok kinetikus energiája több ezer Kelvin foknak felelhet meg, míg az ionok és semleges atomok szobahőmérséklet közelében maradnak. A nemegyensúlyi termodinamika egyedülálló lehetőséget kínál a kémiai reakciók irányítására és az anyagok szerkezetének szabályozására mérsékelt hőmérsékleten, lehetővé téve azokat az alkalmazásokat, amelyeket a hagyományos

termikus módszerekkel nem lehet elérni. Az alacsony hőmérsékletű plazmák éppen ezért egyre nagyobb figyelmet kapnak a modern technológia fontos területein.

Az ipari alkalmazásokon túl, ezen rendszerek számos fizikai jelenséget mutatnak a legkülönbözőbb méret-, és időskálákon, amelyek megértéséhez a fizika számos részterületét érinteni kell. Kezdhetjük a gázkisülési plazmák leginkább szembetűnő tulajdonságával, azzal, hogy világítanak. Fényük azonban nem termikus, sokkal inkább a kisülésben részt vevő atomok és molekulák elektronütközéses gerjesztése és spontán legerjesztése során keletkező, tipikusan vonalas színképpel rendelkező fény. Egyik tudományos alkalmazásuk, a glow discharge spectroscopy (GDS) pontosan ezen alapszik, ugyanis egy ismeretlen minta atomjainak gerjesztésével, a kibocsátott fény spektroszkópiai elemzésével az anyagi összetétel jól meghatározható. A kisülési plazmákban a töltött részecskék transzportja nem lokális, így a helyes leíráshoz a kinetikus elmélet és a statisztikus fizika eszköztára szükséges. De hosszabb időskálán, kollektív jelenségek, úgymint nemlineáris hullámok, pl. szolitonok és önrendeződés alakulhat ki. Szilárd felületekkel való kölcsönhatásuk során elektronemisszió, porlasztás, fonon-, és plazmon-keltés léphet fel.

A kötet igyekszik szilárd fizikai alapokra helyezni az állításait, a szakterületen szokásostól eltérően nem elnagyolva a fizikai alapelvekhez való kapcsolatukat, hangsúlyozva a szükséges közelítéseket és azok érvényességi határait. Az egymást követő fejezetekben a szükséges fizikai alapismeretek bemutatása után azok alkalmazása következik a plazmákra jellemző elektromosan töltött részecskék kölcsönható sokaságára. A kötet bemutatja az elektromos gázkisülések alaptípusait, mint pl. az egyenáramú és rádiófrekvenciás változatokat, az utóbbi kapacitív és induktív gerjesztése esetére. Külön fejezet foglalkozik az analitikusan nem megoldható transzportegyenletek numerikus és szimulációs megoldási módszereivel. Betekintést nyerünk modern plazmadiagnosztikai technikákba, valamint a napjainkban legmodernebbnek számító alkalmazásokba. Egzotikumként megmutatja, hogy az ún. „poros plazmák” hogyan járulnak hozzá a klasszikus fizikában ismert makroszkopikus folyamatok, mint pl. fázisátalakulások, deformáció, áramlások, hullámterjedés stb. mikroszkopikus (atomi szintű) megismeréséhez.

Donkó Zoltán és Vass Máté „Alacsony hőmérsékletű plazmafizika” című könyve ajánlott minden fizikai alapismeretekkel rendelkező olvasónak, akit érdekel, hogy mitől világítanak a gázok, és hogy mindez hogyan járul hozzá napjaink technológia által dominált világának megteremtéséhez.



Hartmann Péter 2000-ben szerzett fizikus-diplomát, majd 2004-ben PhD-fokozatot az ELTE TTK-n. Kutatásait az MTA-SZFKI-ben kezdte, Donkó Zoltán témavezetésével elektromos gázkisülések témakörben. Munkáját azóta is ott, az időközben HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközponttá alakult kutatóhelyen végzi. Elektromos gázkisülések és erősen csatolt plazmák fizikája területeken végez kísérleti és numerikus kutatásokat kiterjedt nemzetközi együttműködések keretében.

A FIZIKAI SZEMLE LXXV. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

<i>Bérczi Szaniszló: Ósfizika: A gondolkodás megalapozása ki- mondható fogalmakkal</i>	181
<i>Csernai László, Kroó Norbert, Papp István, Veres Miklós, Bíró Tamás: Új módszer a lézerfúzióra</i>	321
<i>Földes István: Néhány szó a lézeres fúzióról</i>	188
<i>Horváth Dezső: Milyen nehezek a gyenge bozonok?</i>	191
<i>Illy József: Michelson, Morley és Miller. A híres kísérlet utóélete</i>	198
<i>Mócsy Ildikó: A belső terek fizikai jellemzőiről és egyes szennye- zőiről</i>	20

A MESTERSÉGES INTELLIGENCIA A FIZIKÁBAN

<i>Berekméri Evelin, Pedro Lacerda, Göksel Keskin, Szarvas Zoltán, Palatitz Péter, Nepusz Tamás, Vásárhelyi Gábor, Nagy Máté: Önvezérlő siklórepülő robotpilóta és a fedélzeti állatfelismer- és fejlesztése</i>	2
<i>Fehérvári János Gergő, Balogh Zoltán, Halbritter András Ernő: Neuromorfikus számítástechnika, avagy hogyan váltunk apró- pénzre a 2024-es fizikai Nobel-díjat?</i>	13
<i>Pál Balázs, Dobos László: Közepes felbontású csillagspektrum- mok zajszűrése neurális hálózatokkal</i>	8
<i>Somfai Ellák: A mesterséges intelligencia a fizikában</i>	1

MTA-TAGJELÖLTEK

<i>Bajnok Zoltán: Holográfia a kvantumtérelméletben</i>	85
<i>Csabai István: Bevezető – Az MTA-tagjelöltek írásai</i>	73
<i>Dombi Péter: Az ultragyors nanooptikától a femtoszekundumos anyagtudományig</i>	97
<i>Lugaro Maria, Cseh Borbála, Szányi Balázs: A Nap születésének feltérképezése radioaktív atommagokkal</i>	89
<i>Simon Ferenc: A spintronika: bevezetés és alkalmazások</i>	79
<i>Takács Gábor: Eléri-e az egyensúlyt a zárt kvantumrendsze- rek? – Amikor a „fénykúp” bezárul</i>	74
<i>Tapasztó Levente: Grafénba zárt fény</i>	100
<i>Veres I. Gábor: A Nagy Hadronütköztető első sikerei</i>	93

STATISZTIKUS FIZIKAI KALANDOZÁSOK

<i>Bíró Tamás Sándor: Gintropia – Egyenlőtlenségmérték entropi- kus tulajdonságokkal</i>	119
<i>Kolok Balázs Cseő, Ódor Gergely, Keliger Dániel, Karsai Márton: Paradox járványdinamika viselkedésvezérelt hálózatokon</i> 128	
<i>Kormos Márton: Statisztikus fizika tiszta állapotokkal</i>	114
<i>Kun Ferenc, Szatmári Roland: Repedési zaj zsugorodó vékony- rétegekben</i>	121
<i>Szabó György: Az evolúciós játékelmélet és a statisztikus fizika összefonódása</i>	135
<i>Szabó György: Bevezető – Kalandozás a statisztikus fizikában</i>	109
<i>Takács Gábor: Ergodicitás és termalizáció zárt kvantumrend- szerekben</i>	110

CSILLAGÁSZAT

<i>Bebesi Zsófia, Gabányi Krisztina, Gálik Barbara, Juhász Antal, Forgácsné Dajka Emese: A plazmafizikai folyamatokra visz- szavezethető rádiósugárzás észlelhetősége az exobolygók kör- nyezetében I.</i>	146
<i>Könyves-Tóth Réka: Szupernóva-észlelések a Piskéstudatói Ob- servatórium 80 cm-es robotátvicsővével</i>	153

<i>Sóder Ádám: Mindig napirenden: a csillagászat</i>	145
<i>Szécsi Dorottya: Nagy tömegű csillagok 1D szimulálása: mi okozza a különbségeket a modellekben?</i>	160
<i>Ujjfaludi László: Az egri Főegyházmegyei Könyvtár csillagászati könyvei</i>	164

KVANTUMFIZIKA

<i>Asbóth János: Kvantumfizika 100 – szerkesztői előszó</i>	217
<i>Dávid Gyula, Cserti József: Zitterbewegung – egy kevésbé ismert általános kvantummozgásforma</i>	243
<i>Diósi Lajos: Módosul-e a kvantumelmélet a makrovilágban? 232</i>	
<i>Gyenis András: Az áramkörök kvantálása és a szupravezető kvantumszámítógépek</i>	264
<i>Kriváchy Tamás: Fordulat a kvantumhálózatokban: a mérések szerepe átalakul</i>	255
<i>Kürtössy Olivér, Csonka Szabolcs, Makk Péter: Szupravezető kvantumáramkörök a BME-n</i>	288
<i>László István: Werner Heisenberg és a mátrixmechanika</i>	219
<i>Németh Dániel: A világegyetem kvantumgeometriája a gravitáció rácsérelméletével</i>	236
<i>Polónyi János: A kvantum és klasszikus tartományok határán</i>	228
<i>Pozsgay Balázs: Integrálható modellek a kvantumszámítógépen</i>	277
<i>Rakovszky Tibor: Véletlen kvantum áramkörök</i>	282
<i>Rakya Péter: Kihívások a variációs kvantumáramkörök optimalizálásában</i>	269
<i>Schranz Ágoston, Solymos Balázs, Márton Botond László, Ud- vary Eszter, Kis Zsolt: Kvantumos véletlenszám-generátorok</i>	249
<i>Szabó Attila: Kölcsönható kvantumrendszerek szimulációja gépi tanulással</i>	272
<i>Szabó Gábor: Kvantumelmélet és kauzalitás</i>	225
<i>Werner Miklós, Kapás Kornél: Új perspektívák a kvantum rendszerek klasszikus szimulációjában</i>	260

KOLOZSVÁRI MAGYAR FIZIKUSMŰHELYEK

<i>Bálint Zoltán: 3D nyomtatott eszközök használata a modern su- gárterápiás rákkezelésben</i>	311
<i>Járai-Szabó Ferenc, Sándor Bulcsú: Oktatás és kutatás az erdélyi fizikusközösségben – szerkesztői előszó</i>	293
<i>Józsa Máté, Péntek Balázs, Lázár Zsolt József, Ercsey-Ravasz Mária: Az agy térbeli szerveződése: egy bonyolult rendszer egyszerű szabálya</i>	304
<i>Magyari Klára: Bioaktív üvegek in vitro bioaktivitása</i>	316
<i>Nagy László, Borbély Sándor: Fotoelektron-holográfia</i>	298
<i>Sárhózi Zsuzsa, Nagy Melinda-Katalin, Vörös Alpár István Vita, Karácsony János: Magyar nyelvű fizikaoktatás a Babeş–Bolyai Tudományegyetemen 1990 és 2025 között</i>	294

OTDK, 2025

<i>Ajzenberger Lea, Penc Karlo, Kondákor Márk: Jégmodell kago- me-rácson</i>	385
<i>Balázs Gábor: A meteoritokban található szupernóvaszemcsék fosszilis lenyomatainak vizsgálata</i>	366
<i>Baumgärtner Margareta: A pupillakövetés megvalósítása egy egereket vizuálisan stimuláló rendszerben</i>	381
<i>Fröhlich Viktória: Aszteroidák hamvai egy halott csillag körül</i>	

gázkorongban: mit mesélnek a Ca emissziós vonalai?	370
<i>Fröhlich Viktória</i> : Élet egy csillag halála után: urabilitás a galaktikus sötétségben	368
<i>Husztik Anna</i> : Fragmentációs folyamatok vizsgálata számítógépes szimulációval	389
<i>Lelek Klára</i> : Mikor a fény és a por összeér: egy szupernóva és a csillagkörüli anyag találkozása	372
<i>Ligeti Gábor Mihály</i> : Erőstér-fotoemisszió ultrarövid lézerműpulsusokkal	383
<i>Pálfalvi László, Weiszbürg Tamás</i> : A Fizika alszekció a 37. Országos Tudományos Diákköri Konferencián (OTDK), 2025	365
<i>Péntek Balázs, Ercsey-Ravasz Mária</i> : Az ecetmuslica konnektomjának modellezése az exponenciális távolságszabály alapján	392
<i>Schmercz Blanka</i> : Flerék detektálása és elemzése gyorsfotometriai módszerekkel	374
<i>Szóczi Bálint</i> : A víz szerkezetének vizsgálata molekuladinamikai szimulációkkal	387
<i>Szepessy Dávid</i> : Lehetséges-e csillagászati megfigyelésekkel észlelni a párhuzamos világegyetemek létezését?	376
<i>Szöröcsk Noel</i> : Reciprocitási és középérték tételek az elektro- és magnetosztatikában	395
<i>Toronyi András, Oláh László, Varga Dezső</i> : Légköri műográfia	378

LÁGY ANYAGOK

<i>Börzsönyi Tamás, Somfai Ellák</i> : Különböző alakú szemcsék: mi folyik könnyebben, a rizs, a lencse vagy a borsó?	423
<i>Jákli Antal</i> : Ionos folyadékkristály-gumik lehetséges alkalmazásai a mechatronikában és akkumulátorokban	420
<i>Salamon Péter, Máthé Marcell Tibor</i> : Felületi instabilitások és elektromechanikai jelenségek ferroelektromos nematikus folyadékkristályokban	415
<i>Salamon Péter</i> : Lágy anyagok a fizikában – Bevezető	409
<i>Szomor Zsombor, Bereczki Dóra, Fürjes Péter</i> : Cseppek mikrofluidikai rendszerekben	410

KALEIDOSZKÓP

<i>Ábrahám Péter</i> : Mérőföldkövek a hazai fizika és csillagászat modern kori történelméből	401
---	-----

NOBEL-DÍJ 2025

<i>Makk Péter, Csonka Szabolcs</i> : A 2025. évi fizikai Nobel-díjról	427
---	-----

REFLEKTORFÉNYBEN

Kutatók Éjszakája az Ericsson Házban	328
<i>Ötvös Zoltán</i> : Pápa Zsuzsanna L'Oréal–UNESCO ösztöndíjas	27
<i>Ötvös Zoltán</i> : Sólyom Jenő Akadémiai Aranyérmes	325

A FIZIKA TANÍTÁSA

<i>Borbélyné Bacsó Viktória, Komáromi Annamária</i> : Science on Stage Festival 2024 Turkuban	32
<i>Csikós Viktória</i> : Futurum Lucens – Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, Pécs	430
<i>Gärtner István</i> : Megrázó élmények – Kísérleti bemutató 9. osztályos diákok közreműködésével	65
<i>Gombási Róbert, Goertz Amélie, Vincze Miklós, Szeidekman Ákos</i> : Ülepítés döntött folyadékban, avagy elmerülés egy érdekes problémában	104
<i>Härtlein Károly</i> : Hordó alakítása vákuummal, túlnyomással és lökeshullámmal	208
<i>Hasznosi Tamásné</i> : Tegyük néhány kört Arkhimédész körül! A Csodák Tanodája csapat szereplése a Kutatók Éjszakáján	49
<i>Jarosievtz Beáta</i> : Kutatók Éjszakája – „Öveges Tanár Úr Utódai” – A fizika népszerűsítése fizikatanárokkal és sztárokkal 3 éves kortól, informálisan	44

<i>Koncz Károly, Simon Péter</i> : 44. Mikola Sándor Országos Középiskolai Tehetségkutató Fizikaverseny – Beszámoló 351	
<i>Kovács Zoltán</i> : A fizikai ismeretek és feladatok nehézségi fokának becslése	329
<i>Nagy Mórió Tibor, Korom Erzsébet</i> : Miért fontos a tudomány működésének megértése? – A tudomány természetével kapcsolatos nézetek vizsgálata gimnazisták körében	68
<i>Nógrádi Zsófia</i> : A szennyeződés terjedésének modellezése a középiskolában	141
<i>Ollé Hajnalka, Kovács Tamás</i> : Numerikus módszerek a középiskolában? Igen, lehetséges! Exobolygók mozgásának modellezése	171
Országos Károlyházy Frigyes Problémamegoldó Verseny tanárszakos hallgatók számára	31
<i>Pesthy Sándor Gergely, Pesthy Dorottya, Hömöstrei Mihály</i> : A természettudományos érdeklődés és a kreativitás összefüggései – hogyan segítheti egymást a fizika- és rajztanár?	203
<i>Radnóti Katalin</i> : Gondolatok a fizika tanításáról a Kutatók Éjszakája kísérletei kapcsán	37
<i>Radnóti Katalin</i> : Iskola és fizika – Beszélgetés Jarosievtz Beátával és Sükösd Csabával	39
<i>Schramek Anikó</i> : Színes kísérletek a Kutatók Éjszakáján 63	
<i>Simon Alpár, Tunyagi Árpád Róbert, Bodó Kinga</i> : Állandó mágnesek elrendezéseinek kísérleti tanulmányozása	335
<i>Stonawski Tamás, Beszed Imre, Gombosné Kovács Kinga</i> : Feszült pillanatok – kísérletek befőttesgumival	345
<i>Sükösd Csaba</i> : A XXVIII. Országos Szilárd Leó Fizikaverseny	358
<i>Szabó László</i> : Hangoskodjunk egy kicsit!	56
<i>Szenkovits Ervin, Popa Márta, Jármai-Szabó Ferenc</i> : Diákprojekt a homokdomb kritikus viselkedésének tanulmányozására	340
<i>Udvardi Imre</i> : „Kísérletek tűzön-vízen át”	61
<i>Ujvári Sándor</i> : Hands-on kísérletek a Kutatók Éjszakáján	52

HÍREK, ESEMÉNYEK

A HUN-REN EK és a tanítványok: Az egy kultúra gyönyörűsége, avagy rendszertelen köszöntő a statisztikus fizika ürgyén	(4)B3
A kvantumok világa, előadás-sorozat 2025. szeptemberben	(7–8)B3
Beszámoló az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2025. május 10-ei küldöttgyűléséről	216
<i>Kiss L. László</i> : Az MTA Momentum MSCA Programja: út Magyarországra	400
<i>Szász Krisztián</i> : Sikeres szereplés fizikai diákolimpiákon	(10)B3

MEGEMLEKEZÉS

<i>Bokor Nándor</i> : Edwin F. Taylor (1931–2025)	432
<i>Kertész János</i> : Hajdu János (1934–2025)	399
<i>Kiss László</i> : Emlékszilánkok Szatmáry Károlyról és az 1990-es évekről	179
<i>Króó Norbert</i> : Száz éve született Pál Lénárd	397
<i>Szalai Tamás, Szabó M. Gyula, Székely Péter</i> : Dr. Szatmáry Károly (1956–2024) – Emlékezés az SZTE csillagászprofesszorára	177

KÖNYVESPOLC

<i>Hartmann Péter</i> : Donkó Zoltán, Vass Máté: Alacsony hőmérsékletű plazmafizika, Hun-Ren Wigner, 2025	434
<i>Horváth Dezső</i> : Sean Carroll: „The biggest ideas in the Universe: Space, time, and motion”	292
<i>Pálinkás József</i> : Teller Ede-őről – saját szavaival	324
<i>Radnóti Katalin</i> : A zseni, aki megváltoztatta a történelmet	214
<i>Ván Péter</i> : Biró Tamás Sándor: Gintropy	36

A Fizikai Tudományok Osztályának kiállítása az MTA alapításának 200. évfordulájára



Fotó: Szigeti Tamás, MTA

Ferroelektromos nematikus folyadékkristály-csepp ágasodási instabilitása elektromos mezőben

*Salamon Péter, Máthé Marcell Tibor: Felületi instabilitások és elektromechanikai
jelenségek ferroelektromos nematikus folyadékkristályokban, 415. oldal*

