

fizikai szemle



2025/11

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, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Járai-Szabó Ferenc, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Pásztor Gabriella, Sándor Bulcsú, Simon Ferenc, Simon Péter, Sódor Ádám, Sükösd Csaba, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

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

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

A Társulat és a folyóirat honlapja:

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

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

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



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:*

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

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

A Jupiter Európa holdjának jeges felszíne alatt feltételezett sós vízü óceán (NASA/JPL-Caltech) lásd Fröhlich Viktória írását a 368–369. oldalon

TARTALOM

A 2025. ÉVI ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA (OTDK) MUNKÁIBÓL

Vendégszerkesztők: Pálfalvi László, Weiszbürg Tamás

<i>Pálfalvi László, Weiszbürg Tamás:</i> A Fizika alszekció a 37. Országos Tudományos Diákköri Konferencián (OTDK), 2025	365
<i>Balázs Gábor:</i> A meteoritokban található szupernóvaszemcsék fosszilis lenyomatainak vizsgálata	366
<i>Fröhlich Viktória:</i> Élet egy csillag halála után: urabilitás a galaktikus sötétségben	368
<i>Fröhlich Viktória:</i> Aszteroidák hamvai egy halott csillag körüli gázkorongban: mit mesélnek a Ca emissziós vonalai?	370
<i>Lelkes Klára:</i> Mikor a fény és a por összeér: egy szupernóva és a csillagkörüli anyag találkozása	372
<i>Schmercz Blanka:</i> Flerek detektálása és elemzése gyorsfotometriai módszerekkel	374
<i>Szepessy Dávid:</i> Lehetséges-e csillagászati megfigyelésekkel észlelni a párhuzamos világegyetemek létezését?	376
<i>Toronyi András, Oláh László, Varga Dezső:</i> Légköri müográfia	378
<i>Baumgärtner Margareta:</i> A pupillakövetés megvalósítása egy egereket vizuálisan stimuláló rendszerben	381
<i>Ligeti Gábor Mihály:</i> Erőstér-fotoemisszió ultrarövid lézerpulzusokkal	383
<i>Ajzenberger Lea, Penc Karlo, Kondákor Márk:</i> Jégmodell kagome-rácson	385
<i>Soczó Bálint:</i> A víz szerkezetének vizsgálata molekuladinamikai szimulációkkal	387
<i>Husztok Anna:</i> Fragmentációs folyamatok vizsgálata számítógépes szimulációval	389
<i>Péntek Balázs, Ercsey-Ravasz Mária:</i> Az acetmuslica konnektomjának modellezése az exponenciális távolságabszólvány alapján	392
<i>Szöröcsök Noel:</i> Reciprocitási és középérték-tételek az elektro- és magnetosztatikában	395

MEGEMLÉKEZÉS

<i>Kroó Norbert:</i> Száz éve született Pál Lénárd	397
<i>Kertész János:</i> Hajdu János (1934–2025)	399

HÍREK, ESEMÉNYEK

<i>Kiss L. László:</i> Az MTA Momentum MSCA Programja: út Magyarországra	400
KITÜNTETÉSEK	B3

~ ~ ~ ~ ~

<i>L. Pálfalvi, T. Weiszbürg:</i> The Physics Subsection at the 37th National Scientific Student Association Conference (OTDK), 2025	
<i>G. Balázs:</i> Studying fossil imprints of supernova particles in meteorites	
<i>V. Fröhlich:</i> Life after the death of a star: Urability in galactic darkness	
<i>V. Fröhlich:</i> Asteroid ashes in a gas disk around a dead star: What do the Ca emission lines tell us?	
<i>K. Lelkes:</i> When light and dust meet: The encounter between a supernova and circumstellar matter	
<i>B. Schmercz:</i> Detection and analysis of flares using rapid photometric methods	
<i>D. Szepessy:</i> Is it possible to detect the existence of parallel universes through astronomical observations?	
<i>A. Toronyi, L. Oláh, D. Varga:</i> Atmospheric muography	
<i>M. Baumgärtner:</i> Implementing pupil tracking in a mouse visual stimulation system	
<i>G. M. Ligeti:</i> Strong-field photoemission in terms of ultrashort laser impulses	
<i>L. Ajzenberger, K. Penc, M. Kondákor:</i> Ice model on kagome grid	
<i>B. Soczó:</i> Investigating the structure of water by molecular dynamics simulations	
<i>A. Husztok:</i> Investigating fragmentation processes by computer simulation	
<i>B. Péntek, M. Ercsey-Ravasz:</i> Modeling the connectome of the fruit fly based on the exponential distance rule	
<i>N. Szöröcsök:</i> Reciprocity and mean value theorems in electro- and magnetostatics	

COMMEMORATION

<i>N. Kroó:</i> Lénárd Pál was born a hundred years ago	
<i>J. Kertész:</i> János Hajdu (1934–2025)	

NEWS, EVENTS

<i>L. L. Kiss:</i> The Momentum MSCA Program of HAS: Road to Hungary	
--	--

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM



A FIZIKA ALSZEKCIÓ A 37. ORSZÁGOS TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIÁN (OTDK), 2025

Az első OTDK-t 1955-ben rendezték meg. 70 év alatt már kultúra tud kialakulni, különösen a gyorsan fejlődő területeken, mint amilyen a tudomány is. Ez azt is jelenti, hogy mindenki, aki ma Magyarországon aktív a tudományos életben, valahogy találkozott a TDK-val. A tudományos diákköri mozgalom hungarikum, a kutatás előszobája a hazai, és már bő két évtizede a Kárpát-medencei magyar felsőoktatásban. Kutatóink, egyetemi oktatóink többsége TDK-zott, témavezetőként, konzulensként, bírálattal, zsűrizéssel, vagy csak egy-egy mérésel, tanáccsal segítette a tudományban szárnyát bontogató nemzedéket. Kiemelten igaz ez a fizikára, egy olyan szakterületre, ahol évtizedes, évszázados hagyománya van a tanítvány korai, egyenrangú bevonásának a mesterek mellé a műhelyekbe.

A 2025-ben rendezett 37. OTDK a „legek” OTDK-ja volt. Soha ennyi dolgozat (stabil minőség mellett), soha ekkora szakmai és társadalmi nyilvánosság az online közvetítések által. A fiatal tudósok és mestereik üzenete egyértelmű: a tudomány itthon él és élni fog.

A 37. OTDK Fizika alszekciója idén is sokszínű és izgalmas programot kínált. A Pécsi Tudományegyetem vendéglátásában lezajlott rendezvényen 131 hallgató mutatta be kutatásait. A résztvevők az alábbi hazai egyetemekről érkeztek: Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Debreceni Egyetem, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Óbudai Egyetem, Pécsi Tudományegyetem, Szegedi Tudományegyetem. A mezőnyt határon túli versenyzők is színesítették a Babeş-Bolyai Tudományegyetemről, a Comenius Egyetemről és a Sapientia Erdélyi Magyar Tudományegyetemről.

A tagozatok szervezését és a zsűri felkérését hagyományosan az OTDT FiFöMa Szakmai Bizottságának fizikus tagjai és az alszekciók helyi koordinátorai közösen végzik. A munkában *Hagymási Imre* (HUN-REN Wigner FK), *Horváth Ákos* (ELTE), *Járai Szabó Ferenc* (BBTE), *Pálfalvi László* (PTE) és *Rácz Ervin* (Óbudai Egyetem) vettek részt. 18 tagozat alakult ki kedvezőnek mondható 6–9 fős létszámokkal. Elégedettséggel töltötte el a szervezőket, hogy a zsűrijelentések túlnyomó része valóban érdemi, mélyreható, alapos, a jelöltek munkáját segítő értékelést tartalmazott.

A bemutatott témák a fizika szinte teljes spektrumát lefedték: az *asztrofizika és csillagászat*, *nukleáris és részecskefizika*, *optika*, *kvantumfizika*, *térelmélet*, *anyagtudomány*, *komplex rendszerek fizikája*, *biofizika*, valamint a *fizika és a matematika tanítása* egyaránt helyet kapott. Különösen aktívak voltak a *csillagászat-asztrofizika* területén indulók: e téma népszerűségét jól mutatja, hogy önmagában öt tagozatot is megtöltött.

A *Fizikai Szemle* felkérte a tagozatok zsűrielnökeit, hogy ajánljanak közlésre érdemes dolgozatokat a konferencia anyagából – örömteli módon a legtöbben éltek is ezzel a lehetőséggel, így e lapszám szinte minden tagozatból kínál válogatást.

A zsűri összeállítása minden évben komoly kihívást jelent, hiszen a szakmai sokszínűség mellett szem előtt kell tartani a szigorú összeférhetetlenségi szabályokat is. A bizottságokban idén is több külföldön élő kutató vállalta a részvételt, így többek között a *Columbia University*, a *University of Florida*, a *University of Sheffield*, az *Universidad Simón Bolívar*, a *Strasbourg-i Egyetem*, a *Hamburgi Egyetem* és a *Grazi Egyetem* magyar munkatársai is szerepet vállaltak. Hagyományosan erős képviseléssel volt jelen a *Babeş-Bolyai Tudományegyetem* is.

A tudományos programot *Robertus von Fay-Siebenbürgen*, a University of Sheffield professzora „Együtt élni egy csillaggal” című előadásával gazdagította, és saját díjfelajánlással is támogatta a szekciót. *Geresdi István*, a PTE Földrajzi és Földtudományi Intézetének fizikus-professzora a „Felhőkben lejátszódó folyamatok kutatása: mérés és numerikus modellezés” címmel tartott előadást. A házigazda egyetem fiatal oktatói és hallgatói is szerepet vállaltak a programban: népszerűsítő előadások és laborlátogatásaik során az érdeklődők bepillantást nyerhettek a *Szentágothai János Kutatóközpontban* működő *Nagyintenzitású Terahertzes Laboratórium* világába.

A zsűriben ipari partnerek képviselői is megjelentek. A *BlackRock* vállalat például kerekasztal-beszélgetést szervezett a fiatal kutatók számára, ahol a befektetési szféra kutatási és karrierlehetőségeiről esett szó – jól illusztrálva, hogy a fizika módszertana a legkülönfélébb területeken értékes tudást jelent.

Külön öröm volt a középiskolások lelkes bekapcsolódása: egyesek az egyetemi mezőnyben mérették meg magukat, mások a párhuzamosan zajló középiskolási versenyen mutatták be előadásukat vagy saját készítésű videóikat. Jelenlétük azt mutatja, hogy a fizika iránti kíváncsiság és alkotókedv már a felsőoktatás előtt is erősen jelen van.

A rendezvény barátságos, inspiráló légkörben zajlott, és a visszajelzések alapján a résztvevők értékes szakmai tapasztalatokkal és új kapcsolatokkal térhettek haza.

Pálfalvi László,
az OTDK Fizika alszekció koordinátora

Weiszburg Tamás,
elnök
Országos Tudományos Diákköri Tanács

A METEORITOKBAN TALÁLHATÓ SZUPERNOVA-SZEMCSÉK FOSSZILIS LENYOMATAINAK VIZSGÁLATA

Balázs Gábor

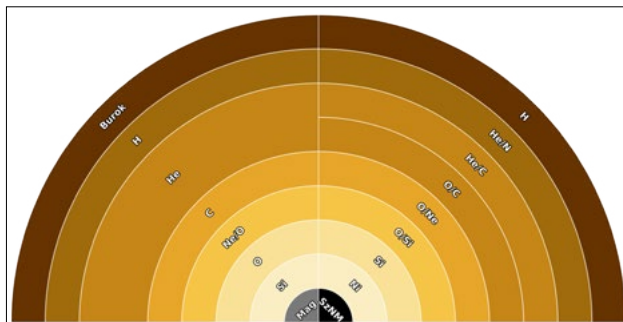
E-mail: balazs.gabor@csfk.org

A Naprendszer egy molekulafelhőből jött létre; olyan folyamatok révén, amelyek során a felhő anyaga, azon belül is a porszemcsék egyre nagyobb testekké, majd végül bolygókká álltak össze. A bolygók kialakulásához a növekvő méretű bolygócsírák sorozatos ütközése és összeolvadása vezetett, azonban az ütközések során kilökődő anyag nem minden esetben épült be a későbbi égitestekbe. Az így megmaradt kisebb darabokat ma meteoroidként ismerjük. Amennyiben ezek túlélnek a Föld légkörébe való belépést, és a felszínre érnek, meteoritnak nevezük őket.

A meteoritok kémiai elemzése egyedülálló betekintést nyújt a korai Naprendszer időszakába, mivel kémiai összetételük lenyomatként őrzi a szülőégitestjeik kialakulásának körülményeit és folyamatait. A különböző eredetű meteoritok precíz tömegspektrometriai vizsgálatai eltéréseket mutattak a földi laboratóriumi standard értékekhez képest. Ezeket az eltéréseket izotópanomáliáknak nevezzük. Az izotópanomáliák egyik magyarázata, hogy a Naprendszer kialakulása előtt történt szupernóva-robbanásból származó szemcsék keveredtek a molekulafelhő anyagába. Az ilyen anomáliák eloszlása alapján megállapítható, hogy ezek a szemcsék heterogén módon oszlottak el, mivel a meteoritok két jól elkülöníthető csoportra oszlanak: a belső Naprendszerből származó, szenes kondritokra és a külső Naprendszerből származó, nem szenes kondritokra. Bizonyos elemek, például a nikkel (Ni) esetében a mért eltérések erős korrelációt mutatnak.

A csillagok életük legnagyobb részét a hidrogén fúziójával töltik. Fejlődésük során egyre nehezebb elemeket építenek fel fúziós reakciók révén. A Napunknál 8–10-szer nagyobb tömegű csillagokban a fúzió egészen a vasig képes elemeket létrehozni, azonban a vas fúziója energetikailag már nem kedvező, így a vasmag kialakulása után a csillag magösszeomlásos szupernóvaként fejezi be életét. Mire a csillag eljut a vasmag kialakulásáig, belsejében egyre több hagymahéjszerű réteg alakul ki. Ezekben a héjakban az előző fúziós folyamat továbbra is

zajlik: a legkülső hidrogénhéjtól a szilíciumhéjakon át vezet az út a vasmagig (1. ábra).



1. ábra. A csillagokban létrejövő, többrétegű struktúráként nevezett szerkezet. Az ábra bal oldalán a héjakat az egyes héjakon belül előforduló, a vasmagig (Fe) terjedő elemek fúziója jellemzi. Az ábra jobb oldala a kidobódott anyagfelhő többszintű szerkezetének sematikus ábráját mutatja, ahol a zónákat a leggyakoribb izotóp(ok) alapján azonosítják. Megjegyzendő, hogy az ábrán a héjak és a zónák nem méretarányosak.

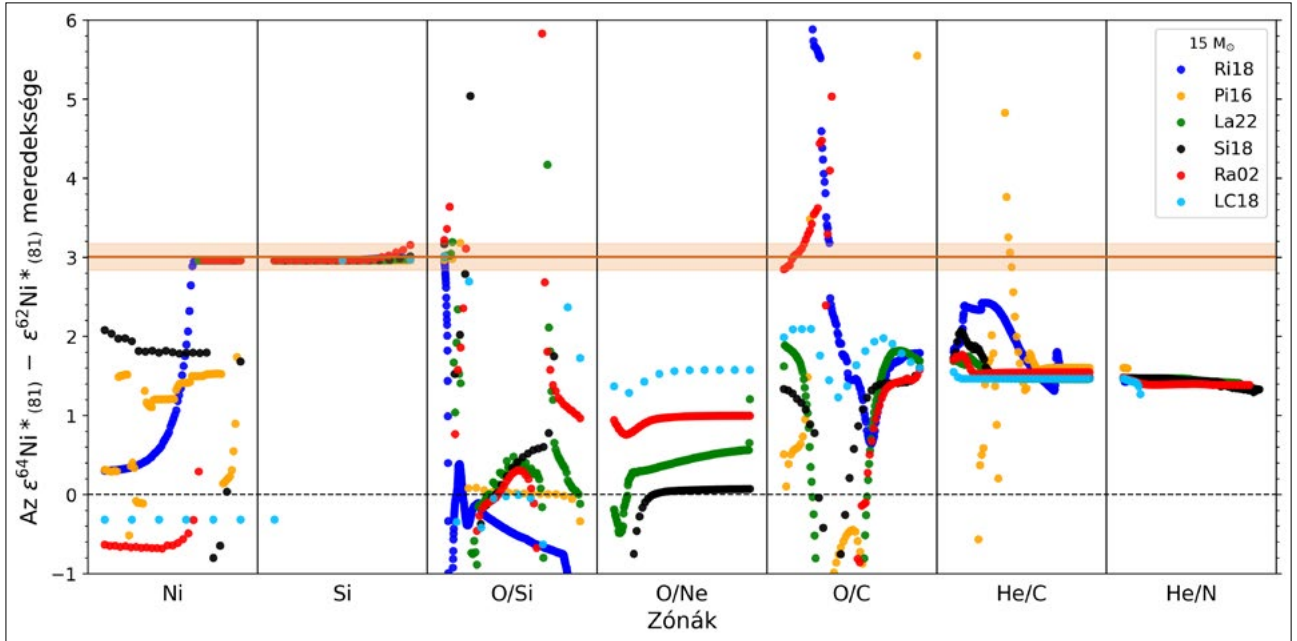
A szupernóva-robbanás során a csillag belsejében kialakult rétegek anyaga a csillagközi térbe kerül, azonban a szupernóva-modellekben ezeket a rétegeket zónákra osztják, amelyeket a bennük domináló 2–3 elem határoz meg. Mivel ezek a zónák közvetlenül megfeleltethetők a csillag fejlődése során kialakult héjaknak, kutatásomban azt a folyamatot igyekeztem meghatározni, amely képes reprodukálni azokat az izotóparányokat, amelyekből a meteoritokban mért meredekségérték adódik.

Ehhez 18 magösszeomlásos szupernóva-modellt használtam, amelyek feldolgozásához olyan Python-kódot fejlesztettünk témavezetőm, Marco Pignatari vezetésével és az MTA-CSFK Lendület Nukleáris Égés Csillagokban Kutatócsoport tagjaival, amely képes a különböző formátumú és szerkezetű adatfájlok beolvasására és kezelésére. A kód validálása után elvégeztem a nikkel-anomáliákból meghatározott meredekségi értékek előfordulásának vizsgálatát a modellekben. A korábbi publikációkkal szemben – amelyek csupán egy-két modellt alkalmaztak – én hat különböző modellsorozat összesen 18 modelljét vettem össze a mért adatokkal. Minden modell a Nap fémességével (2%) számolt, és egyik elődcillag sem forgott.

A modellsorozatok között szerepelt a 2002-ben létrehozott, máig legtöbbet használt modellsorozat, valamint a 2016 és 2022 között kifejlesztett legújabb generációs modellek is. Minden készletből három különböző (a Napnál 15-ször, 20-ször és 25-ször nagyobb) tömegű elődcillag modelljét használtam, mivel magösszeomlásos szupernóva-robbanás csak a Napnál legalább 8–10-szer nagyobb tömegű csillagoknál fordul elő.



Balázs Gábor az ELTE TTK csillagász mesterszakos hallgatója, a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet hallgatói programjának résztvevője, a Magyar Csillagászati Egyesület elnökségi tagja, nemzetközi díjas asztrofotós



2. ábra. A 6 modellcsoport 15 naptömegű modelljeiből kapott mereedekeiségi zónánként ábrázolva. A képen a barna vonal a meteoritokban Steele és mtsai által mért 3-as mereedekeiséget jelzi, a narancssárga zóna pedig ennek a hibátartománya. A modellekben az adott zóna mérete eltér, viszont ebben a reprezentációban azonos méretűre lettek skálázva, egyértelműbb összehasonlítást lehetővé téve

A modellek között azonban több fontos különbség is van. Az egyik legszembevetőbb az, hogy a robbanást követően mekkora mennyiségű anyag hullik vissza a létrejövő objektumra, ami ebben az esetben neutroncsillag vagy fekete lyuk. Ennek következtében bizonyos rétegek anyaga nem jut ki a csillagközi térbe, így nem is épülhet be a meteoritok szülőégitestjeibe. A másik fontos eltérés a robbanás beindításának módszere: bár többféle megközelítés létezik, mindegyik egydimenziós közelítést alkalmaz, holott a szupernóva-robbanások valójában háromdimenziós folyamatok. A legújabb modellek már tartalmaznak olyan eljárásokat, amelyek egydimenziós-ként igyekeznek szimulálni a háromdimenziós hatásokat. Ezen túl a modellekben szereplő izotópok száma, a nukleáris reakciók sebessége, valamint a számításokhoz használt szimulációs kódok is eltérnek, ami szintén különbségeket eredményez az elemgyakoróságokban, és ez közvetlenül befolyásolja, hogy mekkora értékeket kapunk az anomáliákat jellemző mereedekeiségekre.

Az elemzést az elődcillagok tömegei alapján végeztem el. A Python-kód segítségével kiszámoltam a modellek elemgyakoróságából származtatott mereedekeiségeit, majd ezeket közvetlenül összevettem a meteoritok izotóparányaiból számított értékkel. Mivel célom a nikkelt esetében mért értékek reprodukálására képes folyamatok azonosítása volt, kifejlesztettem egy új algoritmust is. Ez az algoritmus az adott fúziós reakcióban képződő izotópok alapján képes minden modellben azonosítani az egyes zónákat. Ezután olyan vizualizációt készítettem, amely a kiszámolt mereedekeiségeket a fúziós folyamatokhoz rendelt zónák szerint ábrázolja (2. ábra).

A kapott eredmények alapján két helyen találtam egyezést a modellekből származtatott és a meteoritok-

ban mért mereedekeiségekkel: a robbanás során a csillag belsejében lezajló nukleáris fúzió által uralt, főként szilíciumban és oxigénben gazdag zónákban, valamint a külső, neutronbefogással nehezebb elemeket termelő rétegekben. A legtöbb mérési pont azonban hibahatáron belül a belső, azon belül is leginkább a szilíciumzónában mutatott egyezést, ezért a legvalószínűbb, hogy a mért izotópanomáliák forrása ebből a zónából származó szemcse. E következtetés megerősítése érdekében a vas (Fe) esetében is végeztem hasonló elemzést, amely szintén a szilíciumzónában mutatott egyezést. Ebben a zónában a nikkelt 58-as, neutronszegény izotópja termelődik a legnagyobb mennyiségben, így ebben az izotópban gazdag szemcse okozhatja a mért eltéréseket.

Összességében munkám során arra a megállapításra jutottam, hogy a nikkelt esetében a meteoritokban kimutatott anomáliák legvalószínűbb magyarázata a magösszeomlásos szupernóvák kilökődött anyagfelhőjének szilíciumzónájában rejlik. Ebben a zónában a robbanás során a szilícium és az oxigén fúziója zajlik, így az anomáliákat okozó szemcsék ezen folyamatok eredményeként keletkezhetnek.

Irodalom

- Hopp T., Dauphas N., Spitzer F., Burkhardt C., Kleine T. (2022): *Earth and Planetary Science Letters*, 577, 117245.
- Kleine T., Budde G., Burkhardt C., et al. (2020): *Space Sci. Rev.*, 216, 55.
- Lugaro M., Ek M., Pető M., et al. (2023): *The European Physical Journal A*, 59, 53.
- Nanne J. A., Nimmo F., Cuzzi J. N., Kleine T. (2019): *Earth and Planetary Science Letters*, 511, 44.
- Steele R. C. J., Coath C. D., Regelous M., Russell S., Elliott T. (2012): *ApJ*, 758, 59.

ÉLET EGY CSILLAG HALÁLA UTÁN: URABILITÁS A GALAKTIKUS SÖTÉTSÉGBEN

Fröhlich Viktória

E-mail: frohlich.viktoria@csfk.org

A „lakhatóság” fogalma sokak számára ismerős lehet: általában olyan égitesteket nevezünk lakhatónak, amelyek felszínén a víz folyékony halmazállapotban fordulhat elő – vagyis a hőmérséklet nem túl magas, hogy a víz elpárologjon, és nem túl alacsony, hogy megfagyjon. A lakhatóság definícióját azonban gyakran kiterjesztik: vajon mely bolygók lehetnek a földihez hasonló élet otthonai, esetleg a jövő kolóniái?

A James Webb űrtávcsőnek és más modern eszközöknek köszönhetően ma már képesek vagyunk az élet építőköveinek jeleit is keresni távoli exobolygókon. De mit tekintünk egyáltalán „életnek”? És a létrejöttének melyek a legszükségesebb feltételei?

Az élet kialakulásához nem elég a megfelelő hőmérséklet és nyomás. Fontos többek között a sugárzási környezet, és elengedhetetlen egy folyékony oldószer, amely a kémiai reakciók mennyiségét és sebességét moderálja (elsősorban gyorsítja). Ezt a szerepet leggyakrabban a víz tölti be, de a Szaturnusz Titán nevű holdján előforduló metántavak arra engednek következtetni, hogy más molekulák is alkalmasak lehetnek folyékony katalizátornak.

Attól, hogy egy égitesten adottak a feltételek, még korántsem biztos, hogy valóban meg is jelenik rajta az élet. A pánspermia-elmélet például azt feltételezi, hogy a Földön az élet külső forrásból, meteoritok közvetítésével jelent meg. Azon égitestek leírására, ahol az élet külső beavatkozás nélkül kialakulhatott, Deamer és munkatársai tanulmánya alapján egy új fogalmat vezettünk be: urabilitás [1]. Az „ur-” előtag az ősi, eredeti lehetőséget hangsúlyozza; nem a meglévő élet fennmaradását, hanem az élet keletkezésének minimális fizikai, kémiai és energetikai feltételeit jelöli (1. ábra).

Urabilis környezeteket valószínűleg a Naprendszerben is találhatunk. A Jupiter Europa holdjának vastag jégpáncélja alatt például globális óceán rejtőzhet. Ha ebben valóban létrejött élet, akkor az nem kívülről érkezett, hanem helyben született, tehát az Europa urabilis.



Fröhlich Viktória csillagász mesterszakos hallgató az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, emellett 2021 óta a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetében végez kutatómunkát Regály Zsolt témavezetésével. Kutatási területe széles körű: a végállapotú csillagok körül keringő bolygórendszerek stabilitásától a fehér törpék körüli gázkorongokon át a naprendszerbeli aszteroidákig terjed. Lelkes ismeretterjesztő és amatőr csillagász, a Vega Csillagászati Egyesület elnökségi tagja.

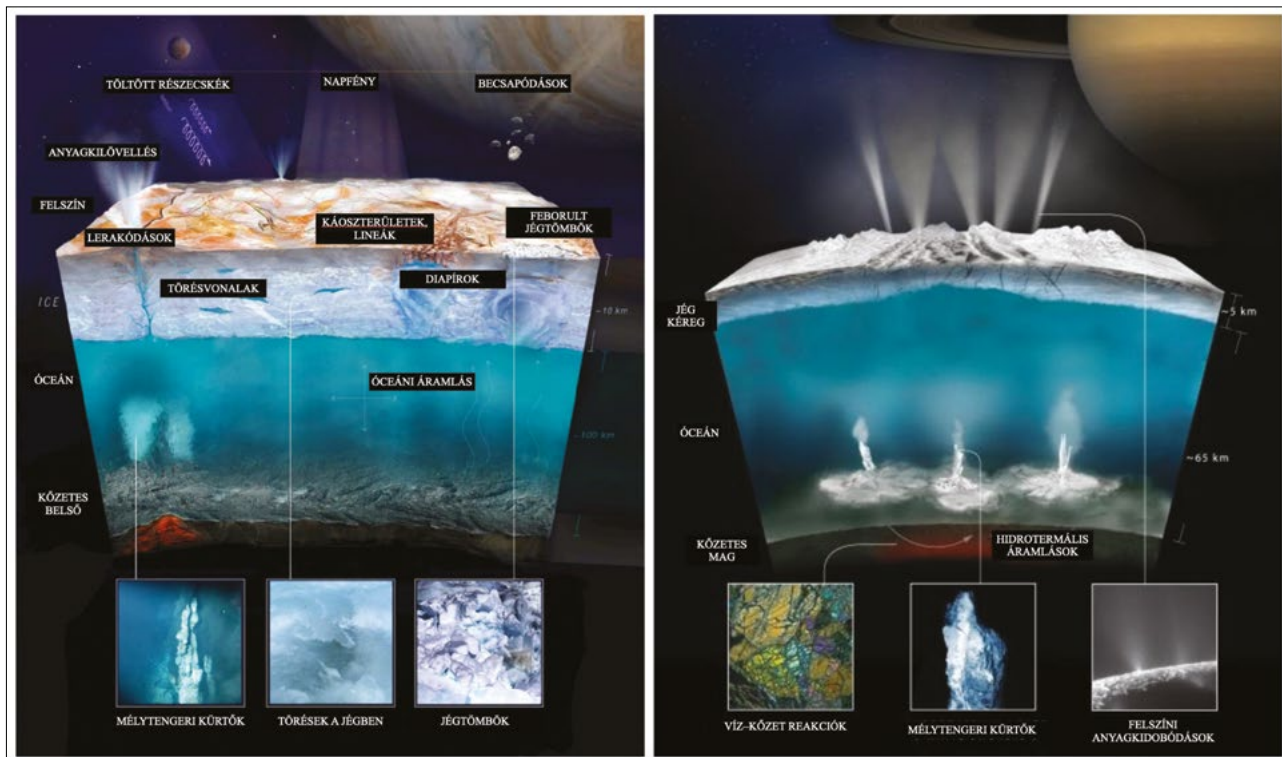
Ezzel szemben a Föld ma már nem megfelelő környezet az élet kialakulásához: többek között oxidáló légkör nem teszi lehetővé új életformák megjelenését (kivéve talán a mélytengeri kürtők környékét). Három és fél milliárd éve azonban más volt a helyzet: bolygónk urabilis környezetet kínált, és ekkor jelentek meg az első archeák.

Az óriásbolygók holdjai ezért kiemelt célpontok lehetnek az élet eredetének kutatásában. Erre a Naprendszerben is több példát találunk: az Europa mellett az Enceladus, a Miranda vagy a Mimas felszíne alatt is kiterjedt vízóceánok húzódnak [2, 3]. Az óceánfenék és a szilikátokban gazdag mag érintkezése továbbá lehetőséget biztosít a szerves molekulák és az energia utánpótlására. Ezeken a holdakon a kulcsszerep az árapályfűtésé. A holdak pályája excentrikus, ezért az égitest által érzékelt gravitációs tér periodikusan változik, ami belső feszültségeket és hőtermelést kelt – ez elég lehet ahhoz, hogy a vastag jégpáncél alatt fennmaradjon egy folyékony óceán. Bár eddig még nem sikerült egyetlen exohold felfedezését sem megerősíteni, elméleti modellek szerint ezek lehetnek a Galaxis leggyakoribb szilárd felszínű égitestjei (példának okáért saját Naprendszerünkben is láthatjuk, hogy a gázóriások körül temérdek hold kering).

Mára több száz olyan bolygót ismerünk, ami nem egy csillag körül, hanem magányosan kering a Galaxisban [4, 5]. Ezeket kóbor bolygóknak hívjuk, és számuk akár a csillaghoz kötött bolygók számát is meghaladhatja. Kialakulásukat két fő elmélet magyarázhatja. Az egyik szerint korai, a bolygókeletkezést kísérő dinamikai instabilitások szakítják ki őket a szülőcsillag rendszeréből. A másik elmélet szerint a bolygók pályája a csillagok halálakor bekövetkező jelentős tömegvesztés miatt perturbálódik: excentricitásuk egységnyi fölé nő, és elhagyják a csillagmaradványokat.

Kutatásomban, amelyet a HUN-REN CSFK Konkoly Csillagászati Intézetében, dr. Regály Zsolt témavezetésével végeztem, a fent említett második elméletet jártuk körül. Azt vizsgáltuk, vajon urabilisak lehetnek-e egy kóbor bolygó holdjai, miután a rendszer központi csillaga II-es típusú szupernóva-robbanásban elpusztult. Vajon a csillagtalan sötétségben, egy jégpáncél alatti óceánban létrejöhet az élet?

Numerikus modellek segítségével tanulmányoztuk, hogyan változik egy bolygó-hold rendszer pályája, ha a csillag II-es típusú szupernóvaként felrobban. A jelenséget többtest-integrátor és homológ köpenyvesztési modell ötvözésével vizsgáltuk. A robbanás során a csillag



1. ábra. Az Europa (balra), illetve az Enceladus (jobbra) holdak feltételezett keresztmetszete. Mindkét hold esetében látható, hogy a szilikátmag felett több tíz kilométer vastagságú folyékony óceán terül el, amely felett pedig jégkéreg található. A holdak pályája excentrikus, így a jégretek megolvadása és a vízóceán fennmaradása az árapályfűtésnek köszönhető. (Forrás: NASA/JPL-Caltech)

tömegének jelentős részét elveszíti, ami erősen perturbálja a bolygók és holdjaik pályáját.

A korábbi kutatásainkkal összhangban úgy találtuk, hogy a bolygók elszakadnak a csillagtól, és kóbor égitestekké válnak [6]. A holdak azonban meglepő módon mindig kötöttek maradtak bolygójukhoz, és továbbra is ellipszispályán keringtek körülötte. Ez azt jelenti, hogy ha a bolygónak eredetileg volt holdja, akkor az megmaradt a szupernóva-robbanást követően is. Ezeknek a holdaknak a kimutatása pedig elérhető közelségbe került a James Webb vagy a hamarosan induló Roman űrteleszkópok révén.

A holdak a szimulációk kezdetén körpályán keringtek, így árapályfűtés híján nem lehettek urábilisek. A csillag tömegvesztése következtében azonban pályájuk gyakran excentrikussá vált – excentricitásuk összemérhető lett az Europa vagy Enceladus excentricitásával. Ez pedig lehetővé teszi az árapályfűtést, immár csillagfény nélkül is. Így egy kóbor bolygó holdja akár urábilis is lehet.

Kiszámítottuk, mekkora árapályfűtés alakulhat ki a kóbor bolygó-hold rendszerekben, és ezeket összevetettük az Europa és Enceladus holdakkal. A modellek szerint a holdak mintegy 12–15%-ánál az árapályfűtés hasonló nagyságrendbe esik, mint az Európán vagy az Enceladuson becsült értékek. Ráadásul már egészen kis pályaeccentricitás (10^{-5} – 10^{-3}) is biztosíthatja, hogy a felszíni víz folyékony állapotban maradjon, vagyis se ne fagyjon meg, se ne párologjon el.

Kulcskérdés, hogy a holdak excentricitása meddig marad fenn, ugyanis az excentricitás az árapályfűtés elsődleges előfeltétele. Számításaink szerint a kóbor bolygók holdjainak excentricitása rendkívül hosszú időskálán, akár a Naprendszer koránál is tovább fennmaradhat, ha a hold tíz bolygósugárnál távolabb kering a kóbor planétától. Ez azt jelenti, hogy az urabilitás nem egy pillanatnyi állapot, hanem évmilliárdokig is fennmaradhat.

Eredményeink alapján kijelenthető: az élethez szükséges minimális feltételek nem kizárólag csillagok környezetében jöhetnek létre. A galaxis sötétjében, magányosan sodródó kóbor bolygók holdjai is alkalmasak lehetnek arra, hogy élet szülessen rajtuk. E szerint az élet bölcsői sokkal változatosabb környezetekben is megjelenhetnek az Univerzumban, mint azt korábban gondoltuk. Eredményeinket az *Astronomy & Astrophysics* nemzetközi folyóiratban publikáltuk.

Irodalom

1. Deamer D., Cary F., Damer B. (2022): *Astrobiology*, 22, 889.
2. Carr M. H., Belton M. J. S., Chapman C. R., et al. (1998): *Nature*, 391, 363.
3. Thomas P. C., Tajeddine R., Tiscareno M. S., et al. (2016): *Icarus*, 264, 37.
4. Miret-Roig N., Bouy H., Raymond S. N., et al. (2022): *Nature Astronomy*, 6, 89.
5. Pearson S. G., McCaughrean M. J. (2023): *arXiv e-print*. (?)
6. Regály Zs., Fröhlich V., Vinkó J. (2022): *The Astrophysical Journal*, 941, 121.

ASZTEROIDÁK HAMVAI EGY HALOTT CSILLAG KÖRÜLI GÁZKORONGBAN: MIT MESÉLNEK A Ca EMISSZIÓS VONALAI?

Fröhlich Viktória
E-mail: frohlich.viktoria@csfk.org

A fehér törpék a Naphoz hasonló csillagok életének utolsó állomását képviselik. Ezek a csillagmaradványok földméretű, de naptömegű kompakt égitestek. Bennük már nem folyik energiatermelés, ezért életük során folyamatosan hűlnek. Felszínükön a gravitációs gyorsulás jelentős, ennek megfelelően a fehér törpék fotoszférájában csak a legkönnyebb elemek (hidrogén, illetve hélium) jeleivel találkozhatnánk.

Éppen ezért meglepő, hogy a kutatók mára több tucat olyan fehér törpét fedeztek fel, melynek légkörében nehéz elemek (pl. vas, kalcium, magnézium) lelhetők fel [1]. Annak ellenére, hogy elvárásaink szerint ezeknek az elemeknek rövid idő alatt a csillag mélyebb rétegeibe kellene süllyedniük, a szennyeződés évtizedes időskálán fennáll. A fehér törpék légkörét szennyező forrás sokáig rejtve maradt a kutatók kíváncsi szemei előtt.

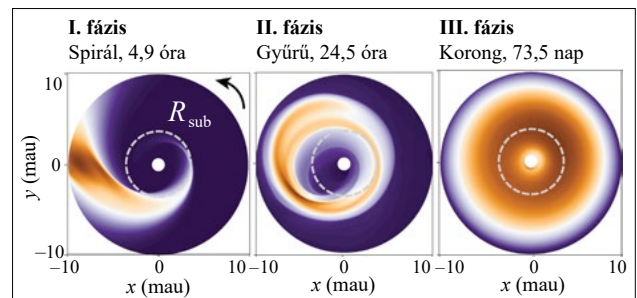
A jelenleg elfogadott hipotézis szerint a szennyeződés az egykori naprendszer haláltusájából származik. A csillagmaradvány körül kötött pályán maradt kisbolygók, üstökösök és törpebolygók a központi csillag gravitációs vonzásának és esetleges társaik zavaró hatásának köszönhetően egyre közelebb kerülhetnek a fehér törpéhez. Végül olyan pályára sodródnak, ahol már nem tudnak egy darabban maradni: a Roche-sugáron belülre kerülve a kis égitesteket ugyanis széttepi a csillag árapályereje.

Az égitestet alkotó por és gáz ekkor szétterül, és korongot hoz létre a csillagmaradvány körül. Efféle por-korongokat mára több tucat rendszerben sikerült azonosítani; mintegy húsz esetben pedig a por mellett egy gázkorong is jelen van [2]. A gázkorong jelenlétéről az egyszerűen ionizált kalcium infravörös tartományban megfigyelhető hármas spektrumvonala tanúskodik.

Egy csillag körül keringő gázfelhőben az egyes elemek emissziós spektrumvonalai dupla csúcsot mutatnak. Ez annak tudható be, hogy a gáz a csillag körül kering, és a korong különböző pontjain a Doppler-effektus kü-

lönböző mértékű eltolódást okoz a vonalak laboratóriumi hullámhosszához képest. Így keletkezik a vonalnak egy vörös- és egy kékoldali csúcsa. Amennyiben a fehér törpék körüli korongok forgásszimmetrikusak lennének, a megfigyelt Ca-spektrumvonalak dupla csúcsai is szimmetriát mutatnának, azaz a két csúcs intenzitása megegyezne.

Ehhez képest a fémszennyezett fehér törpék körüli gázkorongok megfigyelései azt mutatják, hogy a Ca emissziós vonalai jelentősen aszimmetrikusak: az egyik csúcs intenzitása nagyobb. Sőt mi több, sok esetben a csúcsok intenzitása idővel fel is cserélődik, azaz hol a vörös-, hol pedig a kékeltolódott csúcs dominál. Ez a viselkedés évekig vagy akár évtizedekig is fennállhat, és egészen mostanáig nem létezett olyan fizikai modell, amely képes lett volna egyszerre magyarázatot adni a Ca hármas vonalainak alakjára, időbeli változására és a csillag fémes szennyezésére is (1. ábra).



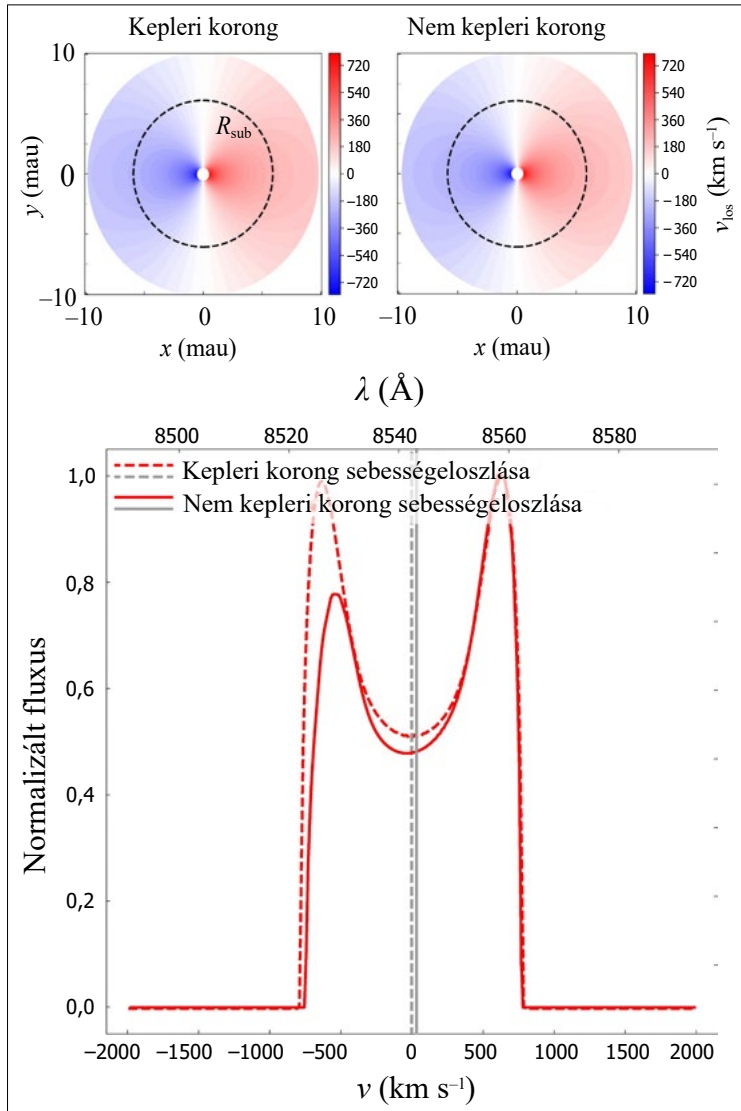
1. ábra. A gázkorongok korai fejlődése a hidrodinamikai szimulációkban. Az aszteroida fokozatos szétesése során a gáz először csóvát alkot a szétesés helyén. Idővel a gáz gyűrűt formál, majd a gyűrű a gáz viszkozitásának köszönhetően koronggá alakul

Az itt bemutatott kutatásban egy olyan modellt dolgoztunk ki *dr. Regály Zsolt* témavezetőmmel, amely képes mindezeket a megfigyeléseket egységes keretbe foglalni [3]. A modellezés alapjaként feltettük, hogy a gázkorong nem egyetlen hirtelen esemény következménye, hanem egy olyan kisbolygó fokozatos szétesésének eredménye, amelynek pályája erősen elnyúlt, azaz excentrikus. Ez az égitest minden keringési periódusa alatt egy ideig a Roche-sugár alatt tartózkodik, így újra és újra anyagot veszít, amely a magas hőmérséklet hatására szublimál.

Az aszteroida periodikus szétesése során keletkező gáz kezdetben egy ívelt csóvát alkot, majd egyre jobban szétterjed, és kialakít először egy gyűrűt, majd egy elnyúlt és ezáltal aszimmetrikus korongot. A korong anyaga ráadásul idővel (a viszkozitásnak köszönhető-



Fröhlich Viktória csillagász mesterszakos hallgató az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, emellett 2021 óta a HUN-REN CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézetében végez kutatómunkát Regály Zsolt témavezetésével. Kutatási területe széles körű: a végállapotú csillagok körül keringő bolygórendszerek stabilitásától a fehér törpék körüli gázkorongokon át a naprendszerbeli aszteroidákig terjed. Lelkes ismeretterjesztő és amatőr csillagász, a Vega Csillagászati Egyesület elnökségi tagja.



2. ábra. Fent a hidrodinamikai szimulációk eredményeképp kapott sebességeloszlások a fehér törpe körüli gázkorongokban. A bal panel egy kepleri, forgásszimmetrikus korong sebességeloszlását mutatja, míg a jobb oldali panelen egy nem kepleri korongot láthatunk. A sűrűségter mindkét korongban aszimmetrikus. Az alsó panel a két szimulációban hasonlítja össze a számított Ca II vonalprofilokat. Szaggatott vonal jelöli a kepleri, folytonos a nem kepleri sebességeloszlású szimulációban számított vonalprofil. Amint látható, a nem kepleri esetben a vonal aszimmetriája jelentősen nagyobb, illetve a vonal centruma ebben az esetben eltolódott, nem 0 km/s-nál található

en) a csillag felszínére hull, így magyarázva a fehér törpe fémszennyezettségét. A modellünket kétdimenziós hidrodinamikai szimulációk segítségével vizsgáltuk, amelyek során a kisbolygó több mint 1,2 évnyi keringését követtük végig (ez több tízezer keringést jelent, ugyanis az aszteroida keringési periódusa ilyen közel a csillaghoz csupán 12 óra). A numerikus szimulációkban kapott sűrűség- és sebességeloszlások alapján szintetikus Ca-emissziós vonalakat számoltunk, és összevetettük őket a megfigyelésekkel.

Az általunk számított Ca II vonalakat éppen olyan aszimmetrikusnak találtuk, mint amilyeneket a távcsöves mérések mutatnak a különböző rendszerekben. Ráadásul a vonalak aszimmetriája periodikusan felcserélődik (vagyis a vörös és kék oldali csúcsok intenzitá-

sának erőssége váltakozik), amit a gázkorong precessziója okoz. Szimulációink szerint ez a precesszió 27 és 177 nap közötti periódusú, ami összhangban van a megfigyelések többségével.

Fontos eredményünk az is, hogy szimulációink szerint az aszimmetria mértéke a kétszeresére nőhet, ha a gáznak nemcsak sűrűségeloszlása aszimmetrikus, hanem a sebességeloszlása is. Így tehát a megfigyelések nem magyarázhatók egy körpályán keringő anyagcsomóval, hanem csak egy excentrikus korong jelenléte adhat magyarázatot. Ennek kialakulásához pedig az szükséges, hogy a Roche-határon idővel széteső aszteroida pályája is excentrikus legyen.

A szennyezés hosszú távú fennmaradását kétféleképpen tudtuk megmagyarázni. Az egyik esetben a kisbolygó nagyon gyorsan, néhány keringés alatt szétesik, de a gáz kis viszkozitása miatt a korong lassan terjed szét, így az anyag hosszú időn át képes a fehér törpére hullani. A másik lehetőség szerint a szétesés fokozatos, akár egy éven át is tarthat, de a gáz viszkozitása nagy, így az anyag hatékonyan jut el a csillag felszínére. Mindkét forgatókönyv képes egyidejűleg, hosszú távon magyarázni a fémes légkört és a kalciumemisszió periodikusan változó aszimmetriáját. Emellett a számított vonalprofilok jól illeszkednek a valós rendszerekben mértetekhez is: a vonalak szélessége, középponti eltolódása és mélysége mind összhangban áll a megfigyelések jelentős részével.

A jelen kutatás részletes betekintést nyújt a Naphoz hasonló csillagok körüli bolygórendszerek végső sorsába. A fehér törpék körüli por- és gázkorongok dinamikusan fejlődő, időben változó struktúrák, a csillagmaradványok légköre pedig az egykori bolygórendszer vagy aszteroidaöv összetételének és dinamikájának utolsó hírnöke. A Ca infravörös emissziós vonalai olyan kozmikus emlékművek, amelyek arról mesélnek, hogyan hamvadnak el az évmilliárdokkal ezelőtt felépült bolygórendszerek utolsó képviselői. Kutatásunk a Naprendszer jövőjéről való feltevésekkel kapcsolatosan is kulcsfontosságú (2. ábra), hiszen néhány milliárd év múlva a Naptól is fehér törpe lesz. És ki tudja, talán Naprendszerünk egykori aszteroidái ugyanilyen meglepő és titokzatos jelek formájában adnak majd hírt magukról...

Irodalom

1. Koester D., Gänsicke B. T., Farihi J. (2014): *A&A*, 566, A34.
2. Gänsicke B. T., Marsh T. R., Southworth J., Rebassa-Mansergas A. (2006): *Science*, 314, 1908.
3. Fröhlich V., Regály Zs. (2024): *A&A*, 692, A25.

MIKOR A FÉNY ÉS A POR ÖSSZEÉR: EGY SZUPERNOVA ÉS A CSILLAGKÖRÜLI ANYAG TALÁLKOZÁSA

Lelkes Klára^{1,2}

¹ELTE TTK Csillagászati Tanszék, Budapest; ²HUN-REN CSFK Csillagászati Intézet, Budapest
E-mail: lk.lelkesklari@gmail.com

A szupernóva-robbanások a csillagok hatalmas energia-felszabadulással járó életvégi eseményei. Rendkívül fényes, rövid ideig tartó égi jelenségek, amelyek hirtelen felfénylenek, majd lassan elhalványulnak. Színképük alapján két nagy csoportra osztjuk őket: míg az I-es típusban hiányoznak, a II-es típusban megjelennek a hidrogénvonalak. Az Ia típusú fehér törpék termonukleáris robbanásából születnek, míg a többi altípus a nagytömegű csillagok összeomlásának következménye.

A magösszeomlásos szupernóvák szülőcsillagai legalább nyolcszor nehezebbek a Napnál. Életük végén egyre nehezebb elemeket fuzionálnak, de ezek a reakciók egyre kevesebb energiát termelnek. A gyorsuló folyamat végén vasmag alakul ki, amely már nem képes pozitív energiamérleggel fuzionálni, így a mag a szabadesési időskálán, kevesebb mint egy másodperc alatt összeomlik. Közben beindul a neutronizáció, és a mag neutroncsillagá vagy akár fekete lyukká zuhan össze, míg a felszabaduló energia szétveti a csillag többi részét.

A II-es típusú szupernóvák egyik különleges és ritka altípusa a IIn, ahol az „n” a keskeny (narrow) emissziós színkép vonalakra utal [1]. Ezek a keskeny színkép vonalak a hidrogénben gazdag környezet és a szupernóva-robbanásból kiáramló anyag kölcsönhatásából származnak, és értékes információt adnak a csillag életének utolsó szakaszáról.

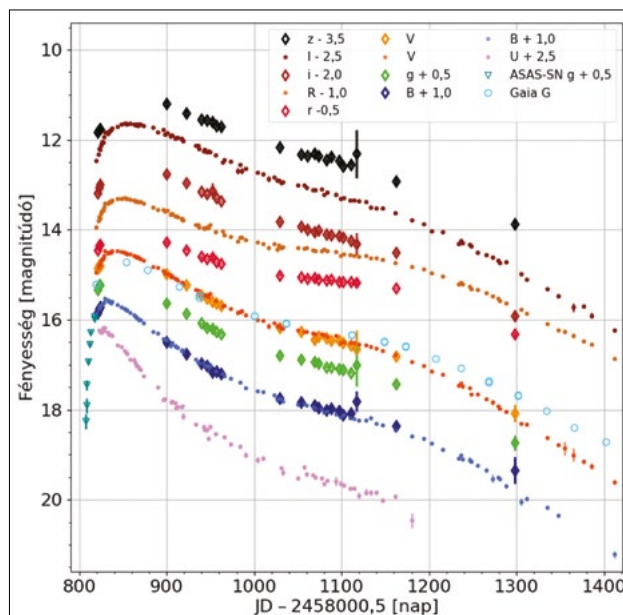
A IIn szupernóvák körül ugyanis gyakran sűrű csillagközi anyag található, amelyet a robbanást megelőző erős csillagszelek vagy óriáskitörések hoznak létre. A csillagszél a csillag légköréből folyamatosan távozó gáz, amely a csillag körül porszemekké is összeállhat. Ez a kiáramlás a nagytömegű csillagoknál komoly tömegvesztést okoz, bizonyos esetekben akár tömegük felét is elveszthetik ily módon.

Az TDK-dolgozatomban az SN 2019vxm nevű kölcsönható, IIn típusú szupernóvát vizsgáltam, amelyet 2019. december 1-jén fedeztek fel a Hattyú csillagképben, egy messzi-messzi galaxisban. A tranziensről hazánkban,



Lelkes Klára az ELTE TTK csillagász mesterzakos hallgatója és a HUN-REN CSFK Csillagászati Intézetének demonstrátora. Korábban kölcsönható szupernóvák modellezésével foglalkozott, amely kutatómunkájáért a 37. OTDK-n III. díjban részesült. Jelenlegi kutatása egy oszcilláló vörös szuperóriás, az Antares csillag vizsgálatára irányul.

Piszkéstetőn készültek fotometriai megfigyelések, valamint más kutatócsoportok, például Tsvetkov és munkatársai is végeztek részletes méréseket [2]. A felfedezéskor készült spektrumon már jól kivehető volt a jellegzetesen keskeny H_{α} emissziós vonal.



1. ábra. Az SN 2019vxm többszínfotometriai fénygörbéi – a különböző szűrőkben mért fénygörbéket az átláthatóság érdekében függőlegesen eltolva ábrázoltam. A pontok Tsvetkov és munkatársai méréseit, a rombuszok a piszkéstetői észleléseket jelölik, míg az üres körök a Gaia, a lefelé mutató háromszögek pedig az ASAS-SN égboltfelmérés g sávjában mért adatait mutatják. A szupernóva gyorsan fényesedett fel átlagnál nagyobb fényességre, amit egy relatíve lassú halványodás követett, ami jellemző a IIn típusra

A fotometriai adatokból előállított fénygörbéik (1. ábra) elemzésével meghatározható a fotoszféra hőmérséklete és sugara, valamint ezek időfejlődése a robbanás után. A fotoszféra kezdetben forró, 15 000 K feletti hőmérsékleten sugárzott, majd körülbelül 80 nap alatt 6000 K környékére hűlt le – ez a hidrogénionizációs front jellemző hőmérséklete. A lehűlés a szupernóva-maradvány tágulásával párhuzamosan zajlott.

A robbanáskor a táguló szupernóva-maradvány, vagyis a szétrepülő anyag beleütközik a csillagot körülvevő felhőbe, és ez a kölcsönhatás a 2. ábrán láthatóhoz hasonló lökéshullámfrontot alakít ki. Ennek egyik komponense a fejhullám, amely a csillag körüli anyagban terjed ki felé. Amikor a táguló szupernóva-maradvány eléri a sűrű anyagot, meglöki a felhőt, ebből jön létre a fejhullám. Az ütközés azonban visszahat a szupernóva-maradványra is, ekkor jön létre a befelé terjedő, úgynevezett vissza-

lökődő hullám. A két hullám között kialakul egy határfelület, ahol a hőmérséklet, a nyomás, a sűrűség és a sebesség éles ugrást mutat, ezt nevezzük kontakt diszkontinuitásnak.

Mivel nem ismerjük pontosan a csillag körüli anyag szerkezetét, a jelenség leírására kétféle modellt alkalmaztam: az egyik ritka, optikailag vékony (ritka modell) [3], a másik sűrűbb, optikailag vastag csillag körüli anyagot feltételez (sűrű modell) [4]. Az optikailag vastag esetben két különböző kialakulási forgatókönyvet vizsgáltam: az állandó csillagszéllel folyamatosan felhalmozódó csillag körüli anyagét, valamint a hirtelen, egyszerre kidobódott, közel állandó sűrűségű héjakét.

A két modell közötti egyik alapvető különbség a fotoszféra helyzete. A sűrű modellnél a fotoszféra a csillag körüli anyag külső peremére tolódik ki, és a többte-nergia lassú diffúzióval jut át a felhőn a megfigyelőhöz. A sűrű modell a korai, a maximum környéki és az azt követő időszakot képes átfogóan jellemezni, de ahogy az anyag idővel áttetszővé válik, a modell alkalmazhatósága is fokozatosan beszűkül. Amikor az átlátszóság megnő, akkor képes a ritka modell reális leírást adni. Ilyenkor magát a szupernóvát látjuk, vagyis közvetlenül érzékelhetjük az ütközés által keltett lökeshullám hatását.

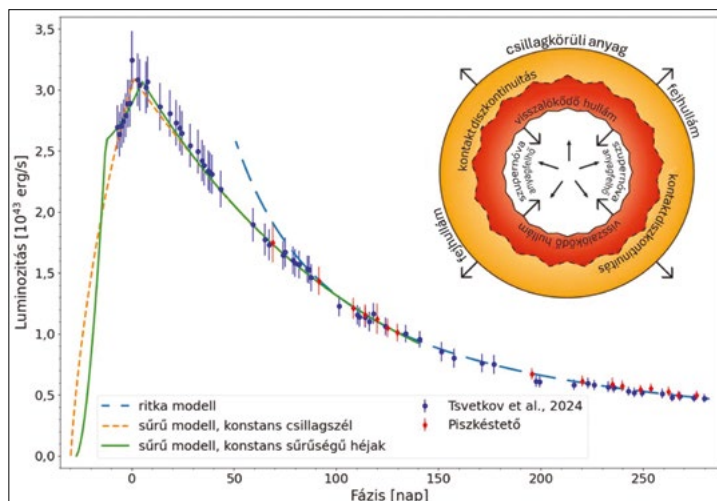
A ritkább csillag körüli anyagot feltételező modellben a fő energiaforrás a visszalökődő hullám lefékeződése, míg sűrű csillag körüli anyag esetében ehhez hozzájárul a fejhullám fűtőhatása és a radioaktív elemek bomlásából származó energia is. A szupernóva-robbanás során ugyanis radioaktív ^{56}Ni keletkezik, amely ^{56}Co -on keresztül a vas 56-os izotópjává bomlik. A kobalt aránylag hosszú felezési ideje miatt ez a folyamat akár több száz napon át is fűtheti a szupernóvát. Az SN 2019vxm esetében azonban a modellezés egyértelműen mutatja, hogy a

radioaktív bomlás hozzájárulása a fűtéshez gyakorlatilag elhanyagolható.

Munkám során a ritkább csillag körüli anyagot feltételező modell esetében megbecsültem a lökeshullám által összesöpört csillagkörüli anyag tömegét, amely hozzávetőleg 7 naptömegnek adódott. Ez az érték már összemérhető a szupernóva-maradvány nagyjából 20 naptömegével. Mindez arra utal, hogy a lökeshullám jelentős mértékben lefékeződhetett.

A sűrű modell használatával mindkét kialakulási forgatókönyvet megvizsgáltam, majd ezt követően két hasonló görbét kaptam – mindezt a 2. ábra szemlélteti. Az egyik esetben a görbe csak egy töréspontot mutat: ez lehet az a pillanat, amikor a visszalökődő hullám eléri a robbanás centrumát, és ezzel megszűnik a lökeshullám által biztosított fűtés. Ettől kezdve a szupernóva az addig felhalmozott termikus energiát sugározza ki a csillag körüli felhőn keresztül. A másik esetben a fénygörbén egy korábbi töréspont is megfigyelhető, ami feltételezhetően akkor jelenik meg, amikor a fejhullám eléri a csillag körüli anyag külső peremét. Tekintettel arra, hogy ez a közeg a szupernóva-maradványhoz képest ritkább, a fejhullám akár néhány nap leforgása alatt is kieri belőle. Az eredményül kapott tömegek mindkét kialakulási modellnél hasonló nagyságrendűek. A szupernóva-maradvány tömege 23–27, míg a csillag körüli anyag tömege 7–8 naptömeg.

A csillag kezdeti minimumtömegét a maradvány, a csillag körüli anyag és az 1–2 naptömegű visszamaradó neutroncsillag tömegének összege adja. A rendelkezésre álló adatok alapján nem dönthető el egyértelműen, hogy melyik modell tekinthető a legpontosabbnak, azonban kijelenthető, hogy a csillag teljes tömege 30–34 naptömeg között mozoghatott, de a korábbi tömegvesztés miatt a csillag kezdeti tömege ennél is jóval nagyobb lehetett. A számottevő tömegvesztés oka lehet egy vagy több társcsillag hatása is, mivel szinte mindegyik nagytömegű csillag kettős vagy többes rendszer része. A becsült kezdeti tömeg beleillik abba a képbe, amit a IIn típusú szupernóvákról tudunk, miszerint ezek jellemzően 25–40 naptömegűek, ami szuperóriások tipikus tömege. Mindez különösen érdekes, ugyanis a fekete lyukak kialakulásának elméleti alsó határa 30 naptömeg környékén húzódhat. A nagy távolság miatt azonban valószínűleg sosem tudjuk meg, ez a szupernóva pontosan mit hagyott hátra maga után.



2. ábra. Az SN 2019vxm bolometrikus luminozitásának időbeli alakulása, vagyis a robbanás teljes, minden hullámhosszon kisugárzott teljesítménye. A kék szaggatott vonal a ritkább, optikailag vékony csillag körüli anyagot feltételező modellt mutatja a késői szakaszon. A szaggatott narancs és a folytonos zöld görbék a sűrű, optikailag vastag csillagközi anyag modelljeit jelölik két különböző kialakulási forgatókönyvre. A betétábra a szupernóva és a csillagkörüli anyag kölcsönhatása során létrejövő kettős lökeshullámfront és a közöttük kialakuló határfelület, vagyis a kontakt diszkontinuitás sematikus vázlatát szemlélteti

Irodalom

1. Branch D., Wheeler J. C. (2017): Supernova Explosions. Astronomy and Astrophysics Library, Springer
2. Tsvetkov D. Y., Pavlyuk N. N., Dodin A. V., et al. (2024): AN, 345, e20230166.
3. Nagy A. (2012): Szegei Tudományegyetem, MSc értekezés.
4. Chatzopoulos E., Wheeler J. C., Vinkó J. (2012): *ApJ*, 746, 121.

FLEREK DETEKTÁLÁSA ÉS ELEMZÉSE GYORSFOTOMETRIAI MÓDSZEREKKEL

Schmercz Blanka
E-mail: schmercz.blanka@gmail.com

Bevezetés

A flerek a csillagok légkörében kialakuló, intenzív és rövid ideig tartó események, amelyek a mágneses tér hirtelen átrendeződése során felszabaduló energiának köszönhetőek [1]. Ezek a jelenségek kulcsfontosságúak a csillagok – köztük a Nap – mágneses aktivitásának tanulmányozásában, mivel hozzájárulnak a naptevékenység és a Földre gyakorolt hatásainak mélyebb megértéséhez. Közvetett módon az exobolygók lakhatóságának vizsgálatában is szerepet játszanak: a flerek során kibocsátott erős ultrabolya sugárzás és nagyenergiájú részecskék képesek roncsolni egy bolygó ózonrétegét és légkörét, akár teljesen lakhatatlanná téve azt.

A napflerek vizsgálata során lehetőségünk van közvetlen képi és videós megfigyelésekre. Ezzel szemben a távoli csillagokon lezajló flerek esetében ezeket a jelenségeket jellemzően a csillag fényességének időbeli változásán keresztül tanulmányozzuk. Egy tipikus csillagfler nagyjából 5–10 percig tart, ezalatt a fényesség hirtelen megemelkedik egy gyors, pár perces meredek felfutási szakaszban, majd ezt egy lassabb, fokozatos lecsengési fázis követi.

Ezeknek az eseményeknek a gyors lefolyása miatt kiemelten fontos a minél gyakoribb mintavételezés. A jelen projekt célja annak feltérképezése volt, hogy milyen lehetőségeket kínál az extrém rövid expozíciós idők alkalmazása a flerek vizsgálatánál. Amellett, hogy ez a technológia lehetőséget teremt a kisebb, máshogyan nem detektálható flerek vizsgálatára, alkalmas annak elemzésére is, hogy vajon van-e a nagyobb flerek fényességváltozásainak valamilyen másodperces időskálájú finomszerkezete. Bár számos úrfotometriai adatsor áll rendelkezésre csillagflerekről, ezek időbeli felbontása jellemzően mindössze 1–2 perc, vagy még ennél is gyengébb. A földi megfigyelések sem kínálnak számottevően jobb időfelbontást, és mindeddig kevés kutatás fordított kellő figyelmet a témában rejlő részletek feltárására.



Schmercz Blanka 2023-ban érettségizett az ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium és Kollégiumban. Jelenleg az Eötvös Loránd Tudományegyetem fizika alapképzésének hallgatója. Egyetemi tanulmányai mellett aktívan részt vesz csillagászati kutatásokban, a CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet demonstrátoraként.

Gyorsfotometria Pizskétetőről

A gyorsfotometriában rejlő lehetőségek feltérképezésére a Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet Pizskétetői Observatóriumában található műszerek tökéletesek.

Az AD Leonis nevű aktív flercsillagról 2019 óta folyamatosan zajlanak megfigyelések ezen a helyszínen. A csillag jellemzően február és március folyamán figyelhető meg Pizskétetőről, és minden évben ebben az időszakban került sor körülbelül 2–3 hétnyi észlelésre.

A mérések az 1 méter átmérőjű Ritchey–Chrétien–Coudé- (RCC) szerelésű távcsővel készültek B (kék) szűrőben. Bár a légkör hatása ebben a szűrőben zavaró, a flerekből érkező jel itt a legnagyobb, így megéri ezt használni. A képek az EMCCD kamerával készültek, amely egy fejlett CCD technológia egy elektronsokszorozó regiszterrel felszerelve, lehetővé téve a jel felerősítését már a kiolvasás előtt. Ez a folyamat jelentősen csökkenti a kiolvasási zaj hatását, így rendkívül gyenge fényviszonyok mellett is megbízható detektálást tesz lehetővé. Akár egyetlen foton érzékelésére is képes, ami különösen hasznos rövid expozíciós idejű, alacsony fényerejű alkalmazások esetén. Az ezzel elérhető lehetséges legrövidebb expozíciós idő – megfelelő beállítások esetén – pár ezredmásodperc is lehet. Az AD Leonis mérése során végül a 0,3 másodperces expozíciós idő bizonyult optimálisnak.

A detektált flerek

Az évek során összesen 211 órányi mérési adat gyűlt össze, amelyekben összesen 42 flert sikerült azonosítani.

A detektált 42 fler elegendő alapot nyújt energiaeloszlásuk vizsgálatához, ez az úgynevezett flerfrekvencia-eloszlás. Ez a kumulatív eloszlás megmutatja, hogy egy adott időintervallumban egy csillagon hány olyan fler fordul elő, amelynek energiája egy meghatározott küszöbértéket meghalad [2]. Elemzése számos fontos információt szolgáltat a csillag aktivitásáról. Eredményeink arra utalnak, hogy az eloszlást a nagyenergiájú flerek dominálják. Emellett a pizskétetői megfigyelések és a TESS űrtávcső hosszabb expozíciós idejű (20 másodperces) méréseinek összevetése egyértelműen bizonyította, hogy a gyorsfotometria hatékonyabb a kisenergiás flerek feltárásában. Ez pedig kulcsfontosságú annak tisztázásához, hogy a kisenergiás tartományban tapasztalt eltérések az észlelési korlátokból fakadnak-e, vagy más tényezők állnak mögöttük.

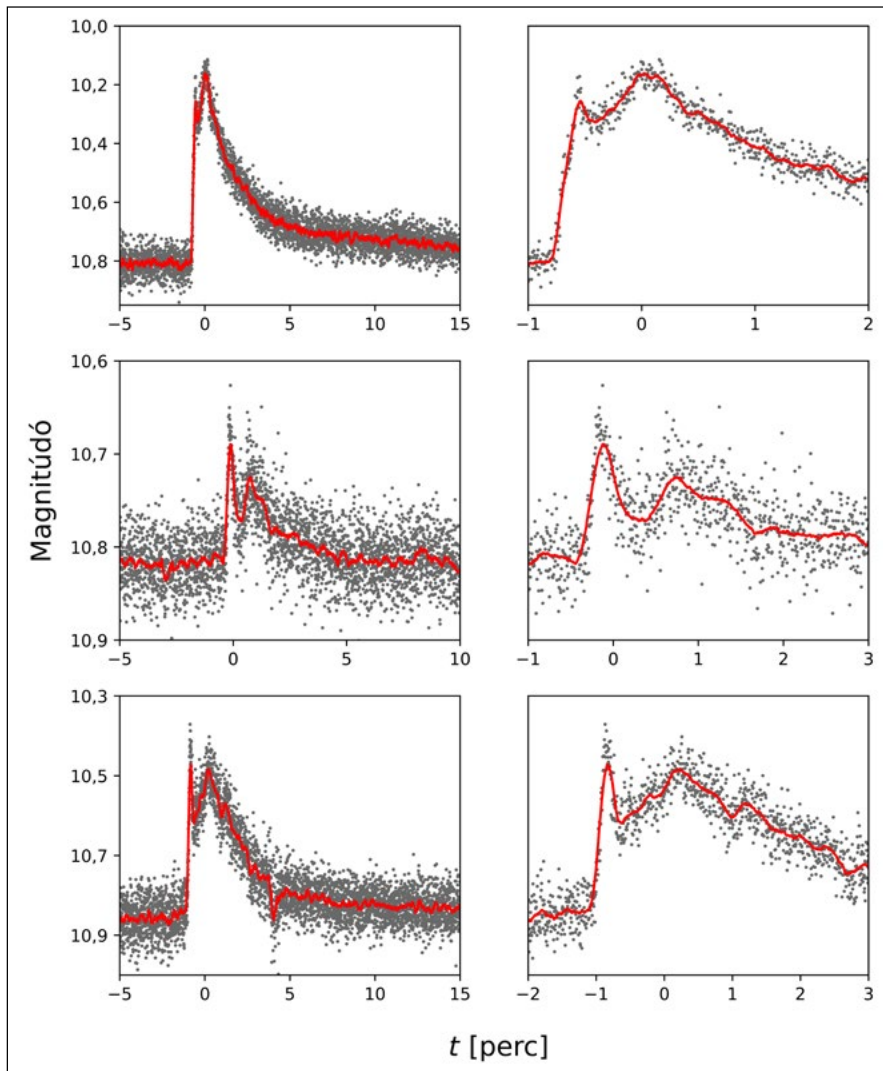
A flerek kutatásának egy másik aktív területe a leszálló ágakon jelentkező, 1–2 periódusideig tartó oszcillációk –

az úgynevezett kváziperiodikus pulzációk – vizsgálata [3]. Bár több elméleti modell is igyekszik magyarázatot adni ezekre a jelenségekre, egyértelmű magyarázat még nem született, ezért minden róluk szóló észlelési adat kiemelt jelentőséggel bír. A rövid expozíciós idők lehetőséget adnak másodperces periódusidejű pulzációk kimutatására, ami korábban – a megfelelő észlelési adatok hiánya miatt – ritkán valósult meg. A vizsgálat fő célja is ilyen jelenségek keresése volt. Az összes fler elemzése során végül két esetben sikerült erős jelet detektálni: az egyiknél 55 másodperces, a másiknál 3 perces periódussal.

A gyorsfotometria további előnye, hogy lehetővé teszi az egyes flerek finomszerkezetének részletes vizsgálatát. A 42 detektált fler közül három esetben olyan szerkezet volt látható, mintha az adott fler valójában két egymásra rétegződő fler összege lenne – ezeket az 1. ábra mutatja. Fontos kiemelni, hogy a két csúcs közötti idő körülbelül 2 perc, ami azt jelenti, hogy akár 30 másodperces expozíciós idővel készült megfigyelések esetén is – amelyek általában rövidnek számítanak – ezek a jelenségek láthatatlanok maradnának. Mivel eddig igen kevés mérés készült ilyen rövid expozíciós időekkel, az irodalomban szinte alig találni adatokat vagy elméleti magyarázatokat az ilyen időskálán megjelenő duplacsúcsos flerekre, ami különösen érdekessé teszi őket.

Konklúzió

A projekt célja az extrém rövid expozíciós idők alkalmazásában rejlő lehetőségek feltérképezése volt a flerek vizsgálatában. Egy aktívan flerező csillagról 0,3 másodperces expozíciós idővel összesen 211 óra mérési adat rögzítettünk, és ennek során 42 flereseményt detektáltunk. Ezek közül három egyedi, „duplacsúcsos” szerkezetet mutatott. A mintában másodperces periódusidejű kváziperiodikus pulzáció nem fordult elő, azonban két esetben néhány perces periódusidejű jelet detektáltunk. A detektált flerek energiaeloszlásának vizsgálata során az irodalomban közölt adatokkal összehangban álló



1. ábra. Összetett időbeli szerkezetet mutató flerek fénygörbéi. Az első oszlop a teljes flerprofil, míg a második oszlop a csúcs környezetére nagyított részletet jeleníti meg. Az időtengely a csúcs időpontjától eltelt percek, a függőleges tengely pedig a fényességet mutatja B szűrőben mért magnitúdóban. (A magnitúdóskála logaritmusos és inverz. Egy magnitúdóegység kb. 2,5-szeres fényességkülönbség, míg 0,1 magnitúdó kb. 10%-os fényességkülönbséget jelent a csillag teljes korongjára integrálva; továbbá a kisebb érték jelent nagyobb fényességet – a szerk.)

eredményt kaptunk, miközben jól érvényesült a gyorsfotometria előnye. Az eredmények megerősítik, hogy ha gyorsfotometriával vizsgáljuk a flereket, új, értékes információt tudhatunk meg róluk.

Irodalom

1. Kowalski A. F. (2024): Stellar flares. *Living Reviews in Solar Physics*, 21(1), 1. <https://doi.org/10.1007/s41116-024-00039-4>
2. Vida K., Kóvári Z., Leitzinger M., Odert P., Oláh K., Seli B., Kriskovics L., Greimel R., Görgei A. M. (2024): Stellar flares, superflares, and coronal mass ejections – Entering the Big Data Era. *Universe*, 10, 313. <https://doi.org/10.3390/universe10080313>
3. Zimovets I. V., McLaughlin J. A., Srivastava A. K., Kolotkov D. Y., Kuznetsov A. A., Kupriyanova E. G., Cho I.-H., Inglis A. R., Reale F., Pascoe D. J., Tian H., Yuan D., Li D., Zhang Q. M. (2021): Quasi-periodic pulsations in solar and stellar flares: A review of underpinning physical mechanisms and their predicted observational signatures. *Space Science Reviews*, 217, 66. <https://doi.org/10.1007/s11214-021-00840-9>

LEHETSÉGES-E CSILLAGÁSZATI MEGFIGYELÉSEKKEL ÉSZLELNI A PÁRHUZAMOS VILÁGEGYETEMEK LÉTEZÉSÉT?

Szepessy Dávid

E-mail: szepessy.david@gmail.com

1. Bevezetés

A fekete lyukak Einstein általános relativitáselméletének legizgalmasabb jóslatai, amelyek pontos matematikai leírása az elméleti fizika nagy sikere, bravúros megfigyelésük pedig a közgondolkodás számára is az elmúlt évtizedek legfontosabb tudományos eredményei közé tartozik. Bár létezésük ma már bizonyított, velük kapcsolatban sok nyitott kérdés maradt: információelméleti leírásuk, szerepük a kozmológiában és a párhuzamos világegyetemek létezése mind-mind pontosabb megértést kíván. Ebben a cikkben a párhuzamos világegyetemek esetleges megfigyelésének lehetőségét vázoló fel. Céloom meghatározni, milyen következményei vannak a párhuzamos világegyetemek létezésének, amelyeket a Földről, teleszkópokkal ellenőrizni tudunk. A cikkben bemutatott kutatást *Kocsis Bence* és *Dávid Gyula* témavezetésével végeztem.

2. Fekete lyukak

A fekete lyukak létezését felvető első eredmény az Einstein-egyenletek Schwarzschild-féle megoldása volt. A gravitációs egyenleteknek ez a megoldása egy nem forgó (gömb-szimmetrikus) objektum körül írja le a téridő szerkezetét. Ez a központi objektum lehet csillag vagy bolygó, ám az eredmények azt mutatták: ha az objektum sugara kisebb egy megadott határnál, azt eseményhorizont veszi körül; magyarul egy olyan felület, amelyen a kívülről érkező anyag (részecskék és fény) csak kívülről befelé haladhat keresztül (tehát ami egyszer beesik, nem térhet vissza). Az ilyen objektumokat hívjuk fekete lyukaknak. A fekete lyukak létezésének leglátványosabb megfigyelési bizonyítéka az a két fényképfelvétel, amelyeket az *Event Horizon Telescope* (EHT) készített az M87*, valamint a galaxisunk közepén található SgrA* fekete lyukakról (lásd a 2. ábra jobb és bal oldali részét) [2, 3]. Ezeket a felvételeket a fekete lyukba az *akkréció* során bespirálozó izzó anyag látható, középen a fekete lyuk árnyékával.



Szepessy Dávid az Eötvös Loránd Tudományegyetem végzős mesterszakos fizikus-hallgatója. Kedvenc területe az általános relativitáselmélet, amelyet Dávid Gyulától és Hraskó Pétertől tanult. A jelen cikkben bemutatott kutatását (amellyel I. helyezést ért el a 2025. évi OTDK Kozmológia szekciójában) Kocsis Bence és Dávid Gyula témavezetésével végzi. A kutatás mellett óraadóként fizikát tanít az Eötvös József Gimnáziumban.

Az eseményhorizonton belüli téridő pontos matematikai leírása során észrevesszük, hogy a téridő természetes módon illeszkedik egy nagyobb, kiterjesztett téridőbe (*geodetikusan teljes kiterjesztett téridő* [4]). A kiterjesztett téridőben felbukkan egy párhuzamos világegyetem: a téridő egy olyan része, amely minden tulajdonságában megegyezik a mi (fekete lyukon kívüli) világunkkal, de a kiterjesztett téridő más tartományán helyezkedik el.¹ A két világegyetemet a fekete lyuk kapcsolja össze, ám semmilyen test (sem fény) nem haladhat át a két világegyetem között, mert a fekete lyukba beeső részecskék pályák szükségképpen beleütköznek a középen található pontszerű szingularitásba.

Bár a Schwarzschild-megoldás az általános relativitáselmélet után alig egy évvel megszületett, a forgó objektumokra érvényes általánosítását csak majdnem 50 évvel később írta fel R. P. Kerr. A forgó fekete lyukakat is leíró Kerr-téridő az általános relativitáselmélet legfontosabb analitikusan ismert megoldása. A Kerr-téridő kiterjesztése bonyolultabb a Schwarzschild-téridőénél, ami érdekes fizikai eseteket tesz lehetővé: a kiterjesztett Kerr-téridőben felbukkanó párhuzamos világegyetemek² között például lehetséges az átjárás [1, 5]. Ez azt jelenti, hogy a párhuzamos világegyetemben a fekete lyukba beeső anyag kibukkanhat a mi világunkban – sőt, el is hagyhatja a fekete lyukat! Továbbra is igaz marad, hogy a fekete lyukba beeső anyag nem hagyhatja el a fekete lyukat afelé a világegyetem felé, amelyből érkezett – egy másik felé viszont igen. (Azt a tartományt, amelyből az adott külső világ felé anyag érkezik a lyukból, az adott külső világhoz képest *fehér lyuknak* nevezik. A könnyebb érthetőség céljából azonban a téridő eseményhorizonttal körülvett tartományát – egyszersmind mint valószínűsítően létező asztrofizikai objektumot – egységesen fekete lyuknak nevezem.)

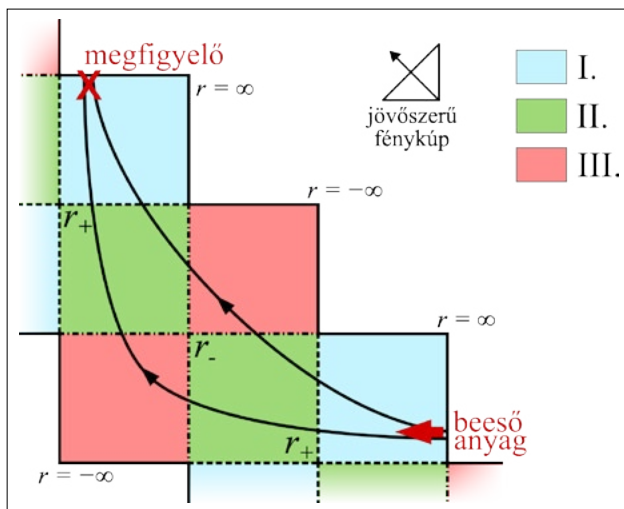
Arról, hogy a párhuzamos világegyetemek valóban léteznek-e, és az átjárás lehetséges-e, az elmúlt évtizedek intenzív elméleti munkája ellenére nem tudunk biztosat mondani (lehetséges, hogy a téridő szingularitás szerkezete instabil, mely esetben elzáródhat az út az áthaladó pályák előtt). E gordiuszi csomó átvágására lehetünk képesek azzal, hogy a fekete lyukból kibukkanó anyag detektálásával megfigyeléseknek vetjük alá a párhuzamos világegyetemek létezését. A cikk célja megfigyelési jósolatot felállítani arra az esetre, ha a párhuzamos világegyetemek léteznek.

¹ A párhuzamos világegyetem kifejezést a fent definiált jelentéssel használom, nem keverendő az egyes multiverzumelméletekben szereplő hasonló kifejezésekkel.

² A kiterjesztett Kerr-téridőben végtelen számú párhuzamos világegyetem kapcsolódik össze. A könnyebb érthetőség céljából a cikkben csak kettőt: a mi világunkat és egy párhuzamos világegyetemet tekintek.

3. Az áthaladó pályák vizsgálata

A megfigyelési predikcióhoz alkotott modell a következő. Adott egy forgó fekete lyuk kiterjesztett térideje, amelyben elhelyezünk egy megfigyelőt a fekete lyuktól távol. A párhuzamos világegyetemben minden irányból egyenletes sűrűséggel indítunk pályákat a fekete lyuk felé (ez lehet pl. a párhuzamos világegyetemet bejáró izotrop kozmikus háttérsugárzás). A fekete lyukba beeső, majd a mi világunkba kibukkanó pályák (*geodetikuskok*³) között lesz egy keskeny nyaláb, amelyik éppen a megfigyelő felé halad. Ez a nyaláb felel meg a valóságban a Földön elhelyezett távcsőbe érkező nyalábnak. A célunk e nyaláb intenzitáseloszlásának meghatározása. A vizsgált geodetikuskokat sematikusán ábrázoltam az 1. ábra Penrose-diagramján. (A vizsgált pályák tartozhatnak részecskékhez vagy fényhez. E cikkben csak az utóbbival foglalkozom; a tömeges részecskékre vonatkozó eredmények megtalálhatóak lesznek a készülő publikációnkban.)



1. ábra. A kiterjesztett Kerr-téridő Penrose-diagramjának részlete a vizsgált geodetikuskokkal. A Penrose-diagram a téridő idő- és radiális koordinátájának konform transzformációjával kapott ábra, amely lehetővé teszi a téridő topológikus szerkezetének szemléltetését. A folytonos (egyenes) vonalak a megfelelő felirattal összhangban a térbeli végtelenekeket, a szaggatott vonalak az $r = r_+$ külső eseményhorizontot, a szaggatott-pöttyözött vonalak az $r = r_-$ belső eseményhorizontot jelölik. A téridő színezett blokkjai a következők: a fekete lyukon kívüli tartomány (kék, I.), a két eseményhorizont közötti tartomány (zöld, II.) és az antiverzum (piros, III.). A két kézzel színezett blokk párhuzamos világegyetemek; a megfigyelőre a mi világunkként, a másikra párhuzamos világegyetemként hivatkozom. A görbe folytonos vonalak a vizsgált geodetikuskok sematikus ábrázolásai. A szélek mentén folytatódó ábra szemlélteti, hogy a kiterjesztett Kerr-téridő Penrose-diagramja végtelen sok blokkból áll. Az ábra az [5] alapján készült

Ahhoz, hogy a megfigyelő felé haladó nyaláb intenzitáseloszlását megkapjuk, a párhuzamos világegyetemben megfelelő kezdőfeltételekkel indított fénysugarak (fény-szerű geodetikuskok) menetét kell meghatároznunk. Az ezt leíró geodetikusegyenletek megoldását megkönnyíti,

³ Geodetikusknak nevezzük az általános relativitáselméletben a téridő azon görbéit, amelyek mentén a részecskék vagy a fény terjed, ha a gravitáción kívül más kölcsönhatás nem hat rájuk.

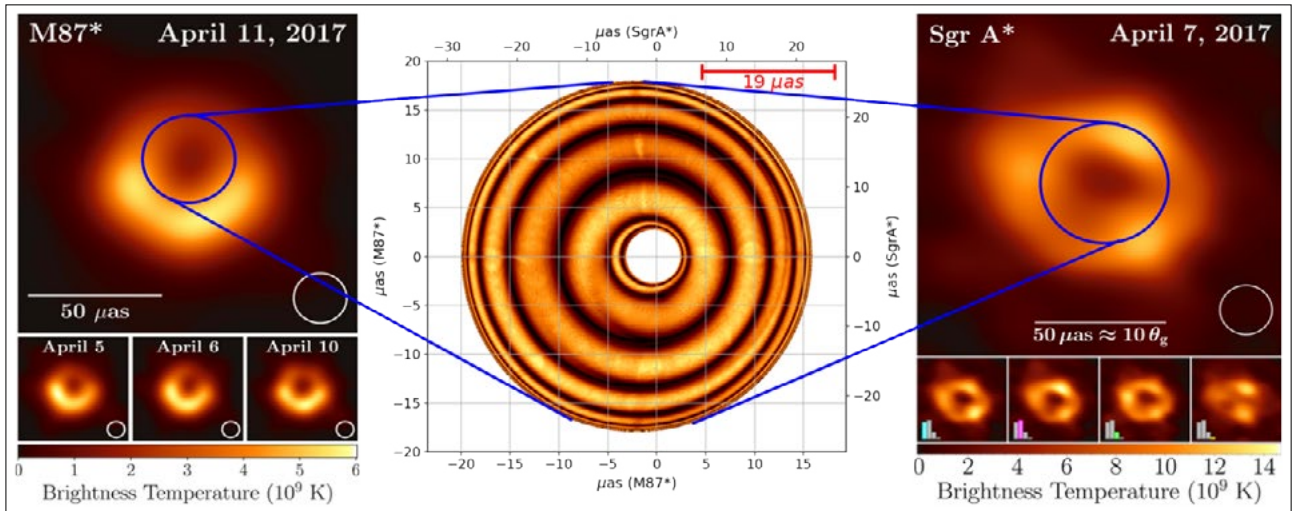
hogy a vizsgált problémában felírható négy megmaradó mennyiség: három triviálisan adódik (a négyessebesség abszolút értéke mellett a téridő időbeli és tengelyszimmetriájából), egy pedig varázslatos módon, a téridő magasabb rendű szimmetriájából (*Carter-állandó* [5]). A négydimenziós téridőn a négy megmaradó mennyiség segítségével a keresett fénypályák kifejezhetőek elliptikus integrálokkal [1]. Bár az eredmények pontos matematikai felírása bonyolult, ezzel meghatározhatjuk a megfigyelőhöz eljutó nyaláb intenzitáseloszlását. Az elliptikus integrálok kiszámítását Python-programmal végzem.

4. Eredmények

A kutatásom legfontosabb eredménye tehát annak meghatározása, hogy ha a párhuzamos világegyetemek léteznek, milyen intenzitáseloszlása van a párhuzamos világegyetemből induló, a Kerr-féle fekete lyuk forgástengelyétől adott polárszögben (látóirányban) elhelyezkedő megfigyelőhöz eljutó fénynyalábnak. A 2. ábra középső részén a nyaláb keresztmetszetét láthatjuk az intenzitással színezve 10°-os látóirány esetén. A megfigyelési predikció pontos illusztrálása végett a bal és jobb oldali ábrákon látható az EHT által eddig közreadott két fekete lyuk-fénykép az M87* és az SgrA* fekete lyukokról. A megfigyelési jóslatunk a következő: ha a párhuzamos világegyetemek léteznek, akkor a fekete lyuk árnyékában (a kék körökkel méretarányosan jelölve) a középső ábrán látható intenzitáseloszlást kell megfigyelnünk. Az EHT középső ábrán pirossal jelölt felbontóképességét figyelembe véve lehetségesnek tűnik, hogy a közeli jövőben képessé váljunk az ehhez szükséges felbontás eléréséhez.

4.1. Az eredmények értelmezése

Az ábrán látható intenzitáseloszlás gyűrűs szerkezetet mutat, egymást radiálisan követő fényesebb és kevésbé fényes sávokkal. Az ábra közepén látható üres területre nem a párhuzamos világegyetemből (hanem az antiverzumból, lásd az 1. ábrát) érkeznek fénypályák, amelyek eloszlását a kutatás következő fázisában határozom meg. A gyűrűs szerkezet magyarázata rendkívül intuitív. Ismert jelenség a fekete lyukak körül kialakuló fénygömb (-hég): a fény egy adott sugáron körpályán keringhet a fekete lyuk körül. Mivel a fénygömb instabil, a végtelenből érkező fénysugarak rendre körbefordulás nélkül, illetve egy, kettő stb. egész számú körülfordulás után haladnak át a fekete lyukon. A megmaradó mennyiségek terében a fekete lyukon áthaladó pályákat a fekete lyukat elkerülőktől éppen a fénygömbre (végtelen körbefordulás alatt) felcsavarodó pályák választják el. Ezért a nyaláb külső pereme felé haladva a körülfordulás végtelenhez tart, az intenzitásgyűrűknek – ahogy látható az ábrán – torlódási pontjuk van. (A fénygömbhöz hasonlóan az antiverzumban átjutó pályákat is az effektív radiális potenciál gátja, azaz lokális maximuma választja el a párhuzamos univerzumba jutóktól, így az intenzitásgyűrűknek a nyaláb belső peremén is torlódási pontjuk van.)



2. ábra. A párhuzamos világegyetemből érkező nyaláb megfigyelési lehetőségei az EHT-vel. Az ábra két oldalán az eddig elkészült két fekete lyuk-fényképet látjuk [2, 3], mindkettőn megfigyelhető az akkráció során bespirálozó anyag által kibocsátott sugárzás a fekete lyuk árnyéka körül. Ha a párhuzamos világegyetemek léteznek, a fekete lyuk árnyékában a középső ábrának megfelelő intenzitáseloszlást kell tapasztalunk. A középső ábra tengelyein feltüntettem a látszó szög méretet az M87* és az SgrA* esetén. A nyaláb méretét az eredeti fényképekhez arányosítva kékkkel jelöltem. Az EHT pirossal jelölt felbontóképességét figyelembe véve látható, hogy a gyűrűs szerkezet keresése a közeljövőben lehetségessé válhat. A középső nyaláb összintenzitásának (fényképen megfigyelhető fényességének) becslése a kutatás jövőbeli tárgyát képezi

5. Összefoglalás, kitekintés

A Kerr-féle forgó fekete lyukak kiterjesztett téridejében felbukkanó párhuzamos világegyetemek létezésének kérdése a mai napig eldöntetlen. A cikkben bemutatott eredmények e kérdés megválaszolásában lehetnek segítségül: ha a párhuzamos világegyetemek léteznek, a bennünket körülvevő fekete lyukakból jellegzetes intenzitáseloszlású fény- vagy részecskenyalábnak kell érkeznie, amelyek megfelelő feketelyuk-megfigyelésekkel (pl. az EHT segítségével) detektálhatóak lehetnek.

A cikkben felvázolt eredményeket részletesen bemutatjuk a készülő publikációkban, amelyet a *Physical Review Letters*-ben tervezünk megjelentetni. A kutatás jelenlegi fázisában a párhuzamos világegyetemből érkező időfüggő (pl. gyorsan fejlődő szupernóvákból származó) jeleket vizsgálunk; a fekete lyukat különböző egész

számszor megkerülő pályák miatt érdekes eredményekre számíthatunk.

Irodalom

- Chandrasekhar S. (1998): *The Mathematical Theory of Black Holes*.
- Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama K., Alberdi A., Alef W., Algaba J. C., Anantua R., Asada K., Azulay R., Bach U., Baczkó A.-K., Ball D., et al. (2022): First Sagittarius A* Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole in the center of the Milky Way. *The Astrophysical Journal Letters*, 930(2), L12.
- The Event Horizon Telescope Collaboration, Akiyama K., Alberdi A., Alef W., Asada K., Azulay R., Baczkó A.-K., et al. (2019): First M87 Event Horizon Telescope results. I. The shadow of the supermassive black hole. *The Astrophysical Journal Letters*, 875(1), L1.
- Hraskó P. (2016): *Relativitáselmélet*. Typotex.
- O’Neill B. (1995): *The geometry of Kerr black holes*. Dover Publications.

LÉGKÖRI MŰOGRÁFIA

Toronyi András^{1,2,®}, Oláh László², Varga Dezső²

¹Eötvös Loránd Tudományegyetem, TTK Fizikai és Csillagászati Intézet, Budapest; ²HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
[®]E-mail: toronyi.andras@wigner.hun-ren.hu

Bevezetés

A világegyetemből érkező, főként protonokból és könnyebb atommagokból álló kozmikus sugárzás a Földet elérve a felső légkör molekuláival kölcsönhatásba lép, ezzel a felszín felé haladó részecskézapókat kelt, amelyeknek fontos összetevői a kozmikus müonok.

Ezen – az elektron nagy testvéreként¹ is emlegetett – elemi részecskék közel fénysebességgel mozogva, a relati-

visztikus idődilatació miatt elérik a földfelszín, ahol több kilométer mélységbe is behatolnak. Anyagon történő áthaladáskor hozamuk csökken a közeg áthatolásához kellő energiával nem rendelkező részecskék elnyelődése miatt. A müonhozam mérésén alapszik a müonképződési eljárás, a *müográfia*, amely elvét tekintve a röntgenes képalkotáshoz hasonló: a leképezni kívánt geofizikai objektumot a kozmikus müonok „átvilágítják”, ezt kihasználva információt nyerhetünk annak anyageloszlásáról [1]. A müográfia már sikeresen alkalmazták vulkánok monitorozására, a bányászatban, illetve a barlangi és régészeti kutatásokban.

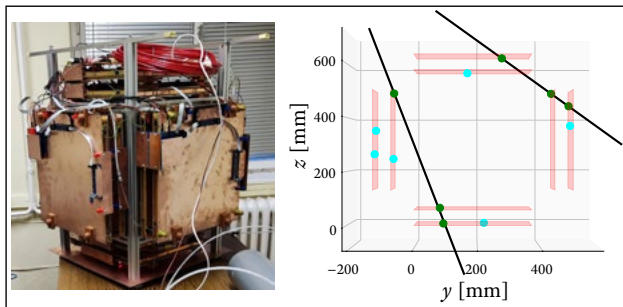
¹ A müonok töltésükben és spinjükben az elektronhoz hasonló részecskék, azonban tömegüket tekintve durván kétszázszor nehezebbek.

2022-ben *Tanaka Hiroyuki* és munkatársai – köztük több hazai kutató – megmutatták, hogy a müográfiának légkörtani alkalmazásai is lehetnek. Müográfiával képet alkottak egy trópusi ciklonról, és követték annak mozgását a *Kagoshima-öblön* keresztül, Japánban [2].

A légköri müográfia olyan berendezést igényel, amely a lehető legtöbb irányból képes a müonhozam mérésére. Kutatómunkánk célja egy ilyen berendezés fejlesztése volt. A detektort a HUN-REN Wigner FK Innovatív Detektorfejlesztő „Lendület” Kutatócsoport megépítette. Kutatásomban a berendezés által felvett adatokat elemző szoftver fejlesztésével foglalkoztam, amelyben a kísérleti részecskefizikában alkalmazott eljárásokat implementáltam: részecskepálya-rekonstrukciót, részecskepálya-alapú geometriai finomhangolást, hatásfokszámítást és a részecskepályák irány szerinti eloszlásának számítását.

A detektor felépítése

A légkör-müográfiás detektorrendszer sokszálas proporcionális kamrákból épül fel. Ezek gáztöltésű kamrák, amelyekben a gázteret párhuzamos réz katódlapok veszik körbe, és a gáztérben egymással párhuzamos nagy feszültségre kapcsolt anódszálak vannak kivesztve [3]. A kamrán áthaladó müonok ionizálják a gázt, és az így keletkező elektromos jel az anódszálakon érzékelhető. Az alapján, hogy a kamrában mely szálon vagy szálokon kaptunk jelet, információt nyerünk a részecske áthaladásának helyéről. A kamrákban két szálsík van kivesztve, amelyekben a szálok egymásra merőlegesek, így minden kamrában két dimenzióban kapunk információt az áthaladó müon pozíciójáról.



1. ábra. Balra a sokszálas proporcionális kamrákból felépülő légköri müográfiás detektor. Jobbra a részecskepálya-rekonstrukció szemléltetése. A piros síkok a kamrák síkjai. A kék, illetve zöld pontok a hamis (elektromos zaj), illetve valódi (részecskék által hagyott) beütési pontok. A fekete egyenesek az illesztett részecskepályák

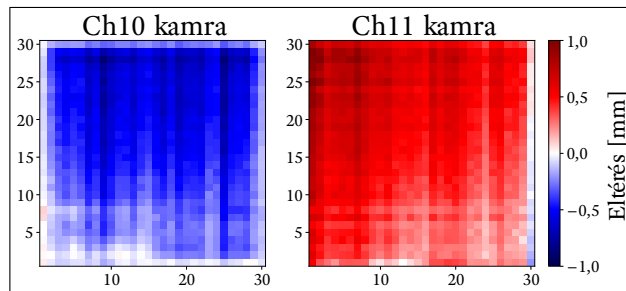


Toronyi András az ELTE TTK fizikus mesterképzésének hallgatója. A fizika alapszakot 2025-ben végezte el szintén az ELTE-n. 2023 és 2025 között a HUN-REN Wigner FK Innovatív Detektorfejlesztő „Lendület” Kutatócsoport és a Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoport vezetésével végzett TDK-munkát a légköri müográfia témakörében. Jelenleg a műometriai pozicionáló rendszer fejlesztésével foglalkozik az említett kutatócsoportnál.

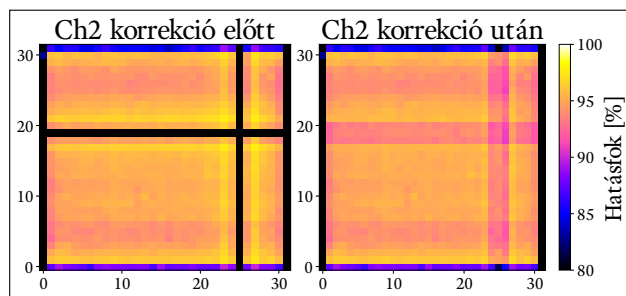
A detektorrendszer elrendezése (1. ábra) olyan, hogy a tér bármely irányából érkező részecske 3 vagy 4 kamrán áthaladhat, és az így kapott 3 vagy 4 beütési pontból a pályája rekonstruálható.

A szoftver működése

A detektorhoz fejlesztett szoftver lelke a részecskepálya-rekonstrukció. A részecskepályát a detektorban hagyott



2. ábra. Az ábrák a detektor két alsó kamráját mutatják. A pixelek színe a beütési pontok áthaladó részecskepályáktól való távolságát illusztrálja (jobb oldali skála) az ábrán vízszintes irányban. Látható, hogy a két kamra egymáshoz képest el van tolvá, hiszen az egyik pozitív, míg a másik negatív irányban tér el a várt zérus átlagtól



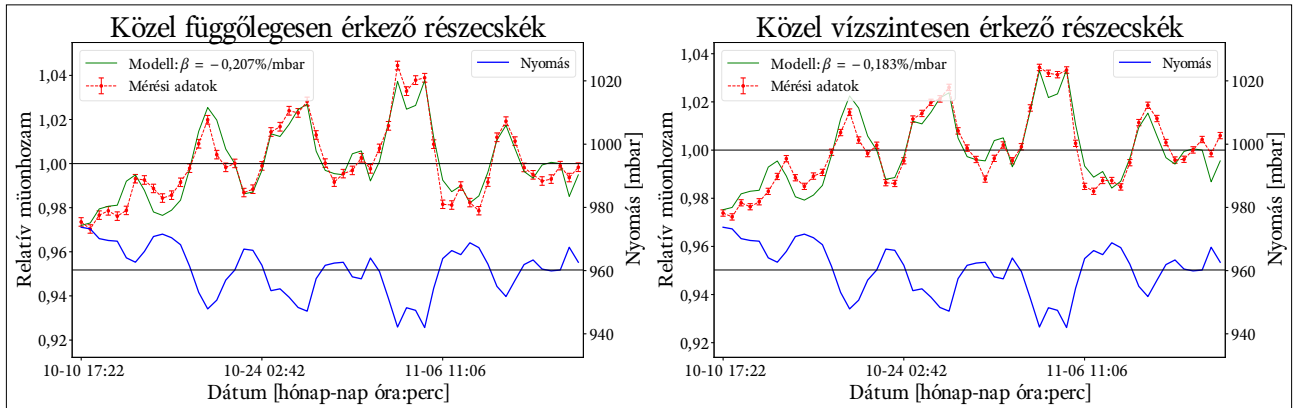
3. ábra. A 2-es számú kamra hatásfoka a hely függvényében. Bal oldalon látható két alacsony hatásfokú anódszál, amelyekre korrigálva a jobb oldali hatásfokot kapjuk. A kamra elég magas, 95% feletti hatásfokon üzemel



Oláh László fizikus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos főmunkatársa. A Nagyenergiás Geofizika Kutatócsoport (<https://wigner.hu/s/high-energy-geophysics/>) alapítója. A müográfia földtudományi és ipari alkalmazásainak kutatás-fejlesztésén dolgozik a HUN-REN Hazahívó és Külföldi Kutatókat Toborzó Program támogatásával.



Varga Dezső fizikus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont főmunkatársa, az Innovatív Detektorfejlesztő „Lendület” Kutatócsoport vezetője. Szakterülete a kísérleti részecskefizika, ezen belül is elsősorban a hadronok kölcsönhatásainak vizsgálata, valamint gáztöltésű nyomkövetők fejlesztése alaputatáshoz és alkalmazásokhoz.



4. ábra. A müonhozam légköri nyomástól való függésének mérése, közel függőlegesen és közel vízszintesen érkező részecskék esetén. A kék vonal a detektor helyén mért légköri nyomást mutatja. A piros pontok a müonhozam relatív változását jelölik a teljes mérési időtartamra vett átlaghoz képest. A zöld vonal a mérési eredményekre illesztett elméleti modell által a légköri nyomásból jóslott relatív müonhozam ingadozást mutatja. Az elméleti modell jól leírja a mérési eredményeket. A modell egyetlen paramétere a β barometrikus koefficiens, amely a nyomásfüggés erősségét jellemzi

beütési pontokra legjobban illeszkedő egyenes adja. A részecskék beütési pontjain túl megjelennek az elektromos zajból származó hamis beütési pontok is, amelyeket ki kell szűrni.

A részecskepálya-rekonstrukciót egy kombinatorikus algoritmus végzi: a valódi és hamis beütési pontok közül minden lehetséges módon kiválasztott három pontra egyenest illesztünk. Ezek közül azt fogadjuk el részecskepályaként, amelyik a legjobban illeszkedik (1. ábra). Ezzel kiszűrtük a zajt, hiszen a hamis pontokra az illeszkedés gyenge.

Az illesztett részecskepályák alapján érdekes korrekciós lehetőség adódik. Azt váránk, hogy a beütési pontok illesztett részecskepályától való eltérései átlagosan nullát adnak, hiszen egy véletlen beütési pont minden irányban egyforma valószínűséggel tér el a részecskepályától. Ha ettől eltérést tapasztalunk, az a detektorgeometria tökéletlen ismeretét jelenti.

Az egyes kamrákban a hely függvényében vizsgálható, hogy a beütési pontok átlagosan mennyire és milyen irányban térnek el az áthaladó részecskepályáktól (2. ábra). Ezek alapján meghatározható a szoftvernek megadott és a valós detektorgeometria közti különbség, így javítható a programnak megadott elrendezés és ezzel az adatok kiértékelése.

Az illesztett részecskepályák alapján kiszámítható a detektor kamráinak *hatásfoka* is. Ez annak a valószínűségét jelenti, hogy a kamrán áthaladó részecske beütési pontot hagy a kamrában az áthaladási ponthoz kéllően közel. Sőt, a kamra különböző pontjain áthaladó részecskepályák vizsgálatával a hatásfok kamrán belüli helyfüggése is meghatározható. A hatásfok helyfüggésének ismerete például a rossz hatásfokú anódszálak felderítésére is lehetőséget ad, amelyekre a beütési pontok meghatározásakor korrigálni lehet (3. ábra).

Mérési eredmények

A korrekciók elvégzése után kiértékelhető a teljes mérés, és vizsgálható a részecskepályák irány szerinti el-

oszlása, valamint ezen keresztül a müonhozam légköri nyomástól való függése. Kihasnálva a detektor által lefedett térszöget, külön vizsgáltam a közel függőlegesen és közel vízszintesen érkező részecskék hozamát. A kapott eredményeket a 4. ábra foglalja össze.

A mérési eredményre jól illeszkedő elméleti modellt illesztettem mindkét tartományra; ennek egyetlen paramétere – a *barometrikus koefficiens* – a müonhozam nyomásfüggésének erősségét írja le. Az elméleti várakozásokkal egyezően, a közel vízszintesen érkező részecskék nyomásfüggése gyengébb, mivel azok átlagosan nagyobb energiájúak.

Összefoglalás és kitekintés

Az ismertett berendezéssel mért adatok elemzésével bemutattuk a detektor légkörtani alkalmazhatóságát. A berendezést a jövőben nagyobb ciklonok és más légkörfizikai jelenségek (pl. hirtelen bekövetkező légköri hőmérséklet-növekedések) mérésére tervezzük alkalmazni.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunka a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24 kódszámú Egyetemi Kiválósági Ösztöndíj Programjának (NKFIA), a HUN-REN KSZF-144/2023 azonosítószámú „Hazahívó” Programjának, és az NKFIH TKP2021-NKTA-10 azonosítójú tématerületi kiválósági pályázatának támogatásával készült el.

Irodalom

- Oláh L. és mtsai (2017): Képkeltés kozmikus részecskék nyomkövetésével. *Fizikai Szemle*, 2017(3), 74–78.
- Tanaka H. K. M. et al. (2022): Atmospheric muography for imaging and monitoring tropic cyclones. *Scientific Reports*, 12(1), Art. No. 16710. 2045-2322. <https://doi.org/10.1038/s41598-022-20039-4>
- Varga D., Nyitrai G., Hamar G., Oláh L. (2016): High efficiency gaseous tracking detector for cosmic muon radiography. *Advances in High Energy Physics*, 2016(1), 1962317. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1155/2016/1962317>

A PUPILLAKÖVETÉS MEGVALÓSÍTÁSA EGY EGEREKET VIZUÁLISAN STIMULÁLÓ RENDSZERBEN

Baumgärtner Margaréta^{1,2}

¹BME TTK Atomfizika Tanszék, Budapest; ²BrainVisionCenter Kft., Budapest
E-mail: baumgartner.margareta@edu.bme.hu

1. A téma bemutatása, célkitűzés

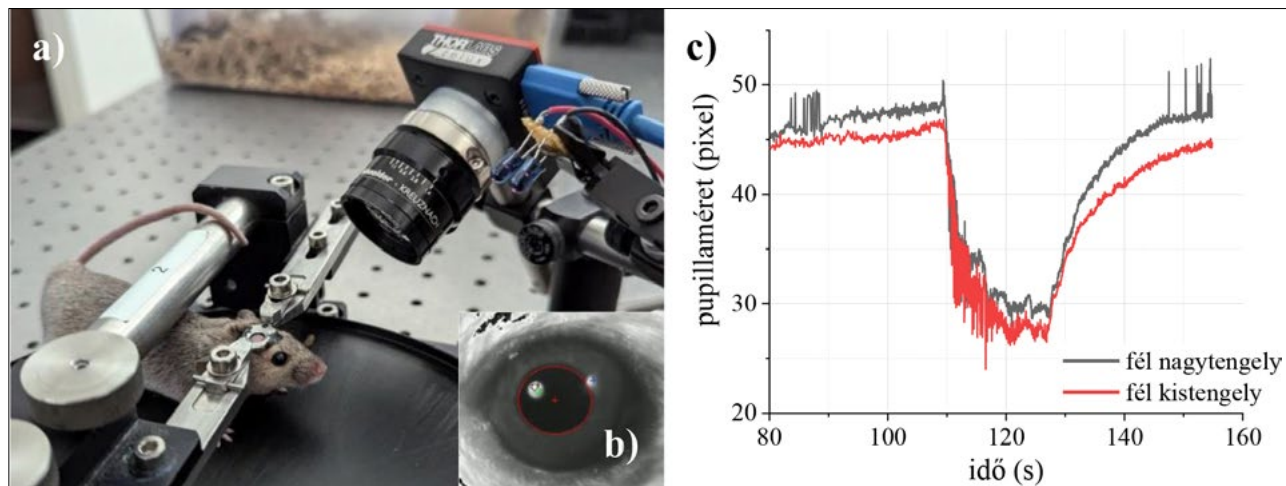
Az idegrendszer komplex működésének megértésében jelentős szerepet játszik a látás mechanizmusának vizsgálata, melynek az egér elterjedten alkalmazott modellállata. A sikeres vizuális stimulációhoz figyelembe kell venni az egér látórendszerének sajátosságait, különös tekintettel rendkívül széles látóterének lefedésére és a térbeli mélységérzékelés biztosítására. Kutatócsoportunk korábban olyan vetítőrendszert dolgozott ki, amely egy speciális vetítőlencse, megfelelő méretű képernyő és a szemtől kis távolságot biztosító mechanika kombinációjával az egér látóterét a vetített képpel teljesen kitölti [1].

Kutatásom célja a vetítőrendszer kiegészítése volt pupillakövetéssel; ennek szoftveres és hardveres kidolgozása. A pupilla méretét a fényviszonyokon túl a kognitív állapot is befolyásolja, ezért megfigyelése információk közöl a vizuális stimuláció alatt fellépő agyi háttér folyamatokról. A pupilla mért pozíciójából kiszámítható a tekintet iránya, ami a vetítés szoftveres pontosításához is hozzájárulhat.

A videookulográfia a szem, illetve a pupilla mozgásának követésére szolgáló, nem invazív, nagy pontosságú technika. Embereken szemészeti és neurológiai diagnosztikára alkalmas, de kutatási célokra állatokon is alkalmazzák. Lényege, hogy egy vagy több videokamera felvételt rögzít a szemekről, amit egy számítógépes szoftver dolgoz fel. A módszer egereken való alkalmazhatóságához [2] rögzíteni kell a fejet, a szem megvilágításához pedig infravörös fényforrások szükségesek, mivel ezek fényét az egér nem érzékeli.

2. Módszerek

A tudományterületen alkalmazott szoftverek áttekintését követően saját megoldásom alapjául a céljaimnak leginkább megfelelő, Arvin és munkatársai által fejlesztett, nyílt forráskódú „EyeLoop” [3] nevű szoftvert választottam. A Python-implementációjú szoftver vektorizált módszerrel detektálja a pupillát valós időben. A programba a hatékonyabb működés érdekében további funkciókat integráltam, automatizáltam, pontosítottam,



1. ábra. a) A pupillakövető kísérlet elrendezése szürke egérrel. b) A kijelölt pupilla a kameraképen. c) A pupilla méretének változása a fényreflex hatására



Baumgärtner Margaréta egészségügyi mérnökként 2025-ben végzett a BME-n. Tanulmányai alatt dr. Maák Pál témavezetésével az egerek hatékony vizuális stimulációjának lehetőségeit vizsgálta, részt vett egy erre szolgáló vetítőrendszer kifejlesztésében. Jelenleg a BME Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának doktorandusza, kutatási területe a kiterjesztett valóság megvalósítása és az érzékelés optimalizálása autópári head-up display rendszerekben.

és kibővíttem a követés egyes lépéseit. Továbbá implementáltam a kiválasztott kamera támogatását, és a környezeti fényviszonyokhoz való alkalmazkodáshoz autoexpozíciós algoritmust [4] alkalmaztam.

A pupillakövetés hardveres megvalósításához olyan kis méretű kamerára volt szükség, amely szoftveresen hatékonyan vezérelhető, érzékeli az infravörös hullámhossztartományt, és látótávolsága néhány centiméterig csökkenthető. A kiválasztott Thorlabs (CS165MU/M-Zelux) kamera a megfelelő objektívvel (Schneider-Kreuznach

Cinegon 1.4/8-0512) teljesítette ezeket a követelményeket. A szemet két infravörös LED világította meg.

Elsőként a szoftvert teszteltem több, különböző körülmények között felvett videón. A teljes pupillakövető rendszer működését először egérszemmodellen (hungarocell golyó, rajzolt pupillával), majd élő egereken vizsgáltam. Az általam alkalmazott fejlesztések révén a szoftver minden esetben megfelelően érzékelt

a pupillát, követte elmozdulását és méretének változását.

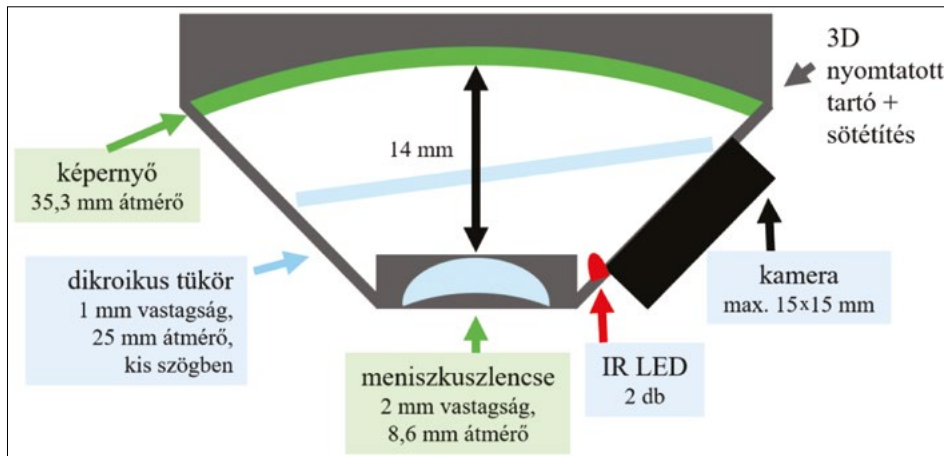
A mérések során az egerek feje rögzített volt, ők pedig egy kerek futópadon álltak, ami mozgási lehetőséget biztosított számukra (a mozgásnak a pupillakövetés szempontjából nem volt jelentősége). A tesztben két, különböző színű és különböző mértékben pigmentált szemű egeret vizsgáltam (SZ: szürke és F: fekete), mivel sötét színű egerek esetén a szem és a pupilla között kisebb a kontraszt, ami nehezítheti a pupilla körvonalainak megtalálását. A kísérleti elrendezés és a szoftver által detektált pupilla az 1a, b. ábra paneljein láthatóak.

3. Eredmények

A kamera az egerek szeméről éles képet készített, a szivárványhártya és a pupilla között mindkét egér esetében megfelelő volt a kontraszt a pupilla határainak kijelöléséhez. Méréseimben 10 percig rögzítettem az egér spon-tán szemmozgásait. A pupillapozíciók változása mindkét egér esetében nagyobb volt vízszintes (P5-P95 terjedele-m, SZ: 22,5 pixel, F: 10,1 pixel), mint függőleges irány-ban (P5-P95 terjedele-m, SZ: 10,6 pixel, F: 6,0 pixel), ez megfelel annak az elvárásnak, hogy a rögzített fejű ege-rek szemmozgásai főként horizontális irányúak.

A pupilla méretének vizsgálatához fényreflexet váltot-tam ki az egérben úgy, hogy 20 cm távolságból egy lám-pával megvilágítottam a szemet. A rögzített adatokban jól megfigyelhető a pupillareflex dinamikája (1c. ábra): a kezdeti átlagos méretről ($47,3 \pm 0,8$ pixel), a pupilla a fény hatására gyorsan (7,6 s alatt) összeszűkül (29,9 \pm 0,7 pixel). A fényinger megszűnését követően a pupilla folya-matosan, a szűkülésnél lassabban (27,3 s alatt) tért vissza eredeti mérettartományába.

A pupillakövetés biológiai kísérletekben való alkal-mazhatóságának kulcskérdése a vetítőrendszerrel való kombinálhatóság. A két rendszer integrálása dikroikus tükör alkalmazásával lehetséges a 2. ábrának megfele-lő elrendezésben. A zavartalan vetítéshez a kamerát és



2. ábra. Az integrált vetítő- és pupillakövető rendszer optimális elrendezése

a fényforrásokat az eszköz oldalában kell elhelyezni, az infravörösén megvilágított szem képe a dikroikus tük-rön visszaverődve jut el a kamerába. A tükör a képernyő látható hullámhosszú fényét átengedi. Ahhoz, hogy a ve-tített képet az egér szeme élesen képezze le, a képernyő-lencse távolságnak 14 mm-nek kell lennie, ezért a Thor-labs kameránál kisebb méretű kamerára van szükség. Kísérleteim alapján a vizuális információk vetítése és a pupilla követése egyidejűleg megvalósítható, a két funk-ció nem akadályozza egymást.

4. Összefoglalás

Tudományos diákköri munkámban kutatócsoportunk számára létrehoztam egy pupillakövető rendszert. A to-vábbfejlesztett szoftver alkalmas a pupilla méretének és pozíciójának követésére különböző körülmények között, előre felvett videókon és valós időben is. A kiválasztott kamera és infravörös LED-ek a kísérletekben megfele-lőek voltak. Kísérleteimmel bemutattam, hogy a pupil-lakövetésből biológiailag releváns adatok nyerhetők. A pupillakövető rendszer a kamera méretének csökken-tését követően alkalmas lesz a vetítőrendszerbe történő beépítésre. A jövőben a tekintet irányának meghatáro-zását is integráljuk az általam megvalósított pupillaköve-tési rendszerbe, így ez a kutatócsoportunkban a biológiai mérések fontos eszközévé válhat.

Irodalom

1. Judák L., et al. (2025): Moccus: an immersive virtual reality sy-tem for mice incorporating stereo vision. *Nat. Methods*, 22(2), 386–398. <https://doi.org/10.1038/s41592-024-02554-6>
2. de Jeu M., De Zeeuw C. I. (2012): Video-oculography in Mice. *JoVE J. Vis. Exp.*, 65, e3971. Art. No. 65. <https://doi.org/10.3791/3971>
3. Arvin S., Rasmussen R. N., Yonehara K. (2021): EyeLoop: An open-source system for high-speed, closed-loop eye-tracking. *Front. Cell. Neurosci.*, 15. <https://doi.org/10.3389/fncel.2021.779628>
4. Su Y., Lin J. Y., Kuo C.-C. J. (2016): A model-based approach to camera's auto exposure control. *J. Vis. Commun. Image Represent.*, 36, 122–129. <https://doi.org/10.1016/j.jvcir.2016.01.011>

ERŐSTÉR-FOTOEMISSZIÓ ULTRARÖVID LÉZERIMPULZUSOKKAL

Ligeti Gábor Mihály^{1,2}

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; ²Szegedi Tudományegyetem TTIK, Szeged
E-mail: ligeti.gabor@wigner.hun-ren.hu

Az elmúlt évtizedekben a nanotechnológia és a lézerfizika fejlődése alapjaiban változtatta meg a fény és az anyag kölcsönhatásáról alkotott képünket. A rendkívül rövid, akár attosekundumos fényimpulzusok lehetővé tették, hogy az elektronok mozgását időben „lefényképezzük”, s ezzel új kutatási terület, az attofizika született meg – amelynek jelentőségét Krausz Ferenc 2023-as Nobel-díja is kiemelte [1]. A nanotechnológiai fejlesztéseknek köszönhetően ma már nemcsak atomokat és molekulákat, hanem nanorészecskékben zajló ultragyors elektronfolyamatokat is vizsgálhatunk.

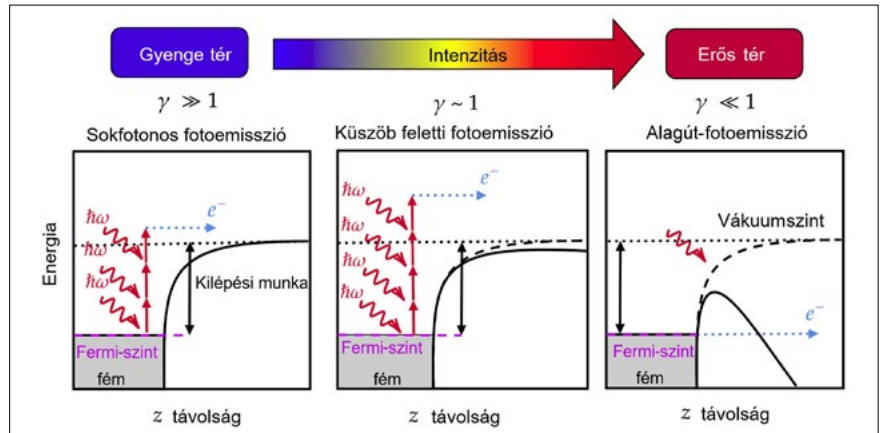
A fém nanorészecskék egyik legkülönlegesebb tulajdonsága, hogy fény hatására kollektív elektronrezgéseket, úgynevezett felületi plazmonokat lehet bennük kelteni. Ezek a lokalizált rezgések a nanorészecskék közelében rendkívül erős, jóval a diffrakciós határ alatti, nanométeres térbeli skálán koncentrálódó elektromágneses teret hoznak létre, amely sokszorosan meghaladhatja a külső lézertér intenzitását. Ennek a tulajdonságnak köszönhetően a plazmonikus nanostruktúrák számos alkalmazási lehetőséget kínálnak – a bioszenzoroktól a napenergia-hasznosításon át egészen az ultragyors elektronikáig. Az utóbbi években különösen nagy figyelem irányult arra, hogyan viselkednek ezek a plazmonikus rendszerek ultrarövid, nagy intenzitású lézerimpulzusok hatására [2]. Ilyenkor a nanorészecskéből elektronok léphetnek ki, amelyek energiája és eloszlása értékes információt ad a lokális plazmontér nagyságáról és térbeli szerkezetéről. A fotoelektronemisszió részletes tanulmányozása így nemcsak alap-kutatási szempontból lehet érdekes, hanem a jövőbeli technológiai

alkalmazásokban is fontos szerepet játszhat. A fotoemisszió, vagy más néven fényelektromos hatás közel 130 éve ismert, és több mint száz éve helyesen értelmezett fizikai alapjelenség, melynek napjainkban számos gyakorlati alkalmazása van, akár az elektronmikroszkópiában, vagy a félvezető-alapú fotodetektor-technológiában. Heinrich Hertz és Lénárd Fülöp kísérleteire alapozva Albert Einstein fektette le a fotoelektromos hatás elméleti alapjait 1905-ben. A magyarázat a fény kvantumosságán alapul – ezt a kvantummechanika egyik első mérföldköveként tartjuk számon. A fotoemisszió lényege, hogy a felületről kilépő elektron kilépési munkáját a felületre érkező megfelelő energiájú foton fedezi.

A korai felfedezések idején csak a lineáris fotoemisszió vizsgálatára volt lehetőség, vagyis amikor egy foton egy elektront vált ki. Lineáris fotoemisszió esetén a fotoelektronok maximális kinetikus energiája az Einstein-féle összefüggés szerint alakul:

$$E_{\text{kin}} = \hbar\omega - W, \quad (1)$$

ahol a kölcsönható foton energiája $\hbar\omega$, W pedig az adott



1. ábra. Fémfelületi fotoemissziós folyamatok sematikus ábrája az intenzitás és a Keldis-féle γ paraméter függvényében adott hullámhosszú fotonokra



Ligeti Gábor Mihály a Szegedi Tudományegyetem Fizika Doktori Iskola és a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóintézet PhD-hallgatója. TDK- és OTDK-munkáiban ultragyors lézerindukált fotoemissziós folyamatok kvantummechanikai modellezésével foglalkozott. PhD-témájában jelenleg nanooptikai rendszerek plazmonikus tulajdonságait vizsgálja fotoemissziós kísérletekben.

anyagra jellemző kilépési munka. Ebben a tartományban az emittált fotoelektronok száma, vagyis a fotoáram lineárisan változik a fényintenzitással. Fémek esetén tipikusan 5 eV körüli kilépési munka jellemző, így lineáris fotoemissziót ultraibolya fotonokkal lehet előidézni.

A nagy intenzitású, ultrarövid lézerimpulzusoknak köszönhetően ma már nemlineáris fotoemissziós jelenségeket is vizsgálhatunk. A szakirodalom a lézerintenzitás alapján weak-field (gyengetér-) és strong-field (erőstér-) tartományokat különböztet meg.

Gyenge térben az elektronok kibocsátása több foton egyidejű abszorpciójával történik – sokfotonos emisszió formájában:

$$E_{\text{kin}} = n\hbar\omega - W, \quad n_{\text{min}} = W/\hbar\omega \quad (2)$$

1964-ben Leonid V. Keldis úttörő munkájával sikeresen megmagyarázta a fényindukált alagútionizáció jelenségét atomi rendszerekre. Ilyenkor a külső tér olyannyira erős, hogy képes „letörni” az atomi vagy a fémfelületre jellemző potenciált, létrehozva ezáltal egy véges magasságú és szélességű potenciálgátat, amin keresztül az elektron nem nulla valószínűséggel alagutazhat egy folytonos energiaspektrumú állapotba. Keldis elméleti leírásában definiált egy karakterisztikus paramétert, ami a fotoemissziós folyamatok mechanizmusának meghatározására szolgál:

$$\gamma = \sqrt{\frac{W}{2U_p}}, \quad U_p = \frac{e^2 \mathcal{E}_0^2}{4m_e \omega^2}. \quad (3)$$

A fenti összefüggésben W az adott anyagra jellemző kilépési munka, U_p pedig az úgynevezett ponderomotoros energia. A ponderomotoros energia a lézerfizikában egy széles körben használt mennyiség. Ez lényegében egy adott elektromos térerősségű elektromágneses térben egy szabad elektron egy optikai periódusra átlagolt, oszcillációs energiáját jelenti. A ponderomotoros energiára vonatkozó összefüggésben e az elektron töltése, m_e az elektron tömege, \mathcal{E}_0 a külső elektromos tér amplitúdója és ω a lézertér oszcillációs körfrekvenciája. $I_0 \sim \mathcal{E}_0^2$, ezért egy adott frekvencián a lézer intenzitása határozza meg, milyen fotoemissziós tartományban vagyunk. Az 1. ábrán az egyes folyamatok sematikus ábrája szerepel. Az átmeneti tartományban 1 körül tehát a küszöb feletti fotoemisszió a jellemző. Ez egy olyan erősen nemlineáris folyamat, ahol több foton abszorpciója valósul meg, mint amennyi minimálisan szükséges.

$$E_{\text{kin}} = n\hbar\omega - W, \quad n_{\text{min}} > W/\hbar\omega. \quad (4)$$

Ezt először atomi rendszerek esetén figyelte meg a 2023-ban Nobel-díjjal kitüntetett Pierre Agostini 1979-ben. A küszöb feletti fotoncsúcsok jellegzetes rezonanciacsúcsokat mutatnak a fotoemissziós spektrumokban, és a közöttük lévő távolságot a lézer frekvenciája határozza meg. Az intenzitást növelve $\gamma \sim 1$ körül a fotoelektronok ponderomotoros energiája már nem lesz elhanyagolható a kilépési munkához képest. Ekkor az elektronoknak nemcsak a kilépési munkához szükséges energiát, de a lézertérben jellemző ponderomotoros energiát is meg kell kapniuk. Így az elektronok energiamérlege a következőképpen módosul:

$$E_{\text{kin}} = n\hbar\omega - W - U_p \geq 0. \quad (5)$$

Mivel a ponderomotoros energia az intenzitástól lineárisan függ, az intenzitást növelve egy adott sokfotonos csúcs pozíciója az alacsonyabb energiák felé tolódik, és végül egy kritikus intenzitásnál meg is szűnik. Ez az úgynevezett csatornabezáródási jelenség. Ez kvantummechanikai képben a kontinuumállapotok Stark-eltolódásával magyarázható.

Ezek a folyamatok mélyen kvantumos természetűek, ezért a plazmontérbeli fotoemisszió modellezésére az egydimenziós Schrödinger-egyenletet használjuk [3]. Az egydimenziós Schrödinger-egyenlet alakja az egy aktív elektront tartalmazó közelítésben:

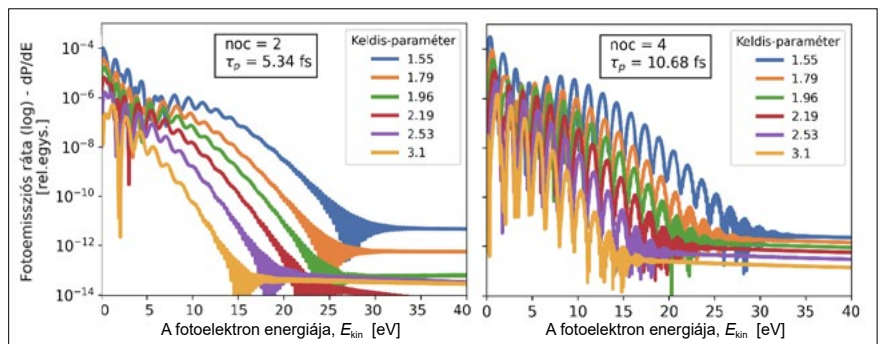
$$i\hbar \frac{\partial \Psi(z,t)}{\partial t} = \left[-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2}{\partial z^2} + V_{\text{fém}}(z) + V_{\text{pert}}(z,t) \right] \Psi(z,t), \quad (6)$$

ahol $\Psi(z, t)$ az elektron hullámfüggvénye, $V_{\text{fém}}(z)$ és $V_{\text{pert}}(z)$ pedig rendre a fém felületi potenciálja és a lézertérből származó potenciál.

A modell egzaktul leírja nemcsak a sokfotonos vagy az alagútemissziós folyamatokat, de az átmeneti tartományban a csatornabezáródás jelenségét is. Az elektron-hullámfüggvény időbeli dinamikájából a fotoemitált elektronok energiaeloszlása is meghatározható.

OTDK-dolgozatomban az időfüggő Schrödinger-egyenlet numerikus megoldásához a Crank–Nicolson-egyenletet használtam, ami egydimenziós közelítésben egy tridiagonális egyenletrendszerre redukálható. Az ilyen mátrixegyenleteket például a Thomas-algoritmussal lehet megoldani, ami az egyik leghatékonyabb soros algoritmus ilyen célra.

A 2. ábrán 800 nm hullámhosszú lézerimpulzusokra vonatkozó számítások eredményei láthatóak különböző intenzitások és impulzushosszak mellett. Ezekon a szimulációkon több trend is jól látható. A τ_p impulzushossz növelésével például fokozatosan jelenik meg egy úgynevezett plató rész, ami az erőtér-tartományra jellemző visszaszórt elektronok hatása. Emellett jól kivehető, hogy az impulzushossz növekedésével a küszöb feletti csúcsok egyre rezonansabbá válnak, és ezek eltolódása is megfigyelhető. A számolások helyesen visszaadják a várt fotoncsúcsokat is. Ezek a csúcsok egymástól ekvidisztnan helyezkednek el, a köztük lévő távolság pedig pont a lézer fotonenergiája. A fotoemissziós spektrumok kulcsfontosságúak, részletes elemzésükkel például a plazmon-



2. ábra. Fémfelületi fotoemissziós folyamatok sematikus ábrája az intenzitás és a Keldis-féle γ paraméter függvényében az adott hullámhosszú fotonokra

tér nagyságára és szerkezetére lehet visszakövetkeztetni. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Ultragyors Nanooptika Csoportjában nemzetközi színvonalú laborokban vizsgálhatjuk a felületi plazmonok dinamikáját [4]. Számos kísérleti és elméleti módszert, köztük ultragyors fotoemissziós méréseket és egydimenziós időfüggő modelleket használunk ezek pontos megértéséhez. Az itt zajló kutatások nemcsak mélyebb megértést nyújthatnak a fény és az anyag kölcsönhatásának femtoszekundumos és nanométeres skálákon való megértésében, de új lehetőségeket nyithatnak a technológiai alkalmazásokban is.

Irodalom

1. The Nobel Prize in Physics 2023. NobelPrize.org. Nobel Prize Outreach AB 2023. Tue. 24 Oct. 2023.
2. Dombi P., Pápa Zs., Vogelsang J., Yalunin S. V., Sivis M., Herink G., Schäfer S., Groß P., Ropers C., Lienau C., et al. (2020): Strong-field nano-optics. *Rev. Mod. Phys.*, 92, 025003.
3. Yalunin S., Gulde M., Ropers C. (2011): Strong-field photoemission from surfaces: Theoretical approaches. *Phys. Rev. B*, 84, 195426.
4. Bánhegyi B., Kiss G. Z., Pápa Z., Sándor P., Tóth L., Péter L., Rácz P., Dombi P. (2024): Nanoplasmonic photoelectron rescattering in the multiphoton-induced emission regime. *Physical Review Letters*, 133, 033801.

JÉGMODELL KAGOME-RÁCSON

Ajzenberger Lea^{1,2}, Penc Karlo², Kondákor Márk^{1,2,@}

¹Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Elméleti Fizika Tanszék, Budapest

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

@E-mail: kondakor.mark@wigner.hun-ren.hu

A jég tulajdonságainak leírása régóta kihívás a fizikusok és kémikusok számára. Jelen tudásunk szerint a jég több mint 20 különböző kristályszerkezetet vehet fel különböző nyomás- és hőmérsékleti körülmények között. Ezek többségében az oxigénatomok egy olyan rácsot alkotnak, amelyben minden atomot négy másik vesz körbe, míg a hidrogénatomok a szomszédos oxigénatomok között találhatóak meg. Az egy oxigénatom körüli négy hidrogénatomból kettő hozzá közelebb, kettő távolabb helyezkedik el – ezt ismerte fel John Desmond Bernal és Ralph Howard Fowler 1933-ban [1]. Ma ezt a rendezésvet hívjuk Bernal–Fowler-szabálynak vagy *jégszabálynak*. Ennek egy interpretációja, hogy két hidrogén kovalens kötéssel, kettő pedig hidrogénhídon keresztül kapcsolódik az oxigénhez.

A felfedezés új problémát vetett fel: hány hidrogénatom-konfiguráció felelhet meg a jégszabálynak? Könnyű belátni, hogy egy oxigén körül hat lehetséges elrendezés van. Linus Pauling 1935-ös becslése szerint a jégszabályt követő konfigurációk száma $W \approx (3/2)^N$, ahol N az oxigénatomok száma [2]. E klasszikus modell véges, $S_0 \approx k_B N \ln(3/2)$ zérus hőmérsékletű entrópiát jósol, ellentmondva a termodinamika III. főtételenek. Fajhőmérésekkel igazolták, hogy 15 K és 273 K között ezt az alapállapotit elfajultságot nem oldják föl egyéb effektusok. A jégszabály hasznosnak bizonyult más anyagok vizsgálatában is, például a magnetitben található töltéslendeződés leírásában.

A jégmodell két- és háromdimenziós rácsokra is általánosítható oly módon, hogy a vizsgált rács minden csúcsába négy irányított él fut be: e négyből kettő be- és kettő kifelé mutat. Ezek az ún. *hatvertex-modellek*, utalva a hat megengedett csúcskonfigurációra. E modellek a statisztikus fizika fókuszában voltak 1960-as évektől. Az egyik első áttekintést Rodney James Baxter 1982-es könyve adta a területről [3].

Az alapötletet tovább általánosítva jutunk a *spinjégek* fogalmához, melyekben a mágneses dipólusok játszzák a nyilak szerepét. A $Dy_2Ti_2O_7$ például olyan kristály, ahol a nagy mágneses momentumú Dy^{2+} ionok csúcscsomszédos tetraédereket alkotnak, és az erős anizotrópia miatt a dipólusok mindig az általuk összekötött tetraéderek középpontjaiba vagy azzal ellentétes irányba mutatnak. Az anyag alapállapota követi a jégszabályt: egy tetraéderben két spin mindig befelé, kettő kifelé mutat. Mivel e rendszerek gerjesztései



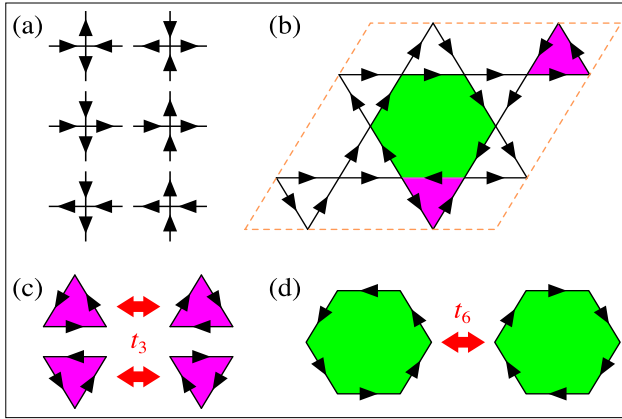
Penc Karlo a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Kvantumos Anyagok Kutatócsoportjának kutatóprofesszora, az MTA doktora. Kutatásai a mágneses anyagok, a spinfolyadékok és az erősen korrelált elektromos rendszerek megértését célozzák.



Ajzenberger Lea jelenleg a BME harmadéves fizikus-mérnök alapszakos hallgatója. A jelen cikkben feldolgozott TDK-dolgozat szerzője, amelyet a 3rd EELISA Scientific Student Competition eseményén adott elő.



Kondákor Márk a BME Fizikai Tudományok Doktori Iskolájának PhD-hallgatója. Doktori témáját a spin-pálya csatolás szerepének vizsgálata adja a mágneses és szupravezető rendszerekben.



1. ábra. a) A hat jég szabályt követő csúcskonfiguráció. (b) Egy jég szabályt követő elrendezés kagome-rácson. Ha egy cella körül egymásba mutató nyilakat látunk, akkor megfordítható – ezt lila és zöld kitöltés jelöli a hatszögek és a háromszögek esetén. A sárga szaggatott vonal a periodikus határfeltételt jelzi. (c), (d) A flippelhető három- és hatszögcellák körüljárása megfordul a vezető rendű kvantumos fluktuációk alatt. Ezek „hoppingparaméterei” t_3 és t_6

„mágneses monopólusokként” értelmezhetők, a spinjegek a 2000-es évektől kiemelt figyelmet kaptak.

A jégmodellt kvantumos rendszerek is megvalósíthatják. A kvantumos spinjegekben a mágneses momentumok rövidek, akár feles spinűek. A kvantummechanikában megengedett a jég szabályt követő konfigurációk szuperpozíciója, és egy Hamilton-operátorral megadható, hogy az állapotok között milyen valószínűséggel térhetünk át egyikből egy másikba. Ilyen anyagokra példa a $Tb_2Ti_2O_7$ vagy a $Pr_2Zn_2O_7$. Továbbá, már a kvantumos hatvertex-modellt követő kvantumszimulátorokat is ismerünk [4], amelyek ferro- és antiferromágnesesen csatolt szupravezető qubiteket használnak építőelemként.

A kvantumos modell kulcsa, hogy a jég szabályt kielégítő konfigurációk több el egyidejű megfordításával köthetők össze. Ha egy rácson egymásba mutató élekből egy zárt hurkot veszünk, és azok irányát egyszerre megcseréljük, akkor új, szabálykövető elrendezést kapunk. Mivel sok el szimultán megfordulása egy kis valószínűségű esemény, csak a rác körüljárással rendelkező celláit vesszük figyelembe a számolásoknál. Ezeket megfordítható (flippelhető) celláknak hívjuk.

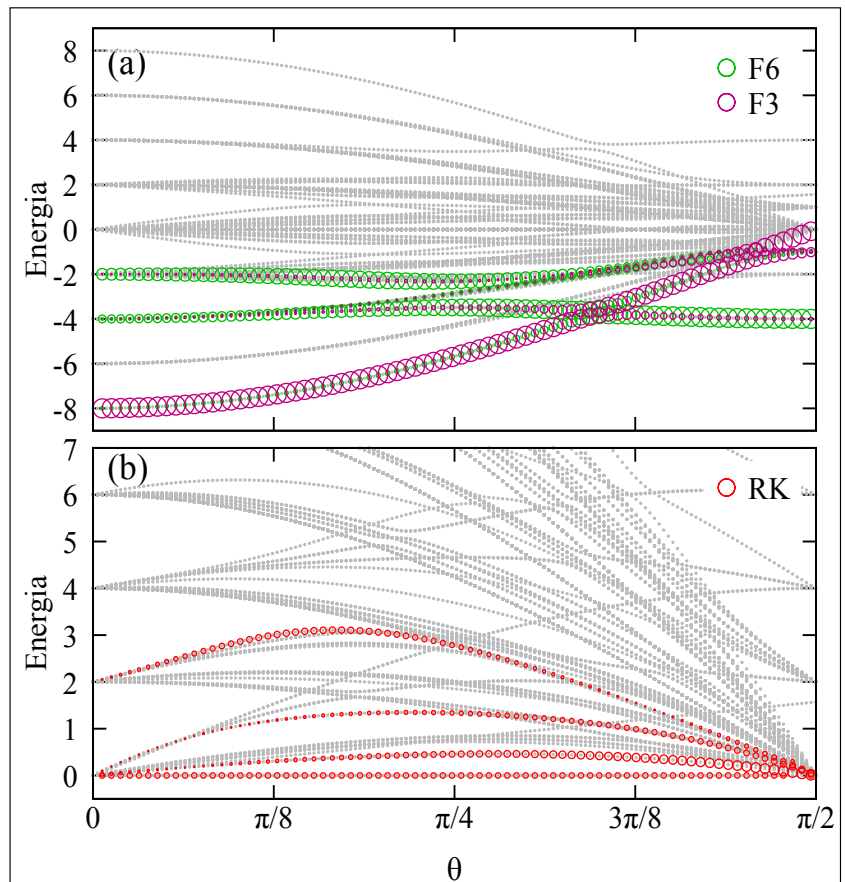
A kvantumos hatvertex-modell Hamilton-operátorát konvenció sze-

rint az alábbi módon szokták megadni:

$$H = V \sum_{\text{cella}} (|\circ\rangle\langle\circ| + |\circ\rangle\langle\circ|) - t \sum_{\text{cella}} (|\circ\rangle\langle\circ| + |\circ\rangle\langle\circ|).$$

A második tag (egyfajta „hopping”) a kvantumos dinamikáért felel: a konfigurációban található valamennyi megfordítható cella körüljárását megcseréli. Ezzel szemben az első tag minden flippelhető cella után a „klasszikus” állapotot V együtthatóval adja vissza, leszámolva ezáltal a megfordítható cellákat. Ezen tag bevezetése elméleti háttérű: míg a $V = 0$ határeset csak numerikusan vizsgálható, addig a $V = t$ választással a kvantummechanikai probléma alapállapota egzaktul megoldható az úgynevezett Rokhsar–Kivelson-modell (RK) analógiáját követve.

Csoportunkban 2021-ben készült el a témában az első TDK-dolgozat „Anizotrop kvantumos hatvertex-modell vizsgálata négyezőgrácson” címmel. A motivációt a már említett qubitszimulátor adta [4], amely a négyzetrács kvantumos hatvertex-modelljét egészítette ki egy anizotropiával. A munkát a BME TDK-konferenciáján



2. ábra. Energiaspektrumok $N = 12$ nagyságú kagome-klaszterre, periodikus határfeltételekkel. (a) A spektrum $V_3 = V_6 = 0$, $t_3 = \cos \theta$ és $t_6 = \sin \theta$ paraméterekkel. A szürke nivókat itt teljes egzakt diagonalizációval kaptuk meg. A lila adatpontokat Lánczos-algoritmussal kaptuk. A bemeneti vektor (F3) azon konfigurációk szimmetrikus szuperpozíciója volt, melyekben az összes háromszögcella megfordítható. A zöld spektrumot ezzel analóg módon kaptuk az F6 állapottal, amely az F3 megfelelője a hatszögcellákra. A körök nagysága a számított és a bemeneti vektorok átfedését tükrözi. Fázisátalakulás az alapállapot és az első gerjesztés metszésénél van. (b) Energiaszintek az RK-modellben ($V_3 = t_3$, $V_6 = t_6$), analóg jelölésekkel. Az RK-hullámfüggvényben valamennyi megengedett jégkonfiguráció szimmetrikus szuperpozícióját vesszük föl. A fázisátalakulás itt a vizsgált tartományon eltűnik

mutatta be Kondákor Márk, amely alapjául szolgált egy publikációnak is [5].

A kagome-rács jégmodelljének vizsgálatával Ajzenberger Lea kezdett el foglalkozni, elsősorban numerikus eszközökkel. Ennek érdekessége, hogy kétféle (három- és hatszög) cellát tartalmaz, továbbá nem bipartit, így kevés analitikus eredmény alkalmazható rá. A rácsot egy véges méretű klaszterrel modelleztük, periodikus határfeltételek mellett. Az első feladat a rendszeren található jégkonfigurációk megtalálása volt, mivel erre hatékony algoritmus nem ismert. A könnyen vizsgálható klaszterek 12–27 rácspontot tartalmaztak – ezt korlátozta, hogy a jégkonfigurációk száma a rendszermérettel exponenciálisan nő. Továbbá meghatároztuk, melyik állapotok vihetők egymásba flippelhető cellák egymást követő megfordításával. A konfigurációk osztályozásához bevezettünk két topologikus invariánst a klaszter oldalain áthaladó fluxussal összefüggésben. Számítógéppel igazoltuk, hogy az azonos invariánsokkal bíró konfigurációk egy-egy ergodikus sokaságokat alkotnak.

A második lépés a kvantumos probléma megoldása volt egzakt diagonalizáció és energiaszint-spektroszkópia segítségével. A kagome-rácson különböző paramétereket kell bevezetni a háromszögek (t_3 , V_3) és a hatszögek (t_6 , V_6) megfordíthatóságára. Egy átlagtér-elmélettel azonosítottunk négy fázist a $V_3 = V_6 = 0$ határértékben: kettőben a háromszögek, kettőben a hatszögek flippel-

hetősége játszik fontos szerepet. Ezt összevetettük az egzakt diagonalizációval kapott energiaspektrumokkal, melyekre példát a 2. ábra mutat. Továbbá, Lánczos-módszerrel beazonosíthatók a különböző szimmetriákkal bíró energiasávok is, ha alkalmas bemeneti vektorokat választunk. Az alapállapot és az alacsony energiás gerjesztések követésével és szimmetriáival megtaláltuk a négy megjósolt fázist, és meghatároztuk a fázisátalakulások helyét és rendjét.

Végül a klasszikus jellegű V paraméterek segítségével Rokhsar–Kivelson-modelleket vizsgáltunk. Ekkor egy adott típusú cellára $V = t$. Megállapítottuk, hogy ebben az esetben a fázisátalakulások szerkezete jelentősen módosul. Ennek magyarázata, illetve a két vizsgált határérték összekötése jelenlegi kutatásunk tárgya.

A kagome-rács vizsgálatáról készült munkát a III. EELISA nemzetközi TDK-konferencián Ajzenberger Lea mutatta be 2025. júniusában (*témavezetők*: Kondákor Márk, Penc Karlo). Dolgozatát 2. díjjal jutalmazták.

Irodalom

1. Bernal J. D., Fowler R. H. (1933): *J. Chem. Phys.*, 1, 515.
2. Pauling L. (1935): *J. Am. Chem. Soc.*, 57, 2680.
3. Baxter R. J. (1982): *Exactly Solved Models in Statistical Mechanics*, Academic Press, New York.
4. King A. D., Nisoli C., Dahl E. D., Poulin-Lamarre G., Lopez-Bezanilla A. (2021): *Science*, 373, 576.
5. Kondákor M., Penc K. (2023): *Phys. Rev. Research*, 5, 043172.

A VÍZ SZERKEZETÉNEK VIZSGÁLATA MOLEKULADINAMIKAI SZIMULÁCIÓKKAL

Soczó Bálint

E-mail: balint.soczo@gmail.com

Az anyagi tulajdonságok mögött valójában a részecskék hatalmas számú kölcsönhatása rejlik. Egy mol anyagban nagyságrendileg 10^{23} részecske mozog, amelyek pontos leírása kizárólag mechanikával lehetetlen. Mivel az egyes részecskék mozgása nem fontos számunkra, csak a statisztikus viselkedésük, a statisztikus fizika eszközeihez nyúlunk. Ám a legtöbb esetben már néhány molekulánál is kezelhetetlenül bonyolulttá válik a feladat. Ezért alkalmazunk molekuláris dinamikai szimulációkat, amelyek a rendszer lehetséges mikroállapotait mintavételezik. Kel-



Soczó Bálint elsőéves fizikus MSc-hallgató a müncheni Lajos–Miksa Egyetemen (Ludwig-Maximilians-Universität, LMU). 2025-ben szerezte fizika BSc-diplomáját a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen. Érdeklődése a molekuláris dinamika, a sokrészecske-rendszerek és a szerkezetvizsgálat. Jelenleg a diffúzió jelenségével és a hidrogénkötések hőmérséklet-függésével foglalkozik.

lően hosszú futtatás után egyre pontosabb eredményeket szolgáltatnak. E számítógépes módszerrel foglalkozik a kutatásom [1].

A kísérletek során mért anyagi jellemzők indirekten írják le a szerkezetet, és nem adnak arról számot, hogy hogyan is álltak elő. A molekuláris dinamikai szimulációk ezzel szemben atomi szintű képet adnak, és a kísérleti adatokkal összevetve mélyebb megértést nyújtanak a vizsgált rendszer működéséről és a részecskék mozgásának szerepéről a szerkezet kialakulásában.

A víz az egyik legegyszerűbb, ugyanakkor legizgalmasabb rendszer, amelyet a molekuláris dinamika módszerével vizsgálhatunk. Oldószerként nélkülözhetetlen a kémiában, biológiában és az orvostudományban, de fizikai szempontból is számos különleges tulajdonsága van [2]. Bár évtizedek óta intenzíven kutatják, mégsem beszélhetünk egységes „vízelméletről”. A víz fázisdiagramja is rendkívül összetett: ma már több mint 15 jégfázis ismert, de a pontos viselkedésük és egymáshoz viszonyított stabilitásuk még mindig kutatás tárgya [3].

A szimulációkkal jelenleg nem vagyunk képesek minden tulajdonságot egyszerre pontosan visszaadni; ezért mindig az adott jelenség szempontjából legalkalmasabb modellt választjuk, és azzal valósítjuk meg a szimulációt.

De hogyan is kell elképzelni egy vízmodellt? A víz – és általában a folyadékok – annyiban különbözik az ideális gáztól, hogy a molekulák kölcsönhatnak egymással. Ezeket a kölcsönhatásokat egyszerű kölcsönhatási potenciálokkal írjuk le, így a rendszer energiája két részből áll: mozgási és kölcsönhatási energiából. A szimulációban a vízmolekulát néhány ponttal ábrázoljuk: két hidrogénatomból és egy oxigénatomból áll, meghatározott kötéstávolsággal és kötésszöggel. Az atomokhoz elektromos töltést és általában Lennard–Jones-féle empirikus potenciálpármetereket rendelünk, így jelenik meg a kölcsönhatás. Ha pontosabb képet akarunk, további, tömeg nélküli „virtuális pontokat” is bevezethetünk a töltéseloszlás finomítására. Bár az egyszerűbb modellekhez csak néhány paraméter szükséges, mégis rendkívül nehéz olyan beállítást találni, amely minden tulajdonságot helyesen ír le.

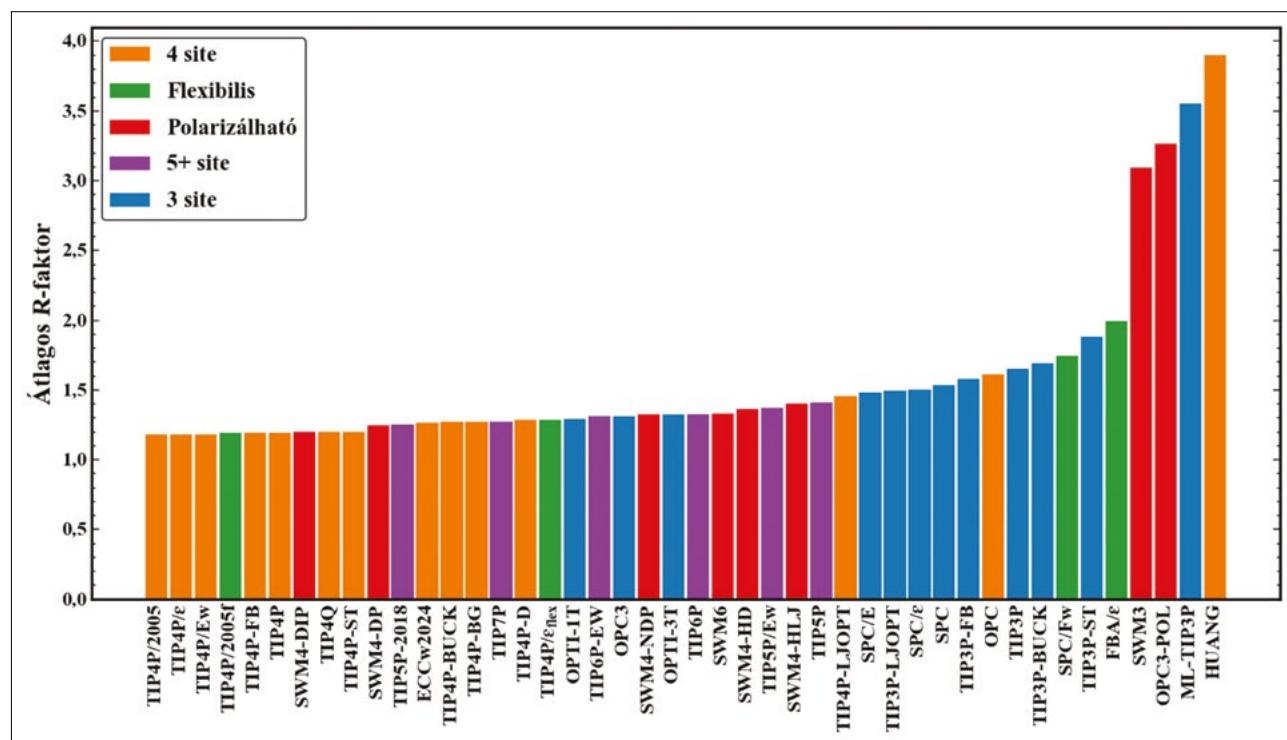
Az optimális paraméterek (pl. töltéseloszlás a molekulán belül) keresésekor célszerű először az alapvető tulajdonságokra összpontosítani. Például, ha a szimuláció szerint a víz sűrűsége 500 kg/m^3 , akkor a bonyolultabb rendszerek – mint például egy vízben oldott fehérje szimulációja – sem lesz megbízható. Itt válik különösen fontosá a szerkezet vizsgálata, mert az viszonylag egyszerűen szimulálható, egyértelműen számolható a szimulációs adatokból, továbbá kísérleti adatok is rendelkezésre állnak az eredmények közvetlen ellenőrzésére. Több modell összevetése ráadásul lehetőséget ad arra,

hogy a paraméterek és a szerkezeti illeszkedés kapcsolatát feltárjuk, és így korlátokat állapítsunk meg arra, milyen modellek lehetnek érdemesek további vizsgálatra. Ez adja kutatásom központi célját.

A szimuláció során egy zárt dobozban több ezer részecskét indítunk el véletlenszerű sebességgel és irányban. Sűrű időközönként (1–2 femtoszekundum) rögzítjük a részecskék helyzetét, sebességét, és a newtoni egyenletekkel kiszámoljuk ezeket a következő pillanatra. Sok milliószor megismételve ezt, a szimulált mennyiségek konvergálnak egyensúlyi értékeikhez, amelyeket kísérletileg – szerencsés esetben – mérni is lehet.

A folyadék vizet hét különböző hőmérsékleten szimuláltam, amelyekhez kísérleti adatok is rendelkezésre álltak. A cél a kísérletek során mért adatokkal való közvetlen összevetés volt. Ha a koordinátákat mérni tudnánk, akkor nem lenne szükség szimulációra. A neutron- vagy röntgendiffrakciós mérések azonban nem atomi koordinátákat, hanem ún. szerkezeti függvényeket szolgáltatnak. A szimuláció kimenetéből kiindulva kiszámítjuk a különböző atompárokhoz (O–O, O–H, H–H) tartozó radiális eloszlásfüggvényeket, majd azokból a szerkezeti függvényeket. A radiális eloszlásfüggvény egy központi atom körüli relatív sűrűséget ad meg, minden atomra átlagolva. Ezek a függvények közvetlenül kiszámíthatók a koordináták ismeretében.

A számolt és mért szerkezeti függvények közötti különbséget az *R*-faktor jellemzi. A röntgen- és neutron-diffrakciós mérésekhez tartozó *R*-faktorokat először egységesíteni kellett, hogy az összehasonlításban azonos súllyal szerepeljenek. Így minden modellhez egyetlen, átlagos *R*-faktor értéket kaptam, amely jellemzi az illesz-



1. ábra. A vizsgált modellek átlagos *R*-faktorértékei. A kisebb a pontosabb

kedés minőségét. Minél kisebb az R -faktor, annál jobb az egyezés.

Az 1. ábra az egyes vízmodellek illeszkedését mutatja az átlagos R -faktor alapján, a neutron- és röntgendiffrakciós adatok együttes figyelembevételével. Ha csak a röntgendiffrakciós eredményeket használnánk, egészen más sorrend adódna: az együttes összevetésben átlagon aluli OPC-modell egyértelműen a legjobbnak mutatkozna. Ez jól szemlélteti, hogy a kétféle mérés kombinálása elengedhetetlen a szerkezet teljes megértéséhez, így a modellek megbízhatóságának megállapításához is.

Az általam vizsgált flexibilis modellek, amelyek a vízmolekulát rugalmasan deformálhatónak tekintik, nem teljesítettek jobban a merev geometriájúaknál. Ez arra utal, hogy vagy még nem sikerült megfelelő flexibilis modellt kidolgozni, vagy – valószínűbb módon – a vízmolekula kötőhossza és kötőszöge folyadékfázisban valóban csak kis mértékben változik, így a rugalmasság szerkezetszimulációs szempontból nem jelent előnyt. A vizsgált öt vagy több ponttal rendelkező modellek (pl. TIP5P, TIP7P) sem mutattak jobb illeszkedést, miközben a négy pontból álló modellek átlagosan a legkisebb R -faktorokat adták. Összességében a négy pontból álló, merev geometriájú modellek tűnnek a legmegbízhatóbbnak. Ezek a modellek a 3 alkotó atomból és egy virtuális pontból állnak, amihez az oxigén töltését rendeljük. A tiszta víz szerkezetének leírásához tehát nem feltétlenül indokolt a legbonyolultabb modellek alkalmazása.

Egy pontosabb, széles körben elfogadott vízmodell számos területen érdemi előrelépést hozhatna. Például a gyógyszerfejlesztés ma azért is költséges, mert a jeleket vizes közegben kísérletileg kell vizsgálni. Ha a szimulációk megbízhatóbban jeleznék előre az oldhatóságot és a kötődést (fehérje-ligandum), a laborvizsgálatokat a legígéretesebb vegyületekre lehetne szűkíteni – így csökkenne a fejlesztési idő és költség. A modellek a kísérleteket nem váltják ki, de hatékonyabban irányítják. Hasonló előrelépés várható a zöldtechnológiákban is,

például az akkumulátorok elektrolitjainak szimulációs vizsgálatánál.

A fizikában pedig mélyebb megértést nyerhetnénk a folyadékok viselkedéséről, és tisztábban kirajzolódna a klasszikus és kvantummechanikai leírások határa: ahol a klasszikus módszerek pontosak, ott a kvantumhatások kevésbé dominálnak. A fejlődést jól példázza, hogy a DeepMind által fejlesztett DM21 DFT-funkcionál [4] mesterséges intelligencia segítségével képes több száz vízmolekulából álló rendszerek energiájának előrejelzésére, és ígéretes eredményeket mutat a folyékony fázis szimulációjában is – ugyanakkor jelenlegi korlátai még számottevőek.

A víz szerkezetének kutatása tehát még messze nem lezárt téma. A radiális eloszlásfüggvény önmagában nem nyújt teljes képet a hidrogénkötésről, pedig ez számos különleges tulajdonság forrása, mint például azé, hogy a víz sűrűsége 4 Celsius-fokon a legnagyobb. Ráadásul a víz nem statikus rendszer, hanem folyamatos mozgásban van, ezért dinamikájának leírása elengedhetetlen a szerkezet teljes megértéséhez, különösen a hőmérséklet változásával összefüggésben. A jövőbeli kutatások így nemcsak a szerkezet pontosítására, hanem a víz komplex viselkedésének mélyebb feltárására is irányulnak, valamint a víz továbbra is modellrendszerként szolgálhat más folyadékok vizsgálatához.

Irodalom

1. Soczó B., Pethes I. (2025): Comparison of water models for structure prediction. *Journal of Molecular Liquids*, 433, 127975. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2025.127975>
2. Rescigno M., Toffano A., Ranieri U., et al. (2025): Observation of plastic ice VII by quasi-elastic neutron scattering. *Nature*, 640, 662–667. <https://doi.org/10.1038/s41586-025-08750-4>
3. Water Structure and Science – Water Anomalies. elérhető: https://water.lsbu.ac.uk/water/water_anomalies.html
4. DeepMind: Simulating matter on the quantum scale with AI. elérhető: <https://deepmind.google/discover/blog/simulating-matter-on-the-quantum-scale-with-ai/>

FRAGMENTÁCIÓS FOLYAMATOK VIZSGÁLATA SZÁMÍTÓGÉPES SZIMULÁCIÓVAL

Huszték Anna

Debreceni Egyetem, Fizikus MSc
E-mail: husztékanna@gmail.com

Általános tapasztalat, hogy a szilárd testek nagymértékű, rövid idő alatti energiaközlés hatására egy gyors folyamatban jellemzően sok darabra törnek (ha például elejtünk egy porcelántányért, az a padlónak csapódva sok darabra törik szét). A keletkező darabok legtöbbször mérete a test eredeti méreténél jelentősen kisebb. Ilyen fragmentációs folyamatokkal a természetben is gyakran találkozhatunk, például sziklaomlásoknál, valamint az

iparban is nagy jelentőséggel bírnak többek között a bányászatban.

Már a hétköznapi tapasztalatainkból is megállapítható, hogy a legtöbb fragmens kis méretű, és minél nagyobb méretről van szó, a keletkező darabok gyakorisága annál kisebb. Az elmúlt évtizedek kísérletei arra a következtetésre mutatnak, hogy kellően rendezetlen mikroszkopikus tulajdonságú test rideg törése esetén

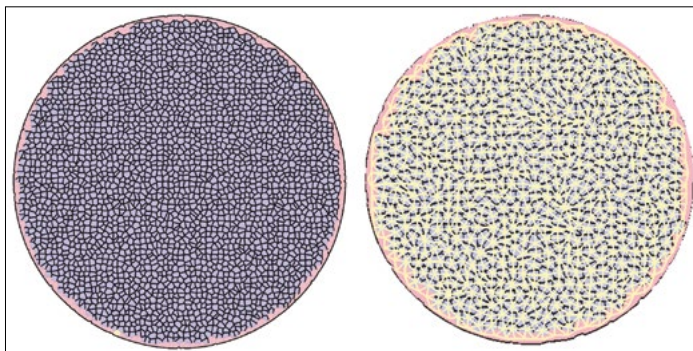
keletkező fragmensek méretének és tömegének gyakorisági eloszlása hatványfüggvény szerint csökken, függetlenül az anyagi minőségtől és az energia betáplálásának módjától [1]. A gyakoriság csökkenésének gyorsaságát jellemző kitevő értékét elsősorban a beágyazó tér dimenziója határozza meg. Ez alapján három univerzalitási osztály létezik: egydimenziós (például egy vékony üvegrúd), kétdimenziós (például vékony üveglapok), illetve háromdimenziós tömbi anyagok töréséről lehet szó.

A fragmentációs folyamatok egyik nagyon fontos gyakorlati alkalmazása a vesekő és epekő emberi testen belül történő összezúzása. A módszer neve lökeshullám-litotripszia (ESWL), amelyet a [2] tanulmány mutat be a vesekő nem invazív zúzása révén. Az ESWL célja olyan fókuszált lökeshullámot létrehozni az emberi testben, amelynek ismételt alkalmazásával a kövek kisebb darabokra törhetnek. A kő törésében az egyik legmeghatározóbb szerepe egy ún. „facsaró mechanizmusnak” van, amely a kő nagy felületen történő radiális irányú összenyomását jelenti. Ez a mechanizmus mikrorepedéseket okoz a kőben, melyek egyesülése a kő hasadását okozza.

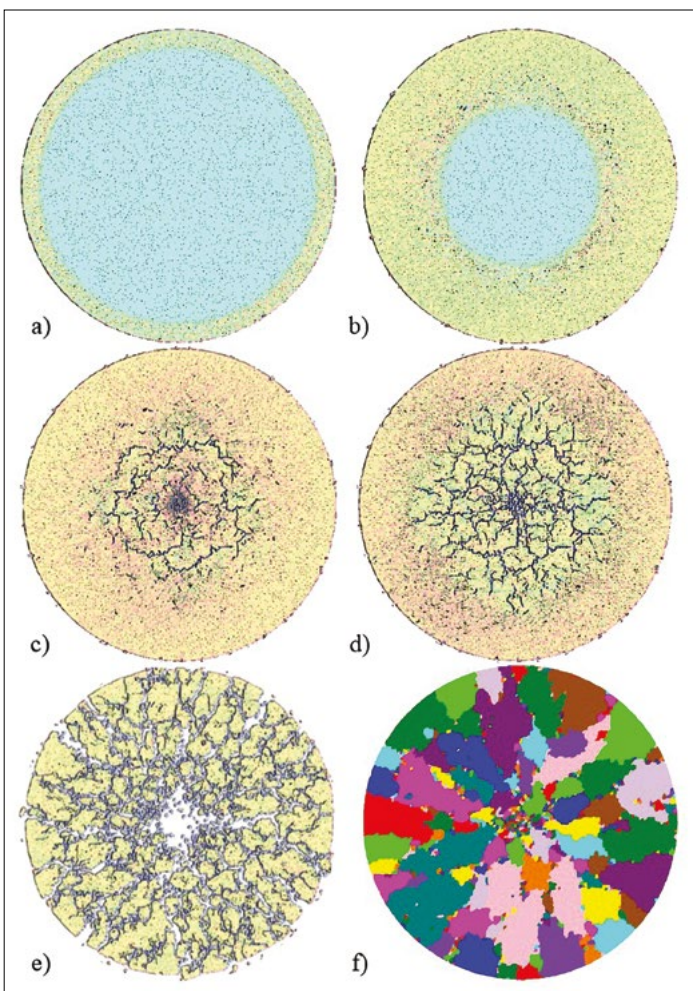
A folyamat komplexitása miatt a számítógépes szimulációkkal történő vizsgálat kiemelten fontos. A szimulációk alapvető fontosságú információval szolgálhatnak a különböző paraméterekkel rendelkező lökeshullámok által kiváltott széttörés pontos megértéséhez.

Kutatómunkám során számítógépes szimuláció segítségével vizsgáltam olyan fragmentációs folyamatokat, amelyeknél az energia betáplálása a test izotrop (minden irányban egyforma) összenyomásával történik, hasonlóan a vesekő zúzására kidolgozott eljáráshoz. Az egyszerűség kedvéért a folyamatot két dimenzióban vizsgáltam úgy, hogy egy korong alakú szilárd testben összenyomással homogén kezdeti energiaeloszlást hozunk létre. Részletesen megvizsgáltam a széttörési folyamat időfejlődését, dinamikai és statisztikus jellemzőit.

Vizsgálataim elsődleges célja annak feltárása volt, hogy az általam alkalmazott speciális terhelési mód – amely jó közelítést adja az ESWL módszerrel megvalósított terhelésnek, valamint különbözik az korábban kísérletesen vizsgált ener-



1. ábra. Szemcsék alkotta korong alakú próbatest. A bal oldalon rudak nélkül, a jobb oldalon pedig a szomszédos szemcsék tömegközéppontjait összekötő rugalmas rudak megjelenítésével



2. ábra. A korong alakú próbatest széttörésének időfejlődése



Husztek Anna a Debreceni Egyetem elsőéves fizikus MSc-hallgatója, BSc-diplomáját szintén itt szerezte. Szakdolgozatát Kun Ferenc professzor témavezetésével írta, melynek keretében számítógépes szimulációval vizsgálta szilárd testek fragmentációját. A kutatás eredményeit a 2025 tavaszán megrendezett 37. OTDK-n is bemutatta, ahol a „Klasszikus fizikai rendszerek” alszekcióban 1. helyezést ért el vele.

giabetáplálási módszerektől – hogyan befolyásolja a széttörés folyamatát és a végállapotban előálló darabok statisztikus jellemzőit.

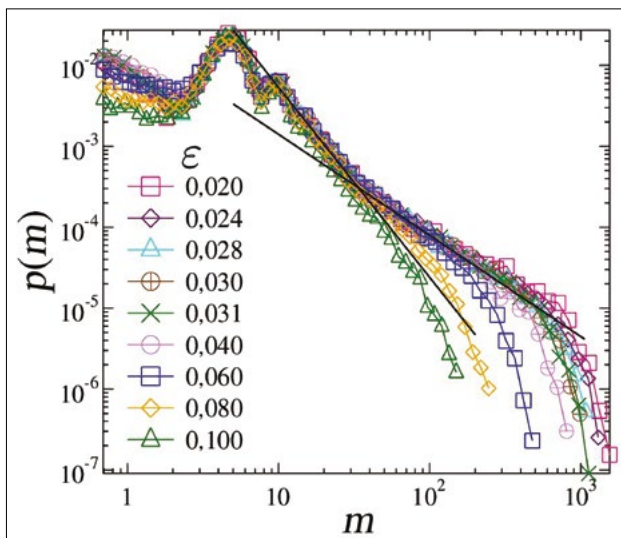
A munkámban olyan kétdimenziós rúd-részecske modellt használtam, amelyben az anyagot egy összefüggő szemcsés test reprezentálja (1. ábra, bal oldal). A szemcsék tömegközéppontjai rugalmas rudak segítségével vannak összekötve, melyek terhelés alatt rideg módon törhetnek (1. ábra, jobb oldal). A szemcséket törhetetlen

poligonok modellezik, amelyek rugalmas taszítóerőt fejtenek ki, ha egymásnak vannak nyomva. Az ilyen rúd-részecske modellek legfőbb előnye, hogy a terhelési folyamat alatt a repedési felületek egymásra kifejtett taszítóerejét is figyelembe veszi. A korong összenyomását a szimulációban úgy értem el, hogy a poligonokat összekötő rudak nyugalmi hosszát rögzített perem mellett növeltem. Szimulációink megmutatták, hogy a deformációban tárolt energia a kényszerek megszüntetése után egyrészt repedések keltésére fordítódik, másrészt a keletkező fragmensek mozgási energiájává alakul.

A korong törésének időfejlődését a 2a.–2e. ábra képei mutatják (erről animáció a következő linken megtekinthető: <https://youtu.be/IR0UmCfnipA>). A 2a., b. ábrákon látható, ahogy egy tágulási hullám indul el a korong széléről annak közepe felé. Ekkor a legtöbb rúd még nem törik el, csak amikor a lökéshullám a korong közepéhez ér (2c. ábra). A hullám a korong közepének elérése után kifelé halad, a korong egésze tágulni kezd, ami radiális repedések keletkezését eredményezi (2d. ábra), majd ettől az egész korong széttörik (2e. ábra). A 2f. ábrán már a korong végállapota látható a törési folyamat lezajlása után. A poligonok itt az eredeti helyükön vannak ábrázolva, és az egy fragmenshez tartozó poligonok azonos színűek.

A törési folyamat részletes megértésére szimulációkat végeztem, amelyekben széles tartományban változtattam a betáplált energiát. Alacsony energiákon a korong sugárirányú repedések mentén néhány nagy darabra esik szét (szegmentálódik), csak a korong közepének közelében keletkezik kisebb mennyiségű törmelék. Növelve a betáplált energiát a korong egésze széttörik, azaz *fragmentálódik*, de a nagy fragmenseket határoló repedések radiális irányítása még itt is megmarad. Az energia további növelésével a repedési mintázat rendezetlen lesz, és a fragmensek mérete nagyon kicsi, a korong *összezúzódik*.

A széttörési folyamat mélyebb megértése érdekében a keletkezett fragmensek tömegeloszlását is meghatároztam, ez a 3. ábrán látható. A kapott tömegeloszlásnak legfontosabb jellemzője, hogy nem egy, hanem két hatványfüggvényszakaszból áll: a kis fragmensek statisztikáját leíró hatványfüggvény kitevője nagyobb ($\tau_s = 2,3$), mint a nagy fragmensek hatványfüggvényének kitevője ($\tau_l = 1,2$). Ez eltér a korábban kísérletileg vizsgált fragmentációs folyamatokban tapasztaltaktól, ahol nagy mennyiségű energiát rövid idő alatt tápláltak be, ezeknél ugyanis csak egy jellemző kitevőt lehetett meghatározni.

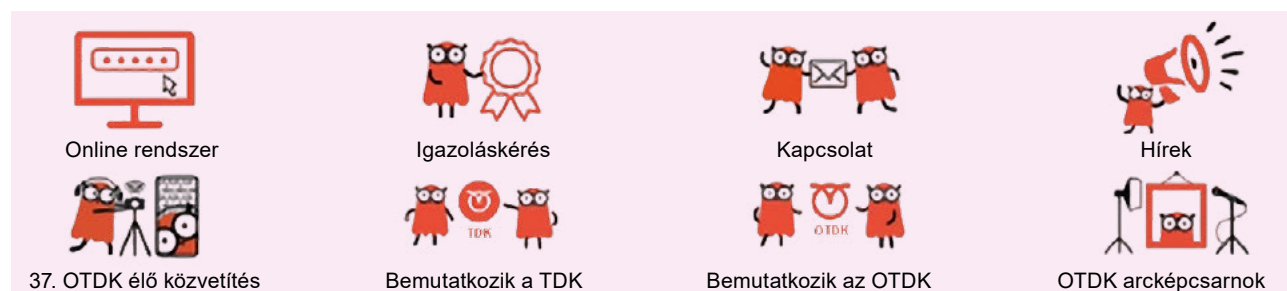


3. ábra. A fragmensek $p(m)$ tömegeloszlása a széttörési folyamat végállapotában különböző nagyságú betáplált energiaértékeknél (ami a poligonokat összekötő rudak kezdeti ϵ megnyúlásával arányos). Az egyenesek illesztett hatványfüggvényeket reprezentálnak

Kutatómunkám fontos eredményeként sikerült feltárni, hogy az izotrop nyomással kiváltott széttörési folyamatnak három fázisa van. Ez szintén más jellegű, mint a nagy mennyiségű és rövid idejű energiabetáplálás következtében létrejövő fragmentációknál megfigyelték. Alacsony energián szegmentáció jön létre, vagyis a korong néhány nagyobb darabra esik szét. Egy kritikus energia fölött már fragmentációról beszélhetünk, ekkor a korong egésze széttörik. A fragmentációs fázisban a keletkezett fragmensek tömegeloszlását hatványfüggvény jellemzi. Mivel azonban a felszíni és a belső fragmensek más lokális repedési mechanizmussal keletkeznek, két eltérő exponensű hatványfüggvényt kapunk. Tovább növelve a betáplált energiát egy második kritikus energia fölött felgyorsul a nagy fragmensek tömegcsökkenése. Ez az energiaérték az összezúzási átmenet kritikus pontját definiálja. Megállapítottam, hogy ebben a fázisban a nagy fragmensek tömegvesztését egy exponenciális függvény írja le.

Irodalom

1. Astrom J. A., Ouchterlony F., Linna R. P., Timonen J. (2004): Universal dynamic fragmentation in D dimensions. *Phys. Rev. Lett.*, 92, 245506.
2. Eisenmenger W. (2001): The mechanisms of stone fragmentation in ESWL. *Ultrasound Med. Biol.*, 27, 683-693.



AZ ECETMUSLICA KONNEKTOMJÁNAK MODELLEZÉSE AZ EXPONENCIÁLIS TÁVOLSÁGSZABÁLY ALAPJÁN

Péntek Balázs, Ercsey-Ravasz Mária

Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Fizika Kar, Kolozsvár, Románia

Transylvanian Institute of Neuroscience, Kolozsvár, Románia

E-mail: balazs.pentek@ubbcluj.ro

Bevezetés

A komplex rendszerek egyik legcsodálatosabb példája az agy, amely számos alkotóelem, például az idegsejtek (neuronok) közötti szinapszisok kölcsönhatásával képes vezérelni az élő szervezeteket. Az idegtudományokban a hálózatalmélet elsősorban az agy felépítésének tanulmányozására, valamint a működésének megértésére szolgálhat. A strukturális agyi hálózatokban a neuronok vagy egy jóval nagyobb skálán az agyterületek tekinthetőek csomópontként, a köztük levő (irányított és súlyozott) kötések pedig a neuronok közti szinapszisokat vagy az agyterületek közti axonkötegeket jelenthetik. Ezek segítségével modellezhető az agy „kapcsolási rajza” (más néven *konnektom*). A rá vonatkozó különböző hálózati mennyiségek kiszámítása érdekes új ismereteket tárhat fel az agyról.

Az agy feltérképezéséért, valamint annak tanulmányozásáért az idegtudományok konnektomika nevű alágazata felel, melynek végső célja az emberi konnektom teljes feltárása lenne, bár ez nagyon messzi célnak tűnik. Emlősök esetében eddig főleg makroskálán, az agyterületek között tanulmányozták a hálózatokat majomban, egérben stb. A 21. század gyors technológiai fejlődése azonban az ecetmuslica konnektomjának teljes neuronszintű feltérképezéséhez vezetett: a 2020-as évekre sikerült beazonosítani 140 ezer neuronját és több mint 150 millió szinapszisát is [1]. A Princetoni Egyetem egyik kutatócsoportjának sikerült a *FlyWire* nevezetű projekt keretén belül felállítani egy általános munkafolyamatot, amely jelentősen felgyorsítja a neuronok digitális rekonstrukcióját, valamint a köztük levő szinapszisok beazonosítását. A feladatot egy mesterséges intelligencia (konvolúciós neurális háló) végzi, amely az agyszeletekről készült nanométeres felbontású elektronmikroszkóp-felvételeket böngészi. Az ember szerepe csupán a

gép tévedéseinek kijavítása, amelyhez a nyílt platformunknak köszönhetően több mint 300 tudós járulhatott hozzá mintegy ötven különböző kutatóintézetből. Eközben a projekt weboldalán a teljes ecetmuslica-konnektomot leíró adatállomány ingyenesen elérhetővé vált a tudományos közösség számára (*flywire.ai*).

Elméleti háttér

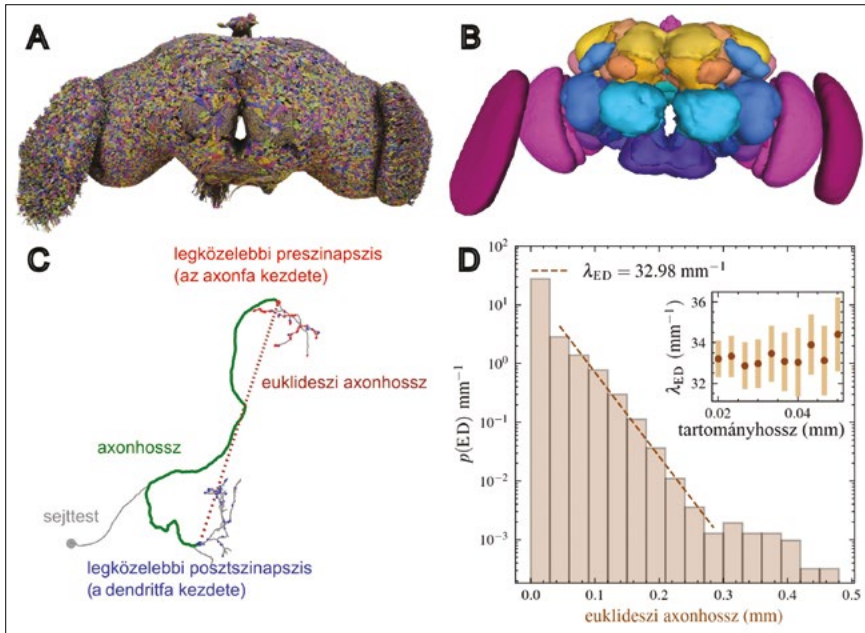
Az agy a rá vonatkozó komoly fizikai és geometriai megszorítások ellenére is képes komplex funkciókat és viselkedéseket hatékonyan kivitelezni. Figyelembe véve, hogy az idegsejtben az információ a dendritfa irányából az axonon keresztül terjed végig az axonfáig, ennek a hosszát a kettőt összekötő nyúlvány hosszaként lehet definiálni. Az agy optimális drótozási elvét fejezi ki az exponenciális távolságszabály (exponential distance rule, EDR), amely szerint az axonhosszak (d) eloszlásának sűrűségfüggvénye exponenciális csökkenést követ: $p(d) \sim \exp(-\lambda_d \cdot d)$ [2]. Legelőször a makákómajom makroszkopikus konnektomjának adataira mutatták ezt ki, majd a későbbiekben egérre és patkányra is – mindegyikre külön λ_d értékkel. A sok rövid és a kevés hosszú axon jelenléte azt eredményezi, hogy az agyterületek hálózatában az egymáshoz fizikailag közelebb elhelyezkedő területek között erősebb kötések találhatók. Ez nyilvánvalóan hatással van a strukturális agyi hálózat topológiájára is. Ennek konkrét felmérésére vezették be az *EDR-véletlen-hálómodellt*. A modell generálási algoritmusában lényegében a térben rögzített csomók (agyterületek) közé véletlen hosszúságú axonkötegeket dob, miközben betartja a megválasztott λ paraméterű exponenciális távolságszabályt. Eredményként az eredeti agyi hálózathoz hasonló, súlyozott és irányított véletlen hálót kapunk, azzal azonos kapcsolatsűrűséggel [2]. A generált hálók tulajdonságait vizsgálva megnézhetjük, hogy mely λ paraméterre



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



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

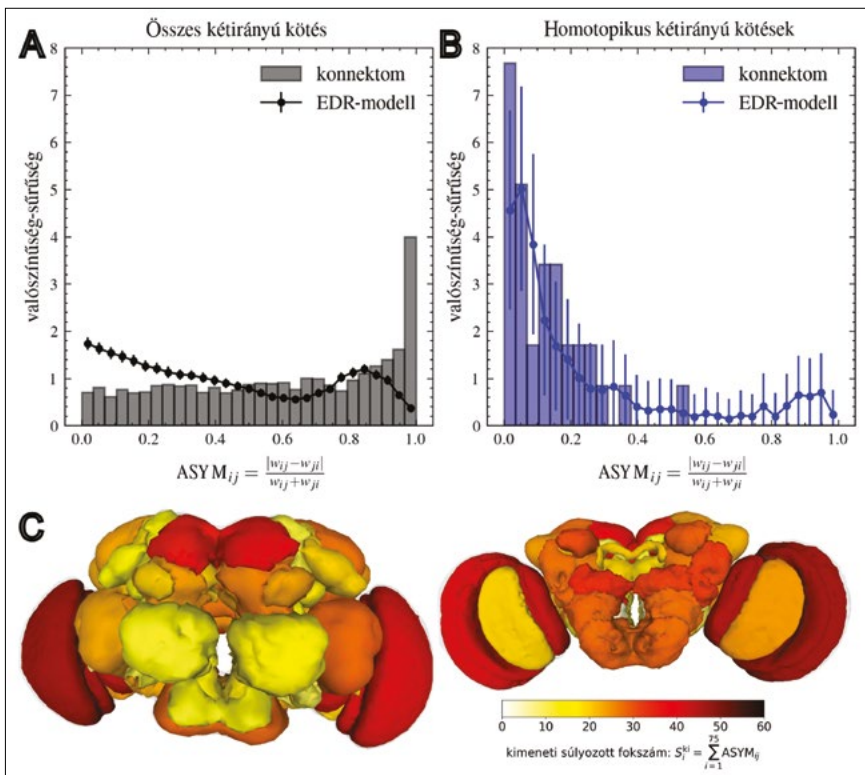


1. ábra. Az ecetmuslica agya és az exponenciális távolságszabály. (A) Az ecetmuslica összes neuronja [1]. (B) Az ecetmuslica agyterületei [1]. (C) Az euclidieszi axonhossz (ED) definíciója a neuronfán mint a sejttesthez legközelebbi pre- és posztzinaptikus pontokat (a dendrit- és axonfa kezdetét) összekötő egyenes hossza. (D) Az exponenciális távolságszabály az euclidieszi axonhosszakra számolva. Ha több tartományhosszra elvégezzük az illesztést, meghatározható a lecsengési ráta valószínű értéke: $\lambda_{ED} \in [31,4; 36,2] \text{ mm}^{-1}$

adja vissza legjobban az EDR-mo-
dell az adott konnektom hálózati
tulajdonságait. Látni fogjuk, hogy
a legtöbb tulajdonság esetében ez
a modellezésből kapott optimális
érték közel van az állatfajra jel-
lemző kísérletileg mért λ_d -hez.
Ez arra utal, hogy a vizsgált tulaj-
donságok kialakulása mögött az
exponenciális távolságszabályhoz
köthető fizikai és geometriai meg-
kötések állnak.

Eredmények

Az ecetmuslica konnektomjának
EDR-moddal való összehason-
lításához szükségünk van arra,
hogy áttérjünk a neuronok skála-
járól az agyterületekre, mivel
a modell ezen a szinten működik
(1A., 1B. ábra). Kiindulva a szin-
apszisokból, egyetlen neuronra
megadható egy mátrix formájában,
hogy milyen valószínűséggel
fordulnak elő ki- és bemeneti szin-
apsziszai az egyes agyterület-pá-
rosokban. Az összes neuronra
szummázva megkapjuk a 75 agy-
területből álló hálózat 85%-os
sűrűségű súlymátrixát, melyet
normalizálunk az oszlopai szerint
(w_{ij}). Az exponenciális távolság-
szabály ellenőrzésére felhasznál-
hatók az adatbázisban megadott
térbeli neuronfák, ahol az igazi
axonhossz (a zöld vonal az 1C.
ábrán) nagyon szép exponenciá-
lis eloszlást mutat [3]. Figyelem-
be véve, hogy az EDR-moddalhoz
szükséges agyterületek távolságai
a centrumok közötti euclidieszi tá-
volságokként vannak megadva, az
exponenciális távolságszabályt is
ezen a rövidített skálán kell meg-
vizsgálni. Ezért az (euclidieszi)
axonhossz méréséhez egy egye-
nest húzunk a sejttesthez legkö-
zelebbi pre- és posztzinaptikus
pontok között (szaggatott vonal,
1C. ábra). Lemérve az ecetmuslica
összes neuronjára ezt a hosszérté-
ket, a statisztikában exponenciá-
lis lecsengést kapunk, melynek
meredekségét több illesztésből
becsüljük meg: $\lambda_{ED} \in [31,4; 36,2]$
 mm^{-1} (1D. ábra).



2. ábra. Aszimmetrikus kötések az ecetmuslica-konnektomban. (A) Az aszimmetriamértékek eloszlása az összes kétirányú kötésre, a valódi konnektom és a $\lambda = 33 \text{ mm}^{-1}$ paraméterű EDR-moddal esetén. (B) Az aszimmetriamértékek eloszlása csak a homotopikus (a bal és jobb féltékek egymáshoz megfelelő területeit összekötő) kétirányú kötésekre. (C) Az agyterületek színezése (elől- és hátulnézetből) az aszimmetriákból számolt kimeneti súlyozott fokszám szerint. A magas értékkel rendelkező területek várhatóan a funkcionális hierarchia alján helyezkednek el

A $\lambda \in \{0,5, \dots, 60\} \text{ mm}^{-1}$ paraméterekre 1000 db EDR-modellt generálva mérjük le a véletlen hálók tulajdonságait, és ezek közül a $\lambda = 33 \text{ mm}^{-1}$ ($\approx \lambda_{\text{ED}}$) értékű adja vissza legjobban a konnektom számos súlyozatlan hálózati mennyiségét [3]. A legegyszerűbb példák közé tartozik az egy- és kétirányú kötések száma a hálóban, a csomópontok fokszámából (a hozzá tartozó kötések számából) számolt eloszlás alakja, az átlagos úthossz és a klaszterezési együttható (szomszédsági sűrűség) is. Szintén hasonló eredményre vezet a modell a háló építő-elemeinek szempontjából a különböző háromszögmotívumok (3 csomópontból álló algráfok) előfordulásában, valamint a jelenlévő klikkek (teljesen kötött algráfok) méreteinek eloszlásában is. Súlyozott hálózati mennyiségek esetén az EDR-modell már nem teljesít éppen olyan jól, a konnektombeli kötések súlyeloszlásának, valamint a csomók súlyozott fokszámeloszlásának alakját nem képes reprodukálni annyira pontosan egy $\lambda \approx \lambda_{\text{ED}}$ körüli paraméterre [3]. Erre egy lehetséges magyarázat, hogy a kísérletileg mért kötési súlyértékek nem annyira pontosak. Érdekes módon a súlyozott legrövidebb úthosszakra alapuló mennyiségeket (pl. távolságeloszlás, kommunikációs hatékonyságok) jól adja vissza a modell [3] – valószínűleg azért mert ezek inkább az erősebb kötésekben múlnak, amiket kevésbé befolyásolhatnak a mérési hibák.

Kiemelendő az aszimmetrikus kétirányú kötések jelenléte a muslica agyterületi szintű konnektomjában, mely az $\text{ASYM}_{ij} = |w_{ij} - w_{ji}| / (w_{ij} + w_{ji}) \in [0; 1]$ értékek eloszlásaként adható meg, felhasználva a $w_{ij} \in [0; 1]$ kötések normalizált súlyát. Az eloszlások összehasonlításából látható, hogy az erősen aszimmetrikus kötések a csupán geometriai megszorításokra épülő EDR-modellben nem találhatóak meg (2A. ábra). Tehát feltételezhető, hogy ezek az agy egyéb érdekes tulajdonságából fakadnak – például az agyterületek funkcionális hierarchikus kapcsolataiból. Ezt megerősíti, hogy a homotopikus (az agyféltekék ugyanazon területeit összekötő) kötések esetén erős aszimmetriák nincsenek; tehát a bal és jobb agyfélteke egymásnak megfelelő területei ugyanazon a hierarchikus szinten helyezkednek el (2B. ábra).

Felhasználva az aszimmetriamértékeket, megpróbáljuk megadni az agyterületek hierarchiájának alakját – ezt egy új hálózatban értelmezzük. Ebben a hálózatban a csomópontok továbbra is az agyterületek, de a köztük

levő (egyirányú) kötések súlyát az ASYM_{ij} érték, irányát pedig a kétirányú kötés erősebbik fele határozza meg. Ha így számoljuk ki mindegyik csomóra külön a be- vagy a kimeneti súlyozott fokszámot (pl. $S_i^{\text{ki}} = \sum_{j=1}^{75} \text{ASYM}_{ij}$), megadható a hierarchia egyik kezdetleges képe (2C. ábra). Például a szélső, vizuális, illetve a felső, szaglászért felelős agyterületekre kapott S_i^{ki} értékek magasak, míg az S_i^{be} értékek alacsonyok, vagyis e területek kimeneti kötései sokkal erősebbek [3]. Visszavezetve a kötések definícióját, ez azt jelenti, hogy a szenzoriális zónából az információ inkább kifelé áramlik, tehát a „parancsnoki lánc” alján helyezkednek el. Itt jön be a legtöbb információ az agyba, és áramlik tovább, feldolgozásra várva a következő területeken. Az is észrevehető, hogy az agyféltekékre kapott értékek láthatóan szimmetrikusak. Ez a hierarchikus felépítés természetesen további részletes tanulmányozást igényel.

Összefoglalás

A kutatásunk az ecetmuslicán is érvényesíti az emlősök agyának vizsgálatához bevezetett EDR-modellt mint az agyi hálózatok „nullmodelljét” [3]. Fontos megjegyezni, hogy ezt a geometriai modellt használva könnyebben észlelhetővé válnak az agy olyan érdekes tulajdonságai, melyek nem a geometriai megszorítások következtében alakultak ki. Egy ilyen konkrét példa az aszimmetrikus kötések jelenléte a muslica agyában, melyet mi az agyterületek között fennálló funkcionális hierarchikus szerkezettel magyaráztunk. Ennek konkrétabb alakját egy új módszerrel próbáltuk megadni, aminek alkalmazása más állatfajok tanulmányozására, valamint az eredmények összevetése funkcionális adatokkal további érdekes eredményekhez vezethet a jövőben.

Irodalom

1. Dorkenwald S., et al. (2024): Neuronal wiring diagram of an adult brain. *Nature*, 634, 124–138.
2. Ercsey-Ravasz M., et al. (2013): A predictive network model of cerebral cortical connectivity based on a distance rule. *Neuron*, 80(1), 184–197.
3. Péntek B., Ercsey-Ravasz M. (2025): The exponential distance rule-based network model predicts topology and reveals functionally relevant properties of the *Drosophila* projectome. *Network Neuroscience*, 9(3), 869–895.

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat jelen van a **facebook** -on!



<https://www.facebook.com/people/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/100057390380604/>

RECIPROCITÁSI ÉS KÖZÉPÉRTÉKTÉTELEK AZ ELEKTRO- ÉS MAGNETOSZTATIKÁBAN

Szöröcsök Noel
PTE Fizikai Intézet, Pécs
E-mail: szorcsoeknoel@gmail.com

1. A Green-féle reciprocitási tétel

Az elektrosztatika szakirodalmában már a múlt század eleje óta ismert Green-féle reciprocitási tétel pontos megfogalmazása a következő:

Ha a φ potenciált a V térfogatban elosztott ρ térfogati és a határoló A felületen elosztott σ felületi töltéssűrűség hozza létre, és ha φ^* -t ugyanebben a tartományban ρ^* és σ^* hozza létre, akkor az

$$\int_V \rho \varphi^* dV + \int_A \sigma \varphi^* dA = \int_V \rho^* \varphi dV + \int_A \sigma^* \varphi dA. \quad (1)$$

összefüggés teljesül.

Az 1930-as években a tételt rádiótechnikai területen is alkalmazták, nevezetesen földelt elektródákon folyó áramok meghatározásához. Napjainkban többek közt szenzorelektrodák tervezésében játszik szerepet a tétel. Ebben a cikkben rávilágítok többek közt a tétel oktatási vonatkozásaira.

Az (1) tétel bizonyítása számos szakirodalomban feltehető. A bizonyításokban közös, hogy a Poisson-egyenletet és a Green-tételt használják. Közös pont továbbá a bizonyításokban, hogy egy előjelhibát tartalmaznak, amit utána egy kegyes csalással korrigálnak.

A kiszúrt előjelhiba sarkallt arra, hogy eljussak a helyes bizonyításhoz. Két ponton kellett körültekintőbben eljárnom: egyrészt, az (1) tételben szereplő felület tulajdonságának (vezető vagy szigetelő) megfelelően kell azt kezelni, másrészt a Poisson-egyenletben nemcsak a $\rho^{(*)}$ térfogati töltéssűrűséget kell szerepeltetni, hisz a $\varphi^{(*)}$ potenciált a $\rho^{(*)}$ és $\sigma^{(*)}$ együttesen kelti. A részletes bizonyítást itt mellőzöm, a TDK-dolgozatomban kifejtettem azt.

2. A tétel háttere és egy alkalmazása

A Green-féle reciprocitási tétel állítása egy ponttöltés-párból álló rendszer esetén könnyen megragadható. Tekintsünk két, egymástól végtelen távol lévő (q_1, q_2) ponttöltést, melyeket r távolságra közelítünk egymáshoz!



Szöröcsök Noel hatodéves fizika-matematika osztatlan tanárszakos hallgató a Pécsi Tudományegyetemen. Egyik érdeklődési területe a fizikaoktatás terén a tehetséggondozás, emellett klasszikus fizikai problémák is foglalkoztatják. A 2025. évi OTDK-n második helyezést ért el „A fizika és a matematika tanítása” tagozatban.

Evidens, hogy rögzített q_1 esetén a q_2 -n végzett munka, miközben azt a végtelen távoból a q_1 -től r távolságra lassan, egyenletesen hozzuk, ugyanakkora, mint ha fordítva járunk el, azaz q_2 -t rögzítjük, és q_1 -t mozgatjuk.

$$W = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r} = \frac{q_1}{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{\varphi_1(r)}} q_2 = \frac{q_2}{\frac{4\pi\epsilon_0 r}{\varphi_2(r)}} q_1, \quad (2)$$

azaz a munka felfogható úgy is, mint a q_1 ponttöltés által a q_2 helyén keltett $\varphi_1(r)$ potenciál és q_2 szorzata, és úgy is, mint a q_2 ponttöltés által a q_1 helyén keltett $\varphi_2(r)$ potenciál és q_1 szorzata. E tény könnyen kiterjeszthető diszkrét töltésrendszerekre a szuperpozíció elvének figyelembevételével. A folytonos töltéseloszlások esetén a következő összefüggés lesz érvényben:

$$\int \rho(\mathbf{r}) \varphi^*(\mathbf{r}) dV = \int \rho^*(\mathbf{r}) \varphi(\mathbf{r}) dV. \quad (3)$$

Több szakirodalom ezt a felületi tagoktól mentes összefüggést hívja Green-féle reciprocitási tételnek.

A tétel ezen megfogalmazása hallgatólagosan megjelent egy, a *Középiskolai és Fizikai Lapok* (KöMaL) cikkben [1] felvetett probléma kapcsán. A cikk szerzőjét az foglalkoztatta, hogy tetszőleges elektrosztatikus térbe helyezett képzeletbeli gömb felszínére kiértékelve mit ad a potenciál, illetve a térerősség átlaga. Indításként a képzeletbeli gömb és a középpontjától l távolságra elhelyezkedő q ponttöltés esetét vizsgálta. A „nyers erő” módszerrel a potenciál átlagára a

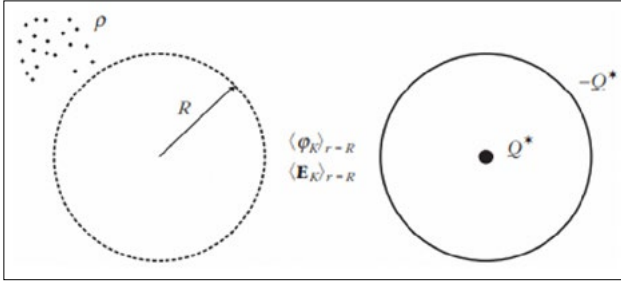
$$\langle \varphi \rangle = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r_s} \quad (4)$$

összefüggés adódik, ahol r_s l és R közül mindig a nagyobbat jelenti. $l > R$ felel meg a *külső*, $R > l$ pedig a *belső* töltésnek.

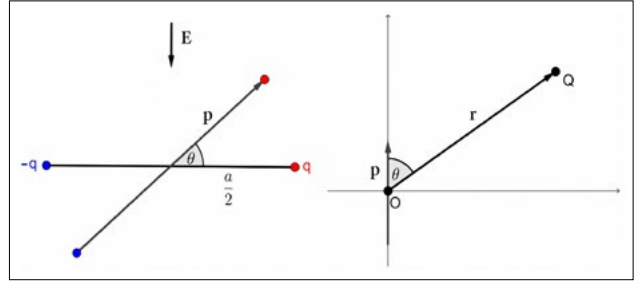
A másik módszer mögött hallgatólagosan a Green-féle reciprocitási tétel húzódik. Ebben a szerző azzal a frapáns ötlettel állt elő, hogy a gömb felszínét egyenletesen egységnyi töltéssűrűséggel látta el. A ponttöltés – töltött gömbhéj rendszer kölcsönhatási energiájának szimmetriájából a (4) eredmény egyszerűen adódik. A szuperpozíció elvének segítségével pedig egyszerűen adódik a kérdésre adott válasz is (lásd *1. táblázat*).

3. Elektrosztatikai középértéktételek

Témavezetőm és egykori tanítványa továbbgondolták a KöMaL-cikkben felvetett problémát [2, 3], és a gömbnek nemcsak a felületére vonatkozóan határozták meg a potenciál- és térerősségátlagokat, hanem annak térfogatára



1. ábra. A külső töltések által keltett φ és \mathbf{E} felületi átlagokhoz tartozó elrendezést szemléltető ábra



2. ábra. A kép bal oldala a homogén elektrosztatikus térbe helyezett dipólust szemlélteti, a jobb oldala a ponttöltés-dipólus rendszert ábrázolja

is mind külső, mind belső töltések esetén, ami nyolc darab középértéktételt jelent. Míg a potenciállal kapcsolatos megállapítások mögött a (3) energetikai összefüggés áll, addig a térerősség esetén a ρ és ρ^* töltésrendszerek közti erőhatást kell vizsgálni. A töltésrendszereket alkotó töltések egymásra erőt gyakorolnak, melynek értékét a megfelelő töltéssűrűségek és térerősségértékek szorzatának teljes térre való integrálja adja. Teljesülnie kell a hatás-ellenhatás törvényének, azaz:

$$\int \mathbf{E}(\mathbf{r})\rho^*(\mathbf{r})dV = -\int \mathbf{E}^*(\mathbf{r})\rho(\mathbf{r})dV. \quad (5)$$

Mind a nyolc esetben a kulcsot egy jól megszerkesztett segéd-töltéssűrűség jelentette. Ez abban a konkrét esetben, ha külső töltések φ potenciáljának és \mathbf{E} térerősségének a gömbfelületre vett átlagát keressük, egy a gömb középpontjába helyezett Q^* ponttöltésből és a felületen egyenletesen eloszlott $-Q^*$ töltésből áll. Ebben az esetben a töltéeloszlás teljes egészében a gömbön kívül helyezkedik el, emiatt a $\rho(\mathbf{r})$ töltéssűrűség a gömb felüle-

tén és a gömbön belül is zérus. A segéd-töltés-eloszláshoz tartozó $\varphi^*(\mathbf{r})$ potenciál értéke a gömbön kívül a konstrikció miatt zérus, így az eredmény könnyen adódik. A további esetekhez tartozó segéd-töltéssűrűségeket az 1. táblázatban gyűjtöttem össze.

4. A pontszerű dipólus potenciálja a Green-féle reciprocitási tétel tükrében

A Green-féle reciprocitási tétel lehetőséget ad a pontszerű dipólus potenciáljának levezetésére. Ehhez először a homogén elektrosztatikus erőterbeli pontszerű elektromos dipólus potenciális energiáját kell értelmezni. Ezt vissza lehet vezetni az m tömegű pontszerű test zérus energiaszinttől mért h magasságbeli $W = mgh$ potenciális energiájára. Tekintsük 2. ábrát! A \mathbf{g} -vel analóg módon az \mathbf{E} térerősség lefelé mutat. A potenciális energia önkényesen megválasztható nullszintje legyen a dipólus közepén \mathbf{E} -re merőleges helyzetében felvett síkban! Ha a dipólust középpontja körül θ szöggel elfor-

1. táblázat. Az első oszlop az elektrosztatikai középértéktételhez tartozó segéd-töltéssűrűségeket tartalmazza, a második oszlop a térerősség/potenciál felületi/térfogati átlagait tartalmazza külső/belső töltések esetén, a harmadik oszlop pedig a mágneses indukció/vektorpotenciál felületi/térfogati átlagait tartalmazza külső/belső áramok esetén

Segéd-töltéssűrűség	Elektrosztatikai középértéktételek	Magnetosztatikai középértéktételek
$\frac{Q^*}{4\pi r^2}\delta(r) - \frac{Q^*}{4\pi R^2}\delta(r-R)$	$\langle \varphi_K \rangle_{r=R} = \varphi(0)$	$\langle \mathbf{A}_K \rangle_{r=R} = \mathbf{A}(0)$
$\frac{Q^*}{4\pi r^2}\delta(r) - \frac{Q^*}{4\pi R^2}\delta(r-R)$	$\langle \mathbf{E}_K \rangle_{r=R} = \mathbf{E}(0)$	$\langle \mathbf{B}_K \rangle_{r=R} = \mathbf{B}(0)$
$\frac{Q^*}{4\pi r^2}\delta(r) - \frac{Q^*}{V_0}[H(r) - H(r-R)]$	$\langle \varphi_K \rangle_{r<R} = \varphi(0)$	$\langle \mathbf{A}_K \rangle_{r<R} = \mathbf{A}(0)$
$\frac{Q^*}{4\pi r^2}\delta(r) - \frac{Q^*}{V_0}[H(r) - H(r-R)]$	$\langle \mathbf{E}_K \rangle_{r<R} = \mathbf{E}(0)$	$\langle \mathbf{B}_K \rangle_{r<R} = \mathbf{B}(0)$
$\frac{Q^*}{4\pi R^2}\delta(r-R)$	$\langle \varphi_B \rangle_{r=R} = \frac{\sum Q}{4\pi\epsilon_0 R}$	$\langle \mathbf{A}_B \rangle_{r=R} = 0$
$\frac{Q^*}{4\pi R^2}\delta(r-R)$	$\langle \mathbf{E}_B \rangle_{r=R} = 0$	$\langle \mathbf{B}_B \rangle_{r=R} = 0$
$\frac{Q^*}{V_0}[H(r) - H(r-R)]$	$\langle \varphi_B \rangle_{r<R} = \frac{1}{6\epsilon_0 V_0} \int \rho(r, \theta, \varphi)(3R^2 - r^2) dV$	$\langle \mathbf{A}_B \rangle_{r<R} = \frac{\mu_0}{6V_0} \int \mathbf{j}(r, \theta, \varphi)(3R^2 - r^2) dV$
$\frac{Q^*}{V_0}[H(r) - H(r-R)]$	$\langle \mathbf{E}_B \rangle_{r<R} = -\frac{1}{3\epsilon_0} \langle \mathbf{P} \rangle$	$\langle \mathbf{B}_B \rangle_{r<R} = -\frac{2}{3} \mu_0 \langle \mathbf{M} \rangle$

gatjuk a 2. ábra szerint, a potenciális energia

$$W = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E} = -pE \cos \theta. \quad (6)$$

Most helyezzünk el egy \mathbf{p} pontszerű dipólust és egy Q ponttöltést a 2. ábra szerint! A reciprocitási törvény elemi értelmezése azt mondja, hogy a dipólus terébe helyezett töltés potenciális energiája megegyezik a Q ponttöltés elektromos terében lévő pontszerű dipólus energiájával. Kihasználva, hogy a pontszerű dipólus környezetében a Q ponttöltés tere *homogénnek* tekinthető, és felhasználva a ponttöltés térerősségképletét, a reciprocitási tételből kifolyólag a pontszerű dipólus potenciáljára a jól ismert

$$\varphi(r, \theta) = \frac{p \cos \theta}{4\pi\epsilon_0 r^2} \quad (7)$$

összefüggés adódik.

5. A magnetosztatikus Green-féle reciprocitási tételek és alkalmazásai

Hasonlóan a ρ töltéseloszlás által keltett φ potenciál és \mathbf{E} térerősség esetéhez, megfogalmazható reciprocitási tétel

az adott \mathbf{j} áramsűrűség által keltett \mathbf{A} vektorpotenciál és \mathbf{B} mágneses indukció értékeire is:

$$\int \mathbf{A} \cdot \mathbf{j}^* dV = \int \mathbf{A}^* \cdot \mathbf{j} dV, \quad (8)$$

$$\int \mathbf{j}^* \times \mathbf{B} dV = -\int \mathbf{j} \times \mathbf{B}^* dV. \quad (9)$$

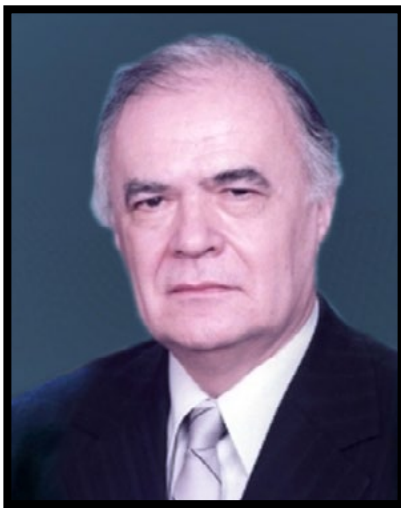
Ezen tételek lehetőséget adnak az elektrosztatikus középérték-tételek analógiák alapján történő magnetosztatikus kiterjesztésre, melyeket az 1. táblázat tartalmaz. Felhívjuk a figyelmet az 5. és 8. sorra, ahol látszik, hogy a mechanikus megfeleltetés helytelen eredményt adott volna. A magnetosztatikai vonatkoztatások további feltárása jövőbeli célunk.

Irodalom

1. Pozsgay Balázs (2001): Az elektrosztatikus mező újabb érdekes tulajdonságai. *Középiskolai Matematikai és Fizikai Lapok*, 51, 555–559.
2. Pálfalvi László, Kovács Vivien (2021): A Green-féle reciprocitási tétel és néhány folyománya – I. rész, *Fizikai Szemle*, 2021(7), 241–244.
3. Pálfalvi László, Kovács Vivien (2021): A Green-féle reciprocitási tétel és néhány folyománya – II. rész, *Fizikai Szemle*, 2021(9), 309–314.

MEGEMLÉKEZÉS

SZÁZ ÉVE SZÜLETETT PÁL LÉNÁRD



Pál Lénárd (1925–2019)

A 20. század második felében a magyar tudományosság, ezen belül pedig különösen a fizika egyik meghatározó szereplője Pál Lénárd volt. Tevékenységének a KFKI-tól

az MTA-n, az OMFB-n és az ELTE-n keresztül az ELFT-ig terjedő helyszínei a mindennapi kutatómunkától a „kutatási eredmények termelőerővé váltásáig” megjelentek, de szerepet vállalt a legmagasabb szinten is a tudománypolitika alakításában. Véleményét még visszavonulása után is a nyilvánosság elé tárta. Az egyik fontos téma, az energetika jelenleg is az egyik központi társadalmi feszültségpont. Erről 2009-ben a következőket írta: „Triviális kijelentés, hogy energiára az élet minden területén szükség van, s talán az is, hogy a távlati hatásokkal számoló piacgazdaságnak sem mindegy, hogyan elégíti ki a növekvő energiaszükségleteket. Nem vitatható, hogy a megújuló energiaforrások hasznosítása, az energiafelhasználás hatékonyságának növelése fontos feladat, de le

kell számolnunk azzal a hamis illúzióval, hogy ezen az úton eljuthatunk a megoldáshoz. Aki azt hiszi, hogy a nap- és szélenergia, a geotermikus energia, valamint a biomassa hasznosításával elérhetjük, hogy hazánkban már nem kell nagy erőművet építeni, az naiv ábrándokat kerget”.

Hasonló határozottsággal fogalmazta meg véleményét az alapkutatások szükségességéről: „Ma sokat beszélnek a »tudásalapú« társadalomról, de a konkrét munkát elképesztően bonyolult és vizszoaélésekre is alkalmas bürokrácia nehezíti. Az ország gazdasági felemelkedése érdekében – éppen most, a recesszió idején – a legkorszerűbb technikák és technológiák elsajátítására és alkalmazására kell az erőforrásokat koncentrálni. Ehhez pedig szükség van profitot

közvetlenül nem termelő alapkutatókat. Nem igaz az a mostanában gyakran hangoztatott állítás, hogy egy kis országnak nem szabad alapkutatókat pénzre költenie. Ha egy országban elsorvad az alapkutató, akkor nem lesznek olyan szakemberek, akik képesek felismerni, hogy mi az, amit át kell venni, mi az, amit alkalmazni kell. Ha nincs olyan szakembergárda, amely rendelkezik megfelelő kutatási tapasztalatokkal, akkor az új módszerek alkalmazása lassan és nagy hibákkal valósul meg”. Ezek a témák ma talán még aktuálisabbak.

A munkatársak kiválasztása úgyszintén olyan fontos eleme vezetői tevékenységének, amire sokan érintettségünk okán emlékezhetünk. Példaként szeretnék ebben a megemlékezésben egy sor személyes dolgot is megemlíteni, mégpedig a KFKI kutatóreaktorának létesítését, valamint tudományos és gyakorlati hasznosításának munkálatait. Azért választottam ezt a témát, – és elnézést kérek az olvasótól a szubjektív megközelítés miatt – mert tudományos karrierem első fázisában munkásságom és a Pál Lénárdhoz kötődő kapcsolatom a neutronfizikához, a kutatóreaktorhoz, de más külföldi neutronforrásoknál végzett kutatómunkámhoz is meghatározó volt. A kutatóreaktor építése 1955-ben kezdődött, és működése 1959-ben indult. Én 1958-ban végeztem az ELTE fizikus szakán, és diplomamunkámat 1957–58-ban a KFKI-ban készítettem. Felépítettem egy spinecho-méréseken alapuló, a magmágneses rezonanciát mérő berendezést, és alkalmazásával a víz diffúziós állandóját mértem. A diplomám megszerzése után szívesen folytattam volna ezt a munkát, de Pál Lénárd nagyon határozott csábítással a csoportjába hívott a kutatóreaktor melletti munkára, amit örömmel elfogadtam.

A csoportban nemcsak kutatómunka folyt, hanem a fegyvelmezt

munkára való nevelés is. Pál Lénárd pontos, előre meghatározott időbeosztást, az elvégzett (kísérleti) munka precíz dokumentálását és a következtetéseken alapuló következő teendőkre vonatkozó javaslatokat várt a csoport tagjaitól. Heti írásos beszámolót várt tőlünk az elvégzett munkáról, amit az ugyancsak rendszeres heti személyes csoportmegbeszéléseken pontosítottunk. A közös szakmai munkánk mellett a későbbi, különböző szintű vezetői munkámban is sokat segítettek azok a tapasztalatok, amelyeket Pál Lénárdtól lestem el a mintegy két évtizedes, különböző szintű együttműködéseink során.

A kutatóreaktornál olyan anyagtudományi vizsgálatokat terveztünk, amilyenek a múlt század hatvanas éveiben az egész világon folytak. A kutatóreaktor nehézbeton védőfalába épített csatornákon lassú neutronokat lehet kivezetni, és ezeknek a vizsgált anyagmintákon való rugalmas és rugalmatlan szórásával szerkezeti és dinamikai információkat kaptunk a vizsgált anyagról. Én a rugalmatlan szórás kísérletek előkészítését és végrehajtását kaptam feladatul.

Pál Lénárd arról is gondoskodott, hogy nemzetközi tapasztalatokat is szerezzek, ami a hatvanas évek elején nem volt egyszerű feladat. Javasolt a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség ösztöndíjára, amit meg is kaptam, és 1963–64-ben Svédországban, egy igen magas színvonalú kutatóreaktor mellett töltöttem el egy évet. Természetesen itt is a rugalmatlan neutronszórás képezte munkám alapját. Néhány évvel később, 1968-ban a dubnai (Szovjetunió) Egyesített Atomkutató Intézet Neutronfizikai Laboratóriuma igazgatóhelyettesi pozíciójának betöltésére kaptam meghívást, amit ugyancsak Pál Lénárd nagyon határozott rábeszélése után fogadtam el.

A Dubnából való hazatértem, 1971 után életem legnagyobb pályamódosítása is Lénárd kérésére következett be. A neutronokat fotonok váltották fel, ugyanis a KFKI-ban folyó optikai kutatások vezetésére kaptam felkérést. Eleinte inkább tehernek éreztem a váltást, de egyre jobban beleszerettem az új területbe, ezen belül pedig én az intenzív lézerefény és a szilárd anyag kölcsönhatásának vizsgálatába kapcsolódtam be, ami a mai napig kutatómunkám fő területe. Ehhez a váltáshoz pedig az akkor a KFKI főigazgatójaként működő Pál Lénárdtól kaptam folytonos segítséget.

Ezen rövid megemlékezés kapcsán elgondolkodtam azon, hogy mit tenne Pál Lénárd, ha beleszólása lenne a mai magyar tudománypolitikába. Véleményem szerint a fenti idézetek szellemében hangsúlyosan képviselné az alapkutatókat fontosságát; és egy régi beszélgetésünkre hivatkozva gondolom, hogy azt is megfogalmazná, hogy milyen jellegű legyen az egyetemeken folyó munka és milyen a hasonlóan fontos kutatóintézetekben. A másik fenti idézet az energetikai alap- és alkalmazott kutatások fontosságára vonatkozik, amelyeknek az elmúlt években szemmel láthatóan rohamosan nőtt a jelentősége.

Pál Lénárd 1990-ben visszavonult a közéletből, de napjait otthonában szakmai munkával töltötte. Eredményeit és gondolatait publikációin keresztül, többek között a *Fizikai Szemle*ben is közölte. 2019-ben, 94 éves korában távozott közülünk. Tevékenysége társulatunkon – mint annak alelnöke, továbbá a Fizikai Szemle főszerkesztője – is fajsúlyos nyomokat hagyott. Ezért is elvárható tőlünk, hogy a százéves évfordulón tisztelegéssel megemlékezzünk róla.

Króó Norbert

HAJDU JÁNOS (1934–2025)

Hajdu János elméleti szilárdtestfizikus, a Kölni Egyetem professor emeritusa, életének 91. évében, 2025. szeptember 20-án elhunyt.

Jellegzetes sors Hajdu Jánosé. 1934. december 21-én született Budapesten, asszimilált zsidó családban. A vészkorszak megpróbáltatásai után értelmiségi származása miatt nem vették föl az egyetemre, ezért munkásnak kellett álljon – így sikerült bejutnia az ELTE fizikus szakára. Az 1956-os forradalomban részt vett a fegyveres felkelésben; a megtorlás elől Nyugat-Németországba menekült.

A Göttingai Egyetemen folytatta tanulmányait, és ott doktorált elméleti fizikából. Kanadai és olaszországi posztdoktori kutatóévek után 1967-ben a Kölni Egyetemtől kapott állásajánlatot, ahol 1971 és 2001 között tanszékvezető egyetemi tanár volt, majd ott lett professor emeritus. Az elméleti fizika számos területe érdekelte – írt például közös cikket Györgyi Gézával a klasszikus mechanika csoportelméleti vonatkozásairól –, de igazi szakterülete



a szilárdtestfizika volt. Főképpen a magnetotranszport elméletén dolgozott, ami a félvezetőfizika fontos területe volt a 70-es években. Így, amikor a későbbi Nobel-díjas von Klitzing 1980-ban felfedezte a kvantum Hall-effektust, Hajdu János azonnal erre a témára koncentrált, és hamarosan annak elismert szakértője lett. Ahogy ez a német professzoroknál szokásos volt, egyetemi előadásokat tartott a négy elméleti fizikai alaptárgyból, sőt, még asztrofizikáról is. Hallgatói szerették a mély összefüggéseket megvilágító, empatikus stílusáért. Emeritusként számos cikket írt a *Fizikai Szemlébe*.

Hajdu Jánosnak fontos szerepe volt abban, hogy a Kölni Egyetem Elméleti Fizikai Intézetében valóságos magyar központ alakult ki. Fazekas Patrik, Iglói Ferenc, Woynarovich Ferenc, Kiss László és e sorok írója is meghatározó éveket töltöttek ott, még ha nem mindannyian János munkatársaiként is. Rendszerek voltak az olyan magyar látogatók, mint Szépfalusy Péter, Menyhárd Nóra, Zawadowski Alfréd, Sólyom Jenő, Vicsek Tamás és Polónyi János. Az intézet idősebb professzora, Bernhard Mühlshlegel tréfásan csak „hunoknak” nevezett bennünket.

Megpróbáltatásai ellenére János szorososan kötődött Magyarországhoz. Amint azt veszély nélkül megtehette, rendszeresen hazalátogatott, később feleségével egy budapesti lakást is vásároltak, hogy minél több

időt tölthessenek szeretett városukban. Mindig szenvedélyesen érdekelte a magyar tudomány és a közélet.

János igen színes egyéniség volt. Például kiváló rádióamatőrként segítette a romániai forradalom idején a segélyszállítmányok navigálását. Gyakran előbb értesült egy-egy fontosabb hazai kulturális eseményről, mint az itthon élők. Gazdag könyvtárát folyamatosan gyarapította a kortárs magyar irodalommal.

János egyik legjellemzőbb tulajdonsága a segítőkészség volt. Nem lehetett úgy hozzá fordulni, hogy ne akart volna segíteni, sőt, ő maga is kereste az ilyen lehetőségeket. Hol javaslatot tett, hogy miként lehetne a Volkswagen Alapítványt magyarországi kutatóközpont létrehozására bírni, hol egy kiváló kolléga sorsát próbálta egyengetni. Ha nem is járt mindig sikerrel, ez nem törte le: megmaradt örök kezdeményezőnek és segítőnek.

A magyar tudományos közösség 1990 után igyekezett elismerni János életművét. A Magyar Tudományos Akadémia külső tagja, a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem címzetes egyetemi tanára, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat tiszteleti tagja lett.

Hajdu János halálával a magyar fizika fontos egyéniségét, és sokan jó barátunkat veszítettük el. Emlékét megőrizzük.

Kertész János

A fényképet Hajdu János fiától, a hamburgi zeneszerzés professzorától, Georg Hajdutól kértük, aki a mellékelt levél kíséretében küldte a képet:

„Szívesen küldök róla fotót, van is belőlük bőven, kivéve, hogy mindegyik többé-kevésbé bensőséges családi környezetben készült. Visszatekintve sajnálom, hogy sosem készítettem róla képet, ahogy az egyik lenyűgöző előadását tartja. Képes volt 90 percig egyfolytában beszélni, és egy pillanatig sem habozott megszámlálhatatlan képlettel teleírni a táblákat. Ez persze mára már régimódi, mivel mindannyian valós idejű hozzáféréssel rendelkezünk az információkhoz, és az ilyen előadások már nem divatosak. Ez azt mutatja, hogy amikor a technológiai fejlődés révén nyerünk valamit, elkerülhetetlenül veszítünk is valami ugyanolyan fontosat.”

AZ MTA MOMENTUM MSCA PROGRAMJA: ÚT MAGYARORSZÁGRA

Jó sok víz lefolyt már a Dunán azóta, hogy 2023. novemberben megkeresett Kovács András csillagász, a HUN-REN CSFK Csillagászati Intézet Lendület-csoportvezetője azzal a kérdéssel, hogy ismerem-e az EU-s társfinanszírozást biztosító Marie Skłodowska-Curie Actions (MSCA) COFUND pályázati felhívását, ami éppen akkoriban nyitotta meg a felületeit az aktuális körre pályázók számára. A válaszom természetesen egy határozott nem volt, ám érdeklődéssel hallgattam a nagyon pozitív spanyol COFUND-tapasztalatokról szóló beszámolóját, illetve a felvetését, hogy győzzük meg az Akadémiát egy saját pályázat elkészítésére a Lendület-program megerősítése céljából.

Az EU-s pályázatok labirintusában járatlanok számára: az MSCA-felhívások általában kutatói mobilitást kívánnak támogatni, azaz arra ösztönzik a különböző karrierfázisban járó kutatókat, hogy új helyre költözve bővítsék saját tapasztalataikat, illetve gazdagítsák a fogadó kutatóhelyek tudományos tevékenységét. A COFUND séma a jelentős önerővel rendelkező intézményi pályázók számára teszi lehetővé 50%-os EU-s társfinanszírozással új doktori hallgatók vagy posztdoktorok alkalmazását legfeljebb 3 évre, azzal a feltétellel, hogy a fogadó intézetekbe mindenképpen más országból kell érkezniük az új munkatársaknak. A posztdoktoroknak bruttó 3522 eurós ösztöndíjat, egyszeri költözési és három évre családi támogatást is biztosító 2023-as konstrukciót megismerve pozitívan rezonáltam a felvetésre, és azonnal megkerestem az MTA vezetését az ötlettel: a Lendület-program költségvetését önerőként kezelve készítsünk el egy posztdoktori MSCA COFUND-pályázatot, amit a Magyar Tudományos Akadémia mint tudományfinanszírozó szervezet („funding agency”) ad be az EU-hoz azzal a céllal, hogy a társfinanszírozott posztdoktorokat a már futó Lendület-kutatócsoportokhoz rendeljük hozzá, így erősítve ezek tudományos potenciálját és humán erőforrását.

Nagy örömmre az MTA teljes felsővezetése azonnal támogatását fejezte ki, és 2023 decemberére egy profi pályázatírói csapatot állított össze EU-s pályázatok kapcsán feketeöves tapasztalatokkal rendelkező szakértők bevonásával. Jó két hónap alatt kitaláltunk egy öt éves futamidőre 5 millió eurós költségvetésű pályaművet, amiben részletesen bemutattuk a Magyar Tudományos Akadémiát, a Lendület Fiatal Kutatói Program történetét 2009-től kezdődően, eddigi hatásait, valamint felépítettünk egy siker esetén működtetni szándékozott értékelési eljárást az új posztdoktorok kiválasztására; illetve

egy tréningprogramot is kitaláltunk, amivel a Magyarországra érkező kutatókat szakmai továbbképzésben részesítjük (ez is MSCA-elvárás). Mivel az MTA nem alkalmaz kutatókat, össze kellett szedni támogató nyilatkozatokkal alátámasztva a pályázat végrehajtásában közreműködő partnereket, elsősorban Lendület-csoportokat működtető HUN-REN-intézeteket és két egyetemet, a BME-t és az ELTE-t. A 2024. februári határidőre sikerült is beküldeni az anyagot, majd vártunk a döntésre. Ez meg is érkezett 2024 nyarán, onnan pedig már világos volt, hogy 2025. január 1-jén új korszak kezdődik az MTA tudományfinanszírozói tevékenységében: EU-s társfinanszírozással külföldi posztdoktori kutatókat lesz képes kiközvetíteni működő Lendület-kutatócsoportok mellé.

Mit terveztünk pontosan az 5 éves futamidővel 5 millió eurós költségvetésből? Egy év különbséggel összesen 35 MSCA-posztdoktor felvételét egyenként akár 36 hónapos alkalmazással (azaz a pénz $35 \times 36 = 1260$ hónap kutatói alkalmazást tesz lehetővé, bizonyos rugalmassággal a pályázók számában és az általuk kitöltött állások hosszában – például lehet több nyertes pályázó, de akkor rövidebb alkalmazással). Az első felhívás 2025 tavaszán jelent meg, ennek a körnek a nyertesei 2026. január 1-jén kezdenek. A második felhívás 2026 elején fog megjelenni 2027. január 1-jétől induló posztdoktori állásokra. Ezek a posztdoktorok saját kutatási tervet nyújtanak be, amit a Lendület-programhoz hasonló értékeléssel rangsorol a Momentum MSCA-zsűri, jelentős számú külföldi bíráló bevonásával. A pályázatban megjelölik a befogadó Lendület-csoportot, amely ad egy támogató nyilatkozatot a közös munka vállalásáról.

Az egész Momentum MSCA Program alapvető célja a magyar tudomány további nemzetköziesítése, külföldi posztdoktorok Magyarországra csábítása, esetleg a több év után hazatérni szándékozó magyar kutatók számára lehetővé tenni az ideköltözést. Egyértelműen a jövő vezető kutatóit keressük, akik nyugodtan lehetnek nem magyar állampolgárok is, ha a kutatási feltételek kellően vonzóak – azaz a jövő új Lendület-, ERC- és más felhívásokban sikeres pályázóit szeretnénk bevonni a magyar kutatói világba.

Mivel az EU-s társfinanszírozás a béren kívül közvetlen kutatási támogatást nem fedez, az MTA vezetése 2025 elején úgy döntött, hogy a Momentum MSCA-pályázókat befogadó Lendület-csoportokat a befogadás alatt évi 10 millió forintos többlettámogatásban részesíti; így lesz fedezet az ideérkező kutatók munkakörülmé-

nyeinek kiépítésére, külföldi utazásaikra (konferencia-részvétel, szakmai tréning külföldi kutatóhelyeken), egyéb kutatási kiadásaira. Összességében ezzel a lépéssel az MTA a Lendület-csoportvezetőket is érdekelttette abban, hogy felkutassák és pályázatra biztassák azokat a külföldön élő kollégákat, akiket szívesen alkalmaznának hazai kutatásokban.

Az így felépített ösztöndíjstruktúra első tesztjét a 2025-ös felhívásra beadott pályázatok jelentették. Kollár László, az MTA főtitkára engem kért fel a Momentum MSCA-zsűri vezetésére, így az összes eseményre ráláttam az MTA titkárságának érintett munkatársaival való folyamatos kapcsolattartáson keresztül. A Lendület-program három paneljének vezetője kapta meg a Momentum MSCA-zsűri három tükörpaneljének vezetését (matematika és természettudományok, élettudományok, humán tudományok), ők irányították az anonim bírálók véleményeire alapuló értékelési folyamatot. A három panel rangsorát a Momentum MSCA-zsűri fésülte össze egy összesített rangsorra, ahol figyelembe vettük a beérkezett pályázatok tudományterületi eloszlását. Ezt hagyta végül jóvá a Momentum MSCA döntéshozó testülete, amelyet Kollár László főtitkár vezet.

A beérkezett pályázatok minden előzetes várakozást felülmúltak. A három tudományterületre 53 érvényes pályázat érkezett, a bölcsészet és társadalomtudományok művelőitől 13, az élettudományi kutatóktól 12, a matematikai és természettudományokkal foglalkozó pályázóktól pedig 28. A beérkezett pályázatok sokszínűségét mutatja, hogy a jelentkezők 23 különböző országot képviseltek, és számos esetben nemzetközi szinten is elismert tudományos előélettel rendelkeztek. A benyújtott pályázatok kiemelkedő szakmai színvonala és tudományos ambíciója jól érzékeltette a jelentkezői körben

rejlő ígéretes szakmai potenciált. A több szakaszból álló, független szakértők és nemzetközi értékelők bevonásával zajló bírálati folyamat végén 20 pályázó nyert el támogatást, további 9 jelentkezőt pedig tartaléklistára soroltunk. A fizika szakterületre négy nyertes került, ami jelzi a fizikus Lendület-nyertesek erős szereplését a jó nemzetközi jelentkezők bevonásában.

Mindez azt jelenti, hogy a 2026-os második körre 15 új posztdoktor finanszírozására marad kerete az MTAnak, amit remélhetőleg hasonlóan zökkenőmentes eljárással, hasonlóan izgalmas kutatókkal és kutatási programokkal sikerül majd feltölteni.

A Momentum MSCA Program különösen közel áll a szívemhez. 2009-ben a Lendület-program első évében az öt nyertes egyikeként térhettem haza Ausztráliából. 16 évvel később, az MTA tagjaként sikerült kezdeményezni ezt az abszolút úttörő vállalkozást, ami az Akadémiát a nemzetközi szinten finanszírozói intézményként jeleníti meg. EU-s társfinanszírozással két év alatt 35 kiváló kutatót hozhatunk Magyarországra, akik jelentősen erősíthetik magát a Lendület-programot is. Ezzel pedig az MTA továbbra is példamutató tevékenységet folytat a magyar tudományosság fejlesztése érdekében, amire úgy az MTA vezetése, mint az Akadémia teljes köztestülete méltán büszke lehet.

A 2025-ös nyerteseket bejelentő MTA-közlemény:

https://mta.hu/mta_hirei/megszulett-a-dontes-a-momentum-msca-program-elso-palyazatarol-a-nyertesek-listaja-114611

Kiss László,
az MTA rendes tagja
HUN-REN CSFK főigazgató

Kitüntetések

Augusztus 20. alkalmából kiemelkedő színvonalú munkája elismeréseként a Magyar Érdemrend tisztikereszt polgári tagozat kitüntetésben részesült:

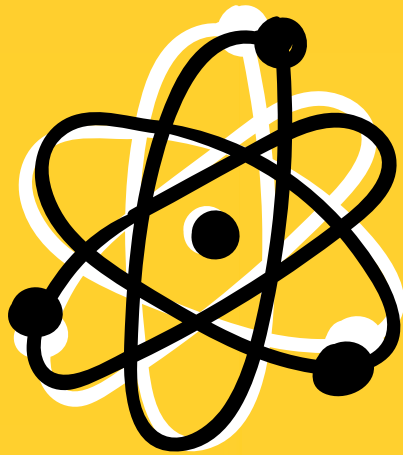
HOPP BÉLA fizikus, a Magyar Tudományos Akadémia doktora, a Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kara Fizikai Intézetének intézetvezető egyetemi tanára kiemelkedő színvonalú munkája elismeréseként

és

LÉVAI PÉTER fizikus, kutatóprofesszor, a Magyar Tudományos Akadémia rendes tagja, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont főigazgatója, a CERN Tanácsának tagja, a magyar tudomány nemzetközi jó hírét a nagyenergiás fizika területén elért kiemelkedő eredményei mellett a kutatóközpont irányítójaként is erősítő, példaértékű tudományos és vezetői tevékenysége elismeréseként.

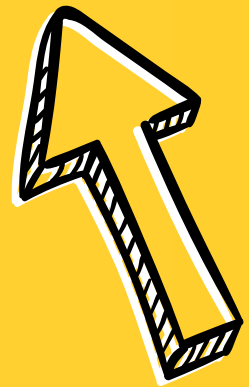
A kitüntetetteknek a szerkesztőbizottság nevében gratulálunk!

Kutass a jövődért! A jövő te vagy!



„Amikor a kutatók dolgoznak, akkor az egy nagyon személyes tevékenység, és személyesen kell örömet találni benne.”

Veres Gábor



TDK
TUDOMÁNYOS
DIÁKKÖR



ORSZÁGOS
TUDOMÁNYOS
DIÁKKÖRI
TANÁCS

nmhh

Az OTDK támogatója a
Nemzeti Média- és Hírközlési Hatóság