

fizikai szemle

Gravitációelméletek
Eötvös-ingák
42. Mikola-verseny
Emlékezés
Jánosi Imrére

2023/12

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, a Magyar Biofizikai Társaság, a Magyar Nukleáris Társaság és a Magyar Fizikushallgatók Egyesülete

Főszerkesztő:
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:
Asbóth János, Bíró László Péter,
Czitrovsky Aladár, Gyürky György,
Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám,
Kopasz Katalin, Néda Zoltán, Ormos Pál,
Pálfalvi László, Rábóczki Bence,
Simon Ferenc, Simon Péter, Sükösd Csaba,
Szabados László, Szabó Gábor,
Takács Gábor, Trócsányi Zoltán,
Ujvári Sándor

Olvasószerkesztő:
Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő:
Hock Gábor

A folyóirat e-mail címe:
fsz_szerkesztok@elft.hu
A lapba szánt írásokat erre a címre kérjük.

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

A folyóirat honlapja:
<http://fizikaiszemle.elft.hu>



A címlapon:

A kettős Eötvös-inga eredeti, első példánya a Miskolci Egyetemen

TARTALOM

| | |
|---|-----|
| Ván Péter, Pszota Máté: Ekvivalenciaelvek és gravitációelméletek | 405 |
| Völgyesi Lajos, Szondy György, Tóth Gyula, Fenyvesi Edit, Kovács Péter, Kiss Bálint, Égető Csaba, Barnaföldi Gergely Gábor, Lévai Péter, Ván Péter: Eötvös-ingák felújítása és továbbfejlesztése, jel-zaj viszonyaik elemzése | 416 |

REFLEKTORFÉNYBEN

| | |
|---|-----|
| Újfalussy Balázs, Csire Gábor: Az LK-99, a kérészetű szupravezető | 423 |
|---|-----|

A FIZIKA TANÍTÁSA

| | |
|---|-----|
| Koncz Károly, Simon Péter: 42. Mikola Sándor Országos Középiskolai Tehetségkutató Fizikaverseny – Beszámoló | 426 |
| Gyertyán Attila: Junior természettudományos diákolimpia – egy kevésbé ismert nemzetközi verseny ismertetése | 431 |

MEGEMLEKEZÉS

| | |
|---|-----|
| Horváth Gábor: In memoriam Jánosi Imre (1963–2023): társszerzői búcsú | 434 |
| Boschán Péter (1938–2023) tanárunkra is emlékezve | 436 |
| Tél Tamás: Egy igaz fizikus: Jánosi Imre | 437 |
| Vincze Miklós: Jó szelet, kapitány! | 437 |

A Fizikai Szemle elérhetőségei megváltoztak:

honlap – <http://fizikaiszemle.elft.hu/>
e-mail – fsz_szerkesztok@elft.hu

Következő számunk tartalmából:

A 2024. januári szám fókuszában Krausz Ferenc Nobel-díja és az azzal kapcsolatos magyar vonatkozású eredmények állnak. Szó lesz a Mű-egyetemen végzett korai kísérletekről, az attoszekundumos impulzusok megvalósítását előrevetítő elméleti eredményekről. Bemutatjuk a lézeres háttér kialakítását, benne az ún. csörpölt tükrökkel és végül Krausz Ferenc atrofizikai eredményeit a nemlineáris optika nézőpontjából. A szám szerzői: Bakos József, Tóth Csaba, Varró Sándor, Szipőcs Róbert és Dombi Péter.

Ehhez kapcsolódó kép a hátsó borítón: Ultrarövid lézerpulzusokkal meghajtott attoszekundumos fényforrás. A magasrendű felharmonikusok keltéséhez használt Ne-atomok egy vákuumkamrába áramlanak, és a látható tartományon kívül eső attoszekundumos impulzusokat bocsátanak ki, amelyek a lézerfényvel együtt terjednek. (forrás: attoworld.de)

P. Ván, M. Pszota: Equivalence principles and gravitation theories
L. Völgyesi, Gy. Szondy, Gy. Tóth, E. Fenyvesi, P. Kovács, B. Kiss, Cs. Égető, G. G. Barnaföldi, P. Lévai, P. Ván: Renovation and further development of Eötvös' torsion balances, analysis of their signal-noise relations

IN THE SPOTLIGHT

B. Újfalussy, G. Csire: LK-99, the ephemeral superconductor

TEACHING PHYSICS

K. Koncz, P. Simon: 42th Mikola Sándor National High School Talent Competition in Physics – Report
A. Gyertyán: Junior natural science student olympiad – about a lesser known international competition

COMMEMORATION

G. Horváth: In memoriam Imre Jánosi (1963–2023): Coworker's farewell and remembering Péter Boschán (1938–2023), our teacher
T. Tél: A genuine physicist: Imre Jánosi
M. Vincze: Have a good wind, Captain!

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT
megjelenését támogatják:



EMBERI ERŐFORRÁSOK
MINISZTERIUMA

nka
Nemzeti Kulturális Alap

group
m v m



EKVIVALENCIAELVEK ÉS GRAVITÁCIÓELMÉLETEK

Ván Péter^{2,3,4}, Pszota Máté^{1,2,3,4}

¹ ELTE, ² HUN-REN Wigner FK, RMI Elméleti Fizika Osztály,

³ BME, Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,

⁴ Montavid Termodinamikai Kutatócsoport, Budapest

1. Motiváció

1922-ben jelent meg Eötvös Loránd, Pekár Dezső és Fekete Jenő cikke a súlyos és a tehetetlen tömeg univerzális egyenlőségéről a kor vezető fizikai folyóiratának, az *Annalen der Physik*nek a hasábjain [1]. Ez a cikk jelentette több évtizedes kutatómunkájuk lezárását, ismertetve azt a kísérletsorozatot – a továbbiakban röviden EPF-kísérletet –, amelyben Friederich Wilhelm Bessel 1832-es ingakísérleteinél tízezerszer pontosabban mérték meg a két tömeg egyenlőségét. Ezután a pontosságot legközelebb 1964-ben Robert Dicke és munkatársai javították meg, már elektronikus eszközök használatával, kicsit kevesebb mint két nagyságrenddel. Eötvösék cikkének megjelenése előtt fejeződött be a gravitációelmélet átalakulása: 1919-ben Arthur Stanley Eddington afrikai expedíciója megmérte a fényelhajlást a Nap mellett, és igazolta Einstein általános relativitáselméletének egyik jóslatát. Az Einstein-elmélet sikeresen összehangolta a fénysebesség állandóságára épülő speciális relativitáselméletet a gravitációval: elvetette a gravitációs mező newtoni fogalmát és helyette a téridő görbületéhez kötötte a gravitáció leírását. A Merkúr perihéliumvándorlását, a vöröseltolódást és a fényelhajlást extra paraméterek nélkül magyarázta. Az EPF-kísérlet, azaz a súlyos és tehetetlen tömeg egyenlősége alapozza meg azt, hogy ez a matematikai leírás működjön, az anyagi és a geometriai fogalmak összekapcsolhatóak legyenek. Ezután több évtizedig csak az elmélet következményeinek kifejtése foglalkoztatta a gravitációval foglalkozó fizikusokat. Az esetleges további mérhető hatások, például a gravitációs hullámok olyan gyengék, az egyéb következmények pedig annyira egzotikusak voltak, hogy a gravitációkutatás sokáig tisztán elméleti fizikai kutatási terület maradt az egész világon.

A fantasztikus elméleti következmények, az egyre gyarapodó csillagászati megfigyelések és a mérés-technika fejlődésének együttes hatására a múlt század 60-as éveinek elején Robert Dicke Princetownban elindította a kísérleti gravitációs kutatásokat. Az elméletnek kulcsszerepe volt a csoport működésében. Dicke 1957-ben kezdett foglalkozni az ekvivalenciaelvvel, és a kísérleti vizsgálatok szükségessége mellett érvelt: legyen az Einstein-elmélet bármilyen szép, a szépség szubjektív, az nem lehet egy fizikai elmélet érvényességének kritériuma. Az általános relativitáselmélet problémáinak elemzése vezetett a Brans–Dicke-elmülethez 1961-ben, amely a Mach-elvvel próbálta kompatibilissé tenni Einstein elméletét egy, a gravitációs állandó változását jósló skalártér bevezetésével. Ez az elméleti-kísérleti útkeresés vezetett az ekvivalenciaelv pontosításához és a fent említett történelmi méréshez, amelyet hamarosan követett a Vladimir Braginsky által vezetett szovjet csoport kísérlete 1967-ben, szintén torziós ingával, javítva az amerikai mérések pontosságán. Az ilyen kifinomult mérések évekig tartó felkészülést, speciális szakértelmet, műszerfejlesztést és nem kevés anyagi támogatást igényelnek. Figyelemre méltó, hogy az amerikai és a szovjet csoport is csak néhány anyagpárt érintő méréseket végzett.

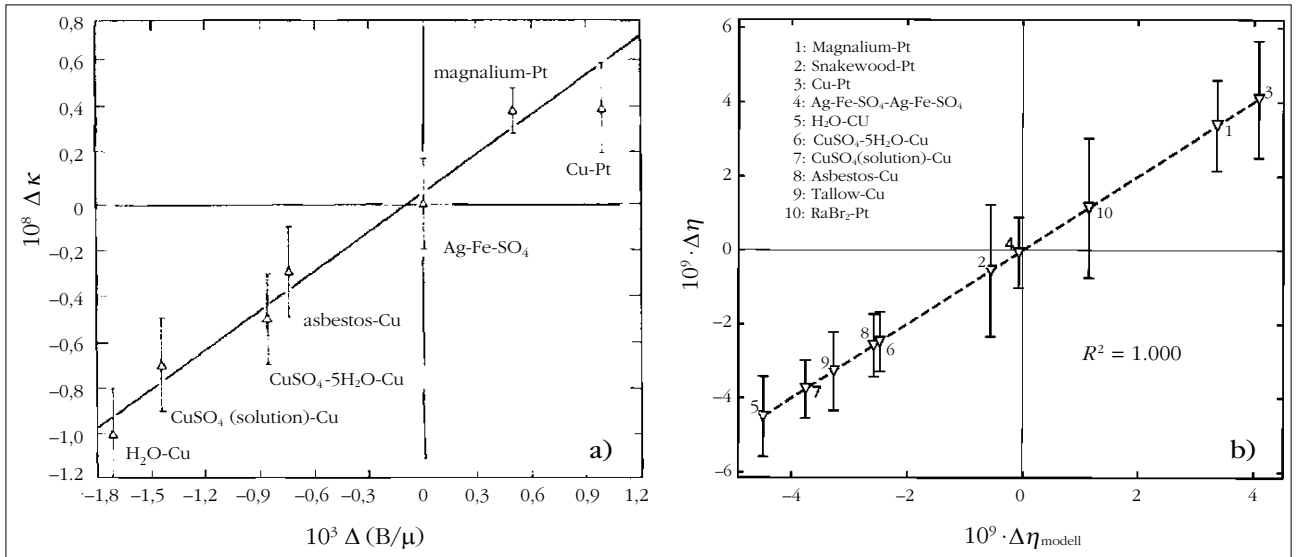
A 70-es években az anyag mikroszerkezetének mélyebb megértésével, az elemi részecskék különféle családjainak azonosításakor újabb szempont merült fel: az ekvivalenciaelv sérülhet, mert a kötési energiáknak gravitációs hatása is van. Ez a fajta hatás azonban csak az univerzalitás sérülésével, többféle anyaggal végzett kísérlet segítségével lehetne felderíthető. A figyelem ismét az EPF-kísérletre irányult, amely tucatnyi, igen különböző anyagpárra demonstrálta a súlyos és tehetetlen tömeg egyenlőségét. Az Eötvös-kísérletek újraelemzése pedig megdöbbentő eredményt mutatott: az



Ván Péter fizikus, az MTA doktora, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézete Elméleti Fizikai Osztályának és a BME Gépészmérnöki Kara Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékének tudományos tanácsadója. Kutatási területe a nemegyensúlyi termodinamika, illetve az Eötvös-ingával kapcsolatos kutatások által motiváltan a gravitáció termodinamikai elmélete.



Pszota Máté okleveles fizikus, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézete Elméleti Fizikai Osztályán tudományos segédmunkatárs és az ELTE-n PhD-hallgató. A termodinamikai kényszerek következményeit vizsgálja a klasszikus gravitációelméletekben.



1. ábra. a) Az EPF-kísérlet újraelemzésének kulcsábrája (Fischbach–Sudarsky–Szafer–Talmadge–Aronson, 1986) mutatja az Eötvös-paraméter lineáris függését az anyagpárok fajlagos bariontöltésének különbségétől. b) Az EPF-kísérlet Tóth Gyula elemzésével mutatja, hogy hasonló eltérés adódhat a henger alakú tesztömegek eltérő hossza miatt, ha figyelembe vesszük a környező gravitációs tér inhomogenitásait és változásait, például a közeli falakat és az Astoria Szálló akkor zajló építkezését [3]. A két ábrán $\Delta \eta$ és $\Delta \kappa$ egyaránt az Eötvös-paramétert jelölik

ekvivalenciaelv sérül, méghozzá arányosan az anyagok fajlagos bariontöltésének különbségével. Tehát az atommagok kötési energiájának hatása más a tehetetlenséggel és más a gravitációval kapcsolatban (1a. ábra). Ebben az elemzésben a legnevesebb gravitációs szakértők (köztük Dicke és Feynmann) sem találtak hibát. A kísérlet eredményének magyarázatára komolyan felmerült, hogy a korábban ismert négy alapvető kölcsönhatáson felül van egy „ötödik erő” is.

Ennek hatására több kísérleti gravitációs csoport is alakult, amelyek különböző módszerekkel újra mérték a súlyos és tehetetlen tömeg egyenlőségét. A legpontosabb méréseket az amerikai EötWash-csoport (Washington államban) végezte, ők egyre fejlettebb torziós ingák építésével 2010-re egy további nagyságrendet javítottak a mérések pontosságán.¹ Az EPF-mérésekben megtalálni vélt effektus nem látszott, az ekvivalenciaelv nem sérült. Azonban az említett anomália magyarázata hiányzott, és Ephraim Fischbach érvei szerint a további kísérletek nem pontosan ugyanolyan

eszközökkel mértek, mint Eötvösök, így az újabb mérések nem biztos, hogy érzékenyek az effektusra [2].

Amikor 2017-ben a Wigner Fizikai Kutatóközpont fizikusai és a BME geofizikusai együtt vitatták meg az ötödik erő kérdéskörét, akkor több tényező szerencsés együttállására derült fény. Egyrészt a geofizikai kutatásokra használt Eötvös-ingák érzékenysége eléri az EPF-kísérlet hajdani laboratóriumi műszerének érzékenységét, és ez az érzékenység manapság már viszonylag egyszerű fejlesztésekkel jelentősen növelhető. Felmerült továbbá, hogy a szisztematikus hiba magyarázatát a bariontöltés helyett elvileg a gravitációs tér gradiense miatt fellépő erőhatás is megadhatja (lásd 1b. ábra). Emellett közelgett Eötvös halálának 100. évfordulója is. Amikor pedig kiderült, hogy a soproni Földtudományi Kutatóintézetnek van új állapotú, működőképes Pekár-típusú ingája, akkor elhatároztuk a Wigner–BME kísérleti gravitációs csoport megalakítását és megkezdtük az Eötvös-inga továbbfejlesztését. A kutatás elsődleges célja az EPF-kísérlet megismétlése volt, illetve a megnövelt érzékenység által lehetővé tett geofizikai kutatási potenciál felderítése.

Az újabb mérőeszközök (gravitációshullám-detektorok és az elektromágneses spektrum egyre kiterjedtebb tartományában megfigyelő különböző teleszkópok) információi egyre komplexebb képet mutatnak az univerzumból. Ezeknek a gravitációelmélettel történő összehangolása, illetve az gravitációelmélet kihívásai (elsősorban a kvantumgravitáció) egyáltalán nem mutatnak megnyugtató képet. Emiatt az elvi kérdéseket folyamatosan újragvizsgálja a fizika, újabb és újabb gravitációelméletek születnek és méretetnek meg az ekvivalenciaelv kísérleti-elméleti mérlegén [4].

De mi is pontosan az ekvivalenciaelv, és milyen viszony van a gravitációelméletekkel?

1. táblázat

Az ekvivalenciaelv-mérések pontossága az EPF-kísérlet előtt és után. Itt η a súlyos és tehetetlen tömeg eltérését kifejező Eötvös-paraméter

| | Bessel 1832 (inga) | EötvösPF 1904 (1922) | RKDicke 1964 |
|-------------------|-----------------------|-------------------------|-----------------|
| $\eta \cdot 10^9$ | 20000 | 2 | 0,03 |

¹ Lényeges körülmény, hogy az EötWash-csoport a feltételezett rövid hatótávolságú 5. erő létezését akarta cáfolni, ezért méréseit egy 1600 m magas sziklafal tövében, extrém gravitációs gradiensek mellett végezték. Tóth Gyula közelmúltban végzett elemzése szerint a gravitációs tér inhomogenitása mellett a próbatetek geometriája és gyártás precizitása határozza meg az ekvivalenciaelv-mérés pontosságát.

2. Ekvivalenciaelvek

A súlyos és tehetetlen tömeg egyenlősége csak az egyik beépített eleme az általános relativitáselméletnek, ezért manapság az összetettebb Einstein-ekvivalenciaelvben (EEP) fogalmazzuk meg az elmélet kísérletileg és megfigyeléssel ellenőrizhető alapjait. Az EEP másik két eleme azt mondja ki, hogy a gravitációs kölcsönhatás az univerzum története során mindig és mindenhol ugyanúgy működött, illetve független a gravitációsan kölcsönható anyag relatív sebességviszonyaitól. Kicsit pontosabban a gyenge Einstein-ekvivalenciaelv szerint [5]:

1. A szabadesés univerzális, azaz a „súly” arányos a „tömeggel” minden anyagra. A tehetetlenségi hatások lokálisan megkülönböztethetetlenek a gravitációs hatásoktól bármilyen nem gravitációs kísérletben. Ez a gyenge ekvivalencia elve (WEP).
2. Minden lokális, nem gravitációs kísérlet kimenetele független a szabadon eső kísérleti rendszer sebességétől. Ez a lokális Lorentz-invariancia (LLI).
3. Minden lokális, nem gravitációs kísérlet kimenetele független attól, hogy hol és mikor végezték. Ez a lokális helyzetinvariancia (LPI).

A lokális, nem gravitációs kísérlet alatt azt kell érteni, hogy a kísérlet maga nem befolyásolja a gravitációs teret, illetve a téridőt, tehát pontoszerű teszttömegeink viselkedését mérjük. Ezzel szemben az Einstein-ekvivalenciaelv erős változata (SEP) ugyanezt a három elemet tartalmazza, de öngravitációs hatásokon alapuló kísérleteket is megenged, a „gravitációs tér energiasűrűsége” önmaga is gravitációs teret hoz létre, illetve görbíti a téridőt. A szóhasználat pongyola, mert hiszen a gravitációs tér newtoni fogalom, az Einstein-elméletben nem olyan egyszerű gravitációs energiasűrűségről beszélni.

A megfogalmazásból érthető, hogy bár többféle energia is kapcsolatba hozható a nyugalmi tömeggel, hisz $E = mc^2$, kérdés, hogy van-e minden energiának súlya. Vagyis ha egy nem gravitációs elméletben van valamilyen kölcsönhatási energia, akkor az sértheti a gyenge ekvivalenciaelvet. Illetve, amennyiben egy módosított metrikus gravitációelmélet eltér az általános relativitástól, akkor az eltérés az erős ekvivalenciaelv sérülését eredményezheti [5]. Ahogy azt Adelberger, az EötWash-csoport alapítója és vezető fizikusa megfogalmazta: „Most of the ideas solving a big problem in physics predict effects that could show up in EP tests.” (A fizika egy nagy problémáját megoldó elképzelések többnyire jósnak olyan hatásokat, amelyek felbukkanhatnak az ekvivalenciaelv-kísérletekben.)

A gyenge ekvivalenciaelv sérülését tehát ellenőrizni kell különböző rendű kvantumtérelméleti kölcsönhatásokra, húrelméltre, extra dimenziókra, szuperszimmetrikus elméletekre, axionokra, az erős ekvivalencia-

elvet pedig az összes általánosított gravitációelméletre (például Horndeski, MOND, TeleParallel, ...). Konkrétan, ha a fent említett, barionok közötti kölcsönhatásnak van valamilyen E^B energiataralma, akkor ez a súlyos és a tehetetlen tömeg között az alábbi képlettel kiszámolható eltérést okozhatja:

$$m_s = m_T + \eta^B E^B / c^2,$$

ahol m_s a súlyos, passzív gravitáló tömeg; m_T a tehetetlen tömeg, η^B pedig az adott kölcsönhatást gravitációhoz csatoló állandó. A konkrét elmélet általában megadja a csatolási állandó értelmezését és a téregyenletet, illetve a gravitációs potenciált a következőképpen módosíthatja:

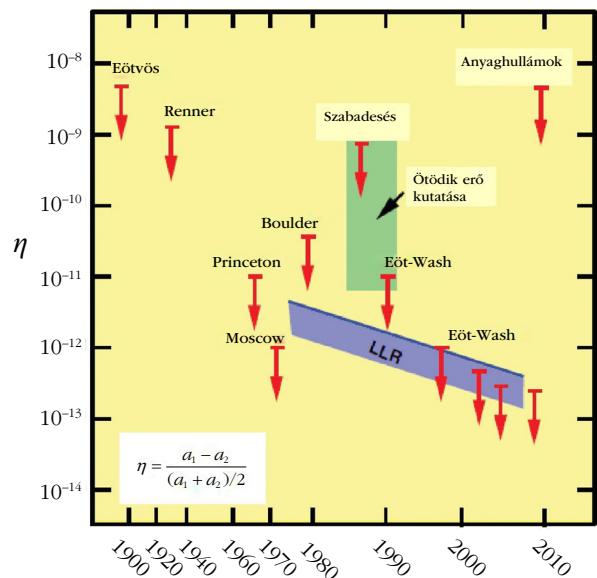
$$V(r) = -G_\infty \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha \exp\{-r/\lambda\}),$$

$$\alpha = -\xi_B \left(\frac{B_1}{m_1} \right) \left(\frac{B_2}{m_2} \right),$$

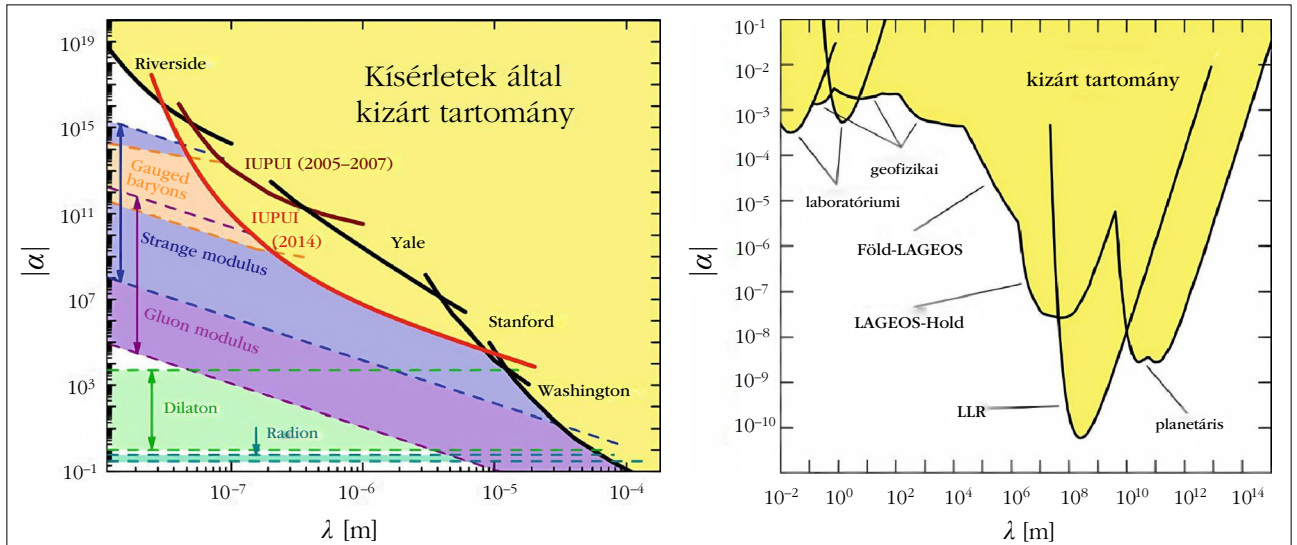
ahol B_1, B_2 a teszttömegek bariontöltései, G a Newton-féle gravitációs állandó, illetve a λ karakterisztikus hossz és a ξ_B csatolási állandó jellemzi a jelentkező extra járulékot a potenciálban. Ez a karakterisztikus hossz Fischbachék javaslata szerint néhány száz méter. A potenciálból következik az erőtvény módosulása, ahol a newtoni erőtvénnytől eltérést látunk:

$$|F| = G(1 + \eta) \cdot (mM/r^2).$$

Itt m a teszttömeg és $\eta = 2|(a_1 - a_2)/(a_1 + a_2)|$ az Eötös-paraméter, illetve annak viszonya az egyenlő tömegű, különböző anyagú teszttömegek a_1, a_2 gyors-



2. ábra. A nagy távolságú gyenge ekvivalenciaelvet tesztelő kísérletek. Az ábra a 2014-es helyzetet mutatja. Jelenleg a MICROSCOPE műhold titán–platina tömegeire mért $\eta(\text{Ti, Pt}) = (-1,5 \pm 3,8) \cdot 10^{-15}$ a legpontosabb mérés. Renner János Eötös tanítványa volt, az LLR (Lunar Laser Ranging) a Föld–Hold távolság mérésén alapuló kísérlet jelöli [5]



3. ábra. Karakterisztikus távolságok és kölcsönhatás-erőségek, lásd [5]. Szerkesztve, az eredeti képek forrásai: [6, 7]

sulásaihoz, amelyet egy torziós ingával kimérhetünk. A 2. ábra mutatja a gyenge ekvivalenciaelv pontosságát jellemző Eötvös-paraméter fontosabb méréseit 2014-ig. Jelenleg a MICROSCOPE műholdas kísérlet a legpontosabb, titán–platina teszttömegpárra. A 3. ábrán a newtoni potenciáltól való eltérést képviselő Yukawa-típusú kölcsönhatás erősségének távolságtól való függését láthatjuk, az egyre pontosabb mérések egyre lejjebb szorítják a sárga területet, amely azt jellemzi, hogy milyen pontossággal nem látunk eltérést a Newton-féle gravitációs törvénytől.

A kísérletek tehát nem mutatnak eltérést az általános relativitáselmélettől. No, de valóban ennyire tiszta a helyzet?

3. Gravitációelméletek

Az ekvivalenciaelvek empirikusan ellenőrizhető feltételei minden gravitációelméletnek. Egyszerűsítve a viszonyokat azt mondhatjuk, hogy ha a gyenge Einstein-ekvivalenciaelv igaz, akkor a gravitációnak lehet téridőmetrikára alapozott elmélete. Azonban az Einstein-elmélettől eltérő majdnem mindegyik metrikus gravitációelmélet eltéréseket jósol az erős Einstein-ekvivalenciaelvtől [5].

Ránézve a 4. ábrára látható, hogy bonyolultabb a helyzet. A fa legtetjén a GR felirat jelenti az általános relativitáselméletet (*General Relativity*), de ezenkívül számos elég vastag ág túlnyúlik a növekvő lombozattal jelképezett különböző megfigyelési-kísérleti következmények által felállított kényszereken, azaz jó modelljei a megfigyelt valóságnak. Persze ettől még nem egyformán kidolgozott és nem is egyformán erős elképzelésekről van szó, de semmiképpen nem zárhatjuk ki ezeket a megfigyeléseink alapján.

Tisztítja a képet az elméletek csoportosítása. Megkülönböztetünk abszolút elemeket tartalmazó előgeo-

metriai és tiszta dinamikai elméleteket. Az előbbiekben vannak adott, abszolút elemei az elméletnek, például Newton elméletében az abszolút tér. Ilyenek vannak a fa alsóbb ágain. Az utóbbiakban az elmélet minden elemét, a téridőt is, csatolt parciális differenciálegyenletek írják le. Ilyen például az Einstein-elmélet. Láthatóan az előgeometriai elméletek egy része lezárul a kisebb lombkoronáknál. Az adott Minkowski-téridőn gravitációs mezőkkel leírt elméleteket (például a skalármezős Nordström-elméletet) a Naprendszer-szintű tesztek hamar kizárták. Azonban az ágak időnként növekednek, új hajtások jelenhetnek meg rajtuk. Így például kiderült, hogy a gravitációt nem relativisztikus téridőn a fénysebesség változásával leíró elképzelések (ilyet javasolt Jánossy Lajos is) helyes értékeket adnak a fényelhajlásra, vöröseltolódásra és a Merkúr perihéliumelfordulására is, néhány egyszerű és ésszerű változtatással. Az ábrán nem látható, de Nordström elmélete, illetve annak megfelelő módosítása 2023-ban szintén teljesíti a gyenge térre vonatkozó követelményeket. Ilyen fejlemények szoktak időnként az újságok címlapjára kerülni, „Einstein tévedett...” címmel.

3.1. Egy elmélet mind fölött?

Hogy is van ez akkor, ezek szerint hibás az általános relativitáselmélet? Hát, nem egészen. Pusztán arról van szó, hogy nem tudunk mindent. Egy fizikai elméletnek többféle tesztje van, többféle értelemben kell igaznak lennie, ezek közül csak egy, az ábrán a lombkoronahajtás-módon szemléltetett *modelllezési képesség*. További fontos feltétel a konzisztencia, azaz nem lehet önelmentmondó, és a *prediktivitás*, azaz új, ellenőrizhető és cáfolható jóslatokat kell kimondania. Az sem mindegy, hogy mennyi feltételre alapul, milyen új fogalmakat használ, vagy hány paramétert tartalmaz. Ezekben a

Még egyszerűbb formulát kapunk, ha a fenti differenciálegyenlet háttérét megadó variációs elvhez tartozó alpmennyiséget, az elmélet Lagrange-függvényét írjuk fel, Hilbert kiindulópontját:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \frac{c^4}{16\pi G} \sqrt{-g} R + \sqrt{-g} \mathcal{L}^{(m)}, \\ T_{\mu\nu}^{(m)} &= -\frac{2}{\sqrt{-g}} \frac{\delta \mathcal{L}^{(m)}}{\delta g^{\mu\nu}},\end{aligned}\quad (1)$$

ahol $\mathcal{L}^{(m)}$ az anyagi Lagrange-sűrűség, ebből származtatható az energia-impulzus sűrűségtenzor.

Természetesen az egyenlet mögött ott van a négydimenziós differenciálgeometria teljes apparátusa, Bolyaival, Lobacsevszkijjel és Riemann-nal, amely a maga módján úgy egyszerű, hogy vizuálisan nem nagyon elképzelhető dolgoknak adja a tömör, konzisztens és kvantitatív leírását. A mindennapi tér- és időszemléletünk valahogy úgy viszonyul ehhez, mint az evezős csónak az óceánjáróhoz. Kétdimenziós sima vízfelületen jól elboldogulunk az evezőinkkel, de egy tengeri viharban történő biztos navigáláshoz már differenciálgeometria kell. Az utóbbi esetben természetesen kicsit tovább tart a használati utasítás tanulmányozása.

A fentiek fényében érthetjük meg a már emlegetett Brans–Dicke-elmélet alap gondolatát is. Annak Lagrange-függvényében egy skalármező szerepel, amely a téridő egyes pontjain különböző értékeket vehet fel és φ jelöli:

$$\begin{aligned}\mathcal{L} &= \frac{c^4}{16\pi G} \sqrt{-g} \left[\varphi R - \frac{\omega}{\varphi} \nabla^\mu \varphi \nabla_\mu \varphi \right] \\ &+ \sqrt{-g} \mathcal{L}^{(m)},\end{aligned}\quad (2)$$

ahol ω a Brans–Dicke-paraméter. Ha összevetjük ennek az első tagját az előző formulával, akkor látható a skalármező jelentése, mivel $G_{\text{eff}} = G/\varphi$ effektív, téridőfüggő gravitációs csatolásnak tekinthető. Azaz a gravitációs állandó nem lesz állandó, hanem a téridőben úgy változik, ahogy a fenti Lagrange-függvényből levezethető parciális differenciálegyenletek meghatározzák. A Brans–Dicke-elmélet ezért sérti az Einstein-ekvivalenciaelvet, annak harmadik, lokalitásra vonatkozó (LL) pontját. De akkor mi indokolja, hogy ezt ma is fontos elméletnek tekintjük? Az, hogy mond valamit a gravitáció mibenlétéről, az elméletbe beépíti a Mach-elvet. Ezt a kérdést nem fogjuk most itt kifejteni, talán annyit érdemes mondani róla, hogy Einstein egyik fontos motivációját jelentette az általános relativitáselmélet kidolgozására, amely végül csak motiváció maradt, az elmélet nem teljesíti azt.

Még egy fontos tulajdonsága van a Brans–Dicke-elméletnek. A Lagrange-függvényből látható, hogy a téridő metrikáját és a skalármezőt meghatározó parciális differenciálegyenletek csatoltak. Azonban ez a csatolás megszüntethető, ha az eredeti, Jordan-rendszerben megjelenő mezők helyett egy konform transz-

formációval azok egy függvényét vezetjük be. Ekkor a (2) formula a (1) formulába transzformálható, amennyiben az anyagi részbe a skalármezőt is beleértjük. Az új metrika és új skalármező parciális differenciálegyenletei függetlenek lesznek, az így átranzformált, Einstein-rendszerben a metrikára a tiszta Einstein-egyenletek vonatkoznak. De akkor melyik megfogalmazás a fizikai? A csatolt vagy a független egyenletek? Ehhez hasonló kérdések az Einstein-elmélet szinte minden általánosításában fellépnek, például a sötét energia kapcsán is. A téridő és az anyag szétválasztása bizonytalan a gravitáció elméleteiben, és ez a bizonytalanság – a Jordan- vagy Einstein-rendszerek közötti választás kérdése – lényeges a fizikai tartalmat illetően (például a sík téridőn megjelenő kvantum hatásokat tudunk a téridőbe görbíteni konform transzformációval).

Tehát az Einstein-egyenlet ugyan a maga módján egyszerű, de ezzel együtt is vannak nyitott, elvi kérdések vele kapcsolatban, és ezek az eldöntetlen, matematika ízű kérdések egyúttal fizikai, modellezési lehetőségeket is jelentenek.

Térjünk hát vissza a modellezésre, a megfigyelések és a kísérletek leírásának képességére! Egy jó gravitációelméletnek tehát tudnia kell a már említett Naprendszer-szintű tesztek, azaz a gyenge terek ismert tulajdonságait és az erős terek esetén elvárt fontos jelenségeket. Ebből a szempontból szintén két elméletcsoportot különböztethetünk meg:

- *A módosított gravitációelméleteknek* az Einstein-elmélet a határeset. Ilyen volt a fent említett Brans–Dicke- vagy ilyen például az $f(R)$ vagy a Horndeski-gravitáció is.
- *Az alternatív gravitációelméleteknek* az Einstein-elmélet nem határeset. Például ilyesmi a TeVeS, amely a módosított newtoni dinamika (MOND) egy verziója.

Ezeket az elméleteket az erős Einstein-ekvivalenciaelvvel lehet tesztelni, ugyanis öngravitáló testekre eltérést kaphatunk az m_P passzív és az m_I tehetetlen gravitációs tömeg között, ez a Nordtvedt-hatás:

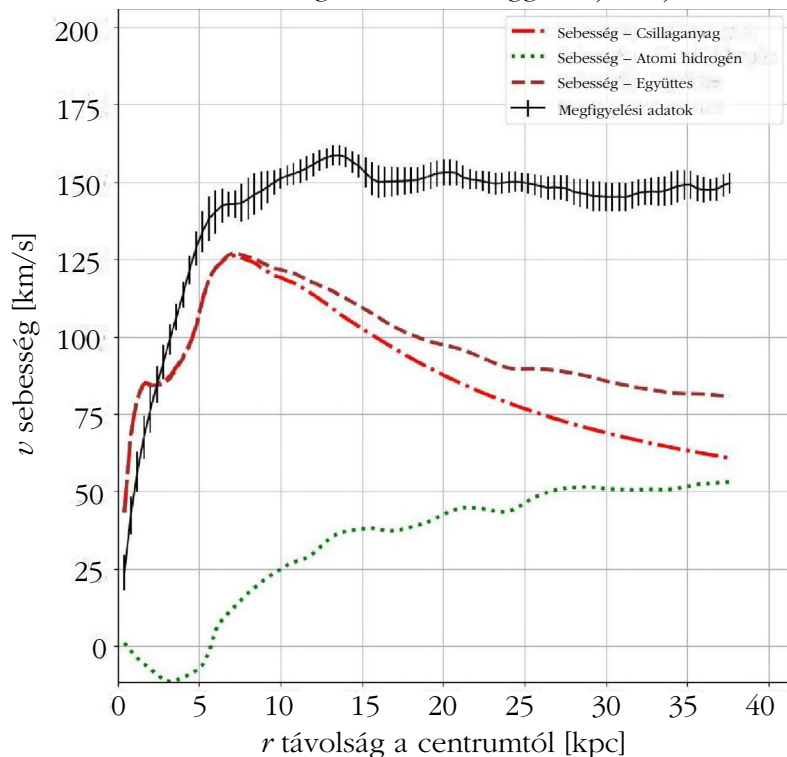
$$m_P = m_I + \eta_N (E_N/c^2).$$

Az eltérést az E_N gravitációs sajátenergia adja az η_N csatolási állandóval, azaz a gravitációs erőkhöz is tartozik kötési energia, és ez módosíthatja a tehetetlenséget. Gyenge terekre vetítve az elméleteknek kiszámolhatók az úgynevezett posztnewtoni paraméterei, amelyek a newtoni határesetből való eltérést jellemzik, és ezekből számolható a fenti csatolási állandó, amely gömbszimmetrikus testekre:

$$\begin{aligned}\eta_N &= 4\beta - \gamma - 3 - (10/3)\xi - \alpha_1 + (2/3)\alpha_2 \\ &- (2/3)\zeta_1 - (1/3)\zeta_2,\end{aligned}$$

ahol a paraméterek részben az Einstein-ekvivalenciaelv különböző részeihez köthetők: γ és β görbületi és szuperpozíciós nemlinearitások (Eddington–Robertson-

Az NGC 3198 galaxis sebességörbéje és járulécai



5. ábra. Az NGC 3198 galaxis környékén az anyag kerületi sebessége. Maga a galaxis látható sugara 7 kpc, a piros vonal a világító anyag newtoni gravitációjával mint centripetális erővel számolt kerületi sebesség. A megfigyelt sebességek ettől jóval nagyobbak, még akkor is, ha az atomi hidrogén (zöld pontok) gravitációs hatását is hozzávesszük. Az együttes sebesség (barna szaggatott vonal) kiszámításakor az atomi hidrogén és a világító anyag newtoni tömegvonzását tekintjük centripetális erőnek, ezért a sebességek négyzetesen összegződnek

Schiff), ζ a kitüntetett hely, $\alpha_{1,2,3}$ a kitüntetett sebesség (*preferred frame*), $\zeta_{1, \dots, 4}$ a teljes impulzusmegmaradás miatt fellépő öngravitációs effektust jellemzi. Az általános relativitáselméletre $\beta = 1$ és $\gamma = 1$, és minden más paraméter nulla, ezért $\eta_N = 0$.

Kísérletileg például a Hold–Föld távolság méréssel – a 2. ábrán LLR – lehet az erős ekvivalenciaelvet ellenőrizni. Ennek akkor van igazán értelme, ha két égitest anyagi összetétele különböző, ami a Hold és a Föld esetén korántsem biztos. Manapság a gravitációs-hullám-detektorokkal fekete lyukak összeolvadásainak jeleiből is számolhatók a fenti posztnewtoni paraméterek. Ezek kizártak néhány kiterjesztett elméletet.

4. Súlyosabb problémák

Az alternatív gravitációelméletek ambiciózusabbak. Szerintük a közmondásos kulcsot nem a világos helyeken találjuk meg, hanem ahol elvesztettük. Ugyanis három fő dolog motiválja ezeket az elképzeléseket.

- **Kvantumgravitáció.** Jelenleg nem világos, mi a pontos akadálya, hogy nincs egészen jó ilyen elméletünk. Lehet, hogy a gravitációelméletet kell ehhez módosítani, de valószínűnek tűnik, hogy a kvantumelméletet is.

- **Kozmológiai problémák.** A kozmológia folyamatos toldozgatása helyett (lásd infláció, sötét anyag és sötét energia) lehet, hogy egy újabb gravitációelmélet ad megoldást. Egyik érdekes javaslat a MOND és relativisztikus kiterjesztései.
- **Mi a gravitáció?** Ezt máig sem tudjuk. „Hypothesen non fingo”, azaz nem foglalkozom spekulációkkal, írta Newton a *Principia* második kiadásához (1713) fűzött „Scholium generale” című függelékben, mert nem akart magyarázkodni az elméletének problémás kérdéseivel kapcsolatban. Úgy érezte, elengedő demonstrálni, hogy működik. Lehet, hogy most már az egyenletek nem elegendőek, valamilyen háttérelméletre lenne szükség.

4.1. MOND = módosított newtoni dinamika

A galaxisok többségének megfigyelt lapos sebességörbét (5. ábra) valamilyen nem barionikus anyag newtoni gravitációs hatásával szoktuk magyarázni. Hogy mi lehet ez a sötét anyag, arra vonatkozóan sok elképzelés létezik, lásd a 6. ábrát.

Az a tény, hogy az intenzív kísérleti és elméleti kutatások ellenére egyik anyagfélét sem sikerült azonosítani, teret ad az alternatív gravitációelméleteknek.



6. ábra. A sötét anyag néhány elmélete. Több is van. Eredetileg: [9]

A fentebb is többször említett MOND eredetileg Newton második törvényének módosítását javasolta, méghozzá feltételezve, hogy kis gyorsulások esetén a tehetetlen tömeg is egyre kisebb lesz, például az alábbiakban megadott módon:

$$F = m\mu\left(\frac{a}{a_0}\right)a,$$

$$\mu(x) = \frac{x}{1+x}.$$

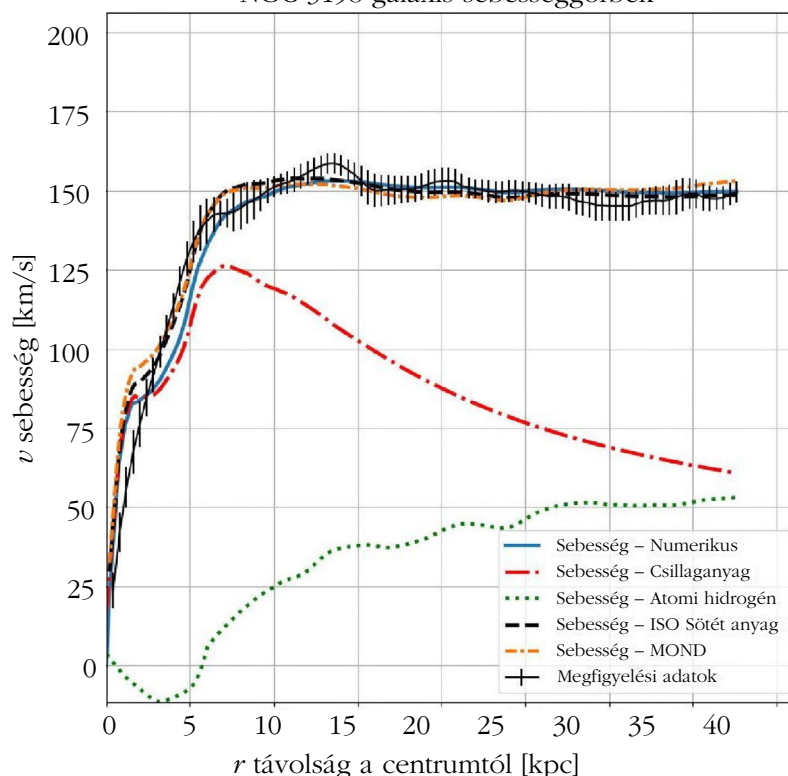
Eszerint nincs szükség a galaxisok lapos sebességgörbéinek magyarázatához sötét anyagra, mert kis gyorsulások esetén (távol a galaxis közepétől) az erő a gyorsulás négyzetével lesz arányos, és ebben az esetben $ma^2/a_0 = mG/R^2 \rightarrow a = (a_0G)^{1/2}/R$, így a gravitációs centripetális erőt a távolsággal (és nem annak négyzetével) fordítottan arányos centrifugális erő ellensúlyozza. Az eredeti elképzelés szerint az a_0 háttárgyorsulás univerzális állandó. A MOND kiterjeszhető gravitációelméletté, amelyben a téregyenletek

vákuummegoldása visszaadja a fenti erőtvényt. Ez a Mordecai Milgrom és David Bekenstein által javasolt AQUAL (*A QUAdratic Lagrangian*), illetve relativisztikus változata a TeVeS (*Tensor–Vector–Scalar gravity*). Az elmélet megmagyaráz néhány olyan megfigyelést, amelyről a sötét anyagnak nincs mondanivalója, mint például a Tully–Fisher-reláció. Természetesen a sötét anyagnak nem egyedül a galaktikus sebességgörbék a következményei; magyarázatul szolgál sok különböző kozmológiai jelenségre, mint például az Univerzum nagyskálás szerkezetére vagy a gravitációs lencsézési megfigyelésekre. Egy alternatív gravitációelméletnek előbb-utóbb minden más ilyen kérdésre is reflektálnia kell.

4.2. Termodinamika

A gravitációval kapcsolatos leginkább zavarba ejtő gondolat, hogy az Einstein-egyenlet által megjósolt legérdekesebb objektumok egyúttal termodinamikai

NGC 3198 galaxis sebességörbék



7. ábra. Az NGC 3198 galaxis sebességörbéjének számítása egy sötétanyag-modell, illetve a MOND direkt illesztése, valamint a termodinamikai gravitáció numerikus realizálása által

rendszerek is. A fekete lyukaknak van entrópiájuk és hőmérsékletük anélkül, hogy mikroszerkezetük lenne. Stephen Hawking és David Bekenstein javaslata alapján a fekete lyukak termodinamikai rendszerek, az entrópiájuk pedig a szingularitást jellemző eseményhorizontjuk felületével arányos (legalábbis a legegyszerűbb esetben).

A termodinamikai rendszerek általában makroszkopikusak, és hajlamosak vagyunk termodinamikai tulajdonságaikat a mikroszerkezetnek, például részecskék véletlenszerű mozgásának tulajdonítani. A legegyszerűbb, Schwarzschild-féle fekete lyuknak azonban az Einstein-elmélet szerint nincs mikroszerkezete: szigorú matematikai állítás, hogy egyetlen paraméter, az invariáns tömege jellemzi. Ha viszont termodinamikai rendszer, akkor mikroszkopikus összetevők hiányában vajon hogyan tud az lenni? Valamilyen a gravitáció-elmélet alatti gondolat, például a téridő kvantumjai lehetnek itt a felelősek, de a kvantumgravitáció elméletét eddig nem sikerült erre alapozva kidolgozni. Vagyis egyelőre nem tudjuk, hogy milyen kvantumgravitációnak következménye a termodinamika. Fordítsuk meg a gondolatot! Mire jutunk, ha azt vizsgáljuk, hogy a termodinamika általános törvényeivel hogyan lesz általában összeegyeztethető a gravitáció és nem csak a speciális fekete lyukak? Ted Jacobson szerint nem fontos semmit tudni a lehetséges mikroszerkezetről: az Einstein-egyenlet egyensúlyi állapotegyenlet a téridő

termodinamikájában. Ezzel szép, egységes képet kaphatunk a kiterjesztett gravitációelméletekről: ezek perturbatív eltérések a termodinamikai egyensúlytól [4, 10]. Ráadásul ez az inspiráló gondolat mintha megnyitná az utat annak megértéséhez, hogy tulajdonképpen mi is a gravitáció.

5. Termodinamikai gravitáció, MOND és sötét anyag

Ahogy említettük, az alternatív gravitációelméletek egyik célja, illetve tesztproblémája a sötét anyag helyettesítése. Erre egy termodinamikai gravitációelmélet is képes, kicsit elegánsabban, mint a MOND [12]. A 7. ábrán láthatjuk az előbbi konkrét galaxis példáján a különféle illesztett sebességörbéket.

Itt a sötét anyag ún. pszeudoizotermikus modellje szerepel az illesztésben, amely egy adott kétparaméteres anyageloszlást jelent, feltételezve, hogy a sötét anyag egy ideális folyadék vagy gáz, amelyet a gravitáció tart össze. A sebességörbét ennek a sötét folyadéknak, illetve a világító anyag és az atomi hidrogéngáz gravitációs hatásainak megfelelő összeadása eredményezi. A MOND a sötét anyag hatását az $1/r$ -es erőtvény közvetlen illesztésével helyettesíti. A MOND fenti paraméteres képletéhez elvileg tudnánk

Lagrange-függvényt és téregyenleteket is számolni, amelyeknek a vákuummegoldása lesz a fenti interpolációs formulát tartalmazó erőtvény (az elméleti háttér a Milgrom és Bekenstein által javasolt AQUA). Míg a fenti két modell adott, kétparaméteres függvényformát illeszt a sebességadatokra, addig a termogravitációs elmélet közvetlenül a megfelelő téregyenletet illeszt, amelyben a világító anyag és az atomi hidrogén sűrűségeloszlása a gravitációs tér forrása.

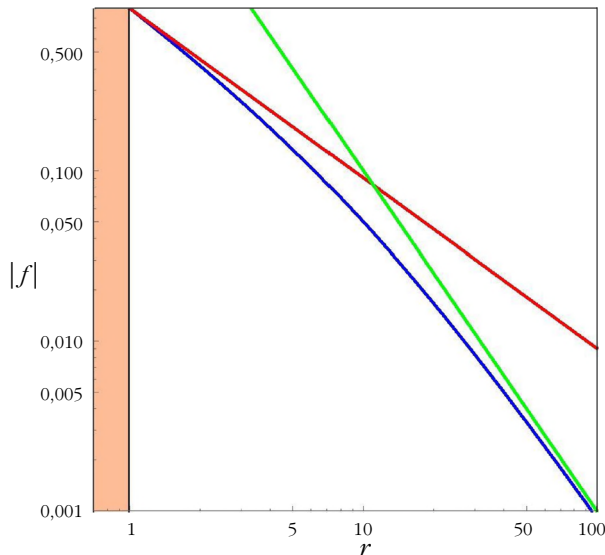
A nemlineáris téregyenlet, amelyet a φ gravitációs potenciállal mint (fajlagos) termodinamikai állapothatározóval vezethetünk le, a következő:

$$0 = \Delta\varphi - 4\pi G\rho - K\nabla\varphi \cdot \nabla\varphi.$$

Ennek az egyenletnek az első két tagja a newtoni gravitációt leíró Poisson-egyenlet. A teljes egyenlet gömbszimmetrikus vákuummegoldása megadja a tömegpontokra ható gravitációs erőtvényt, amely az alábbi formájú:

$$f(r) = -GM_{aa}/[r(r+r_1)].$$

Tehát ha $r \ll r_1$, akkor a gravitációs erő a távolsággal fordítottan arányos, ha pedig $r \gg r_1$, akkor a távolság négyzetével fordítottan arányos. Tehát messzebről nézve a szokásos Newton-féle gravitációs erőtvényt látjuk működni, egy M_{aa} látszólagos tömeggel, míg a forráshoz közelebbi objektumok ettől eltérően mozognak. Az NGC 3198 galaxis világító tömegének fele az atomi hidrogén tömege, és a kettő összegének körülbelül két és félszerese a fenti egyenlettel számolt M_{aa} látszólagos tömeg. Ez hibán belül megegyezik a galaxisban levő sötét anyag fenti illesztés alapján számolt tömegével. Az alternatív gravitáció így tudja kiváltani a sötét anyagot.



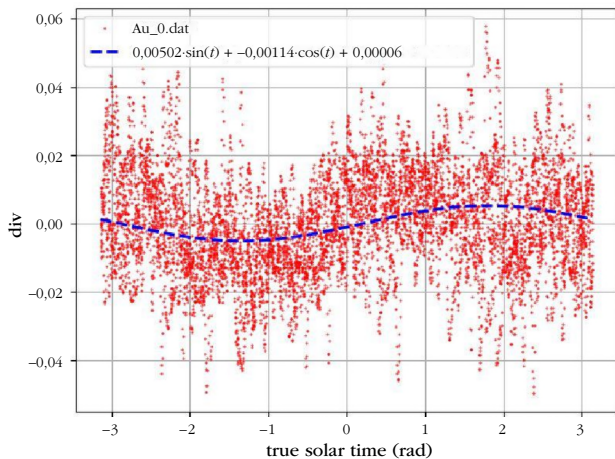
8. ábra. Átmenet a termodinamikailag kiterjesztett gravitáció $1/r$ és $1/r^2$ tartományai közt vákuumban. A függőleges tengelyen az erő, a vízszintesen a távolság a galaxis méretével dimenziótlánítva, logaritmus skálán. A piros és a zöld egyenesek -1 és -2 meredekségű aszimptotikus illesztések

Természetesen a gravitáció termodinamikai indítással elméleteiből is többféle létezik, és ki fog derülni, hogy melyik konzisztensebb, melyik hangolható össze jobban a megértett fizikával, melyeknek a predikciói, jóslatai bizonyulnak igaznak, avagy lesznek más megközelítésekkel megmagyarázhatatlanok. Ami a közös bennük, hogy szerintük a gravitáció nem elemi jelenség, van valamilyen hátere, mechanizmusa. Mi a gravitáció? Ez a kérdés nem értelmes, ha a gravitációt elemi kölcsönhatásnak tekintjük. A kérdés nem érdekes, ha – mint Newton – biztosak vagyunk a matematikai modell teljesítőképességében. Ha viszont fontosnak tartjuk a gravitációval kapcsolatos elvi problémákat, mint a kvantálhatóság vagy a Mach-elv, vagy zavarnak a nehezen magyarázható megfigyelések, mint a sötét anyag, a kozmológiai modellek problémái, az egyre komplexebbnek tűnő megfigyelt világegyetem, akkor ez az egyetlen lényeges kérdés a gravitációval kapcsolatban [11].

6. Kísérleti gravitáció

A torziós ingák a gravitációs mérések legfontosabb eszközei. Az Eötvös-inga, különösen a két nagyságrenddel megnövelt érzékenységgel, képes számos, eddig észrevehetetlen gravitációs és nem gravitációs erőhatás, illetve környezeti zaj és változás észlelésére. Ezek azonosítása, értelmezése számos technológiai és mérés-technikai kihívással szembesítette a fejlesztéssel foglalkozó Wigner-BME kutatócsoportunkat. Az észlelt jelenségek és események némelyike annyira érdekes, mint a földrengésméréseink [13], vagy annyira problémás, mint a nyomásérzékenység jelensége. Ezért az eredeti célunkat, a bevezetőben említett ekvivalenciaelv-mérés megismétlését jelentősen kiterjesztettük egyrészt a szisztematikus hibaforrások felderítése, másrészt a kapcsolódó, új jelenségek pontosabb megértése céljából. A közelmúltban fejeztük be több régi inga korszerűsítését, számos segédműszer fejlesztése van folyamatban, és az inga statikus és dinamikus modelljein is dolgozunk [14].

A fentiekben láttuk, hogy az ekvivalenciaelv minden gravitációelmélet alapja, kísérleti ellenőrzése többféle méretskálán is lényeges. A megnövelt érzékenységű Eötvös-ingával elvégezhetőek a Föld forgását, illetve Nap körüli keringését kihasználó klasszikus gyenge ekvivalenciaelv-mérések többféle anyagpárral. Például a Földnek a Nap körüli keringésére alapozott mérés eredményét szemlélteti a 9. ábra. A Föld tengely körüli forgása miatt 12 óránként ellentétes irányba fordul az a centrifugális erő, amely a Föld Nap körüli keringése miatt hat az inga két tömegére. Amennyiben a két tesztömege a tehetetlen és súlyos tömeg aránya nem ugyanakkora, akkor ez egy szabályos szinuszos változást eredményez az inga egyensúlyi helyzetében. Az ábrán arany-arany tömegpár esetén mutatjuk



9. ábra. A Föld–Nap-típusú ekvivalenciaelv-mérés érzékenysége. Arany-arany tömegpárra az inga egyensúlyi helyzetének változását mutatja 1 nap alatt. A napi ingadozás a környezeti hatások eredménye

egy napi mérés eredményét. A függőleges tengelyen a skálaegységekben az egyensúlyi helyzet látható, a vízszintes tengelyen az efemerisz idő. Az EPF-kísérletben a leolvasási pontosság $\pm 0,3$ skálaegység volt a függőleges tengely skálaegységeiben. Összevetve az ábrával ezt a számot láthatjuk, hogy a mérésünk leolvasási pontossága meghaladja ezt. Az ábra a mérés leolvasási pontosságát, illetve hibáját szemlélteti, hiszen a két teszttömeg ugyanolyan anyagú. Gradienskorrigált arany-réz, arany-alumínium tömegpárookra kapott értékekből az előzetes ekvivalenciaelv-mérésünk becsült szórása a légnyomás hatásának korrekciója nélkül $0,2 \cdot 10^{-9}$. A Föld–Föld mérés sokkal erősebb jelet ad, de technikailag bonyolultabb, mert az ingát kell forgatni.³

Amikor Eötvös Loránd elkezdte kísérleti gravitációs kutatásait, akkor az elméleti célok mellett a geofizikai lehetőségek motiválták. A közel 30 év alatt kifejlesztett célműszer a korabeli, leutánozhatatlan csúcstechnológiai fejlesztés eredménye, sokezerszeresen megtérítette a befektetett kutatási támogatást: a magyar műszeripar fellegvárának, a hajdani Magyar Optikai Műveknek a finommechanikai tudásbázisát Eötvös Loránd és Süss Nándor együttműködése alapozta meg. Az elméletvezérelt cél a híres EPF-mérés volt, amely a tudományos és technológiai kérdések együttes átlátásának következménye. Ezután a bőséges támogatás segítségével elhivatott munkatársai fejlesztettek a laboratóriumi Eötvös-ingából helyszíni geofizikai kutatásokra alkalmas eszközt. Robert Dicke-et kísérleti gravitációs csoportjának megalakítására szintén tudományos kérdések motiválták: az Einstein-elmélet kiterjesztése, illetve annak ellenőrzése volt a célja. Ezt az általa kidolgozott új mérés technikai módszerek tették lehetővé, többek között a lock-in erősítő, amely zajos környe-

zetből képes kis jelet kivonni. Dicke ezután haláláig a gravitáció elméleti-kísérleti kutatásával foglalkozott, többek között a Fischbach-csoport által felvetett ötödik erőre és az EPF-kísérlet szisztematikus hibájának megértésére is voltak ötletei.

Mint a fentiekben láttuk, a modern gravitációelméletekből a nagyon gyenge terekre számíthatóak ki az eltérések a newtoni elmélettől, sértve az erős ekvivalenciaelvet. Azonban az öngravitációs korrekciók csak igen kiterjedt objektumok esetén mérhetőek, mert a gravitációs energia tehetetlenséget módosító járuléka normál anyagokra meglehetősen kicsi (a Föld esetén $4,6 \cdot 10^{-8}$ -szorosa a tömegének). A termodinamikai gravitációelméletek másféle korrekciókat tartalmaznak. Vajon lehet-e mérhető hatásuk földi körülmények között? Nem tudjuk, valószínűleg nem lehet. De ez csak egyik kérdése a kísérleti és elméleti gravitációkutatásnak.

Hivatkozások

1. v. Eötvös R., Pekár D., Fekete E.: Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen der Physik* 373(9) (1922) 11–66.
2. Fischbach E., Krause D. E.: The Eötvös paradox: The enduring significance of Eötvös' most famous experiment. *O39(9)* (2019). arXiv:1901.11163, magyarul: *Eötvös Loránd emlékalbum*, ELTE, 2019.
3. Tóth Gy.: Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalenciamérések szabályos hibája. *Fizikai szemle* 69(5) (2019) 155–158.
4. Tino G. M., Cacciapuoti L., Capozziello S., Lambiase G., Sorrentino F.: Precision gravity tests and the Einstein equivalence principle. *Progress in Particle and Nuclear Physics* 112 (2020) 103772.
5. Will C. M.: The confrontation between general relativity and experiment. *Living Reviews in Relativity* 17 (2014) 1–117.
6. Chen Y.-J., Tham W. K., Krause D. E., López D., Fischbach E., Decca R. S.: Stronger limits on hypothetical Yukawa interactions in the 30–8000 nm range. *Phys. Rev. Lett.* 116 (2016, Jun.) 221102.
7. Adelberger E. G., Gundlach J. H., Heckel B. R., Hoedl S., Schlamminger S.: Torsion balance experiments: A low-energy frontier of particle physics. *Progress in Particle and Nuclear Physics* 62(1) (2009) 102–134.
8. Aldama M. E.: The gravity apple tree. *Journal of Physics: Conference Series*, 600(1) (2015) 012050.
9. Bertone G., Tait T. M. P.: A new era in the search for dark matter. *Nature* 562(7725) (2018, Oct.) 51–56.
10. Jacobson T.: Thermodynamics of spacetime: The Einstein equation of state. *Physical Review Letters* 75 (1995) 1260–1263.
11. Panek R.: *Mi a baj a gravitációval?* Scolar Kiadó, 2020.
12. Ván P., Abe S.: Emergence of modified Newtonian gravity from thermodynamics. *Physica A* 588 (2022) 126505. (arXiv:1912.00252)
13. Völgyesi L., Tóth Gy., Szondy Gy., Kiss B., Fenyvesi E., Kovács P., Barnaföldi G. G., Égető Cs., Lévai P., Imre E., Pszota M., Ván P.: Report on a pre-earthquake signal detection by enhanced Eötvös torsion balance. (2022). arXiv:2202.09607
14. Völgyesi L., Szondy Gy., Tóth Gy., Fenyvesi E., Kovács P., Kiss B., Égető Cs., Barnaföldi G. G., Lévai P., Ván P.: Eötvös-ingák felújítása és továbbfejlesztése, jel-zaj viszonyainak elemzése. *Fizikai Szemle* 73(4) (2023) 416–422. (ebben a számban).

³Eötvös a Nap terében is forgatásos (differenciális) mérést végzett, mert így a zavarjelek ellenkező előjellel jelennek meg a mérésben, így kiejthetők.

EÖTVÖS-INGÁK FELÚJÍTÁSA ÉS TOVÁBBFEJLESZTÉSE, JEL-ZAJ VISZONYAIK ELEMZÉSE

Völgyesi Lajos¹, Szondy György¹, Tóth Gyula¹, Fenyvesi Edit², Kovács Péter², Kiss Bálint³, Égető Csaba¹, Barnaföldi Gergely Gábor², Lévai Péter², Ván Péter^{2,4}

¹ BME, Építőmérnöki Kar, Általános- és Felsőgeodézia Tanszék,

² HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont,

³ BME, Irányítástechnika és Informatika Tanszék,

⁴ BME, Gépészmérnöki Kar, Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszék,

Napjainkban több okból vált újra időszerűvé az Eötvös-ingák használata. Jelenleg a geoid finomszerkezetének meghatározásában [1], korábban olaj- és földgázlelőhelyek felkutatásában, valamint a fizikában a súlyos és a tehetetlen tömeg azonosságának igazolásában volt és van nagy jelentőségük [2]. Az ekvivalenciaelv modern kori méréseiről több áttekintő jellegű publikáció is elérhető, pl. az Eöt-Wash csoport egyik ilyen írása [3]. A 115 évvel ezelőtti Eötvös Loránd, Pekár Dezső és Fekete Jenő nevéhez fűződő ekvivalenciakísérlet eredményei kapcsán merült fel az 1980-as években egy rövid hatótávolságú ötödik erő létezése, melynek igazolása vagy cáfolata a mostani feladatunk – végső soron – ez keltette életre a jelen kutatásainkat. Az Eötvös-inga a fizikában a mai napig az egyik leghitelesebb nagy pontosságú mérőeszköz, ráadásul a jelenlegi technikai lehetőségek alkalmazásával lehetőségünk adódott a korábbi leolvasási pontosság két nagyságrenddel történő további növelésére. Ez a pontosságnövekedés időközben olyan érdekes jelenségek megfigyelését is lehetővé tette, mint pl. az ingák földrengéseket megelőző viselkedése, vagy a légköri frontok átvonulása által okozott földkéreg-deformációk

gravitációs hatásának vizsgálata. A méréshez szükséges komplex mérő-adatgyűjtő rendszer felépítése a kutatócsoport számára rengeteg tudás és tapasztalat felhalmozását jelentette a precíziós mérőrendszerek felépítése és üzemeltetése, valamint a zavaró hatások azonosítása, kiszűrése és kompenzálása terén. A méréseket jelenleg a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont föld alatti laboratóriumában, 30 m-es mélységben végezzük egy általunk felújított, modernizált és automatizált Pekár-ingával. Emellett további három Auterbal-inga felújítását és továbbfejlesztését fejeztük be, amelyekkel jelenleg tesztmérések folynak. Az alábbiakban ezekről a tapasztalatainkról számolunk be.



Völgyesi Lajos geofizikus, az MTA levelező tagja. A BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének professor emeritusa. Főbb kutatási területei a fizikai, csillagászati és matematikai geodézia, a Föld forgása és nehézségi erőterének mérése és vizsgálata, az Eötvös-inga továbbfejlesztése és alkalmazási lehetőségei. Akadémiai Díjas, számos hazai és nemzetközi tudományos bizottság elnöke és tagja.



Szondy György okleveles villamosmérnök, fizikatanár, információ-biztonsági szakmérnök. Elsősorban informatikai rendszerek fejlesztésével foglalkozik. Jelenleg a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékének doktorandusza. Aktívan foglalkozik a gravitáció fundamentális, elméleti és gyakorlati kérdéseivel és a relativitáselmélettel. 2006-óta az Egyesület a Tudomány és Technológia Egységéért (ETTE) társalapítója és elnökségi tagja.



Tóth Gyula egyetemi docens, a műszaki tudomány kandidátusa, földmérőmérnöki szakon végzett 1985-ben. Azóta a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén oktat és kutat. Kutatási területe a fizikai és matematikai geodézia, azon belül a Föld matematikai alakjának, a geoidnak a meghatározása. Ez irányú kutatásaiért 2011-ben Akadémiai Díjban részesült.



Fenyvesi Edit fizikus, PhD, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont tudományos munkatársa, a Nehézion-fizikai Kutatócsoport tagja. Kutatási témái: a gravitációshullám-detektorok infrahangzaj hátterének vizsgálata és alacsony háttérű gamma-spektrometriai mérések.



Kovács Péter geofizikus, PhD, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske és Magfizikai Intézete Úrfizikai és Űrtechnikai Osztályának tudományos főmunkatársa. Kutatási területe a geomágneses tér és a Föld körüli elektromágneses környezet dinamikájának vizsgálata.

1. A jelenleg rendelkezésre álló torziós ingák

Napjainkban Eötvös torziós ingái közül már csak néhány terepi mérésekre készített műszer hozzáférhető és tehető működőképessé. A terepi mérések céljára kifejlesztett három legfontosabb műszer az Eötvös–Pekár-féle, az Eötvös–Rybár-féle Auterbal- (*Automatic Eötvös–Rybár Balance*), és az ötvenes években gyártott E54 inga. Az 1. ábra bal oldalán látható Eötvös–Pekár-inga fejlesztése esetében Pekár Dezső a méretek és a lengésidő csökkentésére és a műszerek egyszerűségének megőrzésére helyezte a fő hangsúlyt, ezért végül megmaradt a manuális forgatás, valamint a pontosabb és megbízhatóbb vizuális leolvasás mellett. A Pekár által fejlesztett ingák Eötvös–Pekár-ingaként ismertek, de a hivatalos típusjelzésük Small original Eötvös G–2 volt [4]. Ezt az ingát három változatban gyártották, amelyek alapvetően csak a torziós szál hosszában különböztek egymástól. Az 1926-ban gyártott műszerekben a szál hossza még 50 cm, az 1928-as típusú készülékekben 40 cm, az 1930-tól gyártott ingákban pedig már csak 30 cm volt.

Az 1. ábra középső részén látható Eötvös–Rybár- (Auterbal-) ingát az 1920-as években fejlesztették ki



1. ábra. Az Eötvös–Pekár-, az Auterbal- és az E54 ingák

Rybár István, Eötvös későbbi utóda vezetésével a Pázmány Péter Tudományegyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén. A korábbi ingákhoz képest az azimutonkénti 40 percre csökkentett észlelési idő mellett a legjelentősebb fejlesztés a műszer automatikus forgatásának rugós óraszerkezettel történő megoldása és a műszer leolvasási értékeinek fotografikus rögzítése volt [4]. Bár az automatikus leolvasás lehetővé tette az inga felügyelet nélküli működését, a kényes óraszerkezet gyakori meghibásodásai miatt a műszer mégis folyamatos felügyeletet igényelt.

Az 1. ábra jobb oldalán látható E54, majd később az E60 ingát az 1950-es években fejlesztették ki alapvetően szénhidrogének kutatására: ezek döntő részben exportra készültek. A cél a minél rövidebb csillapodási idő elérése volt, részben az érzékenység rovására.



Kiss Bálint okleveles villamosmérnök, PhD, egyetemi docens, a BME Irányítástechnika és Informatika Tanszék vezetője. Kutatási területe a robotika és mechatronikai rendszerek irányítása.



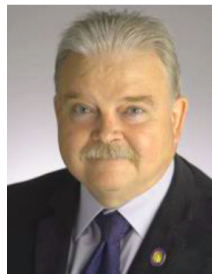
Égető Csaba okleveles földmérő és térinformatikai mérnök, PhD, adjunktus a BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszékén. Kutatási témája a szélsőpontosságú geodéziai mérések tervezése és alkalmazása.



Barnaföldi Gergely Gábor fizikus, PhD, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Nehézionfizikai Kutatócsoportjának vezetője. Kutatási témái: nagyenergiás nehézion-fizika, kompakt csillagok vizsgálata, az erősen kölcsönható anyag szerkezete.

2. Eötvös-ingák javítása, felújítása

A jelenleg rendelkezésünkre álló ingák közül egy Eötvös–Pekár-ingát 2017-ben az ekvivalenciamérések céljára kaptuk kölcsön az akkori soproni Geodéziai és Geofizikai Intézettől. Előtte a műszer mintegy 40–50



Lévai Péter fizikus, az MTA rendes tagja, kutatóprofesszor, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont főigazgatója. Kutatási témái: nagyenergiás nehézion-fizika, fundamentális kölcsönhatások, kutatási infrastruktúrák fejlesztése és fenntartása.



Ván Péter fizikus, az MTA doktora, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske és Magfizikai Intézete Elméleti Fizikai Osztályának és a BME Gépészmérnöki Kar Energetikai Gépek és Rendszerek Tanszékének tudományos tanácsadója. Kutatási területe a nem egyensúlyi termodinamika, illetve az Eötvös-inga kutatása által motiváltan a gravitáció termodinamikai elmélete.

évig pihent az intézet raktárában, így sérülésmentes, de használhatatlan állapotban jutottunk hozzá. Emiatt jelentős felújításra szorult, főként az alumínium alkatrészek korróziója, a csapágyak szorulása, a libellák letapadása és más hasonló problémák miatt.

A Műgyetem Auterbal-ingája évtizedekig csupán hibás, használhatatlan muzeális leltári tárgyként szerepelt a tanszék nyilvántartásában. 2004 tavaszán vizsgáltuk meg, hogy egyáltalán lehetséges-e a megjavítása. Mivel a torziós szálak a műszerben voltak, elvileg lehetségesnek tűnt a javítás. A vezérlőszerkezet felújítása és átalakítása, valamint két törött alkatrész pótlása után sikerült a műszert működőképes állapotba hozni. A felújítást követő tesztmérések során viszont kiderült, hogy az egyik torziós szál felfüggesztésével is gond van. Hosszú kísérletezések után, speciális rögzítő anyag alkalmazásával sikerült egy új, megbízható módszert kialakítani a torziós szálak rögzítésére, így végül az ingát sikerült teljesen használható állapotba hozni [5].

2019-ben, az Eötvös-centenárium évében lehetőség adódott további két Auterbal-inga javítására, illetve felújítására. Mindkét inga használhatatlan állapotban volt, az egyik a hiányzó és törött alkatrészével első rátekintésre javíthatatlannak tűnt, és a torziós szálakat is pótolni kellett. Ráadásul ez valamikor átesett egy szakszerűtlen javításon is, ami nagy károkat okozott a különböző szerkezeti elemeiben. A másik inga optikai rendszere volt alkalmatlan a mérésekre. Az ingákat teljesen szét kellett szedni, a szereléshez célszerszámokat kellett készíteni, csapágyakat kellett cserélni, új alkatrészeket kellett tervezni és pótolni. A legnehezebb feladat a forgatórugó ki- és visszaszerelése, majd be szabályozása volt [6]. A két inga felújítása több mint másfél évet vett igénybe, viszont ma már mindkét ingának a mechanikája kiválóan működik (2. ábra).



2. ábra. Auterbal-ingák a BME Általános, és Felsőgeodézia Tanszékének gravitációs laboratóriumában

Az Eötvös-ingák egyedi műszerek, egyedi paraméterekkel. A paraméterek ismerete nélkül nem ér-

telmezhetőek a műszerekkel végzett mérések. Sajnos a felújított ingák közül egyedül a BME Auterbal-ingájának a gépkönyve állt rendelkezésre, és csak ennek a műszernek ismertük az ingaparamétereit. A Pekár-inga paramétereit magunk határoztuk meg, a többi műszer paramétereinek meghatározása folyamatban van.

A torziós állandókat és a tehetetlenségi nyomatékokat az ingák lengésidejéből és különböző henger alakú kalibráló tömegek alkalmazásával határoztuk meg, a felfüggesztő szálak hosszának mérésére speciális céleszközt készítettünk, a tömegek mérésére mg pontoságú mérleget használtunk.

Vizsgáltuk és vizsgáljuk a műszerek ismétlési pontosságát és az egyes műszereken belüli két antiparallel inga által mért gradiensek eltéréseit. A kalibráló, összehasonlító méréseket az Általános- és Felsőgeodézia Tanszéken található Oltay-féle gravitációs alapponton végeztük és végezzük.

3. Az Eötvös-ingák továbbfejlesztése

A mérések legjelentősebb és legveszélyesebb hibaforrása a műszert kezelő és leolvasó személy jelenléte, elsősorban a tömeghatása [7]. Az észlelő személy a jelenlétével a hőmérsékleti egyensúlyt is megzavarja, és lépteivel zavaró talajrezgéseket kelt, sőt bizonyos mérési pontokban a talaj rugalmassága miatt a műszer parányi megdőlését is okozza. Ezek a hibaforrások a közvetlen emberi jelenlét kiküszöbölésével, a mérési folyamat teljes automatizálásával, távvezérelt méréssel szüntethetőek meg. Ennek megfelelően a vizuális leolvasást megfelelő CCD érzékelők alkalmazásával, digitális műszerleolvasással váltottuk fel, az ingák különböző mérési azimutokba állítását pedig távvezérelt forgatómechanika alkalmazásával oldottuk meg [6, 8, 9].

Az automatikus leolvasás megvalósítása céljából az egyes ingákon több különböző típusú, érzékenységgű és sebességű CCD érzékelőt próbáltunk ki és alkalmaztunk; a skálák megvilágítására pedig erős fényű LED-eket (fénykibocsátó diódákat) használtunk. Megfelelő felbontású CCD érzékelőket alkalmazva az elektronikusan rögzített képeken a kinagyított skálaosztások közötti távolság 25–30 képpont, így az általunk készített képkiértékelési eljárással egy skálaosztás tört részének megfelelő helyzet is meghatározható. Ezzel az elérhető leolvasási pontosságunk egy képből nagyjából néhány ezred skálaosztás (10^{-11}), amely nagyjából két nagyságrenddel jobb, mint Eötvösék eredeti vizuális észlelésének becsült 10^{-9} [6, 8, 9], illetve valamivel jobb, mint a Robert Dicke és a princetoni csoport mérésének $3 \cdot 10^{-11}$ -es érzékenysége [16].

A mérési folyamat teljes automatizálásának másik fontos eleme az ingák különböző mérési azimutokba állítása távvezérelt forgatással.

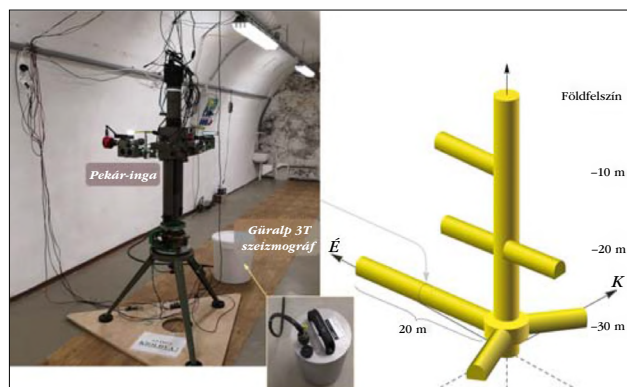
A forgatómechanikának fontos követelményeket kell kielégíteni. A forgatások közötti nyugalmi helyzetben, a mérések közben, nem keletkezhetnek a forgatómotor és az ahhoz kapcsolódó szerkezetek által okozott permanens mágneses zavarok. A motor vezérlését úgy kellett megoldani, hogy az inga tetszőleges azimutokba forgatása szögmásodperc pontossággal, üzembiztosan, ugyanakkor hirtelen gyorsulások és lassulások nélkül, a rendkívül érzékeny ingaszerkezet szempontjából kíméletesen, körültekintően definiált sebességprofilot követve történjen. A forgatás során a megfelelően lassú, egyenletes indulás és fokozatos megállás az inga lengésének csillapodását is kedvezően befolyásolja, rövidítheti a csillapodáshoz szükséges időt [6, 8, 9].

Az inga különböző mérési azimutokba történő automatikus forgatásához speciális szerkezetet építettünk, a mágneses hatások kiküszöbölése miatt legtöbb alkatrészt 3D nyomtatással készítettük [6, 9].

A távvezérelt forgatás legfontosabb eleme az inga tengelyére rögzített kör alakú, pozíciómeghatározásra és mozgásvezérlésre használható Renishaw-kódgyűrű, amely abszolút skálával rendelkezik, és a hozzá tartozó optikai olvasófej segítségével az inga pozíciója (azimutja) szögmásodperc pontossággal beállítható és kiolvasható. Az eredeti Eötvös-kísérletek során az azimutmeghatározás mágnesűvel történt, így a beállítás pontossága mindössze fok nagyságrendű, de legjobb esetben néhány tized fok lehetett [9].

4. Jelenlegi mérések

2017-ben elhatároztuk, hogy Eötvös Loránd halálának 100. évfordulója tiszteletére megismételjük az Eötvös–Pekár–Fekete- (EPF-) kísérletet (más néven az ekvivalenciaelv-méréseket) [10, 11], amelyek Einstein gravitációelméletének legfontosabb kísérleti alapját képezik. Különös motivációt adott a kísérlet megismételése, hogy az egykori mérések leírásait tanulmányozva lehetséges magyarázatot találtunk a méréseket terhelő szabályos hibaforrásra [12]. Az eredeti EPF-kísérletet az



3. ábra. EPF-mérés Eötvös–Pekár-ingával a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánosy Földalatti Kutatólaboratóriumában

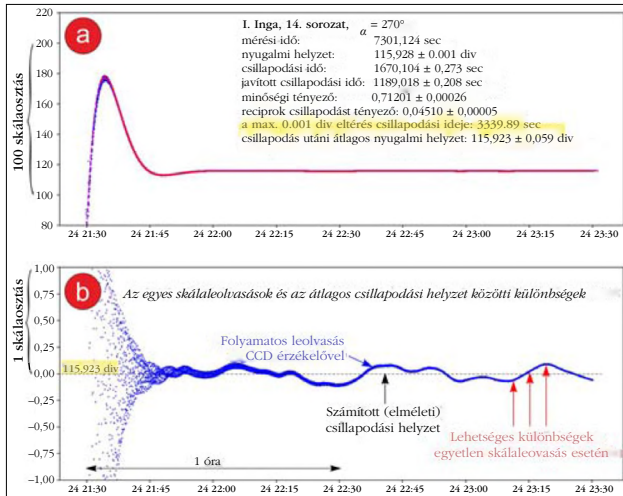
ún. kettős nagyesszközzel [4] végezték. Ehhez az újabb műszerek közül teljesítőképességében az Eötvös–Pekár-inga áll a legközelebb, és megfelelő átalakításokkal ezt az ingát alkalmazhatóvá tudtuk tenni az ekvivalencia-mérésekre. A mérések jelenleg is folyamatban vannak a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánosy Földalatti Kutatólaboratóriumában (3. ábra).

Időközben a jelentősen megnövelt leolvasási pontosság mellett a méréseinkben megjelentek a különböző földrengések által okozott zavaró hullámok is. Ezek az EPF-méréseink szempontjából mérési zajként jelentkeztek. A 2022. év elején azonban jelentős fordulat következett be, ugyanis a 2022. január 9-i görögországi florinai rengés kipattanása előtt olyan, eddig ismeretlen furcsa előjeleket rögzítettünk az ingával, amelyet egyetlen szeizmológiai obszervatórium műszerei sem rögzítettek, és a torziós ingánk közvetlen szomszédságában működő szeizmográf regisztrátumain sem voltak láthatók [13, 14]. Mindez újabb fontos irányt adott az Eötvös-ingával végzett kutatásainkban. A most felújított három Auterbal-ingával elsősorban a földrengéseket és az ezeket megelőző esetleges előjeleket tervezzük tanulmányozni, és arra próbálunk választ keresni, hogy torziós ingákkal lehetséges-e bizonyos földrengések előrejelzése.

5. A torziósinga-méréseket zavaró jelenségek

Korábban a hagyományos Eötvös-ingával végzett mérések úgy történtek, hogy az inga kioldása vagy elforgatása után a csillapodási idő elteltével az észlelő óvatosan megközelítette a műszert, majd egyszeri vizuális leolvasással, a skálaosztások közötti érték becsülésével megállapította és jegyzőkönyvbe rögzítette a leolvasott skálaértéket. Amennyiben a skálaosztások közötti értéket helyesen becsültük meg, a számítható gradiensek pontossága 10^{-9} s^{-2} , azaz 1 E (1 eötvös). Ehhez képest a CCD érzékelővel ellátott műszereken, digitális leolvasással több mint két nagyságrenddel növelhető a leolvasási pontosság. Ebben az esetben rendkívül fontos, hogy nemcsak az inga csillapodott állapotában készítsünk egyetlen skálaleolvasást, hanem hosszabb időn keresztül, másodpercenkénti leolvasást végezve, a csillapodási görbe alakjából határozzuk meg az ingakar átlagos nyugalmi helyzetét (példaként lásd a 4. ábrát).

Az új, jóval pontosabb leolvasási technika alkalmazásával azt tapasztaljuk, hogy a torziós inga a csillapodási idő letelte után sem lesz soha tartósan nyugodt, mozdulatlan egyensúlyi állapotban (lásd a 4. ábra alsó részét). Ennek több különböző oka lehet, amelyek azonosítása, szétválasztása és hatásuk kompenzálása kutatásaink egyik legnagyobb kihívása. A zavaró hatások elkülönítésére és kompenzálására vonatkozóan többek

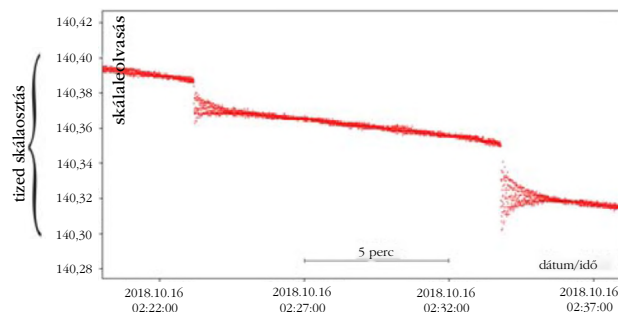


4. ábra. Az Eötvös–Pekár-inga elméleti és valódi nagyított csillapodási görbéje. Az (a) felső ábra egy teljes csillapodási görbét, míg a (b) alsó, nagyított ábra az illesztett görbe, és a tényleges leolvasások eltéréseit mutatja

között egy most induló doktori kutatási téma keretében kerül sor.

A 4b. ábra jobb felén láthatjuk, hogy a korábbi egyetlen vizuális leolvasás alapján miért nincs esélyünk a tényleges nyugalmi helyzet pontos megállapítására. Attól függően, hogy néhány perc különbséggel éppen mely időpontban olvassuk le a skálát, más-más értéket kapunk [5].

A csillapodás folyamatos rögzítésével a csillapodási idő letelte után időnként furcsa jelenségekre lehetünk figyelmesek, a görbéken időnként hirtelen változások tapasztalhatók. Ezek a változások a torziós szálak hosszabb idejű terheletlen állapota után jelentkeznek, az ingaszerkezet kioldását (*dezarretálását*) követő órákban illetve napokban. Ilyen változásokat láthatunk az 5. ábrán, amelyen egyébként ideális, driftmentes esetben, jóval a csillapodási idő letelte után vízszintes egyenes vonalat kellene látnunk. Ezzel szemben a leolvasási értékek monoton csökkenése a torziós szál lassú elcsavarodását, a csavarodási driftet mutatja, a hirtelen ugrások és az ezeket követő gyorsan lecsengő tranzien hullámok pedig a torziós szálon belüli apró „csavarodási szakadásokra”, a szilárdtestfizikában jól ismert diszlokációkra utalnak [5].



5 ábra. Csavarodási drift és diszlokációk a torziós szálan

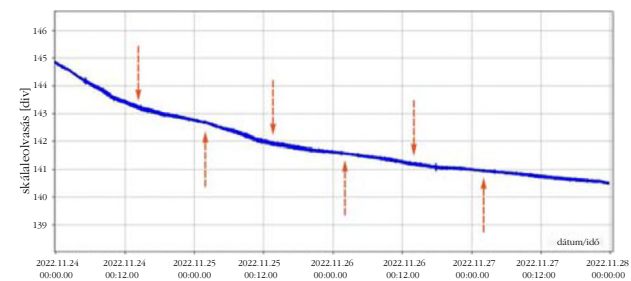
Érdeemes megemlíteni, hogy ezt a jelenséget aktívan kutatja Groma István, Ispánovity Péter Dusán és csoportjuk az ELTE-n. A méréseikkel kimutatták, hogy a Zn egykristály mikrooszlopokban a diszlokációlavinák által okozott akusztikus emisszió-jelek statisztikus tulajdonságai analógiában állnak a földrengéseknél megfigyelt viselkedéssel. Ennek megfelelően kísérleti eljárást dolgoztak ki mikrooszlopokban lejátszó diszlokációlavinák detektálására és kvantifikálására [17].

Megfigyeltük, hogy ezek a változások a torziós szálakat érintő „sokkhatások” következményei, amelyek annál nagyobbak és időben hosszabb ideig tartanak, minél hosszabb ideig pihen az inga a mérések előtt rögzített (*arretált*) állapotban. Több napig arretált állapotban lévő szálak újratelhelését követően minimum egy, de inkább két nap szükséges ahhoz, hogy a szálak közel driftmentesek legyenek, de több éven keresztül tárolt ingák esetében a szálak közel driftmentes állapotának eléréséhez több hétig, esetleg hónapig is várni kell, hogy a terhelt torziós szálak megszabaduljanak a drifttől és alkalmasak legyenek a nagy pontosságú mérésekre. Tapasztalatunk szerint az ingaszerkezet forgatása nem okoz számottevő sokkhatást a torziós szálakra.

Szerencsére az Eötvös-, valamint az Eöt-Wash csoport által alkalmazott forgatásos (differenciális) módszer használatával mind a szál driftjének hatása, mind pedig a Dicke- és Braginskii-csapat mérését befolyásoló, 24 órás periódusú szisztematikus hibaforrások (hőmérséklet, vibráció stb.) kiszűrhetők [3].

Fontos kérdés, milyen további zavarok okozzák, hogy az ingák hosszú idő után sem tudnak teljesen csillapodott állapotba jutni. Ez a kérdés az 1964-es Dicke-mérés esetén is megválaszolatlanul maradt, ahol a problémát a kompenzáló erő folyamatos növelésével (driftkompenzátor) igyekeztek kezelni [16].

A tapasztalataink szerint a méréseinket leginkább a mikroszeizmikus talajnyugtalanág és a már említett földrengések zavarják. Megfelelő mérési helyszínt választva a „technogén” zaj (elsősorban a forgalom által okozott talajrengések) csökkenthető, viszont a földrengések, a Föld szabadrengései, az óceánok, tengerek partí hullámveréseinek zaja állandóan jelen vannak. Ezek kiszűrése céljából az ingánk mellett egy Güralp



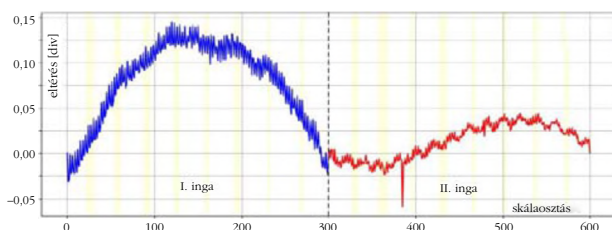
6 ábra. Csavarodási drift 24 órás ciklusú változása a frissen felújított Aulerbal-ingán

3T szeizmográfval folyamatosan regisztráljuk a különböző szeizmikus eseményeket, talajrezgéseket és földrengéseket, illetve előzetes méréseink alapján (lásd 6. ábra) fontosnak látjuk vizsgálni a driftszeizmikus zaj függését, ami egyúttal a korábbi Dicke-méréssel kapcsolatosan az Eöt-Wash csoport által megfogalmazott fenntartásokat is alátámaszthatja [3, 16].

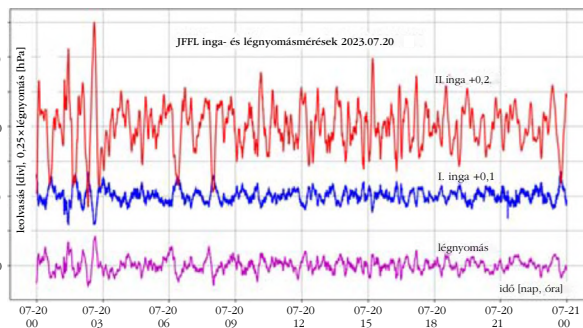
A megnövelt leolvasási pontosság mellett már nem elhanyagolhatóak a műszer skálájának gyártási hibái, pontatlanságai sem, valamint a leolvasás során megváltozó különböző optikai paraméterek, mint pl. az optikai úthossz és a leolvasási szög változása. A kívánt tényleges leolvasási pontosságot csak ezeknek a tényezőknek a meghatározásával és figyelembevételével tudjuk elérni. A 7. ábrán a Pekár-inga skálakalibrációja során mért eltérések láthatók. A 0–300 közötti skálaosztások az I. inga, a 300–600 közötti skálaosztások az II. inga skálájának osztáshibáit mutatják.

Az új, nagyobb leolvasási pontosság mellett jelentős zavaró hatással vannak az ingamérésekre a hőmérséklet- és légnyomásváltozások – különösen ezek infrahang-tartományába eső frekvencián változó összetevői. Ezért az EPF-méréseink helyszínén az inga közvetlen és távolabbi környezetében több pontban folyamatosan regisztráljuk a hőmérséklet-, légnyomás- és páratartalom-értékeket. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont Jánossy Földalatti Kutatási Laboratóriumában a hőmérséklet napi változása igen alacsonyan, akár századfok pontossággal tartható, azonban ezek a kis változások is zavarják a méréseinket, ezért hőmérsékleti korrekciót kell alkalmaznunk.

A méréseink szerint az Eötvös-inga különösen érzékenyen reagál a légnyomás néhányszor 10 perces rövid periódusú változásaira (ezt mutatja a 8. ábra). Látszik, hogy mindkét inga mozgása erősen függ a légnyomás változásától. Az ingakarok helyzetétől függően különböző mértékű pozitív vagy negatív korreláció tapasztalható, melynek mértéke $\pm 0,2 - 1$ osztás/hPa. Az ekvivalenciakísérlet szempontjából különösen fontos ennek a légnyomáscsökkentésének a lehetőség szerinti csökkentése, kiküszöbölése, illetve ha ez utóbbi nem lenne lehetséges, akkor a korrekcióba vétele. A kiküszöböléséhez ismerni kellene a zaj fizikai okát. Legvalószínűbb ok a légnyomásváltozásoknak a felszindülésen keresztüli becsatolódása. A felszindülések ugyanis finoman mozgatják az ingát, ami mozgás a torziós szálon keresztül átadódik az ingakarnak, és az ebből



7. ábra. A Pekár-inga skálakalibrációja során mért eltérések



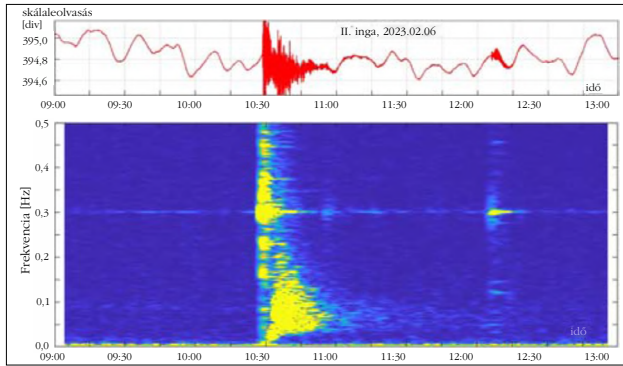
8. ábra. A légnyomásváltozás által okozott zaj a leolvasásokon

eredő, torziós szállhoz képest külpontos közegellenállási erő végeredményben változó nyomatékot fejt ki az ingára. A lassú periódusú szeizmométerek légnyomás okozta dőlészaja ehhez hasonló és jól ismert probléma a szeizmológusok körében [15]. A jelenség további vizsgálatához elkészült egy speciális „billegető” szerkezet, amellyel aktívan szimulálni tudjuk és várhatóan tisztázni lehet az előbb vázolt mechanizmust. Ettől függetlenül egy megfelelően méretezett adaptív szűrővel a légnyomáscsökkentés lényegesen csökkenthető lesz.

A 8. ábrán a Pekár-ingának a Jánossy Földalatti Kutatási Laboratóriumában (JFKL) 2023.07.20-án regisztrált leolvasásai és az ingán elhelyezett szenzorral mért légnyomásváltozások láthatók. Az ábra alsó részén a légnyomásváltozás görbéje látható, a középső részen az I. inga, az ábra felső részén a II. inga mozgása követhető nyomon. A lassú változásokat 1 órás mozgóátlag-szűrővel távolítottuk el a 10 másodperces időközökre interpolált adatokból. Az 1. inga mozgása erősebb pozitív, a 2. inga mozgása kisebb negatív korrelációt mutat a légnyomás változásaival.

Az inga működését jellemző zajok mértékét és ezek időbeli változását, valamint környezeti változókkal való kapcsolatát az ingajelek dinamikus spektrumai alapján folyamatosan vizsgáljuk. Példaként a 9. ábrán a II. inga 2023.02.06 09:00 és 13:00 UTC közötti szakaszának spektrogramját mutatjuk be, amelyet 512 mp hosszú és 500 mp időtartamon átlapolott Hanning-típusú analízisablak alkalmazásával képeztünk.

A spektrogramon kb. 0,3 Hz körüli frekvencián folyamatos periodikus jel látszik, amely az inga sajátrezgéséhez kapcsolódik ugyan, de – a másodperces mintavételből adódó időbeli átlapolódás (*temporal aliasing*) miatt – annak valódi frekvenciájánál kisebb frekvencián jelenik meg. A rendszer sajátfrekvenciája az inga geometriáját figyelembe vevő modellszámítások alapján a valóságban $\sim 0,7$ Hz. Az inga csillapodásához köthető, illetve a környezeti paraméterekkel összefüggő változások általában hosszú periódusúak, tehát a spektrogramok alsó tartományában vizsgálhatók. Ezzel szemben a közelben vagy nagy magnitúdóval kipattanó földrengések az ingákat széles frekvenciatartományban (+0–0,5 Hz) gerjeszthetik, ezért a spektrogramokon a rengéshullámok beérkezési



9. ábra. A II. inga 2023.02.06 09:00 és 13:00 UTC közötti időszakra számolt idősora (fent) és spektrogramja 512 s hosszú, 500 s hosszú átlapolt Hanning analízáló ablak használatával számolva (lent). A 0,3 Hz környékén látható folyamatos jel az inga sajátrezgésével áll összefüggésben (lásd a szövegben). 10:29 és 12:08 UTC időpontokban földrengés által okozott ingarezgés látható az inga idősorán és spektrogramján (lásd a szövegben)

időpontjában függőleges gerjesztési zóna jelenik meg (lásd 10:29 UTC a 9. ábra spektrogramján). Tapasztalatunk szerint azonban a távoli vagy kis magnitúdójú földrengések is érzékelhetőek, mert ilyenkor az inga sajátrezgésének amplitúdója megnő, és ez az átlapolt sajátfrekvencián energianövekedésként jelentkezik a spektrumokon (lásd 12:08 UTC a 9. ábra spektrogramján). Ennek alapján egy automatikus földrengés-detektáló algoritmust fejlesztettünk, amely akkor jelez, ha a két egymással szembe fordított inga sajátperióduson mért rezgésének amplitúdója bizonyos időtartamon belül egyszerre halad meg egy előre beállított szintet. Az algoritmus segítségével 2022 kezdetétől közel 2200 földrengést detektáltunk, amelyek eredetét a USGS földrengés-katalógusának (earthquake.usgs.gov) bejegyzéseivel tudjuk azonosítani. A 9. ábra spektrogramján felismerhető földrengések Törökországban patantak ki 2023. február 6-án $M = 7,6$ (10:29 UTC) és $M = 5,7$ (12:08 UTC) magnitúdóval.

Foglalkoztunk továbbá a környezet geológiai felépítésével is. A méréseket egy 30 m mélységben kialakított aknában, mészkőben elhelyezett vízáró, rendkívül szilárd „reaktorbeton” tömbben végezzük. Mérésekkel és modellszámításokkal is nagy felbontással meghatároztuk a mérési pont környezetében a horizontális és a görbületi gradienseket, nagy részletességgel felmértük a mágneses térerősség térbeli eloszlását, és Lippmann-féle dőlésmérővel hosszabb ideje figyeljük a parányi talajdőléseket, amelyek szintén befolyásolják az Eötvös-ingával végzett méréseket.

Műszereink legérzékenyebb része az Eötvös-ingák lelke, a pillanatnyilag pótolhatatlan torziós szál. Ennek

kiváltásához, új torziós szálak fejlesztéséhez száltesztelő berendezés fejlesztése van folyamatban.

Hivatkozások

- Völgyesi L.: Local geoid determinations based on gravity gradients. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 36/2 (2001) 153–162. DOI: 10.1556/AGeod.36.2001.2.3
- Wagner T. A., Schlamminger S., Gundlach J. H., Adelberger E. G.: Torsion-balance tests of the weak equivalence principle. *Class. Quantum Grav.* 29 (2012) 184002 and arXiv:1207.2442 (gr-qc)
- Ván P., Pszota M.: Ekvivalenciálméletek és gravitációelméletek. *Fizikai Szemle* 73/4 (2023) 405–415. (Lásd ebben a számban.)
- Szabó Z.: Az Eötvös-inga története. *Magyar Geofizika* 40/1 (1999) 26–38.
- Völgyesi L., Égető Cs., Laky S., Tóth Gy., Ultmann Z.: Eötvös-inga felújítása és tesztmérések a budapesti Mátyás-hegyi-barlangban. *Geomatikai Közlemények XII* (2009) 71–82.
- Völgyesi L., Tóth Gy., Szondy Gy., Kiss B., Fenyvesi E., Barnaföldi G., Égető Cs., Lévai P., Ván P.: Jelenlegi Eötvös-inga felújítások, fejlesztések és mérések. *Geomatikai Közlemények XXIV.* (2021) 129–139.
- Csapó G., Laky S., Égető Cs., Ultmann Z., Tóth Gy., Völgyesi L.: Test measurements by Eötvös-torsion balance and gravimeters. *Periodica Polytechnica Civil Eng.* 53/2 (2009) 75–80.
- Péter G., Deák L., Gróf Gy., Kiss B., Szondy Gy., Tóth Gy., Ván P., Völgyesi L.: Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalencia-elv mérések megismétlése. *Fizikai szemle* 69/4 (2019) 111–116.
- Völgyesi L., Szondy Gy., Tóth Gy., Péter G., Kiss B., Deák L., Égető Cs., Fenyvesi E., Gróf Gy., Ván P.: Előkészületek az Eötvös-kísérlet újramérésére. *Magyar Geofizika* 59/4 (2018) 165–179.
- Eötvös R., Pekár D., Fekete E.: Beiträge zum Gesetze der Proportionalität von Trägheit und Gravität. *Annalen d. Physik* (1922) 11–66.
- Bod L., Fischbach E., Marx Gy., Nárayné Ziegler M.: Az Eötvös-kísérlet száz éve. *Fizikai Szemle* 42/3 (1992) 94–101.
- Tóth Gy.: Az Eötvös–Pekár–Fekete ekvivalencia-mérések szabályos hibája. *Fizikai Szemle* 69/5 (2019) 155–158.
- Völgyesi L., Tóth Gy., Égető Cs., Szondy Gy., Kiss B., Barnaföldi G., Fenyvesi E., Lévai P., Kovács P., Imre E., Pszota M., Ván P.: A pre-earthquake signal detection by the Eötvös torsion balance (2023). In: Kaliakin V. N. et al.: Smart Geotechnics for Smart Societies: Proceedings of the 17th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (17th ARC, Astana, Kazakhstan, 14–18 August, 2023). DOI: 10.1201/9781003299127-112
- Völgyesi L., Tóth Gy., Szondy Gy., Kiss B., Fenyvesi E., Barnaföldi G., Égető Cs., Lévai P., Imre E., Pszota P., Ván P.: Report on a pre-earthquake signal detection by enhanced Eötvös torsion balance. arXiv:2202.09607
- Alejandro A. C. B., Ringler A. T., Wilson D. C., Anthony R. E., Moore S. V.: Towards understanding relationships between atmospheric pressure variations and long-period horizontal seismic data: a case study. *Geophysical Journal International* 223/1 (2020) 676–691. <https://doi.org/10.1093/gji/ggaa340>
- Roll P. G., Krotkov R., Dicke R. H.: The equivalence of inertial and passive gravitational mass. *Ann. Phys.* 26 (1964) 442–517.
- Ispanovity P. D., Ugi D., Péterffy G., Knapke M., Kalacska Sz., Tüzes D., Dankházi Z., Mathis K., Chmelik F., Groma I.: Dislocation avalanches are like earthquakes on the micron scale. *Nature Commun.* 13 (2022) 1975. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29044-7>

fizikaiszemle.elft.hu

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

AZ LK-99, A KÉRÉSZÉLETŰ SZUPRAVEZETŐ

Újfalussy Balázs – HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
Csire Gábor – Materials Center Leoben Forschung GmbH, Leoben, Austria

Van a fizikának néhány olyan területe, ahol a kutatók rendkívül lassan haladnak, és kívülről könnyen úgy tűnhet, nem is érdemes ezeket folytatni, pénzzel támogatni, de ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy megvalósulásuk esetén olyan mértékű változást hoznának az emberiség életébe, hogy mégsem lehet felhagyni velük. Ilyen terület például a fúziós energiatermelés és a szobahőmérsékletű szupravezetés. A *Fizikai Szemle* olvasói számára bizonyára ismeretes, hogy a szupravezető anyagok azzal a rendkívüli tulajdonsággal rendelkeznek, hogy ellenállás nélkül képesek vezetni az elektromos áramot. A szupravezetés jelenségét 1911-ben figyelte meg Heike Kamerlingh Onnes holland fizikus, amikor egy higanyvezetékét a -273 °C fokos abszolút nullához közeli, néhány kelvines hőmérsékletre hűtött. A jelenséget csak jóval később, a John Bardeen, Leon N. Cooper és John Robert Schrieffer által 1957-ben felállított BCS-elmélet magyarázta meg. Egészen 1986-ig a szupravezetést csak 30 K ($-243,15\text{ °C}$) alatt figyeltek meg – egyezésben azzal, hogy az elektron–fonon kölcsönhatás retardációját is figyelembevévő Eliasberg-egyenlet és az abból következő McMillan-formula szerint az átalakulási hőmérséklet nem lehet ennél magasabb. Ekkor azonban Georg Bednorz és Alex Müller azzal okozott meglepetést, hogy a lantán-bárium-réz-oxidban, egy réz-perovszkit kerámiaötvözetben 35 kelvin fokon szupravezetést tapasztaltak. A meginduló kutatások ezt elég gyorsan 90 , mára 135 kelvinre tornázták fel úgy, hogy ezen anyagok szupravezetésének mechanizmusáról a mai napig nincs konszenzus. Ez a hőmérséklet – bár szignifikánsan magasabb, mint a hagyományos szupravezetők átalakulási hőmérséklete – még mindig túl alacsony ahhoz, hogy laboratóriumon kívül is tömegesen hasznosítani tudjuk. A jelenleg legmagasabb ismert szupravezető egy lantán-hidrid vegyület, amely nagyjából 250 °K fokon (-23 °C) és 200 GPa nyomáson (a normál légköri nyomás kétszázszorosán) válik szupravezetővé.

Eme rövid bevezető után jobban érthető, hogy az idei nyár közepén egy váratlan és szenzációs tudományos bejelentés miatt hozta izgalomba a világ fizikusait. Július 22-én két publikáció jelent meg az arXiv felületen. (Az arXiv egy olyan webhely, ahova a kutatók publikációikat a neves folyóiratoknál megszokott, a megjelenést

megelőző hosszadalmas referálási folyamat előtt feltölthetik, így gyorsítva az eredmények megosztásának menetét.) Mindkét kéziratot a Sukbae Lee és Ji-Hoon Kim által vezetett kutatócsoport töltötte fel, amely ráadásul nem egy egyetemhez vagy egy kutatóközpontoz volt köthető, hanem egy dél-koreai startup cég, a Quantum Energy Research Centre keretén belül működött.

Mindkét kézirat fő állítása az volt, hogy szobahőmérsékleten, sőt, annál jóval magasabb, $127\text{ Celsius-} (!)$ fokon – és normál légköri nyomáson – szupravezető anyagot állítottak elő amelyet LK-99-nek neveztek el. A kéziratok ráadásul látszólag pontos leírással szolgáltak az anyag előállítását illetően, és pontosan dokumentálták azt a hőmérsékletet ($104,8\text{ °C}$), amelynél az ellenállás egy tízszeres ugráson ment keresztül $0,02$ ohmcentiméterről $0,002$ ohmcentiméterre.

A tudományos közösség rendkívül gyorsan reagált: augusztus végére nagy tisztaságú minták készültek, az arXiv-ra szinte naponta kerültek fel az új kéziratok, amelyekben pontosan megvizsgálták az anyag szerkezetét, vezetési és mágneses tulajdonságait, kiszámolták a sáv szerkezetét, továbbá felderítették a szennyezések szerepét is. Hamarosan kiderült, hogy az LK-99 nem szupravezető, és nagyjából abban is egyetértés alakult ki, hogy miért is tűnhetett kezdetben annak.

Az LK-99 egy összetett anyag, amelynek alapja egy ólom-foszfát-kristály, amelyben néhány ólomatomot rézre cserélnek. Hogy hány ólomatomot sikerül rézre cserélni, az nemcsak mintáról mintára változhat, hanem egy mintán belül is más és más lehet annak különböző részeiben. A kémiai képlete $\text{Pb}_{10-x}\text{Cu}_x(\text{PO}_4)_6\text{O}$, ahol x jelenti azt, hogy hány ólomatomot sikerült rézre cserélni. Az anyagot ráadásul polikristályos formában állították elő, ami azt jelenti, hogy a kristálytani iránytól függő mennyiségek vizsgálata során közvetlenül könnyen valamilyen kompozit viselkedését láthatjuk. Ráadásul a megadott előállítási folyamat tág teret adott a melléktermékek keletkezésének és az azzal való szennyeződésnek is.

Ez utóbbi kulcsfontosságúnak bizonyult. Amint azt Jain Prashant, az Illinois állam (USA) egyetemének professzora észrevette, az előállítás során melléktermékként nem is kevés réz-szulfid (Cu_2S) is keletkezik. Ez azért érdekes, mert a réz-szulfid éppen azon a hőmérsékleten megy át egy fázisátalakuláson egy

alacsony hőmérsékletű γ és egy magas hőmérsékletű β fázis között ($\sim 104^\circ\text{C}$), ahol az eredeti szerzők szupravezetést véltek észlelni. Jain professzor már régóta foglalkozott a réz-szulfid tulajdonságaival, így hamar rámutatott arra is, hogy a réz-szulfid a 104°C fokos átalakulás mindkét oldalán szilárd marad ugyan, de 104°C fok fölött az anyagban a Cu-atomok rendezetlensége megnő (mintha a réz alrács megolvadt volna, az S^{2-} alrács viszont nem), a β fázis szuperionossá válik, Cu^+ kationok rendezetlenül helyezkednek el a S^{2-} -rácsban. Ettől az anyag ionos vezetőképessége megnő. Az alacsony hőmérsékletű γ fázisban azonban a Cu-atomoknak kötött helyük van. Azonban a réz már kis mennyiségű levegővel érintkezve oxidálódik, ezzel rézatomokat távolítva el a réz-szulfid szerkezetből. Ez a reakció töltött, szabad „lyukakat” hagy hátra, amelyek jól vezetnek az elektromosságot. Emiatt a γ fázis elektromos vezetőképessége nagyságrendekkel nagyobb lesz, mint a β fázis ionos vezetőképessége, és így az anyag egy meglehetősen éles átmenetet követően jóval nagyobb vezetőképességet (kisebb ellenállást) mutat 104°C fok alatt, mint fölötté – pontosan úgy, ahogy a kísérletekben látták.

A rejtély megoldásának utolsó részlete a németországi Stuttgartból, a Max Planck Társaság Szilárdtestfizikai Kutatóintézetéből érkezett, ahol egy egészen más technológiával, ként tartalmazó reakció közbeiktatása nélkül állítottak elő LK-99-et, ráadásul egykristály formában (lásd 1. ábra). Így meg tudták vizsgálni az LK-99 tulajdonságait azok nélkül a komplikációk nélkül, amelyeket a polikristályos forma jelent, kizárták a réz-szulfid-képződést, és minimalizálhatták a minta más melléktermékekkel való szennyeződését is. Kiderült, hogy az LK-99 bármely hőmérsékleten szigetelő. Ezt ráadásul triviálisan bizonyítja az a tény is, hogy az LK-99 egykristályként egy áttetsző anyag, és – mint tudjuk – az áramot szabadon vezető fémek mindenféle

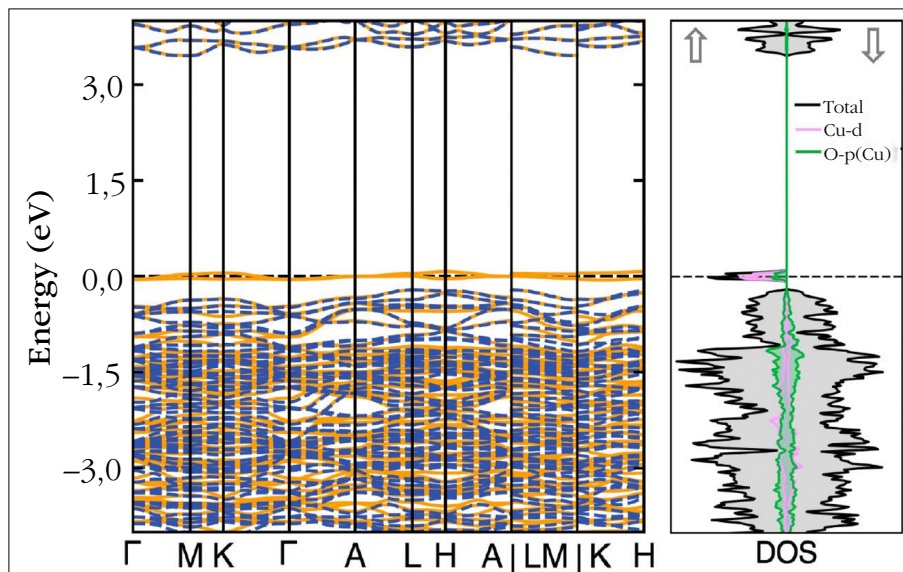
hullámhosszon elnyelik a fényt. Ennek következtében az ellenállás megfigyelt viselkedésének kialakulására Jain professzor elmélete maradt a legjobb lehetséges magyarázat: az LK-99 szigetelő, a vezetési jelenségek az előállítás során keletkező réz-szulfid-kontamináció fázisátalakulásait tükrözik.

A szupravezető állapotot nemcsak az ellenállás nélküli áramvezetés jellemzi, hanem az is, hogy a szupravezetőkbe nem hatol be a mágneses tér. Amennyiben egy mágnes fölé helyezik azt, lebegni fog (*levitáció*); a jelenséget Meissner-effektusnak nevezzük. A kezdeti kapkodásban minden csoport a lebegés jelenségének a bemutatásával (vagy hiányával) próbálta igazolni, hogy az általuk előállított anyagminta szupravezető-e vagy sem, és a közösségi médiát is elöntötték az ilyen jellegű képek és videók. A lebegés megfigyelése azonban több más okra vagy azok kombinációjára is visszavezethető. Az egyik ok, hogy mind az egykristály LK-99, mint pedig a réz-szulfid diamágneses anyag, és mint ilyen, képes lebegéssel reagálni a mágneses tér jelenlétére. A másik ilyen tényező, hogy a beépült réz koncentrációja folyamatosan változhat a mintán belül: van, ahol egyáltalán nem épül be réz, és van, ahol jóval nagyobb arányban sikerül ezt létrehozni; az átlag nagyjából $x = 1,2$ -re jön ki, de ez is függ az előállítás körülményeitől. Amennyiben nagyobb rézbeépülést sikerül elérni, az anyag mágnessé válik. Ez pedig további lehetőséget biztosít arra, hogy mágneses levitációt hozzunk létre. Egy másik kutatócsoport megmutatta, hogy mind a levitáló, mind pedig a nem levitáló minták egyaránt tartalmaztak diamágneses és mágneses foltokat, bár eltérő arányban.

A mágneses viselkedést több elméleti csoport is észrevette, köztük a szerzők is. Ezek az eredmények olyan számításokon alapultak, amelyekben az anyagi összetételt és az anyagszerkezetet a lehető legpontosabban, illesztési paraméterek nélkül igyekeznek figyelembe venni. Az eredmény az úgynevezett sáv szerkezet, amely abszolút nulla (0°K) hőmérsékleten leírja az anyagban az elektronállapotokat azok hullámszámainak függvényében. Ezt az összefüggést mind a hullámszámra, mind pedig a betöltött elektronállapotok energiáira összegezve megkapjuk a rendszerben lévő elektronok összszámát. Azt a maximális energiát pedig, ameddig az elektronállapotok be vannak töltve, Fermi-energiának nevezzük. E tudással felvértezve már értelmezni tudjuk az ábrán látható eredményeket. A vízszintes skálán láthatjuk a hullámszámvektor (amely egy háromdimenziós vektor) nagyságát a tér valamely speciális pontjai között (ezeket a jól meghatározott koordinátájú pontokat jelöljük az 2. ábrán betűkkel,



1. ábra. LK-99 egykristályok



2. ábra. Az LK-99 sávszerkezete az ólomatomok felének rézzel való helyettesítése után $\text{CuPb}_3(\text{PO}_4)_6\text{O}$

Γ , M, K stb). Látható, hogy éppen a betöltöttség határán, a Fermi-energián (ahová az energia nullpontját is eltoltuk) megjelenik egy keskeny sáv, amely a Cu-atomokhoz köthető. Ebből látszólag az a következtetés lenne kiolvasható, hogy az anyag vezető, ám az ilyen nagyon keskeny sávokba tartozó elektronok, amelyek Fermi-sebessége eleve nagyon kicsi, az elektronok közötti taszítás következtében gyakorlatilag lokalizálódnak, és így végül is szigetelőként viselkednek. Mint utóbb kiderült, az LK-99 esetében is erről van szó.

Azt is megfigyelhetjük, hogy a keskeny sávot csak egyféle, – ahogy mondani szoktuk – csak felfelé mutató spinű elektronállapotok alkotják. Ezek után nem meglepő, bár meglehetősen szokatlan eredmény, hogy a rézatomok elég nagy, nagyjából $1 \mu_B$ mágneses momentummal rendelkeznek (normál vas esetén ez $2,2 \mu_B$). Az LK-99 ezen tulajdonsága akkor is figyelemre méltó, ha a szupravezetésre vonatkozó állítások végül elhamarkodottnak bizonyultak. Jól ismert továbbá, hogy a szupravezetés és a mágnesség egymást kizáró jelenségek, bár az utóbbi időben jelentettek ilyen egzotikus szupravezető anyagokat is. A kapott sávszerkezet tág teret engedett a lehetséges mechanizmusokra vonatkozó spekulációknak – amelyek mostanra mind füstbe mentek – de a lapos sávok egyesek szerint új, a szupravezetéshez nem köthető alkalmazásokra adnak lehetőséget.

Elméleti szempontból az ilyen „lapos sávok” mindig érdekes jelenségeket okozhatnak. Egyrészt az ilyen rendszerekben az elektronok lelassulnak, ami lehetőséget adhat egy erősen korrelált elektronrendszer, és így egy egzotikus szupravezető kialakulására. Amint az LK-99 kapcsán már említettük, a lapos sávok olyan elektronrendszerre is vezethetnek, amelyekben az elektronok lokalizáltak, mozgásuk korlátozott.

A nyár utolsó hónapját ezekkel a izgalmas kérdésekkel foglalkozó preprintek töltötték ki, azonban vé-

gül felmerül a kérdés, tanultunk-e valamit. Bizonyára sok szerző és sok kutató von le magára nézve érdekes tanulságokat, és ebben a közösségi média „szakértői” is élen járnak.

Érdekes volt látni, hogy bár az LK-99 nem bizonyult szupravezetőnek, mégis rávilágított a szilárdtestfizikai kutatások jelentőségére és lehetséges hatásaira. A meglepő módon felfokozott közösségi médiabeli aktivitás tanulsága pedig éppen ez, hogy létezik egy valós társadalmi igény a lenyűgöző szilárdtestfizikai jelenségek és ezek technológiai vonatkozásainak megismerésére, ha megtaláljuk a módját annak, hogyan tudjuk kibontani ezeket a jelenlegi sokkal hozzáférhetőbb módon.

Az olvasó számára, reméljük, az is nyilvánvalóvá vált, hogy a tudományos közösség úgy reagált, ahogy reagálnia kellett: az eredeti szerzők semmit sem elhallgatva publikálták a lényeges adatokat, még ha azok félvezetőek voltak is, a közösség tagjai pedig objektív módon megvizsgálták azokat, és bebizonyították, hogy hibás a konklúzió. Sőt, egy igazán bravúros nyomozással még azt is kiderítették, mi vezethette félre az eredeti szerzőket! Ehhez, mondjuk, kellett, hogy valakinek eszébe jusson, a Cu_2S fázisdiagramját már 1951-ben kimérték.

Hivatkozások

1. Lee S., et al.: Preprint (2023), <https://arxiv.org/abs/2307.12037>
2. Lee S., Kim J.-H., Kwon, Y.-W.: Preprint (2023), <https://arxiv.org/abs/2307.12008>
3. Jain, P. K.: Preprint (2023), <https://arxiv.org/abs/2308.05222>
4. Puphal P., et al.: Preprint (2023), <https://arxiv.org/abs/2308.06256>
5. Griffin S. M.: Preprint (2023), <https://arxiv.org/abs/2307.16892>
6. Hirahara E.: The electrical conductivity and isothermal Hall effect in cuprous sulfide, semi-conductor. *Journal of the Physical Society of Japan* 6(6) (1951) 428–437.
7. Hirahara E.: The physical properties of cuprous sulfides-semiconductors. *Journal of the Physical Society of Japan* 6(6) (1951) 422–427.

42. MIKOLA SÁNDOR ORSZÁGOS KÖZÉPISKOLAI TEHETSÉGGKUTATÓ FIZIKAVERSENY – BESZÁMOLÓ

Koncz Károly – PTE Babits Gyakorló Gimnázium
Simon Péter – PTE Fizikai Intézet, Pécsi Leőwey Klára Gimnázium

A járvány alatti erős visszaesés után 2022-ben jelentősen növekedett a versenyre való jelentkezések száma. Nagy öröm, hogy ez a trend idén is folytatódott. 2023-ban 158 középiskola 2796 diákja próbálta megoldani a Mikola-verseny első fordulós feladatlapját. (Tavalyi adatok: 157 iskola, 2572 diák. Tavalyelőtti adatok: 131 középiskola, 1815 diák.)

A verseny szakmai megvalósulásának háttérében a kb. húsztagú versenybizottság munkája áll. Az anyagi feltételek legfőbb biztosítói: EMMI, Nemzeti Tehetségprogram, Eötvös Loránd Fizikai Társulat, Pécsi Tudományegyetem, Paksi Atomerőmű Zrt., Radioaktív Hulladékokat Kezelő Közhasznú Nonprofit Kft., Samsung, Baranya Megyei Önkormányzat, Pécs Város Önkormányzata, Gyöngyös Város Önkormányzata, valamint sok-sok magánadományozó. A döntő két helyszíne idén is a Gyöngyösi Berze Nagy János Gimnázium, illetve a Pécsi Leőwey Klára Gimnázium.

Első forduló

2023. február 14-én megrendezett első fordulóban a diákoknak 3 óra alatt kellett megoldaniuk 5 számításon feladatot. A négy kategóriában megjelent 20 feladat közül ismertetjük azt a kettőt, melyet a versenybizottság a legizgalmasabbnak tart.

Az I. kategória (Gimnázium 9. évfolyam) 4. feladata, Baranyai Klára (Veresegyház) javaslata:

Egy 1,2 kg tömegű, távirányításos, gyors modellautó mozgását számítógépes programmal elemeztük. A program két grafikont rajzolt ki: a test sebességének x irányú (kelet felé mutató) és y irányú (észak felé mutató) összetevőjét az idő függvényében.

- Mekkora eredő erő gyorsította a modellautót?
- Ha a 4. másodperc után sem változna a kisautóra ható eredő erő, akkor mikor mozogna éppen délkelet felé? Mekkora sebességgel?

Megoldás:

Adatok: $m = 1,2$ kg

- A grafikonokról leolvasható adatok alapján keleti irányban a modellautó gyorsulása $a_x = 1,5$ m/s²,

északi irányban pedig $a_y = -2$ m/s². Az eredő gyorsulás $a = [a_x^2 + a_y^2]^{1/2}$.

Az eredő erő $F = ma = 3$ N.

- Amikor az autó éppen délkelet felé mozog, akkor a keleti és északi irányba mutató pillanatnyi sebesség komponenseinek nagysága azonos, előjele ellentétes: $v_x(t) = -v_y(t)$. Behelyettesítve a sebességkomponensek időfüggő kifejezéseit, a következő egyenletet kapjuk:

$$4 \text{ m/s} + 1,5 \text{ (m/s}^2) \cdot t = - [3 \text{ m/s} - 2 \text{ (m/s}^2) \cdot t].$$

Az egyenlet megoldása alapján ez 14 s elteltével következik be. Ebben a pillanatban a kisautó sebessége:

$$\begin{aligned} v &= \sqrt{v_x^2 + v_y^2} = \sqrt{2v_x^2} = \sqrt{2}|v_x| \\ &= \sqrt{2} \cdot \left(4 \frac{\text{m}}{\text{s}} + 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2} \cdot 14 \text{ s} \right) = 25\sqrt{2} \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx 35,4 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \end{aligned}$$

A II. kategória (Gimnázium 10. évfolyam) 2. feladata, Szkladányi András (Baja) javaslata:

Kínában, a *Tsien-tang-kiang* folyón időnként dagálykor úgynevezett torlóár alakul ki, a dagály megállítja a folyó vizének az áramlását, és a folyómederbe a tengervíz 30 km/h sebességgel, 7 m magas, közel függőleges falként nyomul be. Egy merész jetskis, a jelenséget figyelve, a vízfalal párhuzamosan halad 60 km/h sebességgel. Megvárja, amíg a vízfal 25 méterre közelít, majd sebességét megtartva 40 m sugarú negyedkörív mentén elkanyarodik, azután pedig egyenes vonalban távolodik.

- Milyen messze lesz a jetskis a vízfaltól a kanyarodás kezdetétől számított 5 s múlva?
- Mekkora a vízfal és a jetskis legkisebb távolsága?

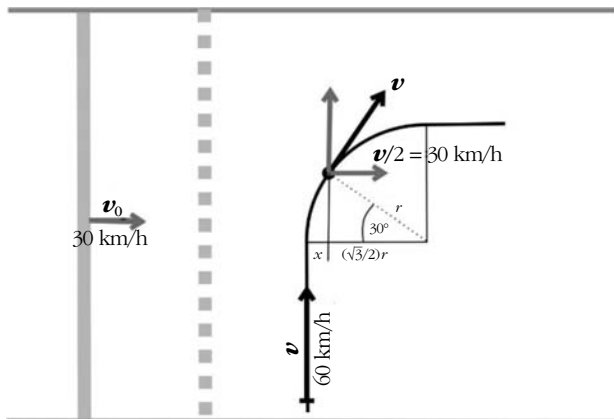
Megoldás:

Adatok: $v_0 = 30$ km/h = 8,33 m/s, $v = 60$ km/h = 16,7 m/s, $r = 40$ m, $d = 25$ m, $t = 5$ s.

- A jetskis a negyedkörös fordulatot $t_1 = 2r\pi/(4v) = 3,77$ s alatt teszi meg, miközben 40 métert távolodik a vízfaltól, a hátralévő $t_2 = 1,23$ s alatt pedig további $v \cdot t_2 = 20,5$ métert. Közben a vízfal $v_0 \cdot t = 41,7$ métert halad a jetskis felé.

Tehát 5 s elteltével a távolságuk $25 \text{ m} + 40 \text{ m} + 20,5 \text{ m} - 41,7 \text{ m} = 43,8$ méter.

b) A vízfal és a jetskis akkor van egymáshoz legközelebb, amikor utóbbinak a fordulás során a vízfal haldási irányával párhuzamos sebességkomponense pontosan $v_0 = 30$ km/h. Ez éppen 30° -os szögelfordulásnál következik be.



Eddig a pillanatig $t' = 2r\pi/(12v) = 1,26$ s telik el, mely idő alatt a vízfal $v_0 \cdot t' = 10,5$ métert közeledik. Eközben a jetskis $x = r(1 - \sqrt{3}/2) = 5,4$ métert távolodik a vízfaltól (lásd az ábrát). A legkisebb távolság $25 \text{ m} + 5,4 \text{ m} - 10,5 \text{ m} = 19,9$ méter.

Második forduló

Az első fordulóban legalább 50%-os teljesítményt elérő diákok jutnak a 2. fordulóba. Idén ez 97 iskola 419 diákjának sikerült. Az újabb megmérettetésre március 22-én került sor. A második fordulóban megjelent 16 feladat közül a bizottság döntése alapján a következő kettőt ismertetjük.

Az I. kategória (Gimnázium 9. évfolyam) 4. feladata, Baranyai Klára (Veresegyház) javaslata:

Egy reggel a vasúttörténeti parkban a 60 méter hosszú fűtőház kéménye füstölt, a párhuzamosan futó síneken régi, egyforma gőzmozdonyok dőcögtek. A parkban egyenletes, 6 m/s sebességű szél fúj a talajjal párhuzamosan. A parkról a mellékelt drónfelvétel készült, a fényképen látszanak a kémények füstcsíkjai.

- A fénykép elkészítése után mennyi idővel láthattuk felülről kereszteződni az A és a B mozdony füstcsíkját?
- A kép készítésének pillanatában egyenletesen gyorsulva elindult a C mozdony. Mekkora volt a C mozdony gyorsulása, ha felülről nézve azt láttuk, hogy mindhárom mozdony füstcsíkja egy pontban keresztezte egymást?

Megoldás:

A füstcsíkok iránya és a fűtőház méretéből azonosított 30 méteres beosztású négyzetrács segítségével meghatározhatjuk a mozdonyok sebességét a szélesség ismeretében.

A szél egy rácsosztásnyit, azaz 30 métert 5 másodperc alatt tesz meg. Ez alatt az idő alatt az A mozdony is 30 métert halad előre, vagyis a sebessége

$$v_A = 6 \text{ m/s.}$$

A B mozdony 60 métert halad, amíg a szél 90 méterrel sodorja oldalra a füstöt, vagyis 15 másodperc alatt. A sebessége:

$$v_B = \frac{60 \text{ m}}{15 \text{ s}} = 4 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

a) A füstcsíkok a mozdonyok sebességével mozogva egymás felé haladnak. A két füstcsík metszéspontja akkor jön létre, amikor a rajzon A'-vel jelölt pont találkozik a B mozdony kéményével. Mivel ezek kezdeti távolsága 210 méter, relatív sebességük a két mozdony sebességének összege, a keresett időpont:

$$t = \frac{210 \text{ m}}{6 \text{ m/s} + 4 \text{ m/s}} = 21 \text{ s.}$$

Tehát a két füstcsík a kép elkészülte után 21 másodperccel keresztezte egymást.

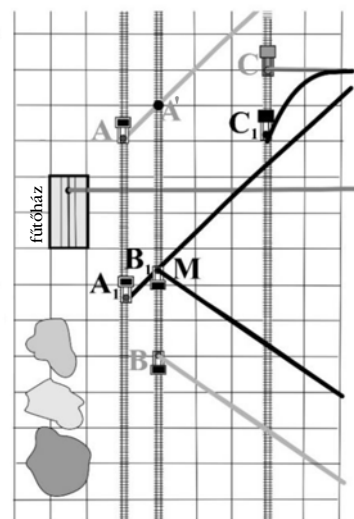
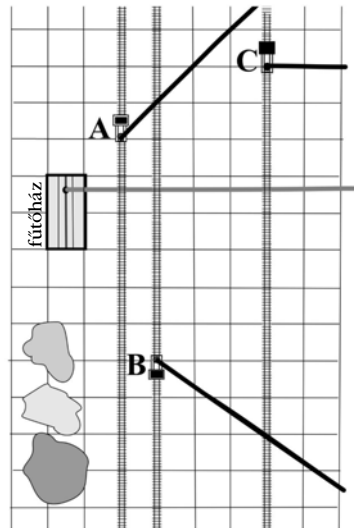
b) Az M metszéspont kialakulásának pillanatáról az alábbi vázlatos képet készíthetjük, halványan jelölve a kiinduló állapotot:

Az M és A' távolsága annyi, amekkora utat 21 másodperc alatt az A mozdony megtett az A₁ pontba érve:

$$\begin{aligned} MA' &= 6 \frac{\text{m}}{\text{s}} \cdot 21 \text{ s} \\ &= 126 \text{ m.} \end{aligned}$$

Ezután az M pont jobbra sodródik. A három füstcsík akkor keresztezheti egymást egy pontban, ha a C mozdony abban a pillanatban, amikor az M pont eléri a C vágányt, maga is ebbe a pontba ér.

Az M pont a C vágányt 90 méter megtétele után, 15 másodperc alatt éri el. A C mozdony indulása óta eddig a pillanatig eltelt idő:



$$t_c = 21 \text{ s} + 15 \text{ s} = 36 \text{ s}.$$

A C mozdony összes megtett útja:

$$s_c = MA' + 30 \text{ m} = 156 \text{ m}.$$

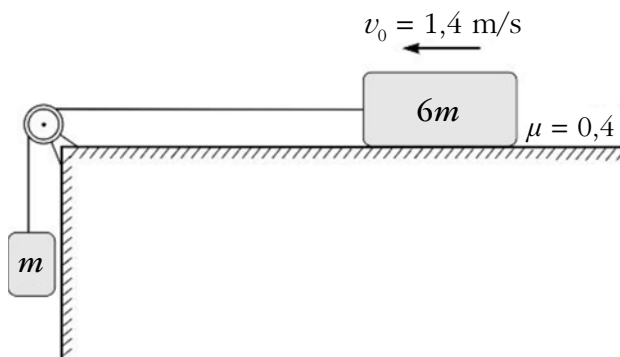
A C mozdony ez idő alatt nyugalomból indulva egyenletesen gyorsult, így a négyzetes úttörvényből meghatározhatjuk a gyorsulását:

$$a_c = 2s_c/t_c^2 = 0,24 \text{ m/s}^2.$$

Megjegyezhetjük, hogy a C mozdony füstcsíkja parabola alakú lesz, de ennek nincs szerepe a megfontolásainkban.

A II. kategória (Gimnázium 10. évfolyam) 4. feladata, Honyek Gyula (Veresegyház) javaslata:

Vízszintes asztal szélére egy könnyű, súrlódásmentes csigát rögzítünk, melyen vékony, erős, nyújthatatlan fonalat vetünk át. A fonál egyik végére m tömegű testet erősítünk, míg a másik végére $6m$ tömegű hasábot rögzítünk az ábrán látható módon. A hasáb és az asztal felülete közötti csúszási és tapadási súrlódási együttható megegyezik, mindkettő értéke $0,4$. A hasáb és a csiga kezdeti távolsága 50 cm . A hasábot hirtelen meglökjük a csiga felé, így a hasáb $1,4 \text{ m/s}$ kezdősebességet kap.



- A hasáb meglökése után mennyi idővel feszül meg a fonál?
- Milyen messze áll meg a hasáb a csigától?

Megoldás:

a) A hasáb hirtelen meglökése után az m tömegű test szabadon kezd esni, tehát a függőleges elmozdulását így írhatjuk le:

$$y = (g/2) \cdot t^2.$$

A $6m$ tömegű hasáb elmozdulása pedig így adható meg:

$$x = v_0 t - (a/2) \cdot t^2 = v_0 t - (\mu g/2) \cdot t^2.$$

A fonál akkor feszül meg, ha a két elmozdulás egyenlővé válik ($x = y$):

$$\frac{g}{2} t^2 = v_0 t - \frac{\mu g}{2} t^2 \rightarrow t = \frac{2v_0}{g(1+\mu)} = 0,2 \text{ s}.$$

b) A fonál megfeszüléséig mindkét test

$$x = y = \frac{g}{2} t^2 = v_0 t - \frac{\mu g}{2} t^2 = 0,2 \text{ m} = 20 \text{ cm}$$

utat tesz meg. Ezután már egy rendszerként mozognak, tehát közös gyorsulásukat így számíthatjuk ki:

$$mg - 6\mu mg = 7ma_k \rightarrow a_k = \frac{(1-6\mu)g}{7} = -2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}.$$

A negatív előjel azt fejezi ki, hogy a rendszer lassulni fog, végül megáll.

A feladat legnehezebb része azt meghatározni, hogy a fonál megfeszülésekor mekkora lesz a rendszer közös sebessége. A szabadon eső test $0,2 \text{ s}$ alatt $v_1 = gt = 2 \text{ m/s}$ sebességre tesz szert, míg a $6m$ tömegű hasáb $1,4 \text{ m/s}$ -ról indul, lassulása $-\mu g = -4 \text{ m/s}^2$, vagyis $0,2 \text{ s}$ alatt $0,8 \text{ m/s}$ -ot veszít a sebességéből, tehát a fonál megfeszülésekor a hasáb sebessége

$$v_2 = v_0 - \mu gt = 0,6 \text{ m/s}.$$

Azt kell észrevennünk, hogy a két test között a fonál közvetíti a kölcsönhatást, az m tömegű test lelassul, a $6m$ tömegű pedig felgyorsul, az egész folyamat lényegében egy tökéletesen rugalmatlan ütközésnek felel meg, így a kialakuló közös sebességet így kaphatjuk meg:

$$mv_1 + 6mv_2 = 7mv_k \rightarrow v_k = \frac{v_1 + 6v_2}{7} = 0,8 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

A közös mozgás időtartama így adható meg:

$$t_k = v_k / |a_k| = 0,4 \text{ s}.$$

Ennyi ideig az előzőekben kiszámított közös sebesség fele lesz a rendszer átlagsebessége, tehát a közös mozgás elmozdulása:

$$\Delta s = (v_k/2) t_k = 0,16 \text{ m} = 16 \text{ cm}.$$

A hasáb teljes elmozdulása $x + \Delta s = 36 \text{ cm}$, tehát a hasáb $50 \text{ cm} - 36 \text{ cm} = 14 \text{ cm}$ -re áll meg a csigától.

Harmadik forduló

A döntőbe jutáshoz az elérhető 40-ből 29 pontra volt szükség az I. kategóriában, 29 a II.-ban, 26 a III.-ban, 18 a IV.-ben. A gimnazisták közül 44 és 43 diák jutott a döntőbe, a technikumban tanulók közül csak 5 és 4 fő. Sok éve probléma, hogy a technikumban tanulók teljesítménye nagyon elmarad a gimnazisták eredménye mögött.

A járványhelyzet miatt 2020-ban és 2021-ben nem tudtunk döntőt szervezni, hanem a második forduló bizottság által kijavított versenydolgozatai alapján hirdettünk végeredményt. Nagy öröm, hogy a pandémia elmúltával újra tudunk igazi döntőt szervezni – idén másodjára. Hagyományosan a kilencedikesek Gyöngyösön, a tizedikesek Pécsen vetélkedtek a fináléban

május 7-étől 9-éig. Gyöngyösön az I. és III. kategória döntője volt. A gyöngyösi elméleti feladatlapot Vigh Máté szerkesztette, a zsűri elnöke Szász Krisztián volt. A zsűri további tagjai: Honyek Gyula, Horváth Ferenc, Pántyáné Kuzder Mária. Gyöngyösön közel 30 éven keresztül Kiss Miklós és felesége, Kissné Császár Erzsébet szervezték nagy szeretettel a döntőt. Áldozatos, színvonalas munkájukért itt is köszönetet mondunk. Emellett Miklós a mérési feladatokat is kidolgozta. Nyugdíjazásukkal egyidőben visszavonultak. Feladatukat Horváthné Zörög Anikó és Csordás Ágnes vette át. Pécsen a II. és IV. kategória döntője volt. A feladatlapot szerkesztette a zsűri elnöke, Pálfalvi László. A zsűri további tagjai: Koncz Károly, Kotek László, Simon Péter, Szkladányi András. A harmadik fordulóban megjelent 16 feladat közül a bizottság döntése alapján a következő kettőt ismertetjük.

Az I. kategória (Gimnázium 9. évfolyam) 2. feladata, Kotek László (Pécs) javaslata:

Egy $M = 3m$ tömegű, $h = 0,15$ m magasságú, harang alakú test szabadon csúszhat egy hosszú, vízszintes felületen. A test végei belesimulnak a vízszintes síkba. Kezdetben a test nyugalomban van, és tetején egy m tömegű, kisméretű hasáb található bizonytalan egyensúlyi helyzetben. A kis hasábot az ábra szerint jobbra kissé kimozdítjuk eredeti helyzetéből. A kis hasáb a vízszintes felületre érve rugalmasan ütközik egy nagyobb hasábbal, amelyet mindvégig állandó u_0 sebességgel mozgatunk feléje. A súrlódás mindenhol elhanyagolható, minden mozgás az ábra síkjában történik. A kis hasáb a harang alakú testen való mozgása során soha nem válik el attól.



Legalább mekkora állandó u_0 sebességgel kell mozgatni a nagy hasábot, hogy a kis hasáb az ütközés után áthaladjon a harang alakú testen?

Megoldás:

Legyen az m tömegű test sebessége a vízszintes felületre érkezéskor v_1 , a harang alakú testé pedig V !

Az impulzusmegmaradás így írható:

$$mv_1 - 3mV = 0, \quad \text{ebből} \quad v_1 = 3V.$$

A súrlódás hiánya miatt alkalmazhatjuk a mechanikai energia megmaradásának törvényét:

$$mgh = \frac{1}{2}mv_1^2 + \frac{1}{2} \cdot 3mV^2.$$

Ebbe beírva a v_1 és V közötti összefüggést:

$$mgh = \frac{1}{2}m(3V)^2 + \frac{1}{2} \cdot 3mV^2.$$

Innen a következő sebességeket kapjuk:

$$V = \sqrt{\frac{gh}{6}} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}, \quad v_1 = \sqrt{\frac{3}{2}gh} = 1,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}.$$

Most egyelőre ne foglalkozzunk a nagy hasábbal történő ütközés részleteivel, csak tegyük fel azt, hogy az ütközés után a kis hasáb v_2 sebességgel halad a harang alakú test felé. Határozzuk meg, hogy mekkora v_2 érték esetén fogja az m tömegű test utolérni a harang alakú testet, majd éppen feljutni a tetejére, hogy azután egy bizonyos $v_{\text{közös}}$ sebességgel együtt mozogjanak tovább! Vegyük észre, hogy a $v_{\text{közös}}$ sebességgel mozgó (azaz tömegközépponti) vonatkoztatási rendszerben ez a folyamat éppen az imént tárgyalt lecsúszási folyamat fordítottja. A lecsúszás során a kis hasáb és a harang alakú test egymáshoz viszonyítva $V + v_1 = 2,0$ m/s sebességgel lökődött szét, így a feljutás akkor jön létre, ha a két test ugyanakkora nagyságú relatív sebességgel közelít egymáshoz. A harang alakú test sebessége az újbóli találkozás előtt $V = 0,5$ m/s volt, így a kis hasábnak a felülethez viszonyítva $v_2 = V + (V + v_1) = 2,5$ m/s-mal kell mozognia az ábra szerint balra.

Végül következzen a nagy hasábbal történő ütközés vizsgálata! Gondolatban üljünk bele a nagy hasábbal együttmozgó vonatkoztatási rendszerbe! Itt nyilvánvaló, hogy a kis hasáb ugyanakkora relatív sebességgel közeledik a nagy hasáb felé ütközés előtt, mint amennyivel távolodik attól ütközés után. Az ütközés előtti és utáni relatív sebességek nagyságát egyenlővé téve:

$$v_1 + u_0 = v_2 - u_0,$$

ahonnan

$$u_0 = (v_2 - v_1)/2 = 0,5 \text{ m/s}.$$

Ekkora tehát határesetben a nagy hasáb sebessége, a keresett u_0 értékének ennél kicsit nagyobbak kell lenni.

Megjegyzések:

1. A paraméteres számolásból látszik, hogy a feladat előírása akkor teljesíthető, ha

$$u_0 > V = \sqrt{gh/6},$$

2. A feladat egyik kulcsa v_2 értékének meghatározása. Ez a fenti furdangos gondolatmenet helyett megmaradási törvények segítségével is megtehető. A kis hasáb és a harang alakú test találkozására alkalmazhatjuk az impulzusmegmaradást:

$$mv_3 + 3mv_2 = 4mv_{\text{közös}},$$

valamint az energiátételt:

$$\frac{1}{2}mv_3^2 + \frac{1}{2} \cdot 3mV^2 = \frac{1}{2} \cdot 4mv_{\text{közös}}^2 + mgh.$$

Ebből a két sorból v_2 -re az alábbi másodfokú egyenletet kapjuk:

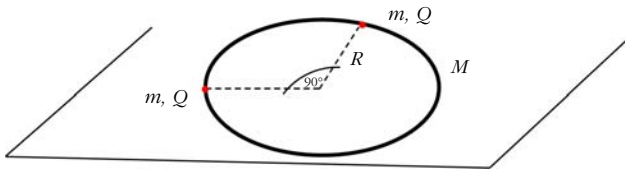
$$v_2^2 - 2v_2V + V^2 - \frac{8}{3}gh = 0.$$

Az adatokat behelyettesítve végül az egyenlet nem triviális megoldására valóban a $v_2 = 2,5$ m/s értéket kapjuk.

A II. kategória 4. feladata, Koncz Károly (Szigetvár) javaslata:

Az ábrán látható, nem rögzített, szigetelőből készült, $M = 2m$ tömegű, elhanyagolható keresztmetszetű karika, amelynek sugara $R = 8$ cm, vízszintes szigetelő felületen nyugszik. A karikán két szigetelő gyöngy szabadon tud mozogni. A gyöngyök tömege $m = 4$ g, töltése $Q = 2 \mu\text{C}$. Kezdetben a gyöngyöket úgy tartjuk, hogy a hozzájuk húzott sugarak egymással derékszöveget zárnak be. A gyöngyök a mozgásuk során pontszerűnek tekinthetők, és a súrlódás mindenhol elhanyagolható. A gyöngyöket elengedjük.

- Mekkora a gyöngyök és a karika tömegközéppontjának a sebessége abban a pillanatban, amikor a gyöngyökhöz húzott sugarak először 180° -os szöveget zárnak be?
- Mekkora az előző helyzetben a karika tömegközéppontjának az elmozdulása?
- Mekkora ebben a pillanatban a karika és valamelyik gyöngy között ébredő erő?



Megoldás:

a) Az ábrán látható és az eredeti állapotra felírva a lendület megmaradásának törvényét:

$$\begin{aligned} \Sigma I &= \text{áll.}, \\ 0 &= 2mv_M - 2mv, \\ v_M &= v. \end{aligned}$$

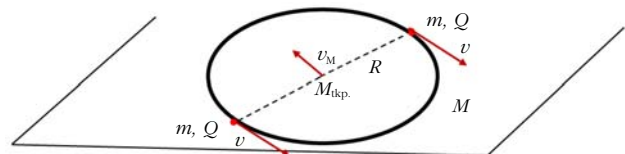
A folyamatra alkalmazva az energia megmaradásának törvényét:

$$\Sigma E = \text{áll.},$$

$$kQ^2/(R\sqrt{2}) = (1/2) \cdot 2mv_M^2 + 2(1/2)mv^2 + kQ^2/(2R).$$

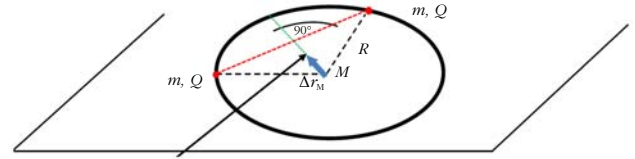
Az előző eredményt az egyenletbe helyettesítve és az egyenletet átrendezve:

$$\begin{aligned} kQ^2/(R\sqrt{2}) - kQ^2/(2R) &= (1/2) \cdot 2mv_M^2 + 2 \cdot (1/2)m(v_M)^2, \\ v_M &= Q \{ [k/(4mR)] \cdot [(2 - \sqrt{2})/\sqrt{2}] \}^{1/2}, \\ v_M &= (Q/2) \cdot \{ [k/(mR)] \cdot (\sqrt{2} - 1) \}^{1/2}, \\ v_M &= 3,41 \text{ m/s}. \end{aligned}$$



A gyöngyök sebessége megegyezik a karika tömegközéppontjának sebességével.

b) Mivel a külső erők eredője zérus, a rendszer tömegközéppontja helyben marad.



A rendszer tömegközéppontja a kezdő helyzetben a derékszögű háromszög átfogóhoz tartozó magasságának a felezőpontjában (azaz az R oldalú négyzet átlójának negyedében) van.

Az ábra alapján a karika tömegközéppontja a gyöngyszemeket összekötő húr felezőpontján átmenő sugár mentén mozdul el. Az elmozdulás nagysága megegyezik a karika középpontjának a tömegközépponttól való kezdeti távolságával:

$$\Delta r_M = R\sqrt{2}/4,$$

$$\Delta r_M = 2\sqrt{2} \cdot 10^{-2} \text{ m}.$$

c) Ebben a pillanatban a karika nem gyorsul, tehát alkalmazhatjuk a karika rendszerében a dinamika alapegyenletét a gyöngyökre. A karika tömegközéppontjához viszonyítva a gyöngyök R sugarú körpályán mozognak v_{rel} sebességgel:

$$\Sigma F = m \cdot a_{\text{cp}},$$

$$F_k - kQ^2/(4R^2) = mv_{\text{rel}}^2/R.$$

A relatív sebesség meghatározása:

$$\begin{aligned} v_{\text{rel}} &= v_M + v, \\ v_{\text{rel}} &= 2v. \end{aligned}$$

Ezt felhasználva:

$$\begin{aligned} F_k &= m(2v)^2/R + kQ^2/(4R^2), \\ F_k &= k(Q^2/R^2) \cdot (\sqrt{2} - 3/4), \\ F_k &= 3,72 \text{ N}. \end{aligned}$$

Honyek Gyula volt felelős Gyöngyösön a mérési feladat kidolgozásáért és megvalósításáért. A vizsgálat során egy enyhén megdöntött és forgatott rúdra akasztott test lassú mozgását kellett tanulmányozni a rúddal párhuzamos irányban. A forgatás miatt ferde irányú csúszási súrlódási erő lép fel, melynek rúdírányú összetevője egyensúlyt tart a nehézségi erő rúdírányú komponensével. A súrlódási erő rúdra merőleges összetevője forgatónyomatékokat eredményez, ami a lecsúszó test akasztójának kismértékű elfordulását eredményezi. Ezért az egyenletes mozgással haladó test erőegyensúlyát három dimenzióban kellett vizsgálni, egyrészt rúdírányban, másrészt a rúdra merőleges síkban. Az erők nagyságát szerkesztéssel lehetett meghatározni, és a mérés végső célja a rúd és a test akasztója közötti csúszási súrlódási együttható kiszámítása volt.

Simon Péter volt felelős Pécssett a helyi szervezésért, valamint a mérési feladat kidolgozásáért. Idén a levegő hőtágulását kellett vizsgálni. A főzőpohárban lévő, nehezékkel ellátott, skálázott kémcső szája lefelé nézett. A pohárba úgy töltöttünk meleg vizet, hogy ellepje a kémcsövet. A buborékképződés után, a hőmérséklet csökkenésével a kémcsőben lévő keverék (levegő és telített gőz) térfogata csökkenni kezdett. A száraz levegő állandó nyomáson összetartozó térfogat-hőmérséklet értékeinek számolása után a levegő hőtágulási együtthatóját kellett meghatározni.

2023-ban a következő diákok érték el a legjobb helyezéseket:

I. kategória (Gimnázium 9. évfolyam):

1. helyezett: *Téti Miklós* (Budapesti Fazekas Mihály Gyak. Gimnázium, tanára: *Schramek Anikó*)
2. helyezett: *Tóth Kolos Barnabás* (Budapesti Eötvös József Gimnázium, tanára: *Gulyás Erzsébet*)
3. helyezett: *Űrge Benedek* (Budapesti Fazekas Mihály Gyak. Gimnázium, tanára: *dr. Nagy Piroska Mária*)

II. kategória (Gimnázium 10. évfolyam):

1. helyezett: *Elekes Dorottya* (Budapest-Fasori Evangélikus Gimnázium, tanárai: *Izsa Éva, Költő Emese*)
2. helyezett: *Bencz Benedek* (Baár-Madas Református Gimnázium, tanára: *Horváth Norbert*)
3. helyezett: *Ujjpál Bálint* (Miskolci Herman Ottó Gimnázium, tanárai: *Pilzné Nagylaki Tünde, Veres Pálné, Dezsőfi György, Dudás Imre*)

Elekes Dorottya tavaly Gyöngyösön is első volt, így ő kétszeres Mikola-bajnok.

III. kategória (akik első évben tanulnak technikumban):

1. helyezett: *Balogh Barnabás* (BMSZC Trefort Ágoston Két Tanítási Nyelvű Technikum, tanára: *Fülöp László*)

IV. kategória (akik második évben tanulnak technikumban):

1. helyezett: *Szabó Iván* (Paksi Energetikai Technikum, tanára: *Nagyné Lakos Mária*)

A döntőn minden versenyző kapott oklevelet, ajándékkönyvet, pendrive-ot, valamint egyéb ajándékot (válltáska, toll, hátizsák, Samsung-termék) is. Mind a négy kategória győztese Mikola-éremmel tért haza. Gyöngyösön és Pécssett is minden felkészítő tanár kapott emléklapot, Gyöngyösön egy üveg bort is. A visszajelzések alapján a résztvevők (diákok, felkészítő tanárok, zsűri, szülők) elégedetten, élményekkel, ismeretekkel gazdagodva tértek haza a verseny döntőjéről. A Mikola-verseny Magyarország egyik legnépszerűbb fizikaversenye. A sikerért sok ember munkálkodott együtt. Az egyes fordulók feladatlapjai, megoldásai, eredménylistái olvashatóak a verseny honlapján: www.mikolaverseny.hu, ezzel is gazdagítva a hazai fizikaoktatás kultúráját.

JUNIOR TERMÉSZETTUDOMÁNYOS DIÁKOLIMPIA – EGY KEVÉSBÉ ISMERT NEMZETKÖZI VERSENY ISMERTETÉSE

Gyertyán Attila – ELTE Apáczai Csere János Gyakorló Gimnázium és Kollégium

Létezik egy nemzetközi természettudományos verseny, amely lassan húsz éves múltra tekint vissza, és amelyről eddig minden évben, minden magyar versenyző éremmel tért haza. Aki járatos a nemzetközi tanulmányi olimpiák éremosztási rendszerében, az persze tudja, hogy ez nem jelenti azt, hogy rendszerint az első háromban végez minden diákunk, de azt is tudhatja, hogy a legalább bronz minősítés megszerzése így se

magától értetődő. Annak ellenére szerepelünk ilyen sikeresen, hogy a verseny jóval kevésbé ismert, mint a „nagy” olimpiák, így a versenyzőket is kissé nehezebb felkutatni hozzá. A jelen cikk célja részben éppen az, hogy kicsit szélesebb körrel ismertesse meg ezt a kiváló kezdeményezést, remélhetőleg még több tehetséges diákhöz eljuttatva a verseny hírért, ezáltal is biztosítva, hogy továbbra is a legrátermettebb tanulók képviselhessék az országot ezen a megmérettetésen.

A bevezetőben említett verseny természetesen a címben már megnevezett, Nemzetközi Junior Természettudományos Diákolimpia (rövidítve IJSO az angol nyelvű elnevezés kezdőbetűi után). Ez a verseny a maga nemében több szempontból is rendhagyónak számít a tanulmányi olimpiák között, mégis rengeteg hasonlóságot is mutat velük. A következőkben szeretném bemutatni röviden ezt a versenyt, amelyen ez idáig minden egyes évben oly sikeresen szerepelt a magyar küldöttség.



Gyertyán Attila 2009-ben végzett az ELTE matematika-fizika tanárszakán. Ugyancsak 2009-től az ELTE Apáczai Gyakorló Gimnáziumában tanít, ahol a fizika munkaközösséget is ő vezeti. 2018-tól fizika szakos vezetőtanárként a tanárképzésben is részt vesz. 2010 óta a Junior Természettudományos Diákolimpia felkészítő tanára fizikából. Tanári munkájáért 2022-ben a Köznevelési Bizottság rektori dicséretre terjesztette fel.



A 2019-es csapat az éremosztó után. Balról jobbra: Szabó Márton, Csonka Illés, Villányi Attila (csapatvezető), Dóra Márton, Herold Viktor (külgazdasági attasé Dohában) Farkas Izabella, Gyertyán Attila (felkészítő fizikatanár), Szépvölgyi Gergely, Papp Marcell

A versenyt 2004-ben Indonézia alapította, ahol is a kormány adott forrásokat egy nemzetközi verseny megrendezésére. A részt vevő országokat a különféle tantárgyi olimpiákon kampányolva toborozták össze, akkoriban még az utazáshoz szükséges repülőjegyek közül is állt egyet a rendező ország. A helyszín Jakarta, a főváros volt, és mintegy 30–35 ország vett részt a versenyen. Az alapötlet két elemből állt: egyrészt szerettek volna létrehozni egy olyan versenyt, amely a fiatalabb diákokat célozza meg, másrészt komplex természettudományos kihívást álmodtak meg a tantárgyspecifikus olimpiák mellé. Így került az olimpia elnevezésébe a junior és a természettudományos szó. Az előbbi értelmében a versenyen (melyet rendszerint valamikor december első két hetében rendeznek meg) csak olyan diákok vehetnek részt, akik a verseny évében még nem töltik be 16. életévüket. Az utóbbi pedig arra utal, hogy a diákoknak fizikából, kémiából és biológiából is helyt kell állniuk, mivel mindhárom tantárgyból kapnak feladatokat. Az első év sikere után másodjára is az alapító ország, Indonézia volt a házigazda – ezúttal Jogjakarta városa –, majd innentől kezdve minden évben más ország vállalta a rendezést (bár volt más is, aki többször, és azóta harmadszor is járt a mezőny Indonéziában). 2004 óta egyetlen egyszer maradt el a rendezvény: a 2020-as, amikor a Németországba tervezett olimpiát a világjárvány miatt kellett lemondani. 2021-ben online módon tartották meg az Emirátusok szervezésében, tavaly pedig – némi hercehurcát követően, a rendező országot az utolsó pillanatban megváltoztatva – ismét eredeti formájában vehettünk részt rajta Kolumbiában.

A korábbi évekhez hasonlóan tehát Bogotában is három fordulót kellett teljesíteni a versenyzőknek: az első forduló egy 30 kérdésből álló tesztfeladatsor, a második az úgynevezett elméleti forduló (itt szerepelnek a számításos feladatok, ábrakiegészítések,

grafikonelemzések és ilyesmik), a harmadik pedig a gyakorlati vagy kísérleti forduló. A három órás tesztfordulóban mindhárom tantárgy, a biológia, a kémia és a fizika 10-10-10 kérdéssel szerepel. Ezek mindegyikében négy lehetőség közül kell kiválasztani az egyetlen helyes választ, a pontért pedig pontlevonás is jár. Az elméleti forduló fizikából és kémiából nagyrészt számítási feladatokat, illetve reakcióegyenletek felírását tartalmazza. A feladatokat rendszerint igyekeznek valamilyen téma köré csoportosítani, vagy valamilyen módon a „való életbe” elhelyezni azokat. Ez olykor egészen megmósolyogtató tud lenni (súgrós feladat

vákuumban, ugrás nélkül vagy egy aranyötvetből készült muzeális sólyomszobor kaloriméterbe merítése, példának okáért), másrészt viszont jól teszteli, hogy a diákoknak sikerült-e a nyers tankönyvi feladatoknál mélyebben is megérteni az anyagot. Az időtartam ebben a fordulóban 3–3,5 óra között szokott lenni, annak függvényében, hogy mennyi folyószöveget tartalmaz a feladatsor leírása. A megszerezhető pontszám a teszthez hasonlóan itt is tantárgyanként 10, és ebben a fordulóban már nem jár levonás az esetleges rossz válaszokért. A gyakorlati fordulóban háromfős csapatokban végzik a méréseket a diákok. Itt 4 óra áll rendelkezésre a három tantárgyhoz tartozó kísérleti feladatok elvégzésére. Alapvetően hat diák nevezésére jogosult egy-egy ország, ebből lehet két csapatot alakítani a laborfeladatokhoz. Ebben a fordulóban összesen 40 pontot gyűjthetnek (értelemszerűen három-három diák azonos pontszámot kap a korábban elért eredményéhez), így alakul ki a maximálisan elérhető 100 pont a versenyen. A magyar csapat rendszerint a három fő között felosztja a három tárgyat, és így egy-egy diák foglalkozik a biológia, fizika, illetve kémia témájú méréssel, de szinte mindig jut idejük arra is, hogy segítsék egymást a nehezebb vagy hosszabb feladatok elvégzésében. A mérési eredmények kiértékelése is része a feladatnak, grafikonszerkesztéssel, egyenesillesztéssel és a megfelelő következtetések levonásával együtt.

A tantárgyi olimpiákhoz hasonlóan természetesen itt is anyanyelven kell a feladatokkal megbirkózni a versenyzőknek, vagyis a versenybizottság által összeállított feladatsort előzőleg le kell fordítani. Ezt a küldöttség tanár tagjai teszik meg (itt *leader* a hivatalos megnevezésünk), akiből ideális esetben három kísérheti el a hatfős diákcsoportot. A fordításon túl a kitűzött feladatok plenáris megvitatása is a kiutazó tanárok feladatai közé tartozik. Ez mindig az adott fordulót megelőző napon zajlik, és időnként sajnos

kimondottan hosszadalmas, parttalan vitákat is eredményez. A feladatok szakmai értékelésén, és esetleges javításán túl – bizony, előfordul olykor elvi hibás, túlságosan triviális vagy megoldhatatlan feladat az eredeti verziókban – a leggyakoribb probléma az, hogy a feladathoz szükséges tudás része-e az előírt tananyagban. A sorozatos viták eredményeképp az utóbbi pár évben teljesen újraírták a versenyhez tartozó sillabuszt, hogy egyértelműbbé tegyék, mi az, amit lehet kérdezni, és mi az, amit nem. Mindazonáltal az alapvető anyagon esetleg kívül eső problémák is bekerülhetnek a feladatsorokba, amennyiben a feladatmegoldáshoz szükséges ismereteket leírják a feladaton belül. A diákoknak így arra is készen kell állniuk, hogy gyorsan építsenek be új tudáselemeket a már ismert anyagrészekbe. És ha már a sillabusznál tartunk: számunkra a verseny egyik legnagyobb kihívása épp az, hogy az elvárt tudásanyag nem igazán illeszkedik az általános iskolai, illetve 9–10. osztályos tananyaghoz, hanem jelentősen túlmutat rajta. Fizikából többek közt a modern fizika egyes elemei, a teljes termodinamika és elektrosztatika is része az elsajátítandó anyagnak, de kémiából és biológiából is messze többet kell tudni, mint akár egy versenyeken már jártas diáknak. A feladatok nehézsége persze széles skálán ingadozik, előfordulnak tanulmányi versenyhez képest kifejezetten egyszerű példák és valóban kihívást jelentőek egyaránt.

A nagyméretű tananyag miatt – a többi olimpiához hasonlóan – külön felkészítőt tartunk a versenyen részt venni szándékozó diákoknak. A felkészítésre alapvetően a kémiából, biológiából vagy fizikából országos döntőbe jutó, az életkori feltételnek eleget tevő diákokat hívjuk meg. Júniusban kezdünk, egy intenzívebb másfél-két héttel, majd szeptember elején szoktunk tartani egy első válogatót. Itt jellemzően 7–10 diákot választunk ki, velük utána hétvégenként dolgozunk tovább, egészen október végéig, amikor a második válogatón kiválasztjuk azt a hat diákot, aki részt is vehet a versenyen. A gyakorlati fordulóra mindhárom tantárgyból a végső válogatás után tartunk külön felkészülőt alkalmat. A felkészítő helyszíne az Apáczai Gimnázium szokott lenni. A versenyen való részvételt tehát igen nagy mennyiségű befektetett munka előzi meg, amely azonban később meg szokott térülni: a felkészítőt végigjáró diákok később a hazai országos versenyeken is rendszerint eredményesen tudnak szerepelni.

Maga a verseny pedig egészen különleges élmény a kiutazó hat diáknak. Noha effektíve versenyzéssel mindössze három délelőttöt töltenek, az utazás teljes időtartama 7–9 nap szokott lenni. A versenynapok délutánján és a fordítási napokon a rendező ország szervez programokat a világ minden tájáról összegyűlt diáksereg számára. Ezek kivételes lehetőségek a különféle kultúrákkal való megismerkedésre, ideértve a rendező ország mellett a többi résztvevőt is. A diákok

életre szóló barátságokat, kapcsolatokat alakíthatnak ki a nemzetközi közösség más tagjaival, utazhatnak, és teljesen új perspektívákból ismerhetik meg a világot. Természettudományos versenyről lévén szó, a bejutó tanulók között sokszor előfordulnak zárkózottabb, ún. „maguknak való” gyerekek is. Az út végére rendszerint ők is „kinyílnak”, ismerkedni, barátkozni kezdenek, amit pedagógusként nagyon jó megtapasztalni. Úgy érzem, a verseny nemcsak a szakmai előmenetelük szempontjából jelent komoly lépcsőfokot, de a személyiségfejlődésükhöz is jelentősen hozzá tud járulni. Ahogyan én tanárként nagyon élvezem, hogy hozzám hasonló, de más nemzetbeli fizikatanárokkal alakíthatok ki kapcsolatokat, úgy a diákok számára is jó lehetőség, hogy hasonló érdeklődésű, de teljesen más háttérű kortársaikkal ismerkedjenek meg. Bár személyesen nem vettem még részt a nagyoknak szóló olimpiákon, de talán az életkorból adódóan ez a vonatkozása a versenynek még erősebb is a fiatalabb korosztályban, mint később. Természetesen amikor nem fordítunk vagy moderálunk, akkor a tanárok is szervezett kirándulásokon vehetnek részt, így a helyi nevezetességek megismeréséből mi sem szoktunk kimaradni.

Mivel a versenyt rendszerint aránylag távoli országokban rendezik, a nevezési díjon felül a repülőjegyek árának előteremtése szokott anyagi nehézségeket okozni (a felkészítést a tanárok jelenleg társadalmi munkában végzik). Ebben a Nemzeti Tehetség Program aktuális évi pályázati lehetősége mellett rendszeres segítséget kapunk a Richter Gedeon Zrt.-től és a MOL Új Európa Alapítványától. Rajtuk kívül alkalmi támogatásokat is rendszeresen ajánlanak fel kisebb-nagyobb cégek. Ezeket a támogatásokat ezúton is köszönöm kollégáim és az utazó diákok nevében.

Összességében egy kiváló és izgalmas kezdeményezésnek tartom az IJSO-t – noha számtalan boszszantó problémával is szembesültünk, valamint az is érezhető, hogy a nagy hagyományokkal bíró olimpiákhoz képest ez a verseny még gyerekcipőben jár. Én személy szerint nagyon boldog vagyok, hogy bekerülhettem az IJSO vérkeringésébe. A diákjaink sikere, az örömük és az élmények, amelyekkel mindannyian gazdagodunk, minden évben rengeteget adtak nekem úgy is, mint tanárnak, és úgy is, mint magánembernek. Nagyon remélem, hogy a versenyt sikerül a tanulmányi olimpiák rangjára emelni, és azt is, hogy a magyar csapat továbbra is rendszeres résztvevő marad. Az utóbbi évek természettudományos oktatást érintő folyamatai ezen a szinten érződnek talán legerősebben, évről évre nehezebb olyan fiatalokat találni, akik rendes képzést kaptak kémiából vagy fizikából az általános iskolában. Ezért is szeretnénk tovább bővíteni a merítési lehetőségeket, és még több embernek bemutatni a versenyt, mert meggyőződésem, hogy tehetséges, érdeklődő diákból nem lett kevesebb, csak a fizikatanárokkal találkozhatnak ritkábban.

IN MEMORIAM JÁNOSI IMRE (1963–2023): TÁRSSZERZŐI BÚCSÚ BOSCHÁN PÉTER (1938–2023) TANÁRUNKRA IS EMLÉKEZVE

Horváth Gábor – ELTE Biológiai Fizika Tanszék

Kedves Jánosi Imre, alias Janó! Jelen emlékezésemet már a Mennyekben olvashatod, mivel a 2023. augusztus 14-én az Adriai-tengerről kapott utolsó leveled és fényképeid (1. ábra) után – a namíbiai sivatagban kaptam meg tőled – sajnos megszakadt a földi üzenetváltásunk. Pedig e leveledben még azt tervezted, hogy írsz egy rövid visszaemlékezést az augusztus elején Münsterben elhunyt egykori kedvenc ELTE-s elméleti fizikus tanárunkról, Boschán Péterről, akinek több elméleti és kísérleti házfeladatát veled összefogva, kettesben oldottuk meg. Válaszlevelem szerint úgy terveztem, hogy miután visszatértem a namíbiai asztropolarimetriai mérőkampányunkról, ezen írásodat kissé kiegészítem, és együtt nyújtjuk be a *Fizikai Szemlé*be. Sajnos rám maradt a te részed megírása is korai váratlan távozásod miatt.

Emlékezésemet ezért a Boschán Péter (2. ábra) által az évfolyamunknak rendszeresen adott házfeladatokkal kezdem. Péter fordította a Landau–Lifsic-féle „Elméleti fizika” tankönyvsorozat jó néhány kötetét oroszról magyarra, s nekünk is ebből tanított olyan hatékonyan, hogy a szigorlatunk után szinte bármit ki tudtunk számítani. Az elmélet mellett kísérleti szorgalmi házfeladatokat is föl adott, és a sikeres megoldókat a szobájába hívva különféle fizikakönyvekkel jutalmazta buzdításai közepette. Akkoriban, 1983/84 táján már volt saját személyi mikroszámítógépünk – Janó maga is épített egyet az innen-onnan összeszedetett alkatrészekből –, amellyel több olyan elméleti házfeladatot tudtunk numerikusan megoldani, amelyekhez programokat kellett írunk és az eredményeket grafikusán ábrázolnunk.



1. ábra. Jánosi Imre az Adriai-tengeren 2023. augusztus 14-én

Boschán Péter egyik ilyen szorgalmi feladata az volt, hogy modellezzük azt az égi mechanikai helyzetet, amikor egy anyabolygója körül körpályán keringő hold mellett egyenes mentén elszáguld egy vendégbolygó, s határozzuk meg az utóbbi távoztával a hold új, perturbált pályáját, továbbá derítsük ki a vendégbolygó azon sebességtartományát, amely mellett az anyabolygótól elrabolva magával viszi a holdat, s az a távozó vendégbolygó körül kering tovább. E feladatot Janóval összefogva az akkori Sinclair ZX Spectrum személyi mikroszámítógépünkkel oldottuk meg. Péternek annyira tetszett a beadott dolgozatunk, hogy a *Fizikai Szemlé*ben való közlést javasolta, ami később meg is történt. Ez volt az első közös cikkünk Janóval.

Boschán Péter adott néhány kísérleti házfeladatot is. Az egyikben azt kellett vizsgálni, hogy egy lengő

fizikai inga maximális szögkitérése (amplitúdója) az időben miként csillapodik a légellenállás hatására. Janóval az ELTE TTK akkori Múzeum körüli fizika főépületének hosszú, kongó emeleti folyosóján egy kétszárú létrát állítottunk föl, amelyről egy fizikai ingaként szolgáló, madzagra kötött, hulladékkal teli szemeteskosarat lógattunk le, amelynek külső oldalára zseblámpát rögzítettünk. Megvártuk a teljes besötétedést, bekapcsoltuk a zseblámpát, meglódtottuk a kosarat, amelynek a csillapodó lengéseit oldalról egy fotóállványra helyezett, nyitott rekesznyílású fényképezőgéppel rögzítettük a lámpa fényfoltnyoma formájában, fél lengésenként exponálva. Mivel éjjelre bezárták a főporta ajtaját, nem mehettünk haza, így az egyik labor kemény asztalain aludtunk, pirkadatra jól elgémberedett tagokkal. Reggel a portás a távoztunkkor cso-



2. ábra. Boschán Péter egy könyvtárban időzve

dálkozott, miért nem vette észre az aznapi korai bejövételünket. Előhívva a fotópapírokat (akkor még nem voltak digitális kamerák), a fényképeken lemértük az idővel csökkenő lengési amplitúdókat. Habár mind ebből nem született cikk, a kísérletezés során értékes gyakorlati tapasztalatokra tettünk szert, és Boschán Péter megint egy-egy fizikakönyvvel jutalmazta a bő fénykép-dokumentációval ellátott jegyzőkönyvünket.

Az érettségi után, az egyetem előtt Janóval 12 hónapig előfelvételis katonatársak voltunk a Zala megyei (mai nevén vármegyei) Lenti határközség melletti fenyőerdőben meghúzódó elsőlépcsős laktanyában (amelyet mára már fölszámoltak). Ő mesterlövész volt, én 82 mm-es aknavető irányzó. Az egyetem utáni 6 hónapos katonai szolgálatot megúsztam, mert nem hívtak be újra. Janó mihamarabb le akarván tudni e fél évi katonaságot, önként jelentkezett, s miután leszolgált a hat hónapját, hadnagyként szerelt le. Onnantól kezdve gyakran azzal ugratta katonaviselt volt évfolyamtársait, hogy katonai szlengben osztogatott műparancsokat, mivel sokunk honvédként szerelt le, miáltal Jánosi hadnagy elvtárs (ma már úr) katonai felettesünk volt.

Mikor Janó egy csoportban fölbukkant, kifogyhatatlan humorának köszönhetően hamarosan a társaság közepé lett folyamatos viccelődéseivel, nevetető anekdotáival, ugratásaival és élcelődéseivel. Alapvetően egy életvidám, boldog ember volt, aki élvezte az életet és a fizikát. Például nem tudott leszokni arról a visszatérő poénjáról, hogy mikor egy teremből csoportosan távoztunk, az ajtóban megtorpanva leguggolt és hangosan elnézést kérve rövid ideig föltartotta a kifelé igyekvőket mondván: elnézést, kioldódott a cipőfűzőm.

Emlékszilánkom az is, amikor 2003. december 15-én az ELTE TTK Fizikai Intézetében Janó habilitációján

lehettem az egyik bizottsági tag prof. Horváth Zalán elnököle mellett. Élvezettel hallgattam meg az MTA székházában az „Atmoszferikus paraméterek statisztikus fizikai vizsgálata és laboratóriumi modellezése” című MTA-doktori értekezésének védését is, amelyen mélyen belém ivódott Janó azon vizsgálati eredménye, amely megvilágította, miért megbízhatatlan a szélenergia. A sok évtizedes európai szélenergia adatsorok használatával modellezte, hogy ha egész Európát tele-raknánk szélkerekekkel, akkor az év folyamán számos olyan hét fordulna elő, amikor a tengerpartok kivételével szinte egyik szélkerék sem forogna a globális szélcsend következtében. Ezért sem elégíthető ki az emberiség teljes energiaigénye csupán szélenergiaforrásokkal, de napelemekkel sem a gyakori felhők miatt, meg persze az éjszakai sötétség és gyakori szélcsend okán. A Janótól e témában tanultakat mindig hangoztatom a megújuló szélenergiában méregzölden hívókkal vitázva.

Janóval több közös cikkünk is született, amelyekben fontos részfeladatai voltak: az igen pontos és ezért nagyon drága egyetemi hőkamerájával készült hőképek kiértékelésével járult hozzá egyes biológiai fizikai mérésünkhöz, vagy pedig meteorológiai adatsorokbeli adatbányászással és ezen idősorok elemzésével. Kimutattuk, hogy a nőstény böglyök vérszívásra a napsütötte, sötét, erősen fénypolarizáló gazdaállatokat részesítik előnyben, aminek fő oka, hogy a melegebb testfelületű gazdákról könnyebben tudnak elröppenni a gazda számukra veszélyes légyűző farokcsapásai előtt. Egy új magyarázatot adtunk arra, hogy miért keletre néznek a Napot már nem követő napraforgók (*Helianthus annuus*) virágzatai. Megmutattuk, hogy a napraforgó-virágzat maximális fényenergiát nyel el, ha keletre néz, és a délutánok felhősebbek a délelőttöknél. Kísérletileg megcáfoltuk a zebrák hipotetikus légűzőjét azzal, hogy Schlieren-optikával igazoltuk, hogy nem keletkezik hűtő légörvénysor a napsütötte zebracsíkok fölött. Megmutattuk, hogy ha a délelőttök éves átlagban kevésbé felhősek a délutánoknál, akkor az állandó dőlésű napelemtáblák energiamaximalizáló azimutiránya az ideálisnak vélt földrajzi déli iránytól annál inkább a földrajzi kelet felé fordul, minél meredekebb a dőlésszögük (minél jobban közelít a függőlegeshez), lényegében ugyanazért, amiért az érett napraforgó-virágzatok keletre néznek. Legutóbb pedig egy új termofiziológiai magyarázatot adtunk arra, hogy a zebracsíkok miért társítják a vérszívó böglyöket.

Egyik egyetemi biomechanika előadásomban rendszeresen idézem Janó és egy másik exévfolyamtársam, Bántay Péter (ELTE-s professzor) azon idősorelemzését, amely azt vizsgálta, hogy a súlylökés, kalapácsvetés, diszkoszvetés és gerelyhajítás dobótávjai miként változnak a földrajzi szélességgel a Föld forgása miatt föllépő centrifugális gyorsulás hatására.

Janó sajátos humora néhány tudományos cikkgyűjteményt tartalmazó monográfiában is tetten érhető:

Egyik pamfletcikkében azt vizsgálta, van-e bármilyen jele az intelligenciának az emberi mozgásokban. Az állatvilágból (például keringőbogarak Brown-mozgáshoz hasonló vízfelszíni bolyongása, udvarló madárpárok vitusrángásokra emlékeztető násztánca) és az emberi társadalmakból vett furcsa mozgásformák (például versenytáncosok táncos tánca, afrikai törzsek harci tánca, hosszútávfutók stadionbeli körözése, katonai parádék tömegmenetelése) példáján arra a következtetésre jutott, hogy az értelem majdnem félreérthetetlenül fölismerhető nagy tömegek néhány teljesen értelmetlen kollektív mozgásformájának akár a Világúrból történő észlelésével is. Egy másik, még humorosabb cikkével megalapította a szélvédőveg-koszológia módszertanát azzal a meglepő következtetéssel, hogy a növekvő országúti forgalom szükségszerűen a péksütemények árnövekedését eredményezi azzal, hogy a gyorsan közlekedő autók szélvédői gyérítik a rovarpopulációkat, miáltal kevesebb rovar fogyaszthatnak a rovarévo madarak, amelyek e táplálékkiesést búzamazok csipegetésével kompenzálják aratás előtt, ami a learatott szemtermés csökkenése által a liszt s egyben a péktermékek árának növekedését vonja maga után. Ugyancsak a rá jellemző sarkított szemlélettel elmélkedett azon talányon, hogy az evolúció miért nem találta föl még a kereket.

Janó és egyik másik volt évfolyamtársam, Horváth Viktor (akikkel hárman évekig egyazon szobában

dolgoztunk az ELTE említett főépületében) egykoron házi sörfőzögetésre adták a fejüket. Janó a tapasztalatait egy „Házi sörfőzőkönyv” című írásban foglalta össze, amely végül sajnos kiadatlan maradt. A könyv lapjainak jobb alsó sarkába egy fényképsorozat képét illesztette be úgy, hogy mikor a könyv lapjait az ősi mozgóképtechnikához hasonlóan kézzel pörgettük, a szemünk előtt megelevenedett két, sörrrel teli, fehér habsapkás söröskrigli összekoccanása.

Janóval évekig együtt jártunk az ELTE-n német nyelvórákra is. E közös német tanóráinkra emlékezvén, végül azon a magyar–német öszvérnyelven búcsúzom humorgazdag, a fizikát szerető és nemzetközileg is magas színvonalon művelő, valamint lelkesen oktató, egykori katona- és évfolyamtársamtól, ELTE-s exkollégámtól, amely kiméryanymelven e-levelzettünk, mikor ő évekig a németországi Jülichben kutatott, én pedig Tübingenben voltam *Gastforscher* (vendégkutató): *Lieber Janó, Mutterwitzeid sehr fehlen* fognak, *wissenschaftliche Ergebnisseid*et *präservieren*elik az *ungarische és englische Veröffentlichungjaid*, *heitere Persönlichkeiten*idet pedig a *Gedächtnissük*ben fogják *behalten*olni a *Mitarbeiterid*, *Lehrlingjaid*, *Bekanntereid* és *Verwandterjaid*. *Ruhe in Frieden!*¹

¹*Kedves Janó, egészséges humorod nagyon fog hiányozni, tudományos eredményeidet megőrzik a magyar és angol közleményeid, deris szémmélységedet pedig az emlékezetükben fogják megtartani a munkatársaid, tanítványaid, ismerőseid és rokonaid. Nyugodj békében!*

EGY IGAZ FIZIKUS: JÁNOSI IMRE

Tél Tamás – ELTE Elméleti Fizikai Tanszék

Jánosi Imrét tanítottam, gyakorlatokat vezettem évfolyamának az elméleti fizikai egyes tárgyaiból. Végzés után a Szilárdtestfizikai Tanszéken az elektrotechnikai laboratóriumba került, ahol számítógépet is épített, és továbbfejlesztette az amúgy is meglévő kísérletező tehetségét. Kutatási témái az önszerveződő kritikussággal és a szemcsés anyagok fizikájával kezdődtek, majd kiegészültek olyan numerikus eszközök értő felhasználásával, mint az idősoranalízis és adatfeldolgozás, melyekkel tökéletesen illeszkedett a később létrejött Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék profiljához.

Már az 1990-es évek elejétől volt néhány közös munkánk (amikortól már én is Janónak szólítottam), de mindennapos együttműködésünk 1998-ban kezdődött. Ekkor jött ugyanis létre Horváth Viktor, Szabó Gábor és kettőnk javaslatára a Kármán Környezeti Áramlások Laboratórium. A labor gondolatát egy tanulmányútja alapján Szabó Gábor hozta, megalapítását az ELTE-n korábban javasoltuk, de ezt a Múzeum-körút – Puskin utca közti régi kampuszon helyhiány miatt nem támogatta a tanszékcsoport. A Lágymányosi új

helyen annak köszönhetően jöhetett létre, hogy egyes már létező laboratóriumok túlméretezték a helyigényüket. A Kármán-labor célja a nagyskálájú jelenségek laboratóriumi méretekre történő hű lekicsinyítése, majd kísérleti vizsgálata. Talán Janó fogalmazta meg először, hogy ilyen laboratórium 1000 km-es körben nem létezik. Megléte jelentősen emelte az ELTE környezeti fizikai képzéseinek hitelességét.

Két üres laboratóriumi szobával kezdtünk '98 szeptemberében. Emlékszem, Janóval mentünk el az ELTE kémiai laborfelszerelések raktárába, ahol észre – elsősorban az ő érzésére – alapozva vételeztünk állványokat, csöveket, főzőpoharakat stb. Ezután következett – megint csak az ő intuícióján – a nagyobb akvárium méretű üvegekádák legyártatása. Az irodalomból tudtuk, hogyan lehet egyenletes sűrűségű réteget létrehozni (két nagyobb műanyag hordó, egy pumpa, só és víz kell hozzá). Novemberben már kísérleteztünk saját örömünkre. Élvezetes és tanulságos volt látni, hogy a sűrűségi réteget vízbe alulról vékony csövön beáramló színes édesvíz nem jut el a felszínig, jóval

alacsonyabban szétterül (ugyanis a 'jet' peremén képződő örvények sós vizet juttatnak az áramlásba, s így annak sűrűsége a feláramlás során folyamatosan nő), vagy ugyanilyen rétegzettségű folyadékba az édesvízű jégtömb vízszintes sávokban olvad bele. Már ez is jól mutatta, hogy mennyiben más a környezeti hidrodinamika, mint az egyetemen tanultak szerinti. Janó helyzetfelismerése és sok váratlan helyzet sikeres megoldása számomra pedig azt jelentette, hogy itt én vagyok az, aki tanul.

Ezután következett a hosszú kádak megépítése. A 10 méteres kádban nemlineáris hullámokat, a cumaminknak megfelelő szolitonokat, a rövidebben pedig ételfestékkel színezett hideg- és melegfrontokat keltettünk. Az első néhány hónapban én tényleg színes tintákról álmodtam. A Föld forgásának szimulálására forgó tartályokra volt szükség. A laboratóriumi forgóasztalok ára nyugaton több tízezer dollár. Ez elérhetetlen volt, ezért helyi megoldás után kellett nézni, s a fazekasok által használt korongozóasztalok adták a megoldást (kis átalakítással). Ezután már a Coriolis-erő következtében létrejövő áramlások is hozzáférhetővé váltak számunkra, ciklonok és anticiklonok születtek meg szemünk előtt, melyek színezéssel még gazdagabbá váltak kaotikus jellegük miatt.

Bő egy év alatt a labor szinte minden környezeti áramlásokkal kapcsolatos lényeges jelenség bemutatására alkalmassá vált. Számos ismeretterjesztő előadást tartottunk, pl. a Kutatók Éjszakáján, melyek során a diákok – de magunk is – tudományos játszóházban érezték magukat. A hallgatók bevonása is megkezdődött, először diákköri, majd szakdolgozati témákkal, s elindult a kutatási tevékenység, Janó szavaival a „happy labor life”. Mivel ez az egész témakör a magyar fizikusoktatásnak sohasem volt része, kidolgoztunk egy „Környezeti áramlások” tantárgyat is, mely azóta több formában is létezik.

A Kármán-labor legismertebbé vált cikkének érdekes az utóélete. A 2000-es évek elején felerősödött az érdeklődés a közegellenállási erő csekély polimeradalék hatására bekövetkező csökkenése (*drag reduction*)

iránt. Egy francia vendéghallgatóval és Szabó Gáborral kísérletsorozatokat végeztünk: egy kezdetben elrekesztelt víztömb falának hirtelen kihúzásával hoztuk létre az ún. gátszakadási áramlást. A cikkben valóban sikerült kimutatnunk, hogy polimeradalékkal a vízlépcső gyorsabban fut végig. Később, amikor a téma már nem volt olyan népszerű, mosolyogva kérdeztük egymást: miért kapunk még mindig hivatkozásokat? Janó derítette ki, hogy a szabad felszínű áramlásokat szimuláló kutatók a kezdeti hullámtörésről készült *fényképekkel* való egyezést tekintik a numerikus megbízhatóság feltételének.

Janó nélkül a Kármán-labor nem teljesedhetett volna ki, hosszú ideig volt vezetője. Emellett érdeklődési köre igen tág volt, s a fizikán kívüli területekre is kiterjedt. Foglalkozott a mikrotubulusok szerkezetével, a baktériumszuszpenziók mintázatképződésével vagy azzal, hogy mitől függ a hagymás növények virágzási ideje. Különösen ismertek a klímaváltozással kapcsolatos kutatásai, a téma talán legelfogulatlanabb hazai előadója volt, amit a 2019 szeptemberében megtartott, sorozatindító AtomCsill előadása is igazol: <https://www.youtube.com/watch?v=ZHgKZzNtIA>. Az elmúlt években nagy álma lett az óceánográfiai kutatás hazai meghonosítása, amit jól mutat, hogy három friss cikke is az *Ocean Science*-ben jelent meg.

Janó kimagaslott közülünk azzal a képességével, hogy tudományos kérdésekben gyorsan és – mint utólag kiderült – szinte mindig helyesen tudott dönteni, ráadásul a felesleges részletekbe menést kerülve. A kísérleti jártassága mellett ezért is van ott fényképe jó másfél évtizede honlapom „Tanárain” oldalán.

Az ELTE-ről való sajnálatos elkerülése óta néha-nyan igyekeztünk a megmaradt szálakat erősíteni: doktori témákat vezetett, tanári PhD-előadásokat tartott, s rendszeres tudományos konzultációkban vett részt, amelyek több publikáció megszületéséhez vezettek.

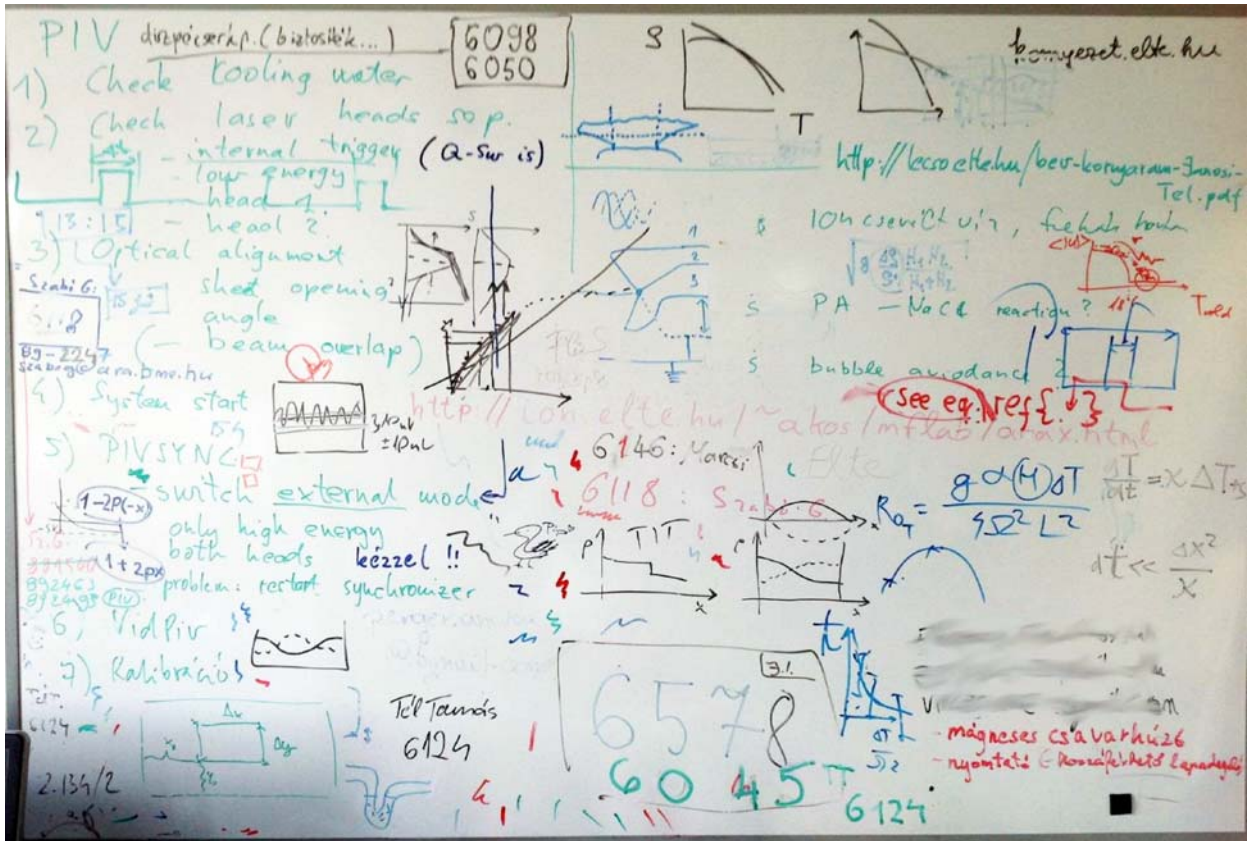
Janosi Imre többünknek fájón hiányzik. Személyében először az ELTE, majd most az ország egyik legsokoldalúbb és legszélesebb látókörű fizikusát, természettudományos kutatóját veszítette el.

JÓ SZELET, KAPITÁNY!

Dr. Jánosi Imre Miklós – vagy ahogy mifelénk mindenki hívta: Janó –, szeretett és csodált témavezetőm kutatásai során a legnagyobb természetességgel lépte át a tudományterületek közötti határokat: közleményei olyan, első ránézésre meglehetősen távol eső területeket fognak át, mint az óceáni vízkörzés dinamikájának vizsgálata, a kontinentális léptékű nap- és szélérőmű-

Vincze Miklós – HUN-REN-ELTE Elméleti Fizikai Kutatócsoport

rendszerek optimalizálásának problémája, a növények fejlődése vagy épp egy gát átszakadásakor létrejövő vízáramlás fizikája. S mindezekben a témakörökben és még rengeteg másban, a környezeti áramlástantól, a granuláris anyagoktól egészen a villámok fizikájáig érdekeset, újszerűt, s alighanem maradandót tudott alkotni.



1. ábra. A Kármán-laboratórium táblája közel húsz év felirataival, köztük számos Janóé

Tehette mindezt egyrészt azért, mert olyan univerzális módszertan volt a kezében – a nemlineáris idősor-elemzés –, melynek eszközeivel virtuóz módon tudott szinte bármilyen problémához közelíteni, de még inkább azért, mert a gyors lényeglátás ritka kutatói képességének s elképesztő intuíciónak volt a birtokában. Ezzel a sokunk által csodált attitűdjével rengetegszer mozdított ki átmenetileg megfeneklelt kutatásokat a holtpontról, s vezetett sikerre. Témavezetőként és kollégaként is úgy ismertük, mint akivel egy rövid konzultáció hónapokra elég ötletet és inspirációt adhat, mely kitar a következő találkozáig. De most már nem lesz több találkozó...

A legelső találkozásunkra 2006-ban került sor, amikor harmadéves fizikushallgatókként két évfolyamtársammal összeszedtük minden bátorságunkat, és jelentkeztünk TDK-zni a Kármán-laborba (1. ábra). Ahogy elkezdtünk hetente kísérletezgetni, közeli ismerősünk-ké és igazi mentorunkká vált Tél Tamás, Szabó K. Gábor és persze Janó, vagyis a labor akkori „alaplegénysége”. Így, azt hiszem, eléggé szokatlan módon, mindhárman társtémavezetői lettek a készülő TDK-dolgozatunknak, amelyben egy friss *Nature*-cikkből közölt érdekes hullámjelenség laboratóriumi modellezését és jobb megértését céloztuk meg.

Már ezt a témát is maga Janó ajánlotta figyelmünkbe, aki valahogy mindig tudott időt szakítani arra,

hogy rajta tartsa szemét a tágabb értelemben vett tudományközi szakirodalom legfrissebb fejleményein is, s aki többek között éppen azért szeretett rendszeresen kéziratokat bírálni, hogy ilyen módon is rákényszerítse magát az új külső ötletekkel való folyamatos találkozásra. (Büszkén viselte öltönyén az Amerikai Fizikai Társaság, az APS rangos *Outstanding Referee* – kiváló bíráló – díjával járó kis aranyozott kitűzőt.) Itt közbevetőleg megjegyzem, hogy mennyire inspiráló és ezért pedagógiai szempontból mennyire kulcsfontosságú volt, hogy szárnypróbálgató kis fizikushallgatókként rögtön egy olyan problémát kaphattunk témavezetőinktől, amely az adott terület frontvonalába tartozik, hiszen a legrangosabb tudományos folyóirat közölt erről alig fél évvel korábban egy közleményt. Megértettük, hogy érdekes módon még manapság is léteznek olyan tudományterületek, ahol hétköznapi méret- és energiaskálákon, szerényebb anyagi háttérrel is lehet újszerű kísérleti fizikát művelni.

A kérdéses jelenség elsőre viszonylag könnyen modellezhetőnek tűnt sós- és édesvízzel feltöltött, kezdetben válaszfalal elzárt hosszú üvegkádak összenyitásával, s a festékekkel színezett frontfej mozgásának videós követésével. De persze, ahogy ezt nulladik lecke-ként gyorsan megtanultuk: az ördög a részletekben bújlik meg, s végül is a munkánk fő „poénja” – ahogy az a felfedező kutatásban lenni szokott –, nem is az lett,

aminek vizsgálatára eredetileg hajtottunk. Eredményeinkből azonban – témavezetőink rendkívüli segítőkészségének köszönhetően – így is egy *Physics of Fluids* „letter”-cikk születhetett másfél évvel később, még egyetemista korunkban.

Hatalmas öröömre aztán Janó 2008-tól vállalta témavezetésem a doktori iskolában is; még úgy is, hogy az azt megelőző félévben nem találkozhattunk személyesen, ugyanis azt a szemeszt a *University of Minnesotán* töltötte vendégkutatóként. Amikor aztán szeptemberben hazaérkezett, így köszöntött: „Welcome on board!” (Üdv a fedélzeten!) Igen, Janó folyamatosan a tengerre vágyott: gyerekkorában is hajóskapitány, de legalábbis tengerész szeretett volna lenni, s ez sok hajózással kapcsolatos szófordulatában is visszaköszönt. Gyakran viccelődött (?) azzal, hogy csak azért lett fizikus, mert Magyarországnak nincsen tengerpartja. De lám, még így is megtalálta a lehetőséget arra, hogy a tengerekhez, óceánokhoz kapcsolódó témákkal foglalkozhasson. S végül aztán beteljesítette eredeti álmát is: jogosítványt szerzett tengeri motoros hajóra, s azóta kedvenc időtöltésévé vált, hogy amikor csak tehet (extrém munkaterhelése és stresszes vezetői feladatai mellett ez a kívánatosnál sokkal ritkábban fordult elő) leutazott az Adriára, kibérelt egy kis hajót, és elindult a nagy kékség felé.

Természetesen nem volna lehetséges itt akár csak címszavak szintjén is felsorolni mindazt, amit tőle tanulhattam arról, ami semmiféle tananyagban nem része: hogy miként, milyen attitűddel érdemes kutatni. Mégis megkísérlem összeszedni ennek néhány elemét. Az olvasónak banálisán hangozhat egyik-másik, de számomra világnézet-formáló tanulságok voltak az alábbiak, amelyeket talán explicite sose mondott ki Janó, de éveken át közelről figyelve tudományos működését így raktam össze őket magamban.

Jó kérdéseket kell felvetni. Ahogy már a TDK-témánál is kiderült, Janó komolyan hitt abban, hogy az élet alighanem túl rövid ahhoz (s lám, milyen igaza lett), hogy olyan tudományos problémákkal foglalkozunk, amelyek nem relevánsak, vagyis még siker esetén sem tanulhatunk belőlük semmi „használhatót”, s végképp ne pazaroljuk az időt olyan elméletek alkotására, amelyeket nem lehetséges kísérletileg vagy megfigyelésekkel ellenőrizni. Persze még így is előfordult, hogy egyik-másik „zátonyra futott” projektben – hogy maradjunk a hajózási metaforáknál – úgy tűnt, mégsem származott a sok hónapnyi pepecseléssel előkészített kísérletből semmilyen újszerű vagy legalábbis publikálásra érdemes eredmény. De ekkor jöhetett a második Janó-féle „szabály”.

Ennyi mérési adatban biztosan kell lennie valami érdekesnek! Az ilyen demoralizáló helyzetekben Janó töretlen optimizmussal (vagy inkább a komplex rendszerek vizsgálatában szerzett sok-sok tapasztalattal) gyakran ezzel vigasztalt. S majdnem mindig igaza is lett! De ahhoz, hogy sikerrel járjunk, rendszerint vissza

kellett mennünk „a kályhához”, az alapokhoz, s ehhez kapcsolódik a következő intelem.

Az adat minden előtt. Janó mindig tudni akarta, és rendszerint ki is derítette, hogy a származtatott adatok, amelyekkel dolgozik, hogyan keletkeztek. Még amikor műholdas hőmérőkkel vagy sok állomás adatából „asszimilált” klímaadatsorokkal és hasonló komplex adattermékekkel találkozott is, a lehető legalaposabban utánajárt, hogy ezek milyen mérési és feldolgozási folyamatok sorozatán mentek keresztül. S meglepően gyakran talált ezeknek köszönhetően valami értékeset.

Merni megkérdőjelezni. Ilyen izgalmas felfedezés volt például munkásságának az a számomra végtelenül tanulságos és feledhetetlen epizódja, amikor másodéves doktoranduszkoromban Janó azt merészelt állítani egy enyhén szólva is provokatív cikkében – melyet ugyan ketten jegyzünk, de benne minden eredeti gondolatért ő a felelős – hogy az Atlanti Többévtizedes Oszcilláció (*Atlantic Multidecadal Oscillation*, AMO) nevű 50–70 éves skálájú hőmérsékleti anomália periodikus jelként való létezését voltaképpen semmiféle mérési adat nem támasztja egyértelműen alá. A cikk publikálása éppen, mert szembe ment az uralkodó paradigmával, nem volt éppen egyszerű, s a kézirat ennek megfelelően legalább három szerkesztőségben is megfordult. Janó azonban nem adta fel, s mostanra már azok a kutatók is Janóéval megegyező következtetésre jutottak, akik annak idején először írtak erről az „oszcillációról”.

Tudni, mikor kell abbahagyni. Végül, minden Janó-féle éleslátás, intuíció és virtuozitás ellenére is bizony megesett, hogy jó másfél évnyi próbálkozás után sem ért sikert egy kísérletünk. Egy doktoranduszunk persze nem könnyű ilyenkor beismerni, hogy rengeteg időt, energiát, pénzt fordítottunk egy kutatásba, amelyből a világon semmi érdekes nem akar kijönni. Az ilyen projektek mérgező csapdákká tudnak válni, s éppen az eddig befektetett energiát öngazolásként felhasználva az ember képes még több energiát, időt és pénzt beleölni teljesen hiába, egyre csak növelve saját és környezete frusztrációját. Janóra mint témavezetőre szerencsére az ilyen helyzetekben is lehetett számítani. „Na mit tanultunk ebből? Ha infralámpával világítunk rá a vízre, akkor felmelegszik. Hát, végül is, ez is valami!” – mondta ekkor, az adatok sok óras gondos átvizsgálása után szembesülve a helyzettel. S éppen az efféle fanyar humorral segített továbblépni és „elengedni” a meddő kísérletet, amelyről kiderült, hogy tisztességes kivitelezése meghaladja lehetőségeinket.

Nagyon hálás vagyok, hogy Janó mellett és tőle tanulhattam meg ezeket a fontos leckéket és még ezernyi mást. Távozása pótolhatatlan veszteséget jelent az innenső parton maradó tanítványok, kollégák, barátok számára.

Jó utat, jó szelet, kapitány!

A FIZIKAI SZEMLE LXXIII. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE

| | | | |
|---|-----|--|-----|
| <i>Antal Dávid, Gergely Attila, Neda Zoltán:</i> Földrengés- modell a futószalagon | 353 | <i>Nagy Sándor:</i> Gravitáció és renormálás | 152 |
| <i>Asbóth János:</i> Topológia a modern szilárdtest-fizikában. | 109 | <i>Németh Károly:</i> Okozhatnak-e vulkánkitöréseket a földrengések? | 346 |
| <i>Asztalos Bogdán, Czégel Dániel, Pollner Péter, Palla Gergely:</i> Szövegelemzések statisztikus fizikai aspektusai | 311 | <i>Németh Zoltán, Opitz Andrea:</i> A Naprendszer űrszondás kutatása – szakmai bevezető. | 218 |
| <i>Azimov Jakov Iszakovics:</i> Vlagyimir Naumovics Gribov – életrajzrészletek | 192 | <i>Németh Zoltán, Timár Anikó:</i> Egy üstökös háborgó plazmakörnyezete – Rosetta-eredmények | 241 |
| <i>Bagyinka Csaba, Nagy Dénes Lajos, Vincze Imre: Keszthelyi Lajos</i> | 85 | <i>Nyíri Pál:</i> Szemelvények Gribov-interjúkból és -emlék- ülésekből. | 197 |
| <i>Bányai Anita, Bató Lília, Leelóssyné Tóth Eszter, Varga Máté, Fűrjes Péter:</i> Áramlástan jelenségek mikroσκο- pikus mérettartományban – mikrofluidikai rendszerek és alkalmazásaik | 383 | <i>Opitz Andrea, Madár Ákos:</i> A belső helioszféra kutatása. | 220 |
| <i>Barna B. Péter:</i> Elmaradt beszélgetés Keszthelyi Lajossal | 77 | <i>Ormos Pál:</i> Keszthelyi Lajos élete. | 74 |
| <i>Barta Veronika, Berényi Kitti, Buzás Attila, Kiszely Márta, Szabóné André Karolina, Szárnya Csilla:</i> Földrengések nyomai a felsőlégkörben? | 338 | <i>Ormos Pál:</i> Keszthelyi Lajos ismerkedése a bakterioro- dopszinnal. | 95 |
| <i>Bebesi Zsófia:</i> A Szaturnusz és plazmakörnyezetének vizsgálata – részvétel a Cassini–Huygens-űrmisszióban | 225 | <i>Pályi András, Frank György, Pintér Gergő:</i> Születés- szabályozás a szilárdtest-fizikában. | 110 |
| <i>Berkesi Márta, Spráncz Tamás, Hencz Mátyás, Béké- si Eszter, Porkoláb Kristóf:</i> A földrengések szerepe a CO ₂ -gazdag fluidumok szállításában | 343 | <i>Pásztor Gabriella:</i> 10 évvel a Higgs-bozon felfedezése után: új fizika nyomában az LHC-n | 37 |
| <i>Cserti József, Dávid Gyula:</i> Eötvös mágikus száma | 369 | <i>Pásztor Gabriella:</i> Az Univerzum titkai és a Nagy Had- ronütköztető: nyitott kérdések a részecskefizikában. | 43 |
| <i>Dér András:</i> Keszthelyi Lajos, a karizmatikus vezető és tanítómester. | 101 | <i>Pásztor Gabriella:</i> Jelek a standard modellen túlról? Leptonuniverzalitás-anomáliák és leptokvark-keresés a Nagy Hadronütköztetőn. | 48 |
| <i>Doksicer Jurij:</i> Vlagyimir Gribov (1930–1997) | 182 | <i>Péli Zoltán, Trócsányi Zoltán:</i> Metastabil Világegyetem | 39 |
| <i>Fejős Gergely:</i> A királis szimmetria helyreállása az erős kölsönhatásban renormálásicoport-módszerrel | 157 | <i>Polónyi János:</i> Kis paraméterek és a nagy egyesítés | 146 |
| <i>Földes István:</i> űrutazás, lézerek és Marx György | 200 | <i>Polónyi János:</i> Mi a renormcsoport? | 145 |
| <i>Frenkel Andor:</i> Vologyára emlékezve | 196 | <i>Rózsa Levente, Palotás Krisztián:</i> Nanoméretű mágneses szerkezetek topológiája. | 114 |
| <i>Gerstejn Szemjon Sz.:</i> Egy barát emlékére. | 189 | <i>Salamon Péter, Máthé Marcell, Buka Ágnes, Jákli Antal:</i> Hangolható hibahelyek nematikus folyadékkristály- cseppekben | 120 |
| <i>Hargittai István, Hargittai Balázs:</i> Szilárd Leó emlékezete. | 53 | <i>Sólyom Jenő:</i> Keszthelyi Lajos (1927–2022) | 73 |
| <i>Horváth Dezső:</i> Vlagyimir Naumovics Gribovra emlékezünk | 181 | <i>Somayegh Eskandari, Koltai János, László István, Kürti Jenő:</i> Szén nanocsövek belső tere mint kémiai nanoreaktor | 319 |
| <i>Horváth Gábor, Pereszlényi Ádám, Száz Dénes, Takács Péter, Egri Ádám, Jánosi Imre:</i> Zebracsíkok termofizio- lógiai vizsgálata, avagy miért csíkos a zebra? | 298 | <i>Sulik Béla, Herczku Péter, Juhász Zoltán, Duncan V. Mifsud, Kovács T. S. Sándor, Sergio Ioppolo, Rácz Richárd, Biri Sándor, Robert W. McCullough, Rahul Kumar Kuswaha, Zuzana Kaňuchova, Vajda István, Lakatos Gergő, Nigel J. Mason:</i> Jeges égítetek ionokkal bombázott felületén zajló folyamatok és laboratóriumi modellezésük | 256 |
| <i>Iglói Ferenc:</i> Köszöntő | 1 | <i>Szabó Bálint, Ungai-Salánki Rita, Francz Barbara, Gerecsei Tamás, Horváth Róbert:</i> Egyedi sejtek mani- pulációi robotizált mikropipettával | 303 |
| <i>Juhász Róbert:</i> Rendezetlen rendszerek renormálása | 168 | <i>Szabó Gábor:</i> Mi a kvantumállapot? | 17 |
| <i>Juhász Zoltán, Duncan V. Mifsud, Herczku Péter, Zuzana Kaňuchova:</i> Laboratóriumi asztrokémiai vizsgálatok a Jupiter jeges holdjait felderítő Juice-misszió jegyében. | 262 | <i>Szakács Sándor, Kovács István János:</i> A földrengések prekurzor alapú előrejelzése: vágýalom vagy valós lehetőség? | 334 |
| <i>Kármán Tamás:</i> A Bécsi Természettudományi Múzeum kiállítása, 2018. | 255 | <i>Szalai Sándor, Nagy János:</i> Fejlesztések naprendszer- kutatási missziókban | 267 |
| <i>Kereszturi Ákos:</i> A Comet Interceptor küldetés | 245 | <i>Szalay Szilárd:</i> Kvantumkorrelációk és rejtett változók | 4 |
| <i>Kontorczyk Mátyás:</i> Nemjelző korrelációk logikai megvalósítása. | 13 | <i>Szalay Szilárd:</i> Második kvantumforradalom – a kvantumelmélet alapfogalmai. | 3 |
| <i>Kovács István János:</i> Földrengések fizikai szemüvegen keresztül: vagy ami a hírekből kimarad. | 333 | <i>Szegő Károly emlékére</i> | 217 |
| <i>Kovács Tamás György:</i> Kvantumtérelmélet rácson | 163 | <i>Szőkefalvi-Nagy Zoltán:</i> „Ott fenn a hegyen” – emlékezés Keszthelyi Lajosra. | 91 |
| <i>McLerran Larry:</i> A nagyenergiás Gribov – emlékezés | 186 | <i>Tárnoki-Zách Júlia, Méhes Előd, Bösze Szilvia, Czírök András:</i> Biológiai gátrendszerek szövetmodelljének biofizikai jellemzése. | 324 |
| <i>Nagy Máté, Zafeiris Anna, Horicsányi Attila, Kubinyi Enikő, Vásárhelyi Gábor, Vicsek Tamás:</i> Csoportos keresés labirintusban: a társaktól származó információ és a patkánycsoport változatos összetételének előnyei és hátrányai | 305 | | |

| | |
|---|-----|
| <i>Tátrallyay Mariella</i> : Magyar részvétel a VEGA- űrmisszióban | 235 |
| <i>Tóth Imre</i> : Mit tudunk meg az üstökösmagokról az eddigyi helyszíni űrmissziókból? – rövid áttekintés . . . | 248 |
| <i>Ván Péter, Pszota Máté</i> : Ekvivalenciaelvek és gravitáció- elméletek. | 405 |
| <i>Vásárhelyi Gábor, Virágh Csaba, Balázs Boldizsár, Somorjai Gergő, Nepusz Tamás, Vicsek Tamás</i> : Intelli- gens drónrajok csoportos viselkedése. | 315 |
| <i>Vicsek Tamás, Kürti Jenő, Derényi Imre</i> : Beköszöntő: 25 éves az ELTE Biológiai Fizika Tanszéke. | 297 |
| <i>Völgyesi Lajos, Szondy György, Tóth Gyula, Fenyvesi Edít, Kovács Péter, Kiss Bálint, Égető Csaba, Barnaföldi Gergely Gábor, Lévai Péter, Ván Péter</i> : Eötvös-ingák felújítása és továbbfejlesztése, jel-zaj viszonyaik elemzése | 416 |

REFLEKTORFÉNYBEN

| | |
|--|-----|
| <i>Dombi Péter, Varjú Katalin</i> : Krausz Ferenc, az attofizika úttörője | 390 |
| <i>Földes István, Tóth Zsolt</i> : Áttörés a lézeres termonukleáris fúzióban | 26 |
| <i>Kun Emma</i> : Út a többcsatornás csillagászat és asztrofizika világába | 124 |
| <i>Makk Péter</i> : Kétdimenziós szerkezetek: Az elektron- optikától a korrelációkig. | 203 |
| <i>Patkós András</i> : Súlyom Jenő. | 108 |
| <i>Péter László</i> : A lítiumion-akkumulátorok hazai gyártásáról – kutatói szemszögből | 357 |
| <i>Pethes Ildikó</i> : Kamarás Katalin, az első Széchenyi-díjas fizikusnő | 274 |
| Schmid Rezső-díj 2022: Fábián Margit | 60 |
| <i>Szalai Tamás</i> : A James Webb-űrteleszkóp. | 57 |
| <i>Újfalussy Balázs, Csire Gábor</i> : Az LK-99, a kérészetű szupravezető | 423 |
| <i>Vancsó Péter</i> : A 2022. évi Gyulai Zoltán-díj: kétdimenziós anyagok modellezése | 173 |
| <i>Vukics András</i> : Fény–anyag-kölcsönhatás – Úton az ultra- erős csatolás tartományába. | 21 |

A FIZIKA TANÍTÁSA

| | |
|--|-----|
| <i>Csatári László</i> : Hangsebesség meghatározása ultrahangos távolságérzékelőkkel | 132 |
| <i>Csernótszky Zoltán, Horváth Ákos</i> : Alacsony hőmérsékletű γ -Stirling-motor tesztelése. | 62 |
| <i>Gärtner István</i> : Egy energetikához kapcsolódó tanóra a középiskolai fizikatanítás lezárásához – A nukleáris energia pozitív bemutatása. | 178 |
| <i>Gnädig Péter, Széchenyi Gábor, Vankó Péter, Vigh Máté</i> : Beszámoló a 2022. évi Eötvös-versenyéről | 279 |
| <i>Gyertyán Attila</i> : Junior természettudományos diákolimpia – Egy kevésbé ismert nemzetközi verseny ismertetése. | 431 |
| <i>Hasznosi Tamásné</i> : A jó pap holtig tanul, avagy rövid élménybeszámoló az MNT tanári továbbképzéséről. | 365 |
| <i>Horváth Dezső</i> : Hozzászólás Keresztesi Miklós cikkéhez. | 69 |
| <i>Izsa Éva</i> : Hogyan szervezzünk tanulmányi kirándulást a CERN-be? | 328 |
| <i>Kiss Miklós</i> : Színképről, hangokról középiskolában – másként. | 208 |
| <i>Koncz Károly, Simon Péter</i> : 42. Mikola Sándor Országos Középiskolai Tehetségkutató Fizikaverseny – Beszámoló. | 426 |
| <i>Kucsera Robin, Simon Ferenc</i> : A folyamatok megfordít- hatatlansága és a spinechó. | 361 |

A FIZIKAI SZEMLE LXXIII. ÉVFOLYAMÁNAK TARTALOMJEGYZÉKE (folytatás az előző oldalról)

| | |
|---|-----|
| <i>Pálfalvi László</i> : Hozzászólás a lejtőről súrlódásmentesen lecsúszó test „paradoxona” című cikkhez | 29 |
| <i>Papp Katalin, Kopasz Katalin, Nagy Anett</i> : Bepillantás a szegedi „Játsszunk fizikát!” kísérletes diákversenye 23 évébe | 32 |
| <i>Patkós András</i> : A párhuzamosok időnként durván egy- másba metszenek (Eötvös Loránd és Kármán Tódor). | 394 |
| <i>Sódor Ádám</i> : Miért olyan elutasítók a tudósok a mindent felforgató, új tudományos elképzelésekkel szemben? | 129 |
| <i>Sükkösd Csaba</i> : XXVI. Országos Szilárd Leó fizikaverseny – 1. rész. | 210 |
| <i>Sükkösd Csaba</i> : XXVI. Országos Szilárd Leó fizikaverseny – 2. rész. | 288 |
| <i>Sükkösd Csaba</i> : XXVI. Országos Szilárd Leó fizikaverseny – 3. rész. | 396 |
| <i>Zhang Yu Jie, Simon Ferenc</i> : Fraktálok zenéje – avagy érdekes jelalakok oszcilloszkópon. | 137 |

HÍREK – ESEMÉNYEK

| | |
|--|-----|
| <i>Balog János, Forgács Péter</i> : Frenkel Andor és Haskó Péter XC | 216 |
| Hírünk a nagyvilágban | 143 |
| Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntetettjeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira | 37 |
| Kitüntetések március 15. alkalmából. | 144 |
| <i>Kondor Imre</i> : Harminc éves a Bolyai Kollégium | 3 |
| <i>Lendvai János</i> : Köszönet a 31. évért! | 332 |
| <i>Pályi András</i> : Emléktábla-avatóbeszéd | 404 |
| <i>Szarka László Csaba</i> : A budapesti Eötvös 175 emlék- helytúra. | 402 |
| <i>Szigeti Balázs Endre, Rábóczki Bence, Dobos Csenge</i> : Mafihe, avagy 35 éve a fizikushallgatók szolgálatában. | 70 |

MEGEMLÉKEZÉS

| | |
|---|-----|
| <i>Elblinger Ferenc</i> : Kaszás Dezső (1932–2022) | 140 |
| <i>Forró László</i> : Búcsú Karl Alex Müllertől | 144 |
| <i>Gelencsér Jenő, Gnädig Péter, Fái György, Tél Tamás, Szapudi István</i> : Emlékek fizikushallgatói generációkat tudományra lelkesítő barátunkról (Patkós András összeállítása) | 366 |
| <i>Horváth Gábor</i> : In memoriam Jánosi Imre (1963–2023): társ szerzői búcsú Boschán Péter (1938–2023) tanárunkra is emlékezve. | 434 |
| <i>Tél Tamás</i> : Egy igaz fizikus: Jánosi Imre. | 436 |
| <i>Vincze Miklós</i> : Jó szelet, kapitány! | 437 |

KÖNYVESPOLC

| | |
|---|-----|
| <i>Súlyom Jenő</i> : Fizika Magyarországon 1945–1959 (Patkós András) | 107 |
| <i>Bokor Nándor</i> : Petr Beckmann: <i>A pi története</i> | 180 |
| <i>Surján Péter</i> : Patkós András: <i>Céltudatos bolyongásaim – történetek a fizika labirintusaiból</i> | 296 |

TÁRSULATI DÍJAK

| | |
|---|------------|
| Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2023. évi díjazottjai. | 2023/10-B3 |
|---|------------|

A 2024. januári szám fókuszában Krausz Ferenc Nobel-díja és az azzal kapcsolatos magyar vonatkozású eredmények állnak

A T T O W O R L D is a home for synergies across institutions and borders. By uniting the teams of the Laboratory for Attosecond Physics [↗](#) at the Max-Planck-Institute of Quantum Optics, the Chair of Experimental Physics - Laser Physics [↗](#) of the Ludwig-Maximilians-Universität (LMU), and of the LMU Centre for Advanced Laser Applications (CALA) [↗](#) and closely collaborating with researchers from the Center for Molecular Fingerprinting (CMF) [↗](#) ... more



Ferenc Krausz

