

# fizikai szemle



2019/2

**NEM KELL HŐSNEK LENNED!**

**MARADJ TOVÁBBRA IS  
A FIZIKA BARÁTJA!**

**SZÁMÍTUNK RÁD,**



támogasd jövedelemadód

**EGY százalékával**

az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot!

Adószámunk: 19815644-2-43



Társulatunk működési biztonsága az intézményes szponzorálás fokozódó bizonytalansága miatt egyre nagyobb mértékben függ tagjaink anyagi támogatásától. Egyik legfőbb szponzorunk – támogatási rendszerének teljes revíziója miatt – már 2018-ban sem hagyta jóvá Társulatunk támogatását, és sajnos a jövő sem biztató. Hisszük, hogy minden tagunk már rendezte éves tagdíját. Sokan szerény mértékben túl is fizetik annak összegét. Bizonyára lesznek még, akik néhány ezer forint többletet is felajánlanak ügyünknek.

Önkéntes adományokat az **10200830-32310274-00000000** számlaszámon fogadunk.

A 2019. évi

## 62. Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató

A 2019. évi ankétot március 13-tól 16-ig a Debreceni Egyetemen, Környezetünk fizikája témában rendezzük meg.

Állandóan frissülő részletek a társulati [www.elft.hu](http://www.elft.hu) és a szakcsoport [www.kfki.hu/elftkisk](http://www.kfki.hu/elftkisk) honlapon.

A rendezvény 30 órás akkreditált pedagógus-továbbképzésnek minősül.

Előadások március 13–16-ig, műhelyfoglalkozások és eszközkiallítás

március 14–15-én, kulturális program március 14-én, ünnepélyes díjátadások március 13-án és 16-án.

ELFT Oktatási Szakosztályának vezetője



2 m

4 m



Az Eötvös-ingát ábrázoló díszkút 1970 óta áll az Eötvös Loránd Geofizikai Intézet épületének Thököly útra néző előkertjében (alkotóját nem ismerjük).

## EÖTVÖS 100

„Eötvös 100” emlékév van, bár a kormány még nem nyilvánította hivatalosan azzá a 2019-es évet, amiért is a január 14-én rendezett tudományos ülés-szakot és az Eötvös Loránd-tablókiállítás megnyitását (<https://eotvos100.hu>) nem lehetett a nemzeti emlékév megnyitásaként meghirdetni. Akárhogyis, a *Fizikai Szemle* kötelességének érzi, hogy 2019-es évfolyamában kiemelten foglalkozzon *Eötvös Loránd* szerteágazó tudományos és közéleti tevékenységének bemutatásával. Előző és jelen számunkban jelent, illetve jelenik meg *Patkós András* Eötvös időszerűségét bemutató kétrészes cikke, aminek elolvasását csak a legmelegebben tudom ajánlani, akár a fizika iránt esetleg kevésbé érdeklődők számára is. A cikk ugyanis nem csak Eötvös munkásságának máig ható aktualitását bizonyítja, hanem akár demonstrációnak is tekinthető – egy éppen napjainkban a hazai tudományos és politikai életben fellángolt vitával kapcsolatban – az alkalmazott, vagy az alapvető, megismerésre irányuló kutatások fontosságáról és finanszírozásáról. Eötvös zseniális módszere mindkét szempontból fontos.

Alaptudományi oldalról a gravitáló és a tehetetlen tömeg arányosságát kimondó, *Einstein* gravitációs elméletének és az általános relativitáselmélet alapját jelentő ekvivalenciaelv érvényességének kísérleti vizsgálata a fontos. Az ekvivalenciaelv érvényességi tartományának egyre pontosabb meghatározására irányuló, napjainkban is lényegében Eötvös módszerén alapuló és igen jelentős ráfordítással folyó kísérletek fontosságát az einsteini elmélet egyre szigorúbb ellenőrzése indokolja. Az ekvivalenciaelv esetleges sérülését kereső kísérleti gravitációs fizika napjainkban az alapvető kölcsönhatások vizsgálatának egyik legígéretesebb kutatási irányzata. Mint *Király Péter* a *Fizikai Szemle* egy korábbi évfolyamában megjelent cikkében (A 100 éves Eötvös–Pekár–Fekete-kísérletek és máig tartó hatásuk. *Fizikai Szemle* 57/1 (2007) 1–6.) olvashatjuk: „a modern kozmológia és a nagy egyesítések korában az »ötödik erő« hipotézise Eötvös Loránd nevét és az Eötvös–Pekár–Fekete-kísérleteket világszerte ismertté tette, ezért azóta a kísérletek tágabb körét tekintik »Eötvös-típusúnak«, mint korábban”.

A gyakorlati alkalmazások területén az Eötvös-féle gravimetria a geofizikában alapvető. A gravitáció helyi változását jellemző mérések jelentőségéről a jelen számunkban megjelenő írásban olvashatunk. A nehézségi erő ilyen változásaiból például a Föld mélyében húzódó nagyobb sűrűségű hegyvonulatok alakjára, méreteire következtethetünk. Közismert, hogy az Eötvös-ingát alkalmazzák a földgáz- és petróleumkutatásokban, mert segítségével kijelölhetőek azok a helyek, ahol a fúrás a legnagyobb valószínűséggel vezet eredményre. Ilyen kutatásokra az egész világon használják az Eötvös-féle ingát, aminek segítségével több milliárd köbméter gázt és több százmillió tonna olajat találtak meg. (Lásd például Meskó Attila: Az Eötvös-inga. *Magyar Tudomány*, 43/7 (1998) 783–795.) Az Eötvös-inga a maga idejében elég sikeres exportcikké is vált, sőt olyan hatása is volt, mint a Magyar Optikai Művek, a hazai ipar egyik sok évtizeden keresztül sikeres és elismert vállalatának megalapítása. Ennek ellenére, az, hogy Eötvös Lorándot máig a legnagyobb hatású magyar fizikusnak tekintjük, az ekvivalenciaelv érvényességére vonatkozó vizsgálatainak köszönhető.

### 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:  
Lendvai János

Szerkesztőbizottság:  
Bencze Gyula, Biró László Péter,  
Czitrovsky Aladár, Füstöss László,  
Gyürky György, Hebling János,  
Horváth Dezső, Horváth Gábor,  
Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Koppa Pál,  
Ormos Pál, Papp Katalin, Simon Ferenc,  
Simon Péter, Sükösd Csaba,  
Szabados László, Szabó Gábor,  
Takács Gábor, Trócsányi Zoltán,  
Ujvári Sándor

Műszaki szerkesztő:  
Kármán Tamás

A folyóirat e-mailcíme:  
szerkesztok@fizikaiszemle.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://www.fizikaiszemle.hu>



A címlapon:

WRO'2018 (Thaiföld, ChiangMai) – készül az Open kategóriában induló SZIG@HUN csapat „Green In Box” modellje.

## TARTALOM

Lendvai János: Eötvös 100	37
Patkós András: Eötvös Loránd időszerűsége – 2. rész	39
Rejtőzködő hegyvonulatok gravimetriás feltárása – Eötvös álma megvalósul <i>Az Eötvös-batásnak nevezik a geofizikában a centrifugális és a Coriolis-batás együttesét figyelembe vevő korrekciót a gravimetriás mérésekben.</i>	
Takács Gábor: Van-e távolhatás a kvantumelméletben?	43
<i>A Bell-egyenlőtlenség kísérletileg is igazolt sértését sokszor távolbatásként (nemlokálitásként) írják le, pedig a kvantumelmélet teljes mértékben összefér a relativisztikus kauzalitás (lokálitás) elvével.</i>	
Ódor Géza, Hartmann Bálint: A heterogenitások hatásai villamos hálózati modelleken	50

*Az írás az áramkimaradások méreteloszlásának statisztikus fizikai módszerekkel történő modellezését tárgyalva egyebek között arra az eredményre jut, hogy az elosztott energiatermelő rendszer szinkronizációs tulajdonságai jobbak, mint a hagyományos, centralizált erőműves hálózatéi.*

## A FIZIKA TANÍTÁSA

Jendrék Miklós: Muzsikáló fizika	55
<i>A bemutatott jelátalakítások lebetűvé teszik fénytani, akusztikai, elektromágneses jelenségek demonstrálását és vizsgálatát.</i>	
Vörös Alpár István Vita: Szabadulósobák a folyadékok fizikájának tanulmányozására	58
<i>A tanulás hatékonysága növelhető aktív tanulási stratégiák felhasználásával, erre egy példa a szabadulósobás foglalkozás, ami által olyan képességek fejleszthetők, mint a komplex problémamegoldó, illetve kommunikációs készség.</i>	

Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Horváth Gábor: Tanulók fizikával kapcsolatos tévhitei – Mégsem mozog a Föld? <i>25 tesztkérdésből 15-ben a megkérdezetteknek több mint fele a fizika tudományával nem összeegyeztethető nézetekkel bírt.</i>	63
--	----

Mai gyerekek legalább két életet kell élnie!	70
Szalayné Taby Zsuzsanna tanárnővel Kerekes Sándor beszélget <i>Diákjaink legyenek felkészültek az órákon, és mozogjanak otthonosan a matematikai, természettudományos, műszaki és informatikai világban!</i>	

## VÉLEMÉNYEK

Bognár Gergely: Mit tegyünk, hogy ne neveljünk laposföld-hívőket? <i>Ha nem akarjuk, hogy diákjaink fejében elmosódjon a határ fizika és varázslás, asztrológia és csillagászat között, komolyan kell vennünk a tudományosság kritériumainak tanítását.</i>	72
--	----

J. Lendvai: Eötvös 100

A. Patkós: The Timeliness of Loránd Eötvös – Part II. Gravimetric exploration of hidden mountains – The dream of Eötvös is comes true

G. Takács: Is there action at a distance in quantum theory?

G. Ódor, B. Hartmann: Effects of heterogeneities in electric network models

## TEACHING PHYSICS

M. Jendrék: Physics plays music

A. I. V. Vörös: Liberation rooms to study the physics of liquids

M. Nagy-Czirok Kiszi, G. Horváth: Misconceptions of students concerning Physics: The Earth is not moving?

S. Kerekes: Today's child must have at least two lives! – Interview with Zs. Szalay Taby

## OPINIONS

G. Bognár: What do we do to not educate flat earth believers?



# EÖTVÖS LORÁND IDŐSZERŰSÉGE – 2. rész

## Rejtőzködő hegyvonulatok gravimetriás feltárása – Eötvös álma megvalósul

Patkós András  
ELTE Fizikai Intézet

### Az eötvösi vízió

„Itt lábaink alatt terjed el, hegyek koszorújától övezve, az Alföld rónasága. A nehézség azt lesimitván, kedve szerint formálta felületét. Vajon milyen alakot adott neki? Micsoda hegyeket temetett el és mélységeket töltött ki lazább anyaggal, amíg létrejött ez az aranykalászokat termő, a magyar nemzetet éltető róna? Amíg járok rajta, amíg a kényerét eszem, erre szeretnék még megfelelni...” [20]

Gravitációs mérések sorozatával *Eötvös Loránd* és munkatársai 1901-ben a Balaton jegén 30 állomáson állapították meg a földfelszín lokális görbületét. A mérések összeillesztésével egy Kenesétől majdnem Tihanyig húzódó vízalatti hegységet fedeztek fel. „Azzal a kíváncsisággal, mellyel az utazó, ismeretlen vidékre jutván, annak hegyeit és völgyeit kutatja, jártam én is a Balatonon. Az én ismeretlen vidékem ott feküdt mélyen a jég sima tükre alatt; nem láttam, s nem is fogom látni soha, csak eszközöm érezte meg...” [20]

A költői hevületű beszámolóban megfogalmazott tudományos program évszázad múltán immár a globális földtörténet kutatásának gyakorlatias eszköze. A gravitáció helyi változását jellemző méréseket ma nem néhány kilométerenként fáradságos munkával újraterelített mérőházikóban, a torziós szál nyugalmi helyzetének kialakulására sok órát várva ismétlik. Repülőgépen vagy éppen műholdon elhelyezett *gravimetrikus* mérőeszközökkel szinte folyamatos a repülés útján változó mérőpontok során a gravitációs vonzás nagyságának és irányának adatfelvétele. Az adatokat ábrázoló *gravitációsanomália-térképeken* sok ezer vagy akár millió négyzetkilométeres tenger- vagy jégfelület alatt húzódó láthatatlan domborzati objektumok képe tűnik fel. A párhuzamos *földmágnességi mérésekkel* (amelyeket már Eötvös is elvégzett) párosítva kontinensek földtörténeti korok időskáláján bekövetkezett vándorlását is fel tudják deríteni.

A modern mozgó laboratóriumokban nyert mérés-  
adatok értékelésének kötelező mozzanata a gravimé-



6. ábra. Wegener elképzelése az egyetlen, egységes őskontinensről.

terek méréseinek *Eötvös-korrektíója*. A műveletet azért neveztek el a geofizikusok Eötvös Lorándról, mert ő hívta fel figyelmüket arra, hogy a forgó Föld felületén mozgó eszközzel végzett gravitációs (szabadesési) mérések eredményeinek értelmezésében a tehetetlenségi erők hatását is figyelembe kell venni. Ezért a geofizikában a közismert centrifugális és a Coriolis-hatás együttesének neve: Eötvös-hatás [21]. Alig több, mint 100 éve még tudós geofizikusokat kellett figyelmeztetni létezésére. A jelenség mindmáig bekerül a felsőbb szintű földmérési szakkönyvekbe, bár speciális esetre középiskolások is könnyen megértik. Az „Eötvös-korrektíó” elnevezést az újabb közlemények majd mindegyike *R. B. Harlan* 1968-as cikkére [22] hivatkozva használja.

Ismertetésünk célja az Eötvös-hatás alkalmazásának bemutatása a 21. század földtörténeti kutatásaiban.

### Az őskontinens feltöredezéseinek nyomában

Az 1920–30-as években *Alfred Wegener* vonta a tudományos figyelem fókuszába a földtörténet – zömében az élet megjelenése előtti (a proterozoikum) korszakában létezett – szuperkontinenseinek kialakulását, majd feltöredezésük kérdését. Javaslatát, amely főleg a mai kontinensek partvonalainak geometriai összeillesztheszhetőségén alapult (6. ábra), egyre alaposabb geológiai tanulmányok tették növekvő mértékben el-



*Patkós András* (1947) akadémikus az ELTE emeritus egyetemi tanára. Elméleti fizikus, aki a kvantumtérelméletek megoldási módszereit fejleszti, az erős és az elektrogyenge anyag fázisátalakulásait, azok kozmológiai szerepét kutatja. Számos tankönyv (társ)-szerzője. Rendszeresen ír tudományos-népszerűsítő cikkeket is.

fogadottakká. A mai globális éghajlati modellek a földtörténet korai szakaszaira vonatkozó szimulációkba beépítik a szuperkontinensek és az ósocéáni áramlások hatásait.

A legalaposabban tanulmányozható dinamikájúnak a nagyjából 800–500 millió évvel ezelőtt az egységes Pangeától elvált, a déli féltéken kialakult Gondwana őskontinentst tartják. Ez 120–140 millió évvel ezelőtt az utolsó nagy lemezdinamikai (tektonikai) folyamatban a mai Dél-Amerika, Afrika, az Antarktisz és Ausztrália kontinenseire töredezett szét. Belőle szakadt le India is, amely azután az északi Laurasia őskontinenssel ütközve a Himalája vonulatát gyűrte fel.

Afrika és az Észak-kelet Antarktisz hegységeit alkotó, mára sok ezer kilométer távolságra került kőzetek mineralógiai vizsgálatával, az azonos korúakba befagyott mágnesség nagyságának és irányának laboratóriumi elemzésével meggyőzően igazolható az egykori kontinentális összetartozás. Azonban Afrika és az Antarktisz közötti óceán-borította óriási területen a tengerfenéknek meg a Kelet-Antarktisz 2 km vastagságú jégréteggel borított talapzatának geológiai vizsgálata – amellyel közvetlenül felderíthető lenne a szétválás során leszakadt kontinentális táblarészek alkotta „híd” – irreálisan drága próbálkozás. Az eötvösi álmodat műholdon és repülőgépen elhelyezett modern eszközökkel megvalósító gravitációs és mágneses mérésekkel kirajzolt és megfejtett anyagi összetételű domborzat látszik a leginkább járható útnak.

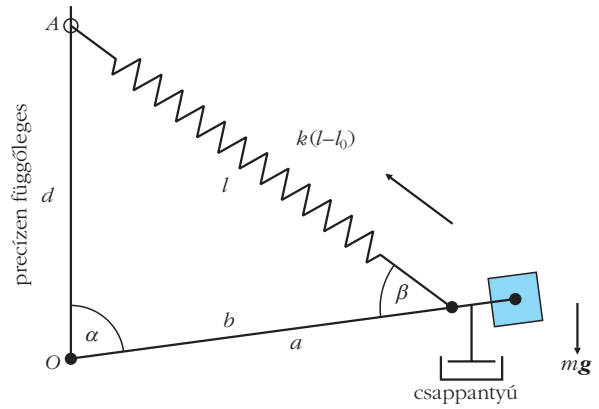
## A repülőgépes gravimetria elve és az Eötvös-korrekción

Hogyan méri a  $\mathbf{g}$  nehézségi gyorsulást a mozgó repülőgépen? Newton II. törvénye alapján, kihasználva a súlyos és a tehetetlen tömeg arányosságát, írható a következő összefüggés:

$$\frac{d^2\mathbf{x}}{dt^2} = \mathbf{a} + \mathbf{g},$$

ahol  $d^2\mathbf{x}/dt^2$  (például az útvonal GPS-jelekkel kirajzolt nagy pontosságú hely-idő összefüggéséből meghatározhatóan) a teljes (kinematikai) gyorsulás. A graviméter (gyorsulásmérő) viszont kizárólag  $\mathbf{a}$ -t, a nem gravitációs erőkből származó gyorsulást érzékeli. Ez az általános relativitáselmélet alapelve, az ekvivalenciaelv következménye, amely szerint a nehézségi erőterben szabadon eső testtel együtt eső rendszerben a gyorsulásmérő nullát mutat. A fenti egyenlet szerint tehát két önállóan mérhető mennyiség különbségeként határozható meg  $\mathbf{g}$ , a nehézségi gyorsulás lokális értéke. A gyorsulás mérésének fizikai elve a legelterjedtebben használt LaCoste–Romberg-graviméter példáján mutatható be (7. ábra).

Az eszköz egy függőleges tengelyen rögzített végű  $k$  erőállandójú rúgóból áll, amelynek másik vége e tengelyhez csuklósan csatlakozó rúdon csúszkálhat. E rúd végén, a csuklós csatlakozástól  $a$  távolságra egy



7. ábra. A LaCoste–Romberg-graviméter működésének fizikai elve.

$m$  tömeg található. A csúszka egyensúlyi helyzetéhez tartozó távolságot  $O$ -tól jelöljük  $b$ -vel. Földön nyugvó (egyenletesen haladó) rendszerben a rúd forgási egyensúlyának egyszerű feltétele (a szinusz-tétel alkalmazásával)

$$k b d = m g a.$$

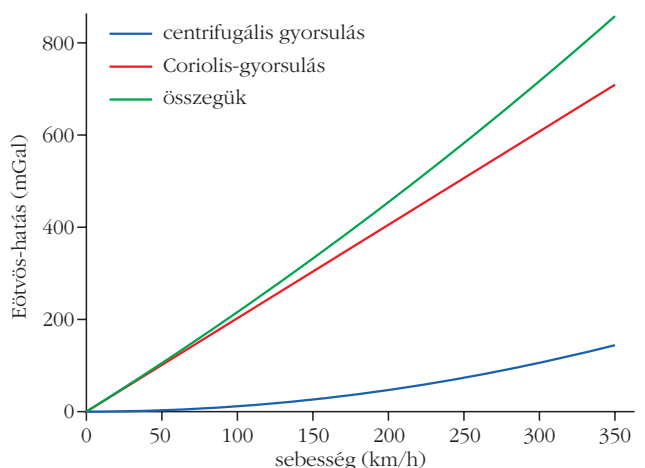
Amennyiben függőlegesen gyorsuló rendszerben (például egy rakétában) vagyunk, akkor jobb oldalon – az ekvivalenciaelvnek megfelelően  $g$  helyén – a nem gravitációs gyorsulás jelenik meg (amelynek pozitív értékét függőlegesen lefelé irányítják):

$$k b d = m a_{\text{függőleges}} a.$$

Az ábrából azonnal látható, hogy például a repülőgép irányváltozásából származó, esetleges vízszintes irányú gyorsulásnak is van forgatónyomatéka, amelynek egyensúlyra gyakorolt hatását a graviméter alkalmas konstrukciójával minimalizálni lehet. További korrekciókra is szükség van, például ha a repülőgép a graviméter tengelye eltér a függőlegestől. Általános jellemzésül elmondható, hogy a berendezés nyugalmi rendszeréből több lépésben transzformálják az adatokat egy közös inerciarendszerbe.

A Föld idealizált gömbi vagy ellipszoid alakjához adott földrajzi szélességen normalizált nehézségi

8. ábra. Az Eötvös-hatás sebességfüggése (a 45. szélességi körön, 45°-ban mozogva/repülve).



gyorsulási értéktől – tapasztalat szerint – mérhető 50–100 mGal<sup>1</sup> nagyságrendű lokális eltéréseket hívják gravitációs anomáliának. Ezt a mennyiséget két nagyon nagy (körülbelül 10 000 mGal nagyságú) szám egymásból történő kivonásával határozzák meg. Az így meghatározott effektív gravitációs gyorsulás lényeges része a  $\delta g_{Eötvös}$  Eötvös-korrektció, amely a mérőberendezés sebességétől függően akár az 1000 mGal értéket is elérheti (8. ábra). A nehézségi erőter okozta gyorsulást e korrekció levonása után kapják meg.  $R$  sugarú gömbalakhoz viszonyítva, a  $h$  magasságban repülő graviméterre a Coriolis- és a centrifugális hatásból összeadó korrekciót a tömegvonzási gyorsuláshoz jól ismert képlet adja:

$$\delta g_{Eötvös} \approx 2 \omega_E v_E \cos \varphi + \frac{v^2}{R+h}.$$

Ebben  $\omega_E$  a Föld forgási szögsebessége,  $v_E$  a viszonyítási szint felett  $h$  magasságban mozgó berendezés sebességének a szélességi kört érintő komponense,  $v$  a Föld forgásából származó kerületi sebesség adott magasságban,  $\varphi$  pedig a Föld középpontjából a berendezés helyzetéhez húzott vektor és az egyenlítő síkjával bezárt szög (a földrajzi szélesség). A gömb helyett inkább a geoid átlagos adataival definiált forgási ellipszoidot szokás referenciafelületként használni. Az Eötvös-hatás korrekciójának képletét erre R. B. Harlan adta meg először [22].

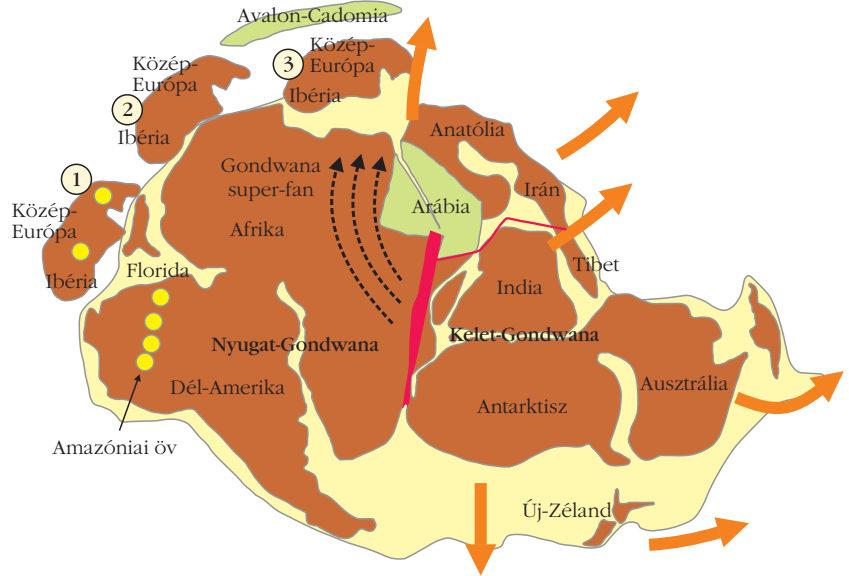
A repülőgép használatával készülő gravimetriai térképhez hasonló geodéziai műholdakkal is készítenek. Az elmúlt években 3 ilyen missziót hajtottak végre (CHAMP, GRACE és GOCE), ám a repülőgépes gravimetria pontossága a kisebb repülési sebesség és a mérési útvonalak sűrű hálójával lefedhető nagy területek révén nagyobb, mint a műholdaké. Ezért azok adatait repülőgépes mérésekkel hitelesítik, pontosítják.

Térjünk vissza végül a tenger- és jégborította domborzat repülőgépes gravimetriával végzett térképezésével feltárható földtörténeti múlthoz.

## A Kelet-Afrika – Antarktisz hegységképződés vizsgálata repülőgépes gravimetriával

A Gondwana őskontinens létrejöttének időszakában, körülbelül 500 millió éve, Nyugat-Gondwana és Kelet-Gondwana kontinentális lemezei ütköztek és

<sup>1</sup> A gyorsulás gravimetriában használt egysége a gal (jelölése: Gal), *Galileo Galilei* nevét örökíti meg. Nagysága: 0,01 m/s<sup>2</sup>. Egy mGal tehát 10<sup>-5</sup> m/s<sup>2</sup>.



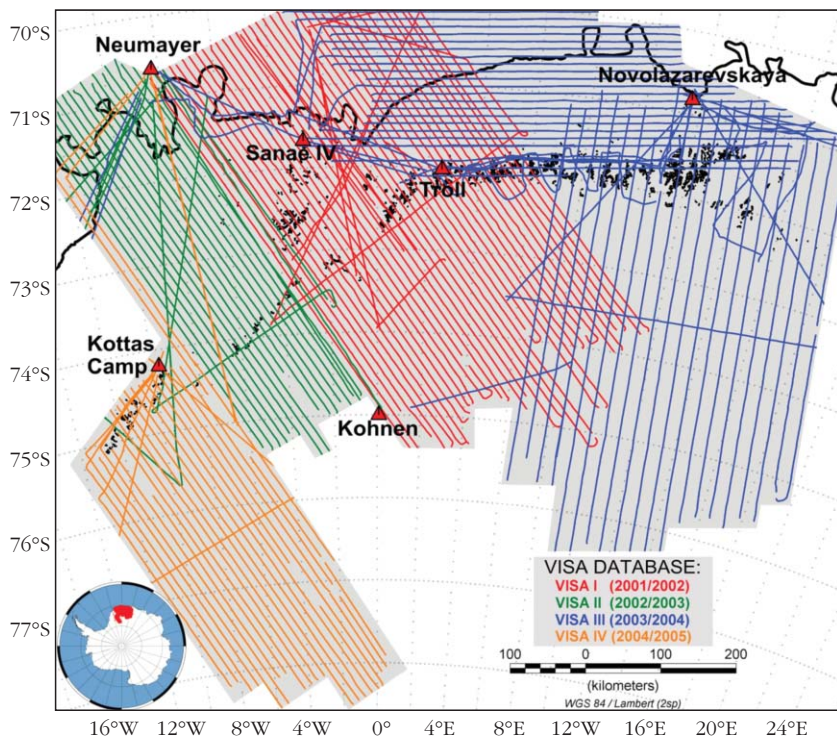
9. ábra. Az ütköző Kelet- és Nyugat-Gondwana rekonstruált kontinensszerkezete. Balra fent a Gondwanát kiegészítő kontinentális tábla 2013-ban javasolt három alternatív helyzete.

ezzel indult el a hegységképződés folyamata Kelet-Afrikában, amelynek eredményei, a Kilimandzsáróval az élen, ma is láthatók. Ez a terület akkor Nyugat-Gondwana határvidéke volt. Kelet-Gondwana érintkező területe a mai Kelet-Antarktisz volt (9. ábra). Közelebről, az Észak-Mozambikkal átellenes terület a földtörténeti rekonstrukció szerint az Antarktisz észak-keleti szélén található Maud Királyné Földje volt. Kapcsolatukra pozitív érvet szolgáltat a két terület hegyeit alkotó kőzetek összehasonlítása.

Az ütközésből létrejött, Arábiától (Núbiai sivatag) Kelet-Afrikán át – feltevés szerint – Maud Királyné Földjéig húzódó 8000 km hosszú hegylánc lenne Földünk egyik leghosszabbika, ha sikerül bizonyítani keletkezési egységüket.

Az Antarktiszon korlátozza a geológiai mintavételt, hogy a jégtakaró alatti talapzat közvetlenül nem tanulmányozható, a hegységek alkotó kőzetei csak az úgynevezett *nunatakok* (inuit szó: jéggel körülvett hegyet jelent) formájában, néhány helyen bújnak ki a jég alól. Közvetlen geológiai jellemzésre a képződmények teljes hosszában nincs mód.

2001 és 2005 között a bremerhaveni A. Wegener Tengerkutató Intézet repülőgépes laboratóriuma a terület közel felét jelentő 1,2 millió km<sup>2</sup> nagyságú tartományon pásztázott végig és elkészítette annak gravitációs- és mágneses anomália-térképét, továbbá a talapzatról visszaverődő radarimpulzusokkal meghatározta a tengervíz és jégtakaró alatti szilárd földkéreg mélységi topográfiáját. A felmérés során négy egymást követő nyári időszakban egymástól körülbelül 10 km távolságra lévő párhuzamos repülési utakon végeztek gravimetriás méréseket a nyugati hosszúság 10°-ától a keleti hosszúság 20°-áig, illetve a déli szélesség 70°-ától 78,5°-áig. Választott témánknak megfelelően a gravitációs anomália (azaz az ellipszoid alakú referenciafelületen mérhető/számítható értéktől való eltérés) meghatározását és eredményét mutatjuk



10. ábra. A gravimetriás mérések 4 kampányának repülési útvonalai. A vázlaton jól látszanak a nunatakok és az Antarktisz partvonala.

be röviden. A repülési útvonalakkal lefedett földrajzi térséget mutatja a 10. ábra.

A mérések normalizálását a gravitációs gyorsulás abszolút skálán megmért értéke segítségével végzik el. Az Antarktison a jégmozgás miatt a mérési tartományba eső egy vagy több földi nyugvó állomáson meghatározott  $g$  érték 3-5 mGal ingadozást mutat egy 8-10 napos mérési kampány során. Ezért saját eszközüket a legközelebbi afrikai állomáson (Fokváros, Dél-Afrikai Köztársaság) mérhető adathoz normálták. A mérések kiértékelése után adódó gravitációs, mágneses és topográfiai térképeket S. Riedel PhD-dolgozata [24] közli.

A felszínre jutó hegyek (nunatakok) hagyományos térképét mutatja a 11. ábra.

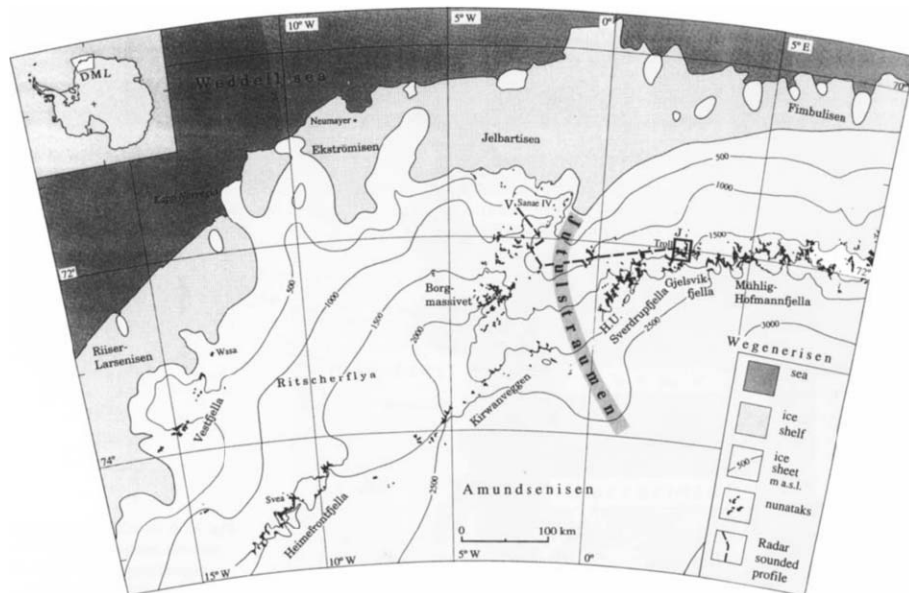
A levegőbeli gravimetriás mérések alapján az összes korrekciós tényező (így az Eötvös-hatás) figyelembevételével a 12. ábrán látható térkép adódik a Jutulstraumen elnevezésű árok környékére. Jól látszik, mennyivel részletgazdagabb és a domborzati viszonyokat részletesebben tükröző ez a térkép, mint a 11. ábra megfelelő területe, amelyen a felszíni hegykibúvások kiterjedés nélküli pontthalmazt alkotnak. Az alattuk, illetve környe-

zetükben található kőzetréteg elrendezésére az első pozitív információt a gravimetriás térképek nyújtják.

A 12. ábrán számozással megjelölt területekre a következő kvalitatív megállapításokat tette S. Riedel [24]. A partvonaltól az óceánban mért 100 mGal körüli többletet az óceánfenék talpzatát alkotó nagyjából 10 km vastagságú kéreg hatása adja, amelyhez mélybe szakadt bazalttöblék gravitációja járul hozzá (1). Az óceán-kontinens találkozásánál elvékonyodó kéreg okozza a negatív anomália-értékeket (2, 3), ami a Jutulstraumen árok mentén is folytatódik (4). A hegylánc teljes kiterjedésében – ugyan erősen töredezett szerkezetben – nagy pozitív anomália-értékekkel ábrázolódik. Mögötte a negatív értékek a jégtakaróval elfedett árkok jelenlétére utalnak (5, 6).

Az Eötvös-hatással korrigált adatokból létrehozott adatbázis a geológiai elméleti rekonstrukció kiindulópontja. A kőzetek anyagára, a földtörténet során bekövetkezett mechanikai, termikus és átkristályosodási folyamatok hatására vonatkozó modellt a kelet-afrikai kőzetminták tapasztalatára építik. A teljes hegységvonalat gravitációs (és mágnesési) térképének sikeres reprodukálása lehetőséget ad e modellvariánsok igazolására vagy cáfolatára. Az 550–500 millió évvel ezelőtti kelet-afrikai hegységképződés dinamikai modelljének fokozatos finomítása, pontosítása várható a napjainkban is egyre intenzívebben továbbfolytatott kutatásoktól.

11. ábra. Nunatak-térkép a Dronning Maud Land tartományban: a bal alsó sarokból majdnem átlósan induló pöttyoszorlat meghatározza a hegységvonalat ívét, de valós kiterjedéséről semmit sem mond. A hegyláncot a Jutulstraumen-árok szakítja meg.

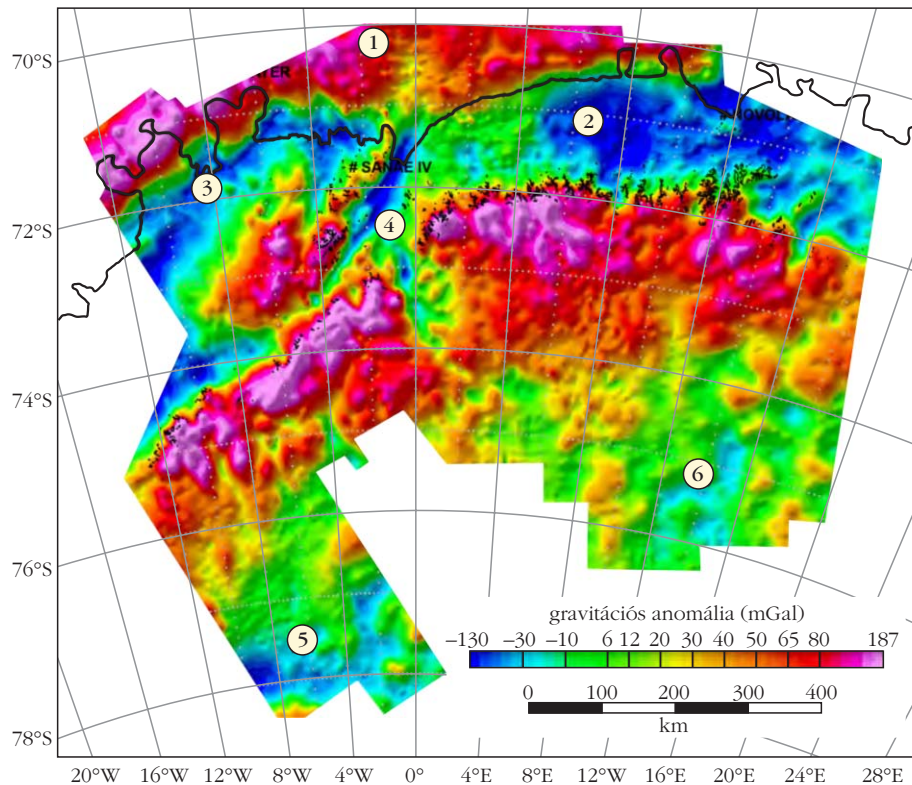




Eötvös Loránd valószínűleg elégedetten nyugtázná, hogy az elmúlt száz évben a Föld gravitációs terének mérésében bekövetkezett folyamatos fejlesztés révén „módunkban van biztosabb alapokra fektetni a földkéreg architektúrájának tanát, némi bepillantást nyerve olyan mélységekbe, melyekhez szemünk egyáltalában nem hatolhat, és fúróink el nem érnek.” [20]

#### Irodalom

20. Eötvös Loránd elnöki beszéde az MTA 1901. évi közülésén. Megjelent: *Eötvös Loránd, a tudós és művelődés politikus írásaiból*. Sajtó alá rendezte Környei Elek, Gondolat Kiadó (1964) 151–160.
21. Br. Eötvös Loránd: Kísérleti kimutatása annak a nehézségi változásnak, amelyet valamennyi mozgó test elszenved. *Mathematikai és Természettudományi Értesítő* (1920) 1–28.
22. R. B. Harlan: Eotvos corrections for airborne gravimetry. *Journal of Geophysical Research* 73 (1968) 4675–4679.
23. S. Riedel, W. Jokat, D. Steinhage: Mapping tectonic provinces with airborne gravity and radar data in Dronning Maud Land, East Antarctica. *Geophys. J. Int.* 189 (2012) 414–427.
24. S. Riedel: Airborne-based Geophysical Investigation in Dronning Maud Land, Antarctica. PhD-értekezés, Bremen, 2008 (letölthető: <http://epic.awi.de/20643>)



12. ábra. A Jutulstraumen-árok környékének gravitációsanomália-térképe.

## VAN-E TÁVOLHATÁS A KVANTUMELMÉLETBEN?

Takács Gábor

BME Elméleti Fizikai Tanszék

Albert Einstein, Boris Podolsky és Nathan Rosen 1935-ös cikkükben azt állították, hogy a kvantumelmélet nem adhatja a valóság teljes leírását. Az általuk megfogalmazott EPR-paradoxon azóta paradigmaticus

A cikk elkészültét a Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alap támogatta a Nemzeti Kiválósági Program keretében, a *Kvantumbitek előállítása, megosztása és kvantuminformációs bázisok fejlesztése* című, 2017-1.2.1-NKP-2017-00001. számú projekt részeként.

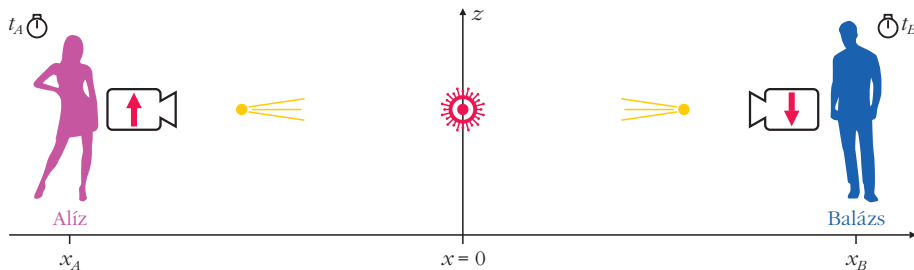


Takács Gábor elméleti fizikus, az MTA doktora. Kutatási területe a kvantumtérelmélet. 2012-ben a Magyar Tudományos Akadémia Lendület pályázatát elnyerve új statisztikus térelméleti kutatócsoportot alapított a BME Fizikai Intézetében, ahol 2014-ben egyetemi tanárrá nevezték ki. Személyes honlap: [http://dtp.physics.bme.hu/Takacs\\_Gabor](http://dtp.physics.bme.hu/Takacs_Gabor), a kutatócsoport honlapja: <http://sft.physics.bme.hu>

kus jelentőségű lett. John Bell híres egyenlőtlensége megfogalmazta annak feltételét, hogy milyen esetben nem írhatók le a korrelációk klasszikus lokális rejtett változókkal. Az egyenlőtlenség kísérletileg is igazolt sértését számos helyen az Einstein által „kísérteties távolhatás”-nak nevezett nemlokális jeleként találják. Ebben a cikkben körüljárjuk a kérdést, és rávilágítunk, hogy ez az értelmezés helytelen: a kvantumelmélet teljes mértékben összefér a relativisztikus kauzalitás (lokális) elvével. A kísérlet eredménye azzal magyarázható, hogy a klasszikus és a kvantumkorrelációk jellege lényegesen különbözik egymástól.

### Az EPR-paradoxon

Einstein, Podolsky és Rosen (EPR) gondolatkísérletüket eredetileg két részecske helyére és lendületére fogalmazták meg [1], itt egy másik, elterjedtebb for-



1. ábra. Az EPR-gondolat kísérlet.

EPR szerint, ha Alíz mért elsőként, akkor a mérése után léteznie kell a valóság egy elemének, ami megfelel annak, hogy Balázs mérésének kimenetele immár teljes bizonyossággal ismert. Viszont ez akkor is igaz, ha Alíz és Balázs mérése között nem telik el elég idő, hogy egy legfeljebb fénysebességgel terjedő jel átérhessen:

$$c |t_A - t_B| < |\mathbf{x}_A - \mathbf{x}_B|, \quad (6)$$

máját használjuk, amely *Yakir Aharonov* és *David Bohm* nevéhez fűződik<sup>1</sup> [2].

Tételezzük fel, hogy egy forrás feles spinű részecskékből álló párokat bocsát ki, összesen zéró perdülettel. Egy térbeli  $xyz$  Descartes-koordinátarendszert felvéve, egy előre megválasztott irányban – mondjuk a  $z$  koordinátatengely mentén – mindkét részecske spinjének vetülete a  $\pm\hbar/2$  értékeket veheti fel, amelyet a következőképpen jelöljünk:  $|\uparrow_z\rangle$  és  $|\downarrow_z\rangle$ . A feles spin általános állapota ezek lineáris kombinációja

$$|\Psi\rangle = \alpha |\uparrow_z\rangle + \beta |\downarrow_z\rangle, \quad (1)$$

ahol  $\alpha$  és  $\beta$  komplex számok. Annak valószínűsége, hogy a spin vetületére egy mérés során a két lehetséges érték valamelyike adódik, Born szabálya alapján

$$P(s_z = +\hbar/2) = |\alpha|^2, \quad (2)$$

$$P(s_z = -\hbar/2) = |\beta|^2,$$

ahol a valószínűség teljessége miatt  $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$ .

Amennyiben a két részecske spinjének együttes állapotát kívánjuk leírni, akkor az állapotok alakja

$$|\Psi_{12}\rangle = \alpha |\uparrow_z\rangle_1 |\uparrow_z\rangle_2 + \beta |\uparrow_z\rangle_1 |\downarrow_z\rangle_2 + \gamma |\downarrow_z\rangle_1 |\uparrow_z\rangle_2 + \delta |\downarrow_z\rangle_1 |\downarrow_z\rangle_2, \quad (3)$$

ahol 1, 2 a két részecskét indexeli és

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 + |\gamma|^2 + |\delta|^2 = 1. \quad (4)$$

Ha a részecskék zéró teljes perdülettel repülnek szét, akkor a spinek állapota úgynevezett szinglett:

$$|\Psi_{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow_z\rangle_1 |\downarrow_z\rangle_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} |\downarrow_z\rangle_1 |\uparrow_z\rangle_2. \quad (5)$$

Tegyük fel, hogy az 1 részecske spinjét Alíz, a 2 részecske spinjét pedig Balázs méri meg (1. ábra). Az (5) EPR-állapot tulajdonsága, hogy Alíz és Balázs is mindkét spinvetületet 1/2 valószínűséggel kapja eredményül, ugyanakkor a két mérés eredménye teljes mértékben korrelált: ha az egyik spinre Alíz valamilyen vetületet mér  $z$  irányban, akkor Balázs ugyanazon  $z$  irányban mérve minden esetben annak ellentettjét kapja.

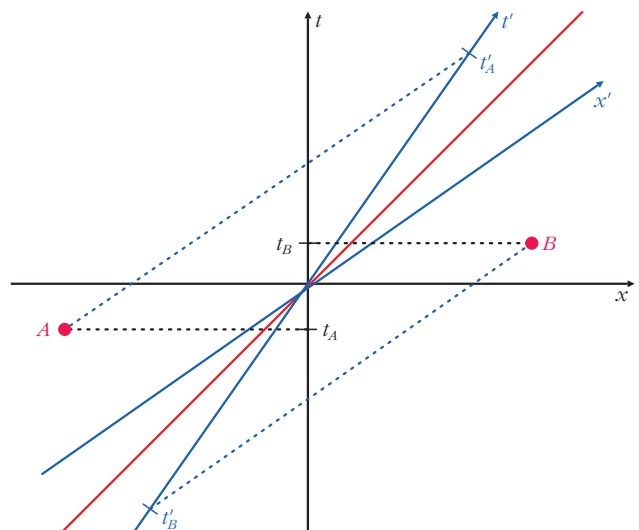
ahol  $t_A$  és  $t_B$  a két mérés időpontja,  $\mathbf{x}_A$  és  $\mathbf{x}_B$  pedig azok helye. Ezt térszerű szeparációnak hívják, amely vonatkoztatási rendszertől függetlenül fennáll, mert a

$$c^2 (t_A - t_B)^2 - (\mathbf{x}_A - \mathbf{x}_B)^2$$

kifejezés Lorentz-invariáns. Ugyanakkor, ha a két mérés térszerűen szeparált, és egy  $K$  vonatkoztatási rendszerben Alíz mér előbb, azaz  $t_A < t_B$ , akkor mindig létezik olyan  $K'$  vonatkoztatási rendszer, amiben Balázs mér előbb, azaz  $t'_A > t'_B$  (2. ábra). Tehát két térszerűen szeparált esemény időbeli sorrendje nem meghatározott, és így nem állhatnak oksági (kauzális) kapcsolatban. Alíz mérése ennek ellenére látszólag mégis determinálja Balázs mérésének kimenetelét, amire Einstein „kísérteties távolhatásként” hivatkozott.

Ezt a paradoxont a szerzők azzal próbálták feloldani, hogy a valóság azon eleme, amely Balázs mérésének kimenetelét meghatározza, már Alíz mérése előtt létezett, ez pedig a következő klasszikus analógiával szemléltethető. Képzeljünk el egy két kártyából álló

2. ábra. Két térszerűen szeparált esemény időbeli sorrendje függ a vonatkoztatási rendszertől. Az ábrán a  $K$  rendszer tengelyeit  $t$  és  $x$ , a  $K'$  rendszer tengelyeit  $t'$  és  $x'$  jelöli. Az átlós vörös vonal a fénysebességet jelöli: az ábra egységeiben  $c = 1$ , azaz a fény világvonala minden koordináta-rendszerben az idő és a hely tengelyek közti szög felezője. Jól látható, hogy Alíz mérése ( $A$  esemény) a  $K$  koordináta-rendszerben megelőzi Balázs mérését ( $B$  esemény), azaz  $t_A < t_B$ , míg a  $K'$  rendszerben a helyzet fordított:  $t'_A > t'_B$ .



<sup>1</sup> Annyiban eltérünk Aharonov és Bohm gondolatmenetétől, hogy fotonok polarizációs állapotai helyett e cikkben feles spinű részecskéket (például elektronokat) használunk példaként.

paklit, amelyben van egy piros ( $|\uparrow_z\rangle$ ) és egy kék kártya ( $|\downarrow_z\rangle$ ), és amelyből Alíz és Balázs véletlenszerűen húz egyet (párkeltés). Ha Alíz kártyáját kéknek találja, akkor Balázsé mindig piros és fordítva, valamint mindkettőjük számára mindkét kimenetel valószínűsége ugyanúgy 1/2. Ez azt jelenti, hogy az eredeti paradoxon egyszerűen magyarázható egy klasszikus korrelációval, miszerint a két kimenetel (piros/kék, avagy spin fel/le) már a részecskék kibocsátásának pillanatában eldőlt, és a korrelációt a részecskék közös eredete magyarázza, azaz hogy olyan állapotban keletkeztek, amelyben a két spin ellentétes (akár a kártyalapok színei) – ezt hívjuk a korreláció közös ok alapú magyarázatának.

EPR konklúziója szerint viszont ebben az esetben a kvantumelmélet nem adja a valóság teljes leírását, hiszen léteznek a valóságnak olyan elemei, amelyeket a kvantumelméleti leírás nem tartalmaz. A valóság ilyen elemeit hívjuk rejtett változóknak: ezek olyan feltételezett mennyiségek, amelyeknek a valóságban határozott értéke van és meghatározzák a mérések kimenetelét. A kvantumelméleti leírás azonban nem tartalmazza a rejtett változókat, és ezért csak valószínűségi jóslatokat tud tenni.

## A Bell-egyenlőtlenség

Bár a fenti megoldás elfogadhatóan hangzik, mintegy 30 évvel az EPR-paradoxon megfogalmazása után Bell egy olyan egyenlőtlenséget vezetett le, amelynek a valós világban tapasztalt sérülése (bizonyos feltételekkel, lásd a később tárgyalt „kiskapuk” kérdését) kizárja ezt az értelmezést [3]. A lényeges észrevétel, hogy bár Alíz és Balázs egy adott részecskepár esetén csak egy-egy irányban tudja a spint mérni, a kísérlet ismétlése során ezeket akár véletlenszerűen is lehet változtatni. A mérési eredményekből adódó statisztikában pedig tetten lehet érni a kvantumelmélet klasszikustól eltérő viselkedését.

Ha egy, az eredeti  $z$  iránnyal  $\varphi$  szöget bezáró  $z'$  tengely irányában mérjük a spint, akkor azok az állapotok, amelyeknek erre határozott vetülete van, a

$$\begin{aligned} |\uparrow_{z'}\rangle &= \cos\frac{\varphi}{2} |\uparrow_z\rangle + \sin\frac{\varphi}{2} |\downarrow_z\rangle, \\ |\downarrow_{z'}\rangle &= -\sin\frac{\varphi}{2} |\uparrow_z\rangle + \cos\frac{\varphi}{2} |\downarrow_z\rangle \end{aligned} \quad (7)$$

alakot öltik.<sup>2</sup> Ha a spin állapota

$$|\Psi\rangle = \alpha |\uparrow_z\rangle + \beta |\downarrow_z\rangle, \quad (8)$$

<sup>2</sup> A fenti formulákat a forgatások spineken vett ábrázolását felhasználva kapjuk. Általános esetben a (7) összefüggésben megjelennek még komplex fázisfaktorok, amelyek attól függenek, hogy a  $z'$  tengely vetülete az  $xy$  síkra nézve milyen irányú. Az idézett összefüggés annak felel meg, amikor ez a vetület az  $x$  tengely irányába mutat. A fizikai valószínűségekre kapott eredmények azonban ettől függetlenül, így ezeket a fázisokat elhagyjuk.

akkor (7) alapján

$$\begin{aligned} |\Psi\rangle &= \left( \alpha \cos\frac{\varphi}{2} + \beta \sin\frac{\varphi}{2} \right) |\uparrow_{z'}\rangle + \\ &+ \left( -\alpha \sin\frac{\varphi}{2} + \beta \cos\frac{\varphi}{2} \right) |\downarrow_{z'}\rangle \end{aligned} \quad (9)$$

és a  $z'$  irányába végzett spinmérések eredményei

$$\begin{aligned} P(s_{z'} = +\hbar/2) &= \left| \alpha \cos\frac{\varphi}{2} + \beta \sin\frac{\varphi}{2} \right|^2 \\ P(s_{z'} = -\hbar/2) &= \left| \alpha \sin\frac{\varphi}{2} - \beta \cos\frac{\varphi}{2} \right|^2. \end{aligned} \quad (10)$$

Ez azt jelenti, hogy amennyiben a részecske a  $z$  irányba meghatározott vetülettel rendelkezik (mondjuk  $|\uparrow_z\rangle$  állapotban van, azaz  $\alpha = 1$  és  $\beta = 0$ ), akkor a  $z'$  irányú vetület nem meghatározott, ami a Heisenberg-féle határozatlansági reláció spinekre érvényes általánosítását jelenti. Ha például a  $z$  és  $z'$  irány merőleges egymásra ( $\varphi = \pi/2$ ), akkor a  $|\uparrow_z\rangle$  állapotban a spin  $z'$  irányú vetülete maximálisan határozatlan: mindkét vetület valószínűsége 1/2.

A szinglett állapot érdekessége, hogy tetszőlegesen választott másik irányra felírva is ugyanazt az alakot ölti:

$$|\Psi_{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\uparrow_{z'}\rangle_1 |\downarrow_{z'}\rangle_2 - |\downarrow_{z'}\rangle_1 |\uparrow_{z'}\rangle_2), \quad (11)$$

ami (9) alapján egyszerű számítással igazolható. Tehát a mérés irányától függetlenül mindig ugyanazokat a valószínűségeket, valamint teljes (anti)korrelációt kapunk akkor is, ha a mérések irányát Alíz és Balázs már a részecskék kibocsátása után választja meg. Ehhez az kell, hogy minden szóba jöhető irányú vetületnél már a párkeltéskor eldőljön, mi lesz a később végzett mérések eredménye. Azonban egy adott párnál Alíz és Balázs csak egy-egy mérést tud elvégezni, így ezt nem tudják részleteiben ellenőrizni. Bell megoldása az, hogy a kísérletet sokszor elvégezve, Alíz és Balázs eredményeinek korrelációjára fogalmazzunk meg olyan feltételt, ami mindig teljesül, ha léteznek a mérések kimenetelét előre meghatározó klasszikus rejtett változók. A következőkben Bell tételét *Jun John Sakurai* megfogalmazását követve prezentáljuk [4].

Ha Alíz az egyik spint  $z$ , míg Balázs a másikat  $z'$  irányban méri meg, az (5) EPR-állapot a (9) összefüggés alapján a következő alakra hozható:

$$\begin{aligned} |\Psi_{EPR}\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\frac{\varphi}{2} |\uparrow_z\rangle_1 |\downarrow_{z'}\rangle_2 + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\frac{\varphi}{2} |\downarrow_z\rangle_1 |\downarrow_{z'}\rangle_2 + \\ &+ \frac{1}{\sqrt{2}} \sin\frac{\varphi}{2} |\uparrow_z\rangle_1 |\uparrow_{z'}\rangle_2 - \\ &- \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\frac{\varphi}{2} |\downarrow_z\rangle_1 |\uparrow_{z'}\rangle_2, \end{aligned} \quad (12)$$

amiből a négy lehetséges kimenetel valószínűségére

$$P(s_z = \pm \hbar/2, s_{z'} = \mp \hbar/2) = \frac{1}{2} \cos^2 \frac{\varphi}{2}, \quad (13)$$

$$P(s_z = \pm \hbar/2, s_{z'} = \pm \hbar/2) = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}$$

adódik.

Tegyük fel, hogy Alíz és Balázs egyaránt három lehetséges irányban –  $a$ ,  $b$  és  $c$  – tud spint mérni, és jelölje +/- azt, ha az adott spint a mért iránnyal párhuzamosnak/ellentétesnek találják. A rejtett változók ezekhez tartozó beállításait az 1. táblázat foglalja össze. Ha Alíz a spint  $a$ , míg Balázs  $b$  irányban méri, akkor annak valószínűsége, hogy mindketten a saját irányukra pozitív vetületet mérnek, a

$$P(a+, b+) = p_3 + p_4 \quad (14)$$

értéket veszi fel. Hasonlóképpen adódik, hogy

$$P(a+, c+) = p_2 + p_4, \quad (15)$$

$$P(c+, b+) = p_3 + p_7.$$

Mivel a valószínűségek nemnegatívak, ezért mindenképpen teljesül a Bell-egyenlőtlenség:

$$P(a+, b+) \leq P(a+, c+) + P(c+, b+). \quad (16)$$

A kvantumelméleti valószínűségek (13) alapján

$$P(a+, b+) = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\varphi_{ab}}{2},$$

$$P(a+, c+) = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\varphi_{ac}}{2}, \quad (17)$$

$$P(c+, b+) = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\varphi_{bc}}{2},$$

ahol  $\varphi_{ij}$  az  $i$  és  $j$  irány közti szöget jelöli. Válasszuk meg ezeket úgy, hogy  $\varphi_{ab} = 2\pi/3$ , míg  $\varphi_{ac} = \varphi_{bc} = \pi/3$  legyen (3. ábra), ekkor a (16) egyenlőtlenség az

$$\frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi}{3} = \frac{3}{8} \leq \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi}{6} + \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\pi}{6} = \frac{1}{8} + \frac{1}{8}$$

alakot ölti, ami nyilvánvalóan nem teljesül!

A fenti gondolatkísérletet (feles spinű részecskék helyett fotonokkal<sup>3</sup>) Stuart Freedman és John Clauser laboratóriumi körülmények között is megvalósították [5]: eredményeik szerint a valóságban mért valószínűségek is sértik a (16) Bell-egyenlőtlenséget. Ez a kvantumelmélet érvényességétől függetlenül igazolja, hogy a kísérletben látott korrelációkat nem lehet a spinek vetületét a mérés előtt meghatározó rejtett klasszikus valószínűségi változókkal magyarázni.

<sup>3</sup> Fotonok esetén a spin megfelelője a foton lineáris polarizációja, és a valószínűségekre vonatkozó (16) formulák megfelelőiben  $\varphi/2$  helyett  $\varphi$  áll (Malus törvénye).

1. táblázat

**Az EPR-kísérlet hipotetikus rejtett változós reprezentációja három irány esetén**

Alíz			Balázs			valószínűség
$a$	$b$	$c$	$a$	$b$	$c$	
+	+	+	-	-	-	$p_1$
+	+	-	-	-	+	$p_2$
+	-	+	-	+	-	$p_3$
+	-	-	-	+	+	$p_4$
-	+	+	+	-	-	$p_5$
-	+	-	+	-	+	$p_6$
-	-	+	+	+	-	$p_7$
-	-	-	+	+	+	$p_8$

A  $p_1, \dots, p_8$  azok a valószínűségek, amelyekkel a rejtett változók adott kísérleti kimenetelre vezető konfigurációi a valóságban előfordulnak.

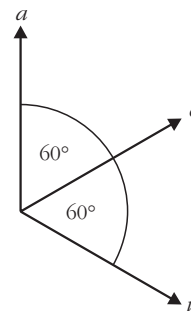
Az EPR-kísérlet fentebb ismertetett változatában több kiskapu (angolul „loophole”) van, ami megenged olyan rejtett változókat, amelyek a mért korrelációkat reprodukálják, amennyiben ezek nem kizárólag a spinek vetületét határozzák meg. Például lehetséges, hogy a rejtett változó az Alíz és Balázs által választott mérési beállításoktól függően „dönti el” a spinek vetületét. Bell ezért azt javasolta, hogy a mérések irányait akkor döntsék el, amikor a részecskék már „úton vannak”, amit Alain Aspect és munkatársai meg is valósítottak [6]. A két legfontosabb fennmaradó kiskapu:

1. Kommunikációs kiskapu: ha a mérési beállítások kiválasztása, illetve maguk a mérési események egymástól nem térszerűen szeparáltak, akkor a mért statisztikát befolyásoló jel terjedhet közöttük.

2. Detektálási kiskapu: a detektálás határfoka soha nem tökéletes, ezért lehet, hogy a detektált párok az összes kibocsátott párra nézve egy torzított, nem reprezentatív mintát képviselnek.

A fenti két kiskapu bezárása hosszas kísérleti erőfeszítések után sikerült [7], és az EPR-kísérletek fokozatos finomodásával a rejtett változós alternatívák egyre kevésbé plauzibilisek. Egy fennmaradt lehetőség, hogy az egész kísérleti folyamat közös kauzális múltjában vannak olyan változók, amelyek a kísérlet teljes

3. ábra. Az  $a$ ,  $b$ ,  $c$  irányok megválasztása.



lefolysását a mérési beállítások kiválasztásával és a mérések kimeneteleivel egyetemben meghatározzák. Egy nemrég végrehajtott kísérletben a mérési beállításokat távoli kvazárok fényével vezérelték [8], amivel ki lehetett zárni, hogy az elmúlt 7,8 milliárd éven belül lehetne a mérésválasztásokat és -kimeneteket együtt befolyásoló rejtett változó. Ez azonban nem jelenti azt, hogy az ilyen rejtett változók egyszer s mindenkorra kizárhatók. Egy példa erre az úgynevezett szuperdeterminizmus [9], ami szerint a megfigyelhető Világegyetem története, benne az összes kísérlet kimenetelével egyben determinált. A rejtett változók ekkor lehetnek egy olyan téridőtartományban lokalizáltak, ami az összes esemény kauzális múltjában benne van: a kozmológiai Ősrobbanás például erre tökéletesen megfelel. A szuperdeterminizmus azonban nem cáfolható, s így nem tekinthető tudományos elméletnek, sőt feltételezésével a tudományos megismerés alapjait kérdőjeleznék meg<sup>4</sup> [10].

## Van-e kvantumtávolhatás?

Az EPR-kísérlet minden eddigi konkrét megvalósításában a mért statisztikák nemcsak megsértik a (16) Bell-egyenlőtlenséget, de a kísérleti hibáktól eltekintve mindig tökéletesen egyeznek a kvantumelmélet jóslataival. A kísérleti fizika rohamos fejlődése révén ma már közvetlenül tudunk kvantumállapotokat manipulálni és dinamikájukat kísérletileg megbízhatóan követni, akár nagy részecskeszámú, makroszkopikusnak tekinthető rendszerekben is, és ilyenekben már EPR-Bell-típusú korrelációkat is sikerült megfigyelni [11]. Komolyan felmerül tehát, hogy a problémát a kvantumelmélet keretei között tárgyaljuk, hiszen annak nemteljességére vagy érvényességének korlátozottságára semmilyen tapasztalat nem utal.

Ennek elemzéséhez érdemes átfogalmazni a kvantumelméleti valószínűségeket. A két spin állapotterét négy állapot feszíti ki (négydimenziós Hilbert-tér): a  $|\uparrow_z\rangle_1 |\uparrow_z\rangle_2$ ,  $|\uparrow_z\rangle_1 |\downarrow_z\rangle_2$ ,  $|\downarrow_z\rangle_1 |\uparrow_z\rangle_2$  és  $|\downarrow_z\rangle_1 |\downarrow_z\rangle_2$  állapotok alkotta bázison az (5) állapotnak a

$$|\Psi_{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (18)$$

vektor felel meg. E formalizmusban azon eseménynek, hogy valamelyik részecske spinjét valamilyen irányban  $\pm 1/2$  vetületűnek mérjük, az ezzel a tulajdonsággal rendelkező állapotvektorok alterére vetítő projektor felel meg, amelyek alakja

<sup>4</sup> Itt közbevetendő a kérdés, hogy milyen alapon bízhatunk a tudományos megismerés módszertani alapjaiban? A válasz erre a tudomány és technika fejlődésének most már évszázadokra visszanyúló történetében rejlik. Ismereteink bővülésével nemcsak magyarázni tudjuk a jelenségeket, hanem megbízhatóan fel is tudjuk használni számos és változatos technológiai alkalmazásban.

$$P_1(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos^2 \frac{\varphi}{2} & 0 & \frac{1}{2} \sin \varphi & 0 \\ 0 & \cos^2 \frac{\varphi}{2} & 0 & \frac{1}{2} \sin \varphi \\ \frac{1}{2} \sin \varphi & 0 & \sin^2 \frac{\varphi}{2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{2} \sin \varphi & 0 & \sin^2 \frac{\varphi}{2} \end{pmatrix}, \quad (19)$$

$$P_2(\varphi) = \begin{pmatrix} \cos^2 \frac{\varphi}{2} & \frac{1}{2} \sin \varphi & 0 & 0 \\ \frac{1}{2} \sin \varphi & \sin^2 \frac{\varphi}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \cos^2 \frac{\varphi}{2} & \frac{1}{2} \sin \varphi \\ 0 & 0 & \frac{1}{2} \sin \varphi & \sin^2 \frac{\varphi}{2} \end{pmatrix},$$

ahol az 1, 2 a két részecskét indexeli,  $\varphi$  pedig a mérés irányának  $z$  tengellyel bezárt szöge (az adott iránnyal ellentétes spinvetületnek a  $P_{1,2}(\pi-\varphi)$  projektorok felelnek meg). Annak valószínűsége például, hogy Alíz  $z$ , Balázs pedig egy ezzel  $\varphi$  szöveget bezáró  $z'$  irányba állónak mérje a megfelelő spint, a következőképpen számolható:

$$\begin{aligned} \langle \Psi_{EPR} | P_2(\varphi) P_1(0) | \Psi_{EPR} \rangle &= \\ &= \frac{1}{2} (0, 1, -1, 0) P_2(\varphi) P_1(0) \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \sin^2 \frac{\varphi}{2}, \end{aligned} \quad (20)$$

ami megfelel a (13) alatti eredménynek; hasonló számolással az összes valószínűség reprodukálható.

A távolhatáshoz vezető szokásos érvelés úgy hangzik, hogy miután Alíz megmérte az egyik spint, a másik spin állapota a Balázs számára most már egyértelműen meghatározott kimenetnek megfelelően redukálódott. Ezt az úgynevezett „hullámfüggvény redukciót” (20)-ban matematikailag a  $P_1(0)$  projektor alkalmazása reprezentálja. Az így feltételezett redukció a térbeli pozíciótól függetlenül „egyidejűleg”<sup>5</sup> megtörténik, így amikor Alíz eredményt kapott, ezzel Balázs mérésének kimenetele is eldőlt. Azonban amennyiben a két mérés térszerűen szeparált, van olyan vonatkoztatási rendszer, amelyben Balázs mérése zajlik előbb, és a  $P_2(\varphi)$  projektor alkalmazása vezet az állapotredukcióhoz. Látszólag

<sup>5</sup> Az egyidejűség eleve problémás, mert a relativitáselmélet szerint ilyen nem létezik vonatkoztatási rendszertől független módon.

tehát – Einstein szavaival élve – itt egy „kísérteties távolhatással” van dolgunk.

Az érvelésben az a hiba, hogy a „hullámfüggvény-redukció” megtörténtét semmilyen fizikai észlelés nem támasztja alá, és a kísérlet értelmezéséhez teljes mértékben szükségtelen. Vegyük észre, hogy a két méréshez tartozó projektor felcserél egymással

$$P_2(\varphi) P_1(0) = P_1(0) P_2(\varphi), \quad (21)$$

azaz a két mérés időbeli sorrendje teljesen lényegtelen! Amennyiben a kvantumelmélet a valóság (legalábbis a kísérlet tekintetében releváns részének) teljes leírását adja, akkor ez azt jelenti, hogy a „hullámfüggvény-redukcióhoz” a valóságban semmi sem tartozik. A jól hangzó történet, amit a távolhatás indoklásához előadtunk, semmilyen fizikai realitásnak sem felel meg.

Sőt, a helyzet ennél még jobban behatárolt: a fundamentális kölcsönhatásokat mai tudásunk szerint leíró Standard Modell<sup>6</sup> egy relativisztikus kvantumtérelmélet, és ezért központi elve éppen az úgynevezett lokalitás: a térszerűen szeparált tartományokhoz tartozó megfigyelhető mennyiségek operátorai felcserélnek egymással. Ezért bármilyen korrelációk is állnak fenn közöttük, ezek nem vezetnek semmilyen távolhatáshoz, vagyis fénynél gyorsabban jelet továbbítani lehetetlen.

## A kvantum korrelációk jellege

Az EPR–Bell-kísérlet középpontjában egyedi megfigyelések eredményei közötti korrelációk állnak, ezért érdemes megvizsgálni a kvantumelméleti korrelációk tulajdonságait, mégpedig a klasszikus esettel összevetve.

Egy feles spin egy kétállapotú rendszer (q-bit), az EPR-pár pedig a spineket tekintve egy két q-bitből álló rendszer. Gondoljuk végig először spineket, azaz q-bitek helyett klasszikus bitekkel az EPR–Bell-kísérletet (ezek az *EPR-paradoxon* fejezet piros/kék kártyái). Ha egy forrásból összesen  $N$  különböző „üzenet” érkezik, és ezek valószínűségei  $p_1, \dots, p_N$ , akkor a forrás információtartalmát a Shannon-féle entrópia adja meg [12]

$$S = -\sum_{i=1}^N p_i \ln p_i. \quad (22)$$

Egy teljességgel határozatlan állapotú  $n$  bites rendszer esetén a lehetséges állapotok („üzenetek”) szá-

<sup>6</sup> A Standard Modell jóslatait az összes eddig elvégzett kísérlet fényesen igazolta. Ugyan a kozmológiában feltételezett sötét anyag és sötét energia túlmutat keretein, ezek léte nem vonja maga után a lokalitás elvének sértését, sőt a javasolt modellek éppen hogy feltételezik azt. Ezen túlmenően a speciális relativitáselméletnek, valamint a relativisztikus kvantumtérelmélet alapvető elveinek létezik konkrét modelltől független kísérleti ellenőrzései is, amelyek igen nagy pontossággal kizárják ezek sérelését.

ma  $N = 2^n$  és valószínűségük  $p_i = 1/N$ , azaz a rendszer információtartalma

$$S = N \ln 2. \quad (23)$$

Ahogy ez várható is, ez arányos a bitek számával: egy bit pontosan  $\ln 2$  mennyiségű információnak felel meg.<sup>7</sup>

Alíz és Balázs egyaránt egy-egy bitet kapnak: ezek információtartalma  $S_A = S_B = \ln 2$ . Ugyanakkor a teljes rendszernek is két azonos valószínűségű állapota van (aszerint, hogy Alíznek és Balásznak melyik kártya jutott), tehát ennek információtartalma is  $S_{AB} = \ln 2$ , ami kisebb, mint  $S_A + S_B$ . Tehát a két részrendszerben tárolt információ egy része redundáns, a különbözetet kölcsönös információtartalomnak hívják:

$$I_{AB} = S_A + S_B - S_{AB} = \ln 2. \quad (24)$$

Ez pontosan egy bitnyi információ, ami világos, hiszen az egyik bit állapota teljesen meghatározza a másikat. Klasszikus esetben az a tétel is igaz, hogy a kölcsönös információ nem lehet nagyobb, mint a részrendszerek entrópiája közül a kisebb:

$$I_{AB} \leq \min(S_A, S_B), \quad (25)$$

ami szemléletesen is érthető, hiszen semelyik részrendszer nem tud a másikról a saját kapacitásánál nagyobb információt tárolni.

A kvantumelméletben a Shannon-féle entrópia megfelelőjét *Neumann János* vezette be [13], és az úgynevezett sűrűségmátrix segítségével lehet megfogalmazni. Egy tiszta állapot sűrűségmátrixa az adott állapotvektorra vetítő projektor, így például a (18) állapotra

$$\rho_{EPR} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (26)$$

Ebből a kvantumelméleti valószínűségek nyomképzéssel származtathatók, például a (20) alatti eredmény átírása

$$\langle \Psi_{EPR} | P_2(\varphi) P_1(0) | \Psi_{EPR} \rangle = \text{Tr} \rho_{EPR} P_2(\varphi) P_1(0). \quad (27)$$

A két részrendszer ugyanakkor úgynevezett kevert állapotban van. Az 1-es részecske spin azonos valószínűséggel lehet mindkét állapotában, azaz

$$\rho_1 = \frac{1}{2} P_{\uparrow} + \frac{1}{2} P_{\downarrow} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (28)$$

<sup>7</sup> Ahhoz, hogy az információ egysége a szokásos bit legyen, a természetes alapú logaritmust elegendő kettes alapúra cserélni, ami annak felel meg, hogy  $S$ -t elosztjuk  $\ln 2$ -vel.

a  $|\uparrow_z\rangle_1, |\downarrow_z\rangle_1$  bázison. Itt

$$P_\uparrow = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{pmatrix} \text{ és } P_\downarrow = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

a két spinvetületnek megfelelő altérre vett projektorok az 1-es spin állapotterében. A 2-es részecske spinjének sűrűségmátrixa hasonlóan írható fel a  $|\uparrow_z\rangle_2, |\downarrow_z\rangle_2$  bázison.

Neumann entrópiadefiníciója

$$S[\rho] = -\text{Tr } \rho \ln \rho = - \sum_{i: \lambda_i \neq 0} \lambda_i \ln \lambda_i, \quad (29)$$

ahol  $\lambda_i$  a  $\rho$  sűrűségoperátor sajátértékeit jelöli;<sup>8</sup> ebből

$$S[\rho_{EPR}] = 0 \text{ és } S[\rho_1] = S[\rho_2] = \ln 2 \quad (30)$$

adódik. Az EPR-állapot teljes entrópiája zérus, hiszen a rendszer tiszta állapotban van, azaz hullámfüggvénye egyértelműen meghatározott. Az egyes spineknak pedig két független kvantumállapota van (azaz q-bit-ek), és az adott szituációban ezek egyforma valószínűséggel fordulhatnak elő. Meglepő módon az EPR-állapotban a kölcsönös információ

$$I_{AB} = S[\rho_1] + S[\rho_2] - S[\rho_{EPR}] = 2 \ln 2 \quad (31)$$

kétszer akkora, mint a klasszikus (24) eredmény, és kétszerese a klasszikusan elérhető (25) maximumnak is!

Hogyan lehetséges ez? A dolog nyitja abban rejlik, hogy egy kvantumállapot nem csak a konkrét kísérletekben mért egyedi kimenetek valószínűségeit „tárolja”. Újra ránézve az (5) EPR szinglett állapotra:

$$|\Psi_{EPR}\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |\uparrow_z\rangle_1 |\downarrow_z\rangle_2 - \frac{1}{\sqrt{2}} |\downarrow_z\rangle_1 |\uparrow_z\rangle_2, \quad (32)$$

szembeötlük, hogy a  $z$  tengely irányába végzett mérések két lehetséges kimenetelének valószínűségén túl a két tag relatív fázisát is tartalmazza, ami ez esetben  $-1$ . Ezért tartja meg alakját tetszőleges  $z'$  tengelyre nézve is (lásd (11)), és ezért kódol több információt, mint ami két klasszikus bitben lehetséges.

Vegyük észre továbbá, hogy a Bell-egyenlőtlenség sérülésében semmilyen közvetlen szerepet nem játszik a két részrendszer kauzálisan szeparált volta. A spinek szinglett állapota a párkeltéskor létrejön, így az egyenlőtlenséget sértő kvantumos korrelációk már ekkor fennállnak. Ezután a rendszer a mérésig időben nem fejlődik tovább, leszámítva a részecskék távolodását a kibocsátás helyétől, ami nem befolyásolja a spinek szinglett állapotát. Alíz és Balázs mérése történhet ugyan térszerűen szeparáltan, vagyis a közvetlen kauzális kapcsolat kizárásával, viszont az eredmények tapasztalt korrelációja *Az EPR-paradoxon* fejezet végi piros/kék kártyás klasszikus esethez hasonlóan egy közös okra vezethető vissza:

<sup>8</sup> A  $\lambda_i$  sajátértékek 0 és 1 közötti valós számok, összegük 1 ( $\text{Tr } \rho = 1$ ), és  $\rho$   $i$ -edik sajátállapota betöltési valószínűségként értelmezhető.

1. a kártyák esetében arra, hogy az eredeti pakli pontosan egy piros és egy kék kártyát tartalmazott;

2. az EPR–Bell-szituációban ahhoz, hogy a két kibocsátott részecske szinglett állapotban keletkezett.

Tehát az EPR–Bell-kísérletben nem valamiféle „kísérteties távolhatásról” van szó, hanem arról, hogy a kvantumrendszerek erősebb korrelációt tudnak hordozni, mint klasszikus megfelelőik. Ezen extra korrelációk jelenléte megfelelően tervezett, ismételt végrehajtott kísérletek esetén (mint amilyen az EPR–Bell-kísérlet) az eredmények statisztikájából kimutatható.

## Zárszó

„There’s Nature and she’s going to come out the way She is. So therefore when we go to investigate we shouldn’t pre decide what it is we’re looking for only to find out more about it.”<sup>9</sup>

A fenti idézetben *Richard Feynman* arra int, hogy nem várhatjuk el a természettől, miként viselkedjen. Hétköznapi életünkben nagyjából milliméterestől a kilométeres skáláig terjedő méretű objektumokkal találkozunk, így a mikroszkopikus világ leírásához elengedhetetlen kvantumelmélet, és a téridő nagy léptékű viselkedését leíró általános relativitáselmélet egyaránt meghökkentő lehet számunkra. A kvantumelmélet úttörői az új fizikát először csak a mikrovilágra tekintették érvényesnek, és az eredményeket egy előzetesen felvett klasszikus fizikai háttéren értelmezték. Az EPR-paradoxon jól illusztrálja, hogy amennyiben a kvantumvilágra a klasszikus fizikából származó kimondott vagy rejtett előfeltevéseinkkel („előítéletekkel”) tekintünk, akkor a kép nem áll össze: ellentmondani látszik a „józan észnek”.

A kvantumelmélet a jelenségek széles körét leírja, arra pedig semmilyen tapasztalati tény nem mutat, hogy alapfeltevései bármilyen módon sérülnének. Az elmúlt évszázad technológiai újításainak jelentős része a kvantumelméleten alapszik, a jelenkori kvantumtechnológiai forradalom már megvalósult vívmányai közül a kvantumtitkosítás és -kommunikáció pedig éppen az EPR-paradoxon alapját képező kvantumos korrelációkat hasznosítja.

A kvantumelmélet megalkotása óta eltelt időben felhalmozódott tapasztalat azt mutatja, hogy az előremutató kérdésfeltevés nem a kvantumjelenségek klasszikus fizikai fogalmi keretben történő értelmezésének erőltetése, hanem hogy miként létezhetnek (legalábbis jó közelítéssel) klasszikus módon viselkedő objektumok a kvantumvilágban. Hely hiányában itt csak utalhatunk rá, hogy a kvantum-klasszikus átmenet leírható a dekoherencia néven ismert, kísérletileg is jól alátámasztott kvantumelméleti mechanizmussal [14].

<sup>9</sup> „A természet a saját törvényeit követi. Tehát amikor vizsgáljuk, nem dönthetjük el előre, mit keresünk, csak azt hogy minél többet tudjunk meg róla.” (R. P. Feynman: *Doubt and Uncertainty*. In: *The Pleasure of Finding Things Out*. Perseus Books, Cambridge, Massachusetts, 1999.)

A speciális relativitás elmélete kísérletileg ugyan csak alaposan és nagy pontossággal igazolt, valamint létfontosságú technológiák (például GPS) működése múlik rajta. A speciális relativitáselméletet és a kvantumelméletet egyesítő kvantumtérelmélet pedig átfogó módon leírja az elemi részecskék és a fundamentális kölcsönhatások működését; ezen elméleti keret legfontosabb alapelve pedig éppen a lokalitás.

A fentiek fényében az EPR-paradoxon kapcsán nemlokálisról vagy távolhatásról beszélni félrevezető és megalapozatlan, és – mint láttuk – az ezt taglaló érvelés valójában csupán egy naiv „történet”, ami nem köthető semmilyen módon a tapasztalati valósághoz. A kísérletben mérhető korrelációk a párkeltés pillanatára vezethetők vissza, azaz közös ok alapján magyarázhatók. Ennek kapcsán érdemes felidézni az ismert figyelmeztetést, miszerint két esemény vagy mennyiség korrelációjából nem következik köztük semmiféle közvetlen ok-okozati kapcsolat.

A Bell-egyenlőtlenség sérülése pedig a kvantum korrelációk klasszikustól eltérő jellegét tükrözi: egy kvantumrendszer komponensei között jóval erősebb korreláció lehetséges, mint a klasszikus esetben, ami tetten érhető többek között a klasszikus és a kvantum kölcsönös információ eltérő viselkedésében.

#### Irodalom

1. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete? *Phys. Rev.* 47(1935) 777–780.

2. D. Bohm, Y. Aharonov: Discussion of Experimental Proof for the Paradox of Einstein, Podolsky and Rosen. *Phys. Rev.* 108(1957) 1070–1076.
3. J. Bell: On the Einstein–Podolsky–Rosen paradox. *Physics* 1(1964) 195–200.
4. J. J. Sakurai: *Modern Quantum Mechanics*. Addison–Wesley, USA (1994) 223–232.
5. S. J. Freedman, J. F. Clauser: Experimental Test of Local Hidden-Variable Theories. *Phys. Rev. Lett.* 28(1972) 938–941.
6. A. Aspect, P. Grangier, G. Roger: Experimental Tests of Realistic Local Theories via Bell’s Theorem. *Phys. Rev. Lett.* 47(1983) 460–463.
7. W. Rosenfeld, D. Burchardt, R. Garthoff, K. Redeker, N. Ortel, M. Rau, H. Weinfurter: Event-Ready Bell Test Using Entangled Atoms Simultaneously Closing Detection and Locality Loopholes. *Phys. Rev. Lett.* 119(2017) 010402.
8. D. Rauch, J. Handsteiner, A. Hochrainer, J. Gallicchio, A. S. Friedman, C. Leung, B. Liu, L. Bulla, S. Ecker, F. Steinlechner, R. Ursin, B. Hu, D. Leon, C. Benn, A. Ghedina, M. Cecconi, A. H. Guth, D. I. Kaiser, T. Scheidl, A. Zeilinger: Cosmic Bell Test using Random Measurement Settings from High-Redshift Quasars. *Phys. Rev. Lett.* 121(2018) 080403.
9. J. S. Bell: Free variables and local causality. *Epistemological Letters*, Feb. 1977. Újra kiadva, mint J. S. Bell: *Speakable and Un-speakable in Quantum Mechanics*. Cambridge University Press (1987) 12. fejezet.
10. A. Zeilinger: *Dance of the Photons*. Farrar, Straus and Giroux, New York (2010) 546–547.
11. R. Schmied, J.-D. Bancal, B. Allard, M. Fadel, V. Scarani, P. Treutlein, N. Sangouard: Bell correlations in a Bose–Einstein condensate. *Science* 352(2016) 441–444.
12. C. E. Shannon: A Mathematical Theory of Communication. *Bell Syst. Tech. J.* 27(1948) 379–423.
13. Neumann J.: *A kvantummechanika matematikai alapjai*. Akadémiai Kiadó, Budapest (1980) V.2. fejezet.
14. W. H. Zurek: Decoherence, einselection, and the quantum origins of the classical. *Rev. Mod. Phys.* 75(2003) 715–775.

## A HETEROGENITÁSOK HATÁSAI VILLAMOS HÁLÓZATI MODELLEKEN

Ódor Géza, Hartmann Bálint  
MTA Energiatudományi Kutatóközpont

### Előzmények

A villamos hálózatok nagy, komplex és heterogén rendszerek, amelyek energiatermelő és -fogyasztó csomópontokból épülnek fel. A villamos áramot változóáramú vezetékrendszerrel osztják szét. Váratlan változások deszinkronizációs eseményeket okozhatnak, amelyek lavinaszerűen terjednek szét és külön-

böző méretű áramkimaradásokat okoznak. Legrosszabb esetben a teljes rendszer hosszú idejű deszinkronizációja is bekövetkezhet. Ilyenek elkerülése végett a villamos hálózatokat úgy kell tervezni, hogy ellenállóak legyenek a helyi instabilitásoknak és hibáknak. Tanulmányok igazolták, hogy az elméleti modellek, amelyek jól reprodukálják a villamos hálózatok topológiai és elektromos kölcsönhatásait, jól



Ódor Géza 1984-ben villamosmérnöki diplomát szerzett a BME-n. Azóta a KFKI területén levő, különböző nevére átkeresztelt MTA kutatóintézetek kutatója. Fizikusi MSc-t 1993-ban Chicagóban, PhD-t 1996-ban az ELTE-n kapott. 2004 óta az MTA doktora. Kétszer egy évig CERN kutatói ösztöndíjas volt. Jelenleg az MTA–EK MFA tudományos tanácsadója, több nemzetközi projekt tagja. Fő kutatási területe a nemegyensúlyi rendszerek statisztikus fizikája a rendezetlen és univerzális viselkedések vizsgálatára.



Hartmann Bálint villamosmérnöki diplomáját és PhD-fokozatát a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen szerezte 2008-ban és 2013-ban. A Villamos Energetika Tanszék docense. Az MTA Energiatudományi Kutatóközpontjának tudományos munkatársa. Kutatási területei az energiatárolás villamosenergia-rendszerben betöltött szerepe, az elosztó hálózatok számítógépes modellezése és szimulációja, illetve az időjárásfüggő megújuló energiaforrások rendszerintegrációja.

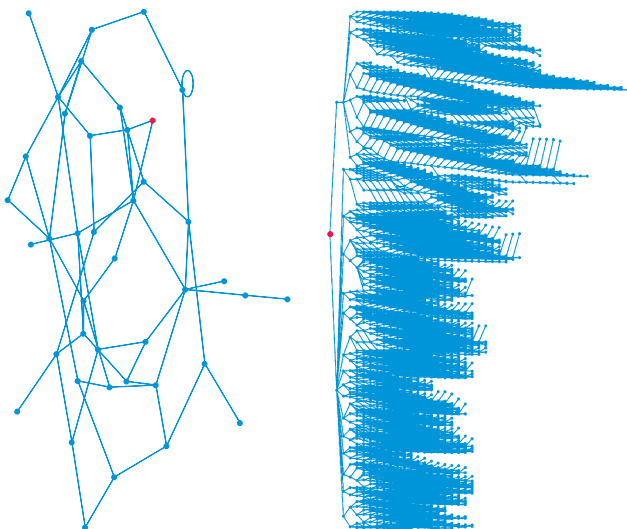


betekintést nyújthatnak az energiarendszer dinamikus viselkedésébe is.

A villamos hálózatok szinkronizációjának leírására az úgynevezett másodrendű Kuramoto-modellt vették be [1]. Ez a más szinkronizációs jelenségeket leíró Kuramoto-egyenlethez képest egy tehetetlenségi tagot is tartalmaz, amelynek következtében a globálisan csatolt, magas dimenziós rendszerek átlagtérmegoldása, szinkronizációs fázisátalakulása másodrendűből elsőrendűvé válik. Azonban alacsonyabb topologikus dimenziókban, ahol a fluktuációk hatása erősebb, ezt az átmenetet korábban nem vizsgálták. Ezen felül más statisztikus fizikai rendszereknél ismert tény, hogy a hálózati heterogenitások elkenik az ugrásszerű fázisátmeneteket és úgynevezett *Griffiths-fázisokat* okozhatnak. Ez utóbbiak az olyan ritka, de nagyon lassan változó régiókkal kapcsolatosak, amelyek hosszú időközön keresztül tartanak fenn a globális fázissal ellenkező állapotot, hatványfüggvény-alakú időfüggéseket okozva a rendparaméterben. Az ilyen fázisok a kritikus pont környezetében egy kiterjedt kontrollparaméter-regióban jelentkeznek és az önszerveződő kritikussággal (SOC) versengő magyarázatot adnak a hatványfüggvények gyakori megfigyelésére [2, 3].

Az áramkimaradások méretének eloszlásairól több ország historikus villamos adatait analizálva megállapították [4], hogy a tiszta véletlen, gaussi helyett vastagfarkú, hatványfüggvény-eloszlással rendelkeznek. A teljesítmény kereslet-kínálat versengés alapján SOC (de nem szinkronizációs) modellekkel próbálják ezt modellezni. Kutatási célunk az volt, hogy a szinkronizációs viselkedést egy olyan helyzetben határozzuk meg, amikor a hálózatban már bekövetkezett a globális csatolás drasztikus leesése [5]. Egy fontos kérdés ezzel kapcsolatban, hogy a rendszer stabilitását miként befolyásolja az elosztott (jellemzően megújuló) energiaforrások bekapcsolása az alaperőművek mellé.

1. ábra. A szintetikus hálózatok jellemző struktúrája. Bal oldalon hurkolt NAF-hálózat, jobb oldalon a NAF-hálózat pirossal jelzett csomópontjához kapcsolódó sugaras KÖF/KIF-hálózat, 68 850 csomóponttal.



## Villamos hálózatok

A villamosenergia-rendszer topológiájának vizsgálatához minden esetben valamilyen kiinduló hálózati modellre van szükségünk, azonban ezek kiválasztását döntően az elvégezni kívánt vizsgálatok köre határozza meg. Az elterjedt gyakorlat szerint néhány jól felépített mintahálózat megfelelő kiindulási alap lehet, ugyanakkor ezek általában a teljes villamosenergia-rendszer csak egy feszültség szintjét (nagy-, közép- és kiefeszültség; NAF, KÖF, KIF) tartalmazzák (1. ábra), vegyes hálózatok alkalmazására ritkán találunk példát. Ennek oka elsősorban abban keresendő, hogy míg a NAF átviteli hálózatok számossága viszonylag kicsi és a kapcsolódó adatok sok esetben állami vállalatokon és nemzetközi szervezeteken keresztül hozzáférhetők, addig a KÖF és KIF elosztó hálózatok esetén ez már közel sincs így. Az adathiány problémája kiküszöbölhető úgynevezett referenciahálózati modellek (reference network model; RNM) konstruálásával. Ezek a modellek az esetek döntő többségében valós hálózatok egy-egy csoportjának közelítő leképezését végzik, így topológia szempontjából kellően pontosak. Alkalmazásuk hátránya kis számukban keresendő, nem teremtik meg a ténylegesen hálózatfüggetlen vizsgálatokhoz szükséges feltételeket.

Az arany középutat a szintetikus úton generált hálózatok jelentik, amelyek valamilyen előzetesen definiált szabályrendszer (például növekedés folyamata, csomópontok és kapcsolatok számának viszonya, feszítőfa struktúrája) szerint kerülnek kialakításra. A szintetikus hálózatok népszerűségét növeli az is, hogy azok topológiai tulajdonságai bizonyos mérőszámok mentén könnyen összehasonlíthatóvá teszi őket nevezetes gráfokkal. Saját vizsgálataink szempontjából ugyanakkor jelentős hátrányt jelentett, hogy az elterjedten használt algoritmusokkal egyrészt viszonylag alacsony (legfeljebb néhány ezres) csomópontszámú hálózatokat hoznak létre, másrészt számos olyan közelítést tartalmaznak, mely a villamosenergia-hálózatok fontos topológiai tulajdonságait nem vagy rosszul képezi le. Az előző két okból munkánk során saját szintetikus hálózat-generáló algoritmus kidolgozását határoztuk el, amelyet MATLAB környezetben végeztünk el. Az algoritmus jobb megértése érdekében – annak bemutatása előtt – röviden kitérnénk a magyarországi villamosenergia-rendszerre.

A villamosenergia-hálózat feladata az erőművek közötti kooperáció megvalósítása, a nemzetközi összeköttetések biztosítása, valamint a megtermelt energia szállítása és elosztása. Ahhoz, hogy e célok a lehető legalacsonyabb gazdasági és környezeti költségek mellett legyenek teljesíthetők, az átviteli és az elosztó hálózatok kialakítása nagymértékben eltér egymástól. Az átviteli hálózatnak (Magyarországon 750, 400 és 220 kV-os feszültség szint) kell a legnagyobb egység teljesítményeket kezelnie, ide csatlakoznak a legnagyobb erőművek, illetve egyes ipari nagyfogyasztók. Ahhoz, hogy a hálózat üzemeltetésének műszaki és gazdasági optimumát megközelít-

sük, lehetőségünk van az energiaáramlás irányának és nagyságának befolyásolására. Ehhez olyan hurkolt topológiára van szükség, amely nemcsak több irányú ellátás kialakítását teszi lehetővé, hanem az ellátás-biztonságot is növeli. (A villamosenergia-rendszer üzemeltetése kapcsán N-1 elvnek nevezzük, amikor a rendszer tolerálja az egyszeres hibák bekövetkezését.) Bár nagyon hasonló felépítésű, a szakmai zsargon megkülönböztetve kezeli a 120 kV-os fő elosztó-hálózatokat, amelyek szintén kiemelten magas üzembiztonságot tesznek lehetővé, azonban kialakításukban már hurkolt és sugaras jellemzők egyaránt megtalálhatók, illetve az energiaáramlásnak általában kijelölt iránya van. Lényegesen nagyobbak a különbségek azonban, ha az összehasonlítást a KÖF és KIF elosztó hálózatokkal végezzük. A magyarországi elosztó hálózat táppontjait a 120 kV-os alállomások adják, a topológia pedig döntően sugaras kialakítású, ezáltal az egyes csomópontok fajlagosan kevesebb csatlakozással bírnak. A KÖF elosztói szintre csatlakoznak az elosztott energiatermelés nagyobb egységei, ipari és kereskedelmi fogyasztók, illetve innét kapja táplálását a KIF elosztó hálózat is. Az utóbbi feszültség szintje 0,4 kV, fő funkciója pedig a lakossági fogyasztók ellátása, illetve újabban a háztartási méretű kiserőművek (például napelemek) termelésének befogadása.

Az átviteli és elosztó hálózatok funkciójának és topológiai jellemzőinek eltéréséből adódóan azok csomópontszáma között is nagyságrendi eltérések adódnak. Saját vizsgálataink szempontjából ez jelenti a legfontosabb előnyt, hiszen olyan méretű, a valós hálózatokat jól leképező modelleket alkothatunk, amelyek már megfelelnek a szinkronizációs átmenetek szimulációjához. Nehézséget jelent ugyanakkor, amint azt a korábbiakban is említettük, hogy az ilyen hálózatok létrehozásának adatigénye nehezen kielégíthető, ezért is fordulunk a szintetikus hálózatok generálásához. A nemzetközi téren használt szintetikus eljárásokhoz képest az elosztóhálózati topológia bevonása – a csomópontszám tekintetében – jelentős előnyt jelent; villamosenergia-rendszerek esetén a NAF-, KÖF- és KIF-hálózatok csomópontjainak aránya durván 1 : 100 : 10 000. (A kutatásaink során létrehozott mintahálózatok néhány millió csomópontból álltak, lásd az 1. táblázatot.) További lényeges eltérést jelent, hogy a hálózatok leképezéséhez súlyozott gráfokat használunk, amely – ellentétben a legtöbb ismert eljárással – figyelembe veszi a rendszerelemek admittanciáját, közvetve pedig a különböző energetikai jelenségek dinamikáját.

A hálózatgeneráló algoritmusban a 120 kV-os feszültség szintet jelöltük meg a véletlen hálózatok kiindulásaként; minden ennél nagyobb feszültségű hálózatrészt determinisztikus módon alakítottunk ki. Egyetlen 120 kV-os alállomás szempontjából nézve a folyamatot, az első lépés az alállomás kijelölése. Ezt követően egy véletlen számot generálva meghatározzuk az alállomásból induló hálózat jellegét (szabadvezeték vagy -kábel). E lépésnek nem csupán az eltérő

hálózat	csomópontok száma	élek száma
1 M	1 098 583	1 098 601
1,5 M	1 455 343	1 455 367
2,5 M	2 356 331	2 356 360
23 M	23 551 140	23 551 254

rő feszültség szintek miatt van jelentősége, hanem a két hálózattípus eltérő kialakítása (vezeték hosszak, transzformátor-teljesítmények, leágazások száma) miatt is. A 120 kV-ot a KÖF szinttel összekötő transzformátor névleges teljesítményét (és ezáltal admittanciáját) a valós hálózat empirikus adatai alapján választjuk ki. A soron következő lépés a transzformátorból induló leágazások kialakítását végzi; a gerincvezeték hossza, az oldalágak elhelyezkedése és hossza, illetve a kapcsolódó KÖF/KIF transzformátorok elhelyezkedése – figyelembe véve a modellezni kívánt hálózat paramétereit – véletlen módon kerül kiválasztásra. Azonos módszerrel alakítjuk ki a KIF-hálózatrészeket is, csatlakoztatva a hálózat végpontjait jelentő egyedi fogyasztókat is.

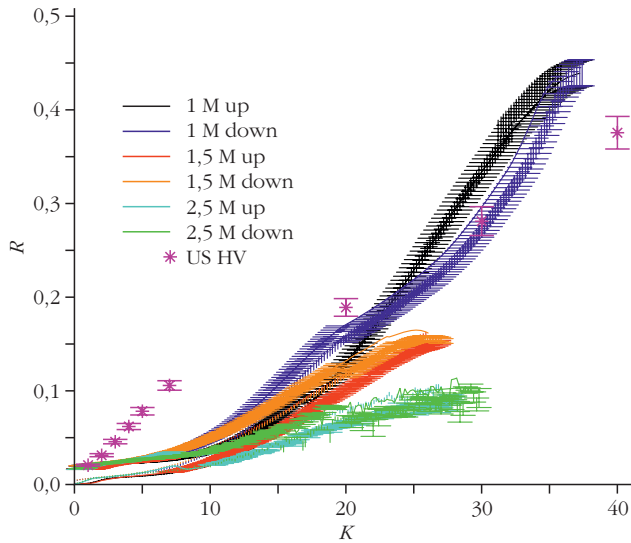
Ahogy az 1. táblázatban is látható, a kutatás jelen fázisában létrehozott legnagyobb hálózat körülbelül 23 millió csomóponttal bírt, ez már jó közelítést jelent egy Magyarországhoz hasonló lakosságszámú és fejlettségű ország villamosenergia-hálózatának. A hálózatelemzések, illetve a szinkronizációs futtatások magas számítási igénye miatt azonos felépítésű, de kisebb hálózatokat is kialakítottunk. Szintetikus hálózatainkat más, a nemzetközi szakirodalomban bemutatott hálózatokkal is összehasonlítottuk, elsősorban a kialakított topológia, a figyelembe vett feszültség szintek, a foksámeloszlás és a klaszterezési együttható mentén. Elmondható, hogy más hálózatok szinte kizárólag az átviteli hálózat topológiája és működési elvei mentén épülnek fel, az egyes csomópontok átlagos fokszáma 2,4–2,8 között mozog. Ezzel szemben az elosztó hálózat figyelembe vétele, annak nagy elemszáma és sugaras kialakítása azt eredményezi, hogy az általunk létrehozott hálózatok átlagos fokszáma 2 körüli, és az eloszlás jellege is eltérő.

## Szinkronizációs modellezés

Valós adatok alapján nagy, szintetikus hálózatokat generáltunk és vizsgáltuk a másodrendű Kuramoto-egyenlet numerikus megoldását, amely a  $j$ -edik oscillator  $\theta_j$  szögváltozójának időfüggését írja le:

$$\dot{\theta}_i(t) = \omega_i(t),$$

$$\dot{\omega}_i(t) = \omega_{i,0} - a \dot{\theta}_i(t) + \frac{K}{N_i} \sum_j A_{ij} \sin[\theta_j(t) - \theta_i(t)].$$



2. ábra. Állandósult állapotbeli Kuramoto-rendparaméter különböző hálózatok esetén a globális csatolás függvényében (fel/le adiabatikus lépésekkel). Szinkronizációs átmenet nagy  $K$ -ra, valamint gyenge hiszterézis látható.

Itt  $N_i$  az  $i$ -edik csomópontba befutó élek száma,  $K$  a globális csatolás, ami a csomópontok között maximálisan átvitt teljesítménnyel kapcsolatos,  $A_{ij}$  az admittanciákkal súlyozott szomszédsági mátrix és  $a$  a teljesítménydisszipációt leíró együttható. Heterogenitás, amely térbelileg rögzített, kétféleképp jelenik meg, a gaussi eloszlású véletlen  $\omega_{i,0}$  oszcillátor-önfrekvenciákban és az  $A_{ij}$  mátrixelemekben. Negyedrendű Runge–Kutta-módszerrel oldottuk meg a fenti egyenletet úgy, hogy a kiindulás teljesen szinkronizált vagy deszinkronizált állapot volt. Az úgynevezett kvencseléses (rögzített  $K$ -hoz való fejlesztés), vagy adiabatikusan változó  $K$ -jú módon vizsgáltuk a kialakuló időfejlődést. A fázisszinkronizáció jellemzésére a Kuramoto-rendparamétert határoztuk meg:

$$z(t_k) = r(t_k) e^{i\theta(t_k)} = \frac{1}{N} \sum_j e^{i\theta(t_k)},$$

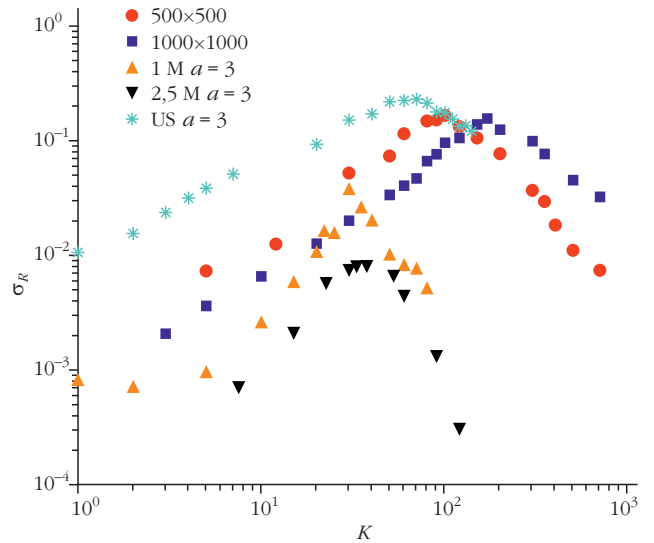
ahol  $1/N$  a rendszer összes csomópontjára való átlagolást jelzi és 50 mintaátlagon képzett valós rész:

$$R(t_k) = \langle r(t_k) \rangle$$

időfüggését analizáltuk. Állandósult állapotban  $R$  fluktuációját ( $\sigma_R$ ) is mértük, amely fázisátalakuláskor szinguláris viselkedést jelez.

## Fázisátmenet-vizsgálat

Míg teljes gráfon igazoltuk az elsőrendű fázisátalakulást, kétdimenziós rácson és a szintetikus villamos hálózatokon (amelyek gráfdimenziója 1-2 körüli) a végesméret-analízis azt mutatja, hogy nincs igazi fázisátalakulás a végtelen limeszben, csak szinkronizációs átmenet, amelynél  $N$ -et növelve egyre kisebb rendparamétert és fluktuációkat találunk (lásd 2. és 3.



3. ábra. Az állandósult állapotbeli fluktuációk különböző hálózatok esetén a globális csatolás függvényében. A rendszermérettel csökken a fluktuációk nagysága, ami fázisátalakulás hiányára utal a végtelen limeszben.

ábrák). A saját szintetikus hálózatok eredményeihez hasonlítottuk az irodalomban gyakran citált USA  $N = 4941$  csomópontos irányítatlan és súlyozatlan NAF-hálózatokon generált eredményeket is.

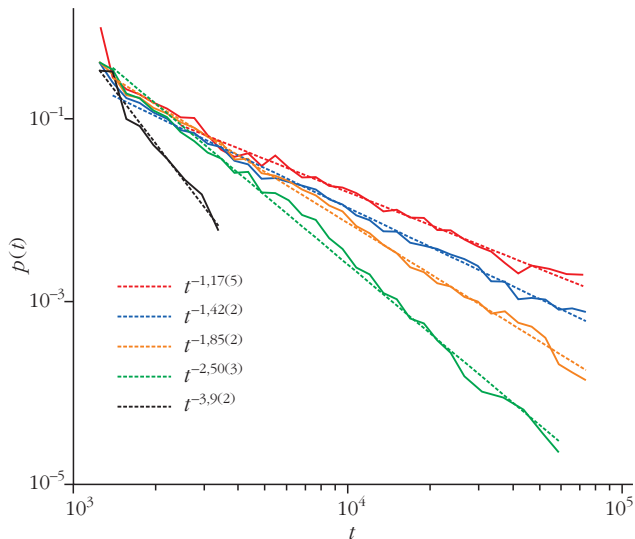
Emellett kétdimenzióban erős, a villamos hálózatokon gyenge hiszterézishurkokat is találtunk, amely az elsőrendű átmenetekre jellemző.

## Deszinkronizációs lavina időeloszlása

Szinkronizált állapotból, indított rendszerek esetén vizsgáltuk azon idők valószínűségeloszlását, ameddig  $R_T$  az  $1/N^{1/2}$  küszöbérték alá esik, mert ez teljesen deszinkronizált állapotot jelez. A kvencseléses protokollt alkalmaztuk alacsony  $K$  csatolási értékekkel. Nagyszámú futásra, amelyek különböző  $\omega_{i,0}$  véletlen kezdeti értékekkel rendelkeztek, meghatároztuk ezen idők  $p(t)$  eloszlását, amelyet az 1 M hálózat esetén a 4. ábra mutat. A log-log diagramon jól megfigyelhetők a  $K$ -függő hatványfüggvényfarkak, amelyek hasonlóak az empirikus áramkimaradás-eredményekhez, de valódi fázisátalakulás hiányában itt nem beszélhetünk valódi Griffiths-fázisról. Inkább a moduláris hálózatban megjelenő úgynevezett frusztrált szinkronizációról, amelyben erősebben csatolt domének különböző szinkronizált állapotokba ragadnak be.

## Az elosztott energiatermelés előnye

Annak tisztázására, hogy a szinkronizációt miként befolyásolja az elosztott energiatermelők megjelenése hálózatunkban, összehasonlítottuk a hagyományos nagyfeszültségű körbeli erőműves modellt a véletlenül szétszórt energiaforrásos esettel. Korábban már kisebb és egyszerűbb szintetikus hálózatoknál



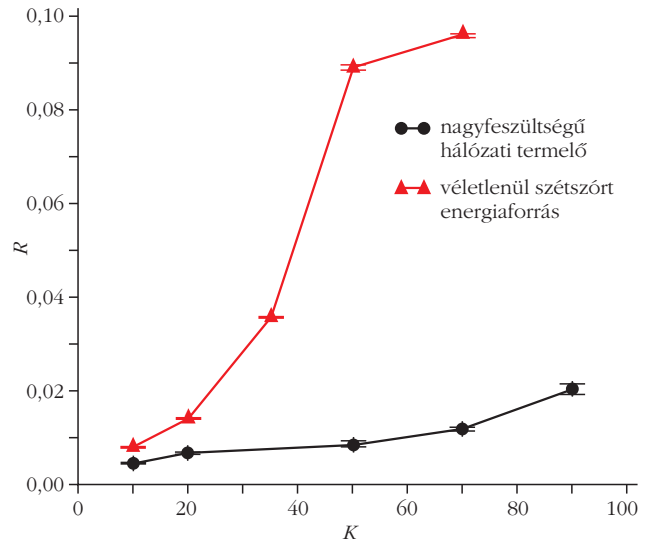
4. ábra. Deszinkronizációs lavinák hosszának időeloszlása az 1 M hálózatnál különböző  $K$ -k esetén ( $K = 0,7, 0,6, 0,5, 0,4, 0,2$  fentről lefelé haladva). A szaggatott vonalak hatványfüggvény-illesztéseket mutatnak.

igazolták [6], hogy a decentralizált energiatermelős modell stabilabb, mint a hagyományos. Mí a fentihez hasonlóan a hagyományos esetet olyan bináris  $\omega_{i,0}$  eloszlással modelleztük, amelyben a nagyfeszültségű hálózat csomópontjaiba  $\omega_{i,0} = 10 + p_G$ , míg a többi, fogyasztónak feltételezett csomópontokba  $\omega_{i,0} = -1 + p_G$  eloszlású sajátfrekvenciát tettünk, ahol  $p_G$  egységsszórású, normál eloszlású véletlen változót jelöl. A szétszórt energiaforrások modellezésére az energiatermelő csomópontokba  $\omega_{i,0} = 2,5 + p_G$ , más-hol  $\omega_{i,0} = -1 + p_G$  értéket alkalmaztunk véletlenszerűen. Szinkronizált állapotból kvencselve határoztuk meg az állandósult állapotbeli értékeket, amit az 5. ábra mutat. Egyértelműen látszik, hogy az elosztott energiatermelős modell az egész vizsgált  $K$  tartományban nagyobb szinkronizációkat eredményez a hagyományosnál.

## Összefoglalás

A heterogenitásának vizsgálata céljából összehasonlítottuk a másodrendű Kuramoto-modell fázisszinkronizációs átmenetét kétdimenziós és szintetikus villamos hálózatokra alkalmazva.

Az utóbbiak súlyozott hierarchikus hálózatok, amelyek valós rendszerek alapján generáltunk.



5. ábra. Állandósul állapotbeli szinkronizáció az 1 M hálózatnál, bináris eloszlású  $\omega_{i,0}$ -k esetén hagyományos nagyfeszültségű hálózati termelő (pötty) és véletlenül szétszórt energiaforrások (háromszög) esetén.

A globális ( $K$ ) csatolást változtatva megmutattuk, hogy az átmenetek ugyan elsőrendű jellegűek, a végtelenméret-limeszben nem lesz igazi fázisátalakulás. Azonos méretű szintetikus hálózatokon a szinkronizáció alacsonyabb csatolásoknál törik le, mint a reguláris griden. Egy hálózati összeomlást szimuláló alacsony  $K$ -ra való ugrásnál a deszinkronizációs lavinák időhossz-eloszlása – a tapasztalatokkal összhangban – hatványfüggvény-viselkedést mutat.

Megmutattuk, hogy az elosztottenergia-termelős rendszer szinkronizációs tulajdonságai jobbak, mint a hagyományos, centralizált erőműves modell alkalmazása esetén.

## Irodalom

1. G. Filatrella, A. H. Nielsen, N. F. Pedersen: Analysis of a power grid using a Kuramoto-like model. *Eur. Phys. J. B* 61 (2008) 485.
2. Ódor Géza: Kritikus dinamika egy nagy emberi konnektomon. *Fizikai Szemle* 67/7 (2017) 227.
3. Ódor Géza: Univerzalizációs osztályok és fázisátalakulások komplex, nemegyensúlyi rendszerekben. *Fizikai Szemle* 59/4 (2009) 136.
4. B. A. Carreras, D. E. Newman, I. Dobson, A. B. Poole: Evidence for self-organized criticality in a time series of electric power system blackouts. *IEEE Trans. Circuit Syst. I: Regular Papers* 51 (2004) 1733.
5. Géza Ódor, Bálint Hartmann: Heterogeneity effects in power grid network models. *Phys. Rev. E* 98 (2018) 022305.
6. M. Rohden, A. Sorge, D. Withaut, M. Timme: Impact of network topology on synchrony of oscillatory power grids, *Chaos* 24 (2014) 013123.



**SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY  
A FIZIKA BARÁTJA!**

**Támogasd adód 1%-ával az Eötvös Társulatot!  
Adószámunk: 19815644-2-43**

## MUZSIKÁLÓ FIZIKA

Jendrék Miklós  
VSZC Boronkay György Műszaki  
Szakgimnáziuma és Gimnáziuma, Vác

Ezt a címet adtam a 2107. évi, Debrecenben tartott nemzetközi *Science on Stage* fesztiválra készített projektemnek. Bemutatóm alapjául a 2015 áprilisában megjelent *Elektroakusztikus átalakítók* [1] című cikkben közzétett kísérletek továbbfejlesztett, új ötletekkel kiegészített változatai szolgáltak. A legszükségesebb két eszköz továbbra is egy tekercs és egy számítógép-hangfal. A kísérletek fő célja a fizikai jelenségek színesebb, érdekesebb, rendhagyó módon történő bemutatása.

A tekercs kettős funkciót tölt be: elektromágneses indukció elvén működhet változó mágneses mező érzékelőjeként, illetve áramot szállítva lehet mágneses mező forrása (elektromágnes). Bontott, újrahasznosított alkatrészeket használok: régi motorok állórészei, relék, fojtótekercsek, elektromágnesek (1. ábra). Mindkét funkció betöltésére legalkalmasabbak a vasmagos, nagy menetszámú tekercsek.

### Hangfrekvenciás elektromágneses mezőforrások észlelése

Kapcsoljunk egy vasmagos tekercset az erősítő (például aktív számítógép-hangfal) bemenetére. Az így kapott elektromágneses érzékelőnköt közelítsük különböző elektromos berendezésekhez. Kezdjük a PC-hangfallal. A mély, bűgő hang elárulja, hol található benne a tápegység transzformátora. Lényegesebben zajosabb hangok „jönnek” a hálózati adapterekből. Ezek a kellemetlen, haszontalannak tűnő jelek jó szolgálatot tehetnek egy látványos kísérlet elvégzésénél.



1. ábra. Nagy menetszámú, vasmagos tekercsek.

### Csillapított rezgések előállítása

Közelítsünk a hálózati adapterhez egy pár száz kilohertzre hangolt rezgőkört. Ilyet tanuló elektronikai készletben találhatunk, vagy magunk is készíthetünk. A ferritúdra helyezett közel 100 menetes tekercs és egy 0,5 nF-os kondenzátor megfelel e célnak. Az adapterből kilépő impulzusok biztosítják a veszteségek periodikus pótlását.

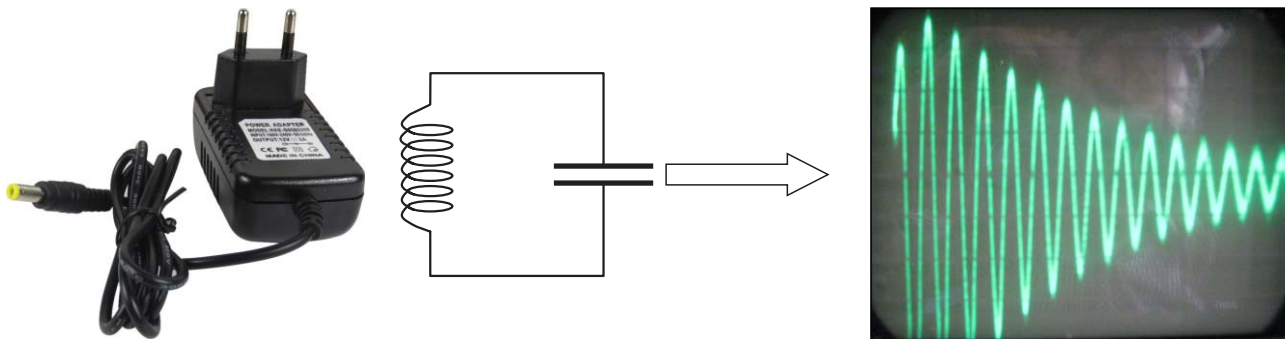
A csillapított rezgéseket akkor lehet jól megfigyelni, ha a rezgőkör sajátfrekvenciája egy-két nagyságrenddel nagyobb, mint a veszteségek periodikus pótlását szolgáló jelek frekvenciája. Ilyenkor két egymást követő impulzus között létrejönnek a csillapodó rezgések, amelyek jól kirajzolódnak az oszcilloszkóp képernyőjén (2. ábra).

### Csillapítatlan rezgések keltése

Ha az érzékelő tekercset a saját erősítő hangszórójához – azaz annak elektromágneséhez – közelítjük, csillapítatlan rezgéseket kapunk. A jelenség hasonlít a mikrofon okozta gerjedésre, de azzal a különbséggel, hogy most a visszacsatolás nem akusztikus, hanem elektromágneses úton történik. Különböző visszacsatoló tekercsek esetén más-más lesz a keltett hang magassága, de minden esetben szinuszos rezgés jön létre.



Jendrék Miklós 1979-ben az Ungvári Állami Egyetemen szerezte meg a fizikatanári diplomáját. 1989-től a Váci Szakképzési Centrum Boronkay György Műszaki Szakgimnáziuma és Gimnáziuma főállású fizikatanára. Tehetséggondozás mellett nagy hangsúlyt fektet az egyszerű – a tananyag jobb megértését szolgáló – saját fejlesztésű eszközök készítésére, és azok segítségével történő kísérletek leírására, bemutatására.

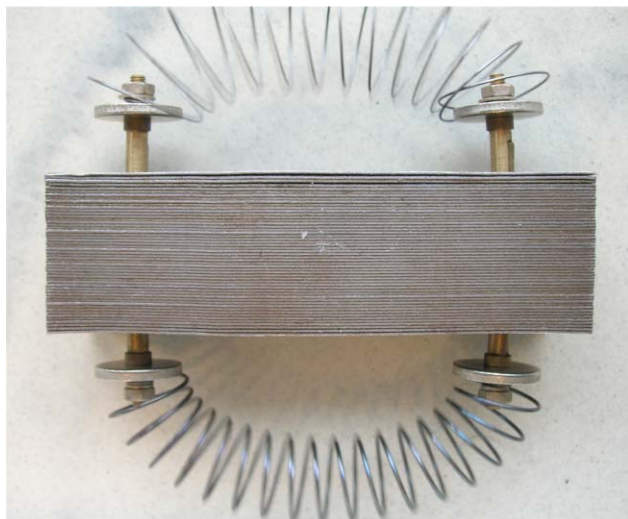


2. ábra. Csillapított rezgések előállítása.

Megfelelő tekercs kiválasztásával elérhetjük, hogy a visszacsatolást követően a kialakult rezgések frekvenciája az ultrahang tartományába essen. A gerjedés tényét oszcilloszkóppal tudjuk ellenőrizni, a frekvenciát műszerrel, vagy egy másik generátor segítségével a *Lissajous*-görbék alapján határozhatjuk meg. Egy referenciagenerátor frekvenciájának elhangolásával lebegést hozhatunk létre. Ilyenkor a két rezgés alfrekvenciájának összege és különbsége is megjelenik. Az utóbbi hang formájában jelentkezik, hiszen az egyik – összeállításban szereplő – tekercs a hangszóró tekercse.

Csillapítatlan rezgéseket úgy is előállíthatunk, ha a mágneses detektorunkat hangszedőként használjuk. Fogjunk be satuba egy fűrészlapdarabot. A lemezt mágnesezzük fel, vagy helyezünk rá egy kis mágnesdarabot. Hozzuk rezgésbe a fűrészlapot, és közelítsük hozzá az érzékelő tekercset. Az elektromos átalakításokon és erősítésen átesett jel ismét hang formájában köszön vissza. Jó akusztikai tulajdonságokkal bíró asztal, illetve megfelelő hangerősség esetén, akusztikus pozitív visszacsatolás révén, csillapítatlan rezgések keletkeznek. A rezgő rendszer szempontjából a hangszóró olyan kényszerrezgés forrása, amelynek frekvenciája egybeesik a lemez sajátfrekvenciájával, rezonancia jön létre. Fűrészlap helyett sikeresen használhatunk hangvillát is.

3. ábra. Állóhullámok keltésére szolgáló „eszköz”.

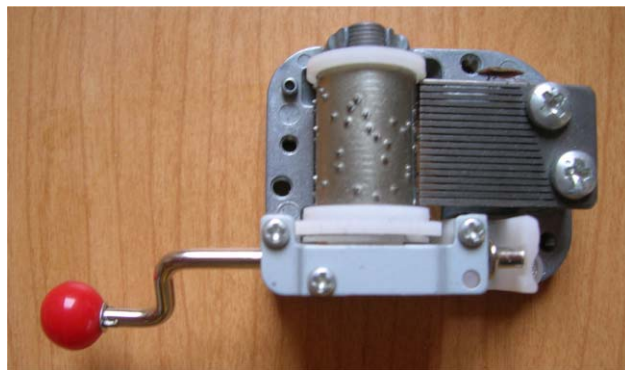


## Még egy pár hangszedő alkalmazás

Rögzítsük a mechanikai készletből származó, banándugókkal ellátott rugók végeit. Ehhez kiválóan alkalmas a szétszedhető transzformátor záróvasa (3. ábra). Gyönyörű állóhullámokat kelthetünk a rugók megpengetésével. Mágneses érzékelő tekercsünket közelítsük a rezgő rugókhoz. Egyre hangosabb lesz a rezgések keltette hang. A kísérlet elvégzése előtt a rugókat érdemes egy darab mágnessel felmágnesezni. A hang magassága és hangszíne a rugók minőségén túl függ a pengetés módjától is: más lesz transzverzális és más longitudinális hullámok esetén.

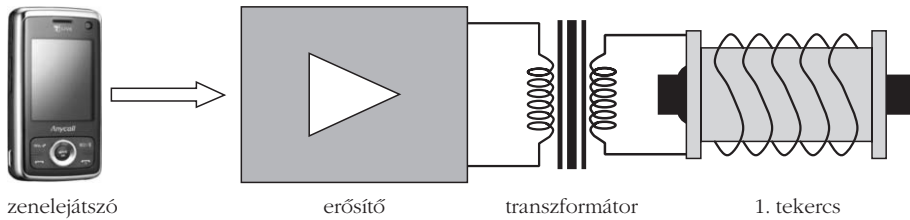
Zenedoboz (4. ábra) akusztikus rezonátor hiányában nagyon halkán szól. Ha érzékelő tekercsünket az eszköz hangot adó acéllemezekéhez közelítjük, jellegzetesen fém hangszínezetűvé válik a felerősített jel.

4. ábra. Zenedoboz.



5. ábra. Elektromosgitár-modell.





6. ábra. Távvezeték szemléltetését szolgáló összeállítása.

Ezen az elven működik az elektromos gitár is. Készítsünk egy gitármodellt: feszítsünk ki acélhuzalt egy tekercs felett (5. ábra). Ha az erősítő bemenetére kapcsolt vasmagos tekercshez közelítünk egy mágnes, jellegzetes zajhatást fogunk észlelni, ami nem indukciójelenség, hiszen a hang magassága nem függ a mágnes mozgatási sebességétől. A domének ugrásszerű átfordulása okozza a hatást (Barkhausen-effektus).

Gyenge mágnes közelítésével jelentősen növelhetjük vagy csökkenthetjük a húr mágnesezettségének mértékét. A mágnes hosszirányú elmozgatása jellemzően csökkenti, míg a keresztirányú növeli a mágneses hatást.

## Az áram mágneses hatása

Zenelejátszót egy néhány wattos erősítő bemenetére csatlakoztassunk (6. ábra). Az erősítő kimenetére pedig – hangszóró helyett – egy tekercset kapcsoljunk. A kísérlethez megfelel a párszáz menetes légmagos tekercs is, de lényegesen jobb hatást, és univerzálisabb alkalmazást kapunk, ha nagy menetszámú, vasmagos tekercset használunk. Az utóbbi esetben – impedanciaillesztés céljából – az erősítő és az 1. tekercs (később lesz második is) közé egy transzformátort szükséges iktatni, a menetszamarány legalább 1:20 legyen. A kis menetszámú tekercset az erősítő kimenetéhez, a nagy menetszámú pedig a vasmagos tekercshez kell kapcsolni. Mágneses szenzorunkkal megbizonyosodhatunk arról, hogy az áramkör különböző szakaszai (tekercs, transzformátor, összekötő vezetékek) mind elektromágneses mező forrásai: a zene ütemével megegyező hangfrekvenciás jeleket indukálnak az érzékelő tekercsben.

Az összeállítás egy távvezetékrendszer szemléltetésére is alkalmas. Ugyanis a kis ellenállású körbe iktatott – veszteséget modellező – előtét-ellenállás lényegesen megnövelheti az eredő ellenállást és egyben a veszteséges teljesítményt. Ugyanez az ellenállás – az amúgy is nagy szekunder kör ellenállás miatt – nem sokat változtat annak eredőjén. Így a

veszteség is elhanyagolható lesz. Minderről, az unalmas 50 Hz-es frekvencia helyett, zenehallgatás közben győződhetünk meg.

Az 1. tekercsre egy akusztikus rezonátort – konzervdobozt, teáskannát – helyezünk, a „hangszóróba” pedig

egy kis méretű, erős mágneset tegyünk! A vasmagos tekercsnek köszönhetően viszonylag kis (1-2 W) teljesítmény esetén is – bár akusztikailag nem kifogástalan, de – jól működő hangszórót kapunk. Most vegyük elő az érzékelő tekercsünket, és közelítsük a kannához! Az indukált jelben a mély hangok erőteljesen kiemelődnek.

Fejlesszük tovább az energiaátalakítási láncot! Az 1. tekercsre egy másikat helyezünk, így még egy transzformátort kapunk (7. ábra). A 2. tekercset kapcsoljuk egy fényforrásra, például LED-es kerékpárlámpára! A fényforrás fényerőssége – szemmel láthatóan – a hang ütemében ingadozik. Amennyiben nem nyeri el tetszésünket a „zenehallgatás” e (békés) módja, irányítsuk a fényt egy PC-hangfal bemenetére kapcsolt fényérzékelőre, ami akár egy napelem is lehet. A lámpát infravörös LED-re cserélve további érdekes kísérleteket végezhetünk. Ugyanakkor a fényel szállított jel demodulálására ebben az esetben fotodiódát vagy fototranzisztort kell használnunk [2].

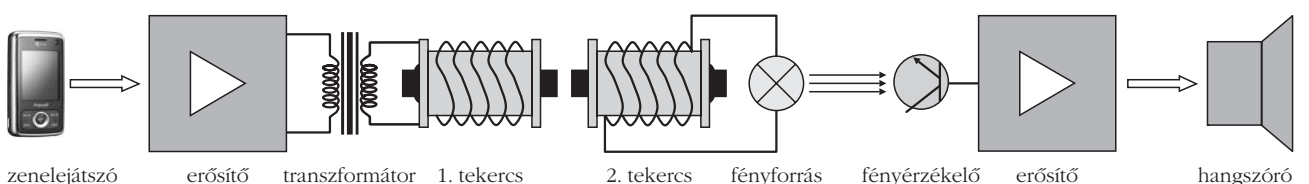
## Összegzés

Hangfrekvenciás elektromágneses és fényjelek detektálásával és átalakításával egy sor fizikai jelenség mutatható be látványos, nem szokványos módon. Elektromágneses mező érzékelésére tekercseket, a fényjelek detektálására fényérzékelő elemet (fototranzisztor, fotodióda) használhatunk. Erősítés után a jeleket ismét hanggá alakítjuk. A jelátalakítási folyamatok során lehetőség nyílik fénytani, akusztikai, elektromágneses jelenségek vizsgálatára, bemutatására. A leírt kísérletekről készült videók az interneten megtekinthetők [3].

## Irodalom

- Jendrék M.: Elektroakusztikus átalakítók. *Fizikai Szemle* 65/4 (2015) 128–130.
- Jendrék M.: Látható hangok, hallható fények. *Fizikai Szemle* 62/3 (2012) 96–100.
- [https://drive.google.com/drive/folders/10hL4U7\\_rK5NyYlyb7lpW52NRKXI\\_sv8?usp=sharing](https://drive.google.com/drive/folders/10hL4U7_rK5NyYlyb7lpW52NRKXI_sv8?usp=sharing)

7. ábra. Energiaátalakítási lánc.



# SZABADULÓSZOBÁK A FOLYADÉKOK FIZIKÁJÁNAK TANULMÁNYOZÁSÁRA

Vörös Alpár István Vita  
Apáczai Csere János Elméleti Líceum,  
Kolozsvár, Románia

A szórakoztatóiparban az elmúlt egy évtized során világszinten nagy népszerűségnek örvendő terjedtek el a szabadulósobák. Egymással párhuzamosan három kontinensen alakult ki és fejlődött, de hasonló koncepció mentén: megadott határidő (általában 45 vagy 60 perc) alatt, 4-10 fős csapatoknak kell egy bezárt helyiségből kiszabadulniuk logikai és ügyességi feladványok megoldása által. Ennek bölcsője Japán (2007-ben a *Real Escape Game* elindítója *Takao Kato*) és az Amerikai Egyesült Államok, de az ötletet magáénak vallja a 2011-ben indult budapesti Parapark alapítója, *Gyurkovics Attila* is. A játék általában egy kerettörténetbe van ágyazva, amely még inkább elősegíti, hogy a résztvevő számára azt a flow állapotot idézze elő, amelyben *Csikszentmihályi Mihály* szerint az emberek akkor a legboldogabbak, amikor teljesen leköti figyelmüket egy olyan feladat, amibe boldogan belefeledkeznek [1]. Ennek alapján úgy gondoltam, hogy érdemes volna a szabadulósobát, mint interaktív játékot a fizika oktatásában is alkalmazni. Az elmúlt egy év során két különböző tevékenységet dolgoztam ki a folyadékok fizikájának témakörére építve, amelyet az *Iskola másként* tematikus héten, illetve tehetséggondozó táborban és egy fizikaverseny alternatív szabadidős tevékenységeként próbáltam ki. Fontosabb célok a tevékenység kidolgozása során:

- a gimnáziumi fizika tananyagból hiányzó témakör, a folyadékok fizikájának megismertetése a diákokkal kísérletek által;
- a diákok passzív tudásának aktivizálása az egymással való kommunikáció által;
- aktív oktatási módszerek hatékonyságának tanulmányozása.

## Szabadulósobák az oktatásban

A szabadulósobák eredményességét *Scott Nicholson* kanadai professzor több éve tanulmányozza és 5 kontinens 175 létesítményétől kapott kérdőíves válaszok alapján kimutatta, hogy 12%-uk tudományos kerettörténetbe van ágyazva. Ugyanakkor megállapította, hogy a létesítmények 30%-a tartalmaz olyan elemeket is, amelyek tanulási céllal voltak kidolgozva, de a tanulmányozott szabadulósobák csak 8%-a lett kimondottan oktatási céllal megalkotva [2]. *Hoellwarth* és *Moelter* 2011-ben közölt tanulmánya kimutatta, hogy aktív tanulási folyamatok során sokkal hatékonyabban sajátíthatók el az ismeretek [3]. Így nem csoda, hogy az elmúlt években több próbálkozás is volt, amely a szabadulósobák alkalmazását kísérte meg az oktatásban. Ennek több formája is kipróbálásra került.

Egyrészt tudományos játszóházakban hoztak létre szabadulósobákat. A győri Mobilis Interaktív Tudományos Játszóház keretében a természettudományok nagyon különböző területéről felhasznált információk segítségével juthatunk ki a szobából. Ennél már célirányosabb, a kvantumfizika jelenségeit megismertető, 2017 elején beindított LabEscape, amelyet az Illinois-i Egyetem Fizika Kara hozott létre egy bevásárlóközpontban [4]. A szabadulósobákat nemcsak természettudományos témakörök feldolgozására használták, hanem irodalmi témákra is, mint például a New York-i Genesee völgy Iskolai Könyvtárhálózata számára 2016-ban elkészített tematikus játék [5], illetve a budapesti Karinty Frigyes Gimnáziumban, ahol az Arany-émlék-év alkalmából 2017 őszén készült el az *Arany János* szabadulósoba, amelyet az iskola matematika és magyar munkaközössége közösen hozott létre [6]. Magyarországon hasonlóval büszkélkedhet a nagykorösi Arany János Református Általános Iskola [7] és a szarvasi Szlovák Általános Iskola is [8]. Ezekben egyidejűleg csak egy csapat vehet részt a játékban.

Másik alkalmazási terület a kimondottan oktatási (egyetemi vagy iskolai) környezetre, vagyis több csoport, ugyanazon térben történő egyidejű munkájára kitalált szabadulósobák. Harmadik éve ajánl fel ilyen oktatási csomagot a *breakoutedu* [9], illetve a *the-escapeclassroom* [10]. Az egyetemi oktatás számára is eredményesen próbálkoztak ilyen szabadulósobás tevékenységekkel: az informatika- [11], a kémia- [12], és a farmakológia-oktatás [13] esetén. Minket inkább ez utóbbi lehetőség, a több csoport egy térben kivitelezett foglalkozása érdekelt, de mindkét környezetben kipróbáltuk a tevékenységeket.

Mindkét fentebb említett internetes szolgáltató forgalmaz egy-egy alapsomagot, amely dobozokat és számozás lakatokat, illetve széfet tartalmaz. Ezeket fel lehet használni a tematikus tevékenységekre, amelyek a honlapjukról térítés ellenében letölthetők, grafikusan tetszetős kivitelezésű, nyomtatható feladatlapokból

---

A tanulmány elkészítését a Magyar Tudományos Akadémia Tantergypedagógiai Kutatási Programja támogatta.



Vörös Alpár István Vita az Apáczai Csere János Elméleti Líceum fizika szakos tanára, igazgatója. A kolozsvári Babeş-Bolyai Tudományegyetem Fizika Karán 1995-ben szerzett fizikus oklevelet, majd Bio- és Orvosi fizika mesterfokozatot szerzett. Jelenleg az ELTE Fizika Tanítása Doktori Program doktorjelöltje. A Vermes-Öveges Fizikaversenyek erdélyi szervezőbizottságának tagja. A Csillagászatban Tantárgyversenyek romániai országos bizottságának tagja.





1. ábra. Az első kihívás a csapatmunka során a feladatkörök leosztása, illetve a szövegeértelmezés.

állnak. Ugyanakkor bárki kidolgozhat saját feladatlapokat is. Számunkra ez utóbbi kézenfekvő, hiszen a feladatlapokat mindenképpen le kellene fordítani angol nyelvből, ugyanakkor nem feltétlenül alkalmazható sem a magyar, sem a román tantervi követelményekhez illesztve. A két szolgáltató csak elvéve ajánl fel gimnáziumi szintű fizika témaköröknek megfelelő szabadulójátékokat, így saját kreativitásunkat is fejlesztve aknázhatjuk ki ezt a tanítási módszert.

## A fizikus szabadulósobák tervezése

Az említett két internetes szolgáltató alapvetően három különböző módját ajánlja a szabadulósobás tevékenységeknek. Az első kettő kisebb, vagy kissé nagyobb befektetést igényel a dobozok és számszörös lakatok beszerzése által. Az olcsóbb változatban csak egy csomagra van szükség. Ekkor a játékban résztvevő csapatok a tevékenység során lejegyzik a kódokat, és a végén kipróbálják a megtalált kódlehetőségeket a lezárt lakatokon (minden csapat ugyanazon lakatokat próbálja ki). A drágább változatban a csapatok számával azonos számban vannak előkészítve a játék során szükséges eszközök. Ennél is olcsóbb változat, hogy dobozok és lakatok helyett lezárt borítékokat használunk, amelyek kódokkal vannak megjelölve. Elsőként ez utóbbi változatot próbáltuk ki az Apáczai-líceumban, majd – a pozitív visszajelzések megerősítése alapján – fokozatosan szereztük be a szükséges eszközöket.

A hagyományos szabadulósobák sem minden esetben kimondottan egy zárt szobából való kiszabadulást jelentik, léteznek úgynevezett „breakin”, vagyis „betörő” játékok is, amikor egy dobozban elzárva található a játék megoldandó talánya.

Mostanáig a következő helyzetekben próbáltuk ki a fizikus szabadulósobát:

- osztálytermi környezetben egy adott iskola diákjaival két alkalommal, különböző feladatsorral;
- tehetséggondozó táborban, különböző erdélyi középiskolák fizika iránt érdeklődő és fizikaversenyeken jó eredményeket elérő diákjaival;
- fizikaversenyhez kapcsolódóan a résztvevők számára szervezett szabadidős programként.

A „betörő” játék elvét alkalmaztuk az első két alkalommal, amikor az utolsó kód egy olyan dobozot nyitott, amelyben egy ráadáskísérlet, illetve a tábor közkedvelt hintapadja volt lelakatolva. Másik két alkalommal már igazi szabadulójáték formájában, az adott terem kulcsát megtalálva kellett kiszabadulni.

A román oktatási rendszerben pár éve minden iskolának kötelező módon egy *Iskola másként* tematikus hetet kell megszerveznie, és alternatív oktatási programokat felajánlania. Ennek keretében a kolozsvári Apáczai-líceum diákjai számára először 2017 áprilisában készítettük el a fizikus szabadulósobát a 9. és 11. évfolyam reál tagozatos diákjai számára. A csapatokban vegyesen vettek részt a két évfolyamról (1. ábra). Mivel a tematikus hét programjai során egyik fő célunk az iskolai tananyagot túli tudás, ismeret átadása, ezért a szabadulósoba témaköröként a folyadékok fizikájának két elhanyagolt fejezetét választottuk: a folyadékok dinamikáját és a felületi feszültség kérdéskörét [14].

A 45 perces időkeretre tervezett játék öt feladatot tartalmazott. Ezek között négy kísérleti feladat volt. A játékban résztvevő hat csapat számára a munkaszaltra elő volt készítve az első feladatlap, amely egyúttal a kerettörténetet is tartalmazta, a kísérleti eszközöket és a lezárt borítékokat a kódokkal. A játék lineáris felépítésű volt, hiszen az első feladatlap által megadott kód segítségével kibontható boríték egyúttal a következő feladatlapot is tartalmazta. Mivel minden kód három- vagy négyszámjegyű, ezért a kódokkal megjelölt borítékok közül már az első számjegy alapján is ki lehetne választani a megfelelőt. Annak érdekében, hogy a csapatokat arra kényszerítsük, hogy a kísérleteket teljes mértékben végezzék el, hibás számkombinációkkal megjelölt borítékokat is kaptak, amelyben nem volt feladatlap elhelyezve, hanem „levélbomba”. A játék szabálya értelmében a csapatoknak három életük van, így maximum két „levélbombás” borítékot nyithatnak fel.

## A kerettörténet

A szabadulósobák sajátossága, hogy a szobából való kiszabadulás akkor jelent igazi kihívást, ha egy kerettörténetbe van ágyazva, amely vagy egy történelmi eseményhez és helyszínhez, vagy mitológiai keretben, vagy fiktív történet köré van kidolgozva. A játék résztvevői ez által egy szerepjáték részesei lesznek, ami elősegíti aktivizálódásukat (2. ábra), ezt az oktató szabadulójáték egyik fő sikerességének tartja Nicholson [15]. A választott témakörhöz kapcsolódóan görög mitológiai keretet választottam: „Feladatokat átjutni a Sztüx vizén, az élők és holtak birodalmát elválasztó határfolyón, amely kilenc kanyarulattal fut az alvilág legmélyére, oda, ahol *Hádész* palotája emelkedik. Ahhoz, hogy ezen folyóhoz eljussatok előbb négy másik alvilági folyón kell átjutnotok: a *Léthé*, a *Phlegethón* (égő), az *Akberón* (örömtelen) és a *Kökütosz* (jajgatás) átszelik a poklot, és óriási, szörnyű mocsárban egyesülnek. Utazásotok során minden feladatban egy



2. ábra. Az együttműködés, a feladatok leosztása a hatékony csapatmunka záloga.

kódot kell megtalálnotok és a megfelelő kóddal megjelölt boríték felbontásával utazhattok egyik folyótól a másikig, míg el nem éritek a Sztüx vizét.”

## A kihívások

A témába való bevezetesként a folyadékfizika néhány jelentősebb tudósának megismerése volt a cél. Ehhez négy fizikus nevének betűit kevertem meg egy internetes alkalmazás segítségével, hiszen az anagrammajátékok nagyon jó kreativitáskeresőek. Az általunk használt négy anagramma: *acetón alig terel virsli, csel liba pásza, undi labor illene, méhész kard*. Ezt egy képfelismeréssel kombinálva adódik a négyjegyű kód, hiszen az anagrammák megfejtését a képeken szereplő fizikusportrékkal kell megfeleltetni. Mivel nem volt elvárható, hogy a diákok ismerjék *Arkhimédész, Torricelli, Pascal* vagy *Bernoulli* portréját, a képeken feltüntettük az keresett személy születési és halálozási évszámát is. Az internet használatával az évszámok ismeretében bárki könnyedén meg tudja fejteni a feladványt. A képek sorrendjében leírva az anagrammák előtt szereplő számjegyeket megkapjuk a négyjegyű kódot, amelyre a következő boríték megkereshető.

Egy egyszerű, de mindenki számára nagyon meglepő kísérlet a felületi feszültséghez kapcsolódóan a vízzel telt pohár túltelítése, amikor egy domború meniszkusz alakul ki. Három jelentősen különböző átmérőjű poharat vízzel telítünk és fecskendővel, illetve egy edényt bocsátunk a diákok rendelkezésére. A feladat: „Három pohárban égő *Phlegeton* vize bugyog. Bár a poharak tele vannak, fecskendővel nektek kell lehútenetek, addig töltve hideg vizet a pohárba, amíg túl nem csordul a víz a poharak peremén. Mérjétek meg a három pohár esetében a legkisebbtől a legnagyobb felé haladva, hogy hány ml víz be-

fecskendezésével nem csordul még ki a víz a pohárból!” (3. ábra). Érdemes minél kisebb térfogatú fecskendőt beszerezni, hiszen a kísérlet annál izgalmasabb, ugyanakkor emlékezetesebb is a résztvevők számára, mennél tovább tart a kivitelezése. Mi 1 ml-es fecskendőket használtunk és még így is a csapatok döntő többsége ezt a mennyiséget is soknak tartotta: vagy nagyon lassan nyomta ki a vizet, vagy csak félig szívtak bele vizet. Mivel a mérés során a túlcordulás több feltételhez köthető, ezért egy intervallummal feleltethető meg adott átmérőjű pohár mérési eredménye. Ilyen intervallumoknak feleltettünk meg számokat és a megfeleltetés eredményeként kapták a diákok a háromjegyű kódot. Ajánlott legalább hat intervallumot megadni és ezek közt legyenek olyan kis értékek is, amelyre a diákok is számítanak. Az általunk használt poharak esetében a méret növekvő sorrendjében 3–5 ml, 9–11 ml, illetve 13–15 ml értékeket mértünk.

A helyes megfejtés segítségével a borítékban újabb feladatot kapnak, de fontosnak tartottam, hogy előtte magyarázzuk meg az észlelt jelenséget, így rövid tudományos leírását találják a domború meniszkusz kialakulásának.

A továbbiakban a légköri nyomás kimutatása volt a cél: „A következő kísérletben használjátok az előbb használt vizespoharat, a gyufát és a lufit. Emeljétek meg utóbbi két tárgy segítségével a poharat, anélkül, hogy kézzel hozzáérnétek!” A kísérlet elvégzése után a diákoknak két kérdésre kellett válaszolniuk: miért sikerül felemelni a poharat, illetve hogy miként változik a nyomás a pohárban (4. ábra). Ezek után a háromjegyű kódot a következőképpen kapták meg: a lufira felrajzolt három tárgy (termosz, villanykörte, Hold) belsejében, illetve a felszínén jellemző nyomást kellett megkeresniük interneten és a nyomás csökkenő sorrendjében leírni a tárgyak mellé írt számjegyeket.

Így juthattak el a harmadik kísérlethez: „Használjátok a 2 literes pillepalackot. Lyukasszátok ki 5, 10, 15 cm magasságban és mérjétek meg, ha megtöltitek vízzel, milyen távol ér földet a vízszugár a palack szélétől. Milliméterpapíron ábrázoljátok a lyuk feletti vízoszlop magasságát a távolság függvényében.” A kódot a parabola szó egyes betűinek megfeleltetett számokkal kapták a diákok az 1. táblázat szerint.

3. ábra. A felületi feszültség tanulmányozása három pohár víz segítségével.





4. ábra. A pohár felemelése másodszor már sikeres volt, bár első próbálkozásra a gyufa égése miatt a lufi szétrobbant.

Az utolsó kísérlet ismét a felületi feszültegről szólt, ahol egy szabályos tetraéder alakú drótkeretet szappanoldatba mártva figyelhették meg a kialakuló szappanhártyát. Itt a kód egyetlen számjegyből állt, amely a következő kérdésre adott válaszukból származott: „Hány különálló síkfelülete van a szappanhártyának?” A helyes válasz eredményeként első alkalommal a csapatok közösen kinyithatták a dobozt, amelyben a Torricelli-kísérlet vizes változatához szükséges eszközök voltak bezárva és közösen, tanári irányítással végezhettek el a mindenki számára tanulságos kísérletet.

## Kiértékelés, tapasztalatok

A fenti feladatsort három különböző alkalommal és diákcsoporttal próbáltuk ki. Az Apáczai-líceum *Iskola másként* hetén 24 diákkal, majd az EmpirX Egyesület sztárnai tehetséggondozó táborában 20 diákkal, végül a *Mindennapok Fizikája* országos vetélkedőhöz kapcsolódó foglalkozásként 2018 áprilisában, amikor 7 csapatban 41 diák vett részt. A második alkalommal a feladatsorban kisebb módosításként a második kísérlet ki lett cserélve és helyette különböző zöldségek és gyümölcsök vízben való elsüllyedését, vagy úszását tanulmányozták a diákok. A harmadik alkalommal a résztvevők elsősorban a vetélkedőn résztvevő diákok voltak, de bejelentkezettek Kolozs megye iskoláiból olyan diákok is, akik nem vettek részt a vetélkedőn. A borítékok helyett már számozás lakatokat használtam, a kulccsal belülről bezárt tanteremben pedig egyidejűleg csak egy csapat játszott. Ezúttal nem volt életkori korlátozás: a 7 csapatból egy hatodikos, három nyolcadikos, két tizedikes és egy tizenegyedikes csapat vett részt. Ennek ellenére egy csapat kivételével mindenkinek sikerült a 45 perces határidőn belül kiszabadulnia. A kivétel egy tizedikesekből álló diákcsoport volt. Az ő esetükben a sikertelenség fő oka a gyenge együttműködés és a nagyon komótos munkatempó volt.

A feladatsorok elvégzése után elsősorban arra voltam kíváncsi, hogy melyik volt a legmeglepőbb kísérlet számukra (többet is megjelölhettek). A válaszadó 53 diák 72%-a számára a hárompoharas kísérlet, míg 57%-nak a szappanhártya a tetraéderen jelentette a

1. táblázat

### A szabadulósobák egyik kedvelt kódolási eszköze: a betűk megfeleltetése számokkal

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
K	L	M	N	O	P	Q	R	S	T
11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
U	V	W	X	Y	Z				
21	22	23	24	25	26				

legnagyobb meglepetést. Ugyanakkor öt rövid kérdéssel mértem fel, milyen mértékben értették meg a tanulmányozott jelenségeket:

1. kérdés (1K): Melyik kísérlet(ek) szemlélteti(k) a felületi feszültséget?

2. kérdés (2K): Melyik kísérlet mutatja be a légköri nyomást?

3. kérdés (3K): Melyik kísérlet során észleltetek izobár folyamatot?

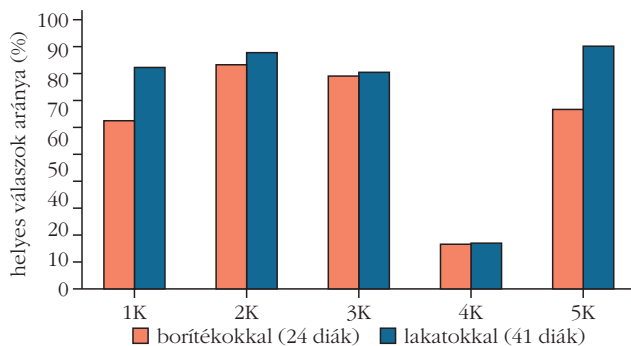
4. kérdés (4K): Ki tanulmányozta a felületi feszültség hőmérsékletfüggését?

5. kérdés (5K): Mi az oka a szappanhártyák gömb-szerű alakjának?

A kérdésekre a választ négy megadott lehetőség közül kellett kiválasztani (először a kahoot mobilos alkalmazás segítségével, másodszor papíron kitöltve). A kérdésekkel nemcsak a kísérletben meg tapasztaltak megértését próbáltam ellenőrizni, hanem azt is, hogy a feladatokhoz kapcsolódó leíró szövegeket milyen mértékben dolgozták fel a diákok, vagy esetleg csak átsiklottak azok fölött. Ezt célozta meg a 4. kérdés, hiszen a hárompoharas kísérlet után részletes leírást kaptak a felületi feszültség jelenségének magyarázatáról, de azt is megtudhatták, hogy *Eötvös Loránd* írta le elsőként a felületi feszültség hőmérsékletfüggését. A kérdőívet első alkalommal 24 diák, másodszor pedig 41-en töltötték ki.

Az 5. ábra mutatja az öt kérdésre adott helyes válaszok statisztikáját, amelyen látható, hogy mindkét esetben – egy kérdés kivételével – nagyon magas, 60–90% közötti, volt a helyes válaszok aránya. Figyelembe véve, hogy a témakör minden diák számára új volt és a 45 perc alatt nagyon sok új fogalommal, fizikai jelenséggel találkoztak, ugyanakkor egy szabadidős tevékenységben vettek részt, amelynek nem volt iskolai értékelése, a válaszok sikeraránya nagyon jónak tekinthető. Feltűnő a 4. kérdésre adott helyes válaszok alacsony aránya, amely csak az elolvasottak memorizálását feltételezte.

A tanulás hatékonyságát igazán az tükrözi, hogy hosszú távon mi marad meg a diákokban. Ennek felméréseért az első tevékenységben részt vett 24 közül 22 diákkal egy évvel később ugyanazt a kérdéssort töltöttem ki, amelyet közvetlenül a szabadulás végén is kitöltöttek. Az eredményeket a 6. ábra szemlélteti. Meglepő módon egy év múlva is jól emlékeztek az elvégzett kísérletekre, nagyon rövid, pár perces felve-



5. ábra. A szabadulósobás játékok két változatának összehasonlítása.

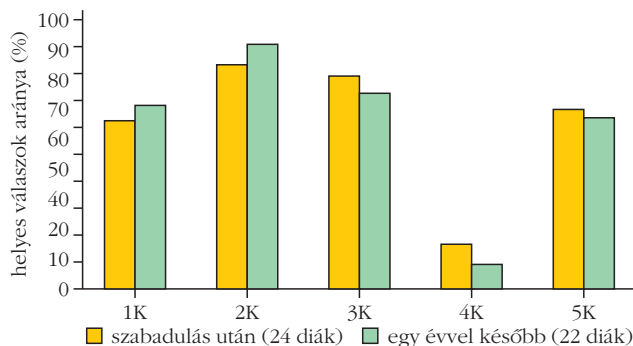
zetés után el lehetett kezdeni a teszt kitöltését, és a helyes válaszok aránya nemcsak hasonló volt, hanem az első két kérdésre még többen adtak helyes választ, mint közvetlenül a tevékenység után. Ehhez az is hozzájárulhatott, hogy a teszt első kitöltése után megszélesítettük, hogy miből adódtak a hibás válaszok. Az év folyamán a későbbiekben már nem foglalkoztunk a folyadékok mechanikájával, így igazán öröndetes, hogy a megszerzett tudás tartósnak mondható.

A szabadulósobás tevékenység a diákok számára újszerű volt és a 2018-as *Iskola másként* hét megtervezésekor iskolánk diáksága körében végzett felmérés eredményeként 176 megkérdezett tanulónk közül 35-en igényelték, hogy szervezzünk ismét fizikus szabadulósobát. Vagyis többen, mint ahányan előző évben részt vehettek. Ezen kérdésnek eleget téve ezúttal is megszerveztük, amely ismét a folyadékok fizikájának témakörét járta körbe, de – mivel részben ugyanazon diákok vettek részt – egészen új feladatsorral. Ezúttal megismerkedtek *Bernoulli* törvényével, azon egyszerű kísérlet által, hogy az asztallapon levő pénzérmét fújással kellett a mellette levő tányérba átemelni, illetve Cartesius-búvárt készítettek egy fél literes műanyag palackban, majd a NASA Csendes-óceáni szigetek felett készült felvételei alapján elemezheték a Kármán-féle örvénysort, végül Heron-kutat kellett készíteniük a rendelkezésükre álló eszközök segítségével. Az örvénysor két légfelfelé kellett elemezniük, amelyen a szigetek közötti távolságot a Googlemaps alkalmazás segítségével le tudtak mérni, így a felvételeken elemezheték az örvénysor teljes hosszát, illetve két csomósodás közötti távolságot. Ez által rádöbbenhettek e jelenség nagyságrendjére, amely a több száz kilométert is elérheti.

## Következtetések

A diákok rendelkeznek a folyadékok mechanikájának alapvető ismereteivel, ezeket alkalmazni tudták a kísérletek elvégzésénél (például a pohár felemelése a lufi segítségével), és a témakört érdekesnek, alaposabb tanulmányozásra is érdemesnek tartották.

Igazolódott, hogy a tanulás sokkal hatékonyabb aktív tanulási stratégiák felhasználásával, ezek egyike lehet a szabadulósobás foglalkozás. A tevékenység alkalmas volt új jelenségek bevezetésére, fenomeno-



6. ábra. A szabadulósoba által tanultak hatékonysága egy évvel később.

logikus tárgyalására, de az elmélyültebb megértéshez több időre van szükség, amelyre sajnos jelenleg nincs tantervi időkeret. A szabadulósobás tevékenységek által olyan képességek fejleszthetők, mint a komplex problémamegoldó, illetve kommunikációs (szociális) készség, amelyeket a Világgazdasági Fórum 2016-os jelentése kiemelt fontosságúnak ítélt meg a jövő munkavállalói számára [16].

Ugyanakkor el kell mondani, hogy egy ilyen szabadulósobás tevékenység nagyon időigényes, mind az előkészítése, mind a kivitelezése során komoly odafigyelést igényel, hogy sikerélményt okozhasson a résztvevő diákok számára.

## Irodalom

1. M. Csikszentmihályi: *Creativity: Flow and the Psychology of Discovery and Invention*. Harper Perennial, New York (1996) ISBN 0-06-092820-4
2. S. Nicholson: *Peeking behind the locked door: A survey of escape room facilities*. (2015) White Paper available at <http://scottnicholson.com/pubs/erfacwhite.pdf>
3. C. Hoellwarth, M. J. Moelter: The implications of a robust curriculum in introductory mechanics. *American Journal of Physics* 79 (2011) 540.
4. L. Greenemeier: "Escape Room" Game Challenges Physics-Phobes to Face Their Fear. *Scientific American* (Feb 2, 2017) <https://www.scientificamerican.com/article/ldquo-escape-room-rdquo-game-challenges-physics-phobes-to-face-their-fear>
5. <https://www.theatlantic.com/education/archive/2016/07/the-rise-of-educational-escape-rooms/493316>
6. [https://index.hu/belfold/2018/01/27/megsem\\_a\\_szarvasi\\_lesz\\_az\\_elso\\_iskolai\\_szabaduloszoba](https://index.hu/belfold/2018/01/27/megsem_a_szarvasi_lesz_az_elso_iskolai_szabaduloszoba)
7. <http://aranyosok.hu/assets/szabaduloszoba.pdf>
8. <https://www.exitheroom.hu/blog/szabaduloszoba-az-iskolaban> (2018. 08. 29)
9. <https://www.breakoutedu.com>
10. <https://www.theescapeclassroom.com>
11. C. Borrego, C. Fernández, I. Blanes, S. Robles: Room Escape at Class: Escape Games Activities to Facilitate the Motivation and Learning in Computer Science. *Journal of Technology and Science Education* 7/2 (2017) 162–171.
12. N. Dietrich: Escape Classroom: The Leblanc Process – An Educational "Escape Game". *J. Chem. Educ.* 95/6 (2018) 996–999.
13. H. N. Eukel, J. E. Frenzel, D. Cernusca: Educational Gaming for Pharmacy Students – Design and Evaluation of a Diabetes-themed Escape Room. *American Journal of Pharmaceutical Education* 81/7 (2017 Sep) 6265.
14. A. Vörös, Zs. Sárközi: Physics escape room as an educational tool. *AIP Conference Proceedings*, 2017, 1916. 050002. 10.1063/1.5017455.
15. S. Nicholson: Creating engaging escape rooms for the classroom. *Childhood Education* 94/1 (2018) 44–49.
16. *The Future of Jobs, Employment, Skills and Workforce Strategy for the Fourth Industrial Revolution*. World Economic Forum, January 2016, pag. 30, [http://www3.weforum.org/docs/WEF\\_Future\\_of\\_Jobs.pdf](http://www3.weforum.org/docs/WEF_Future_of_Jobs.pdf)

# TANULÓK FIZIKÁVAL KAPCSOLATOS TÉVHITEI

## Mégsem mozog a Föld?

Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna  
Fazekas Mihály Általános Iskola, Kiskunhalas  
Horváth Gábor  
ELTE Biológiai Fizika Tanszék

Hazai és nemzetközi neveléstudományi tanulmányokban egyre gyakrabban találkozunk a tévképzet (angol nyelvű irodalomban: *misconception*, *alternative conception*, *preconception*) és gyerek tudomány (*children's science*) fogalmakkal. Oktatókutatók keresik az okát és gyakoriságát annak, hogy a tanulók nézete és jelenségértelmezése eltér-e a természettudományok mai ismereteitől és paradigmáitól. Az ELTE és SZTE [1–3] ilyen témájú kutatásainak eredményeit a tanárképzésben használt tankönyvekből és szakmai folyóiratokból megismerve, saját kutatást végeztünk. Kiválasztottuk a fizikával kapcsolatos azon tévképzeteket, amelyeket e publikációk leggyakrabban említettek, majd kiegészítettük a saját tapasztalataink szerint elterjedtnek tűnő tévhitekkel. Egyszerű feleletválasztásos kérdésekkel feltártuk 25 tévhit gyakoriságát és fizikus szemmel megvizsgáltuk – az esetleges közös eredetüket keresve – hátterüket.

Cikkünkben – *Korom Erzsébet* meghatározását használva – tévhit alatt a következőt értjük [1]: „A tévképzetek (*misconceptions*) a gyerekek vagy akár felnőttek tudásába tartósan beépülő hibás elképzelések, a jelenleg elfogadott tudományos nézetekkel össze nem egyeztethető fogalmak, fogalomrendszerek, a környezet egyes jelenségeiről alkotott modellek, amelyek mélyen gyökereznek, és a tanításnak is ellenállnak.” Hogy az általunk vizsgált 25 fizikai tévképzet/tévedés közül melyek nevezhetők e definíció alapján tévhitnek, arra pedagógiai megközelítésben is – gya-

koriságukat és tartósságukat vizsgálva – választ kerestünk. A vizsgált tesztkérdésekre adott helytelen válaszok életkor, régió és matematikaosztályzatok szerinti eloszlását és változásait sajátosságait egy másik cikkben elemeztük [4]. Jelen írásunkban a fizika tudománya szempontjából vizsgáljuk őket. E megközelítésből mindegyiket tévhitnek tartjuk, mert alapvetően eltérnek a jelenleg elfogadott tudományos magyarázattól.

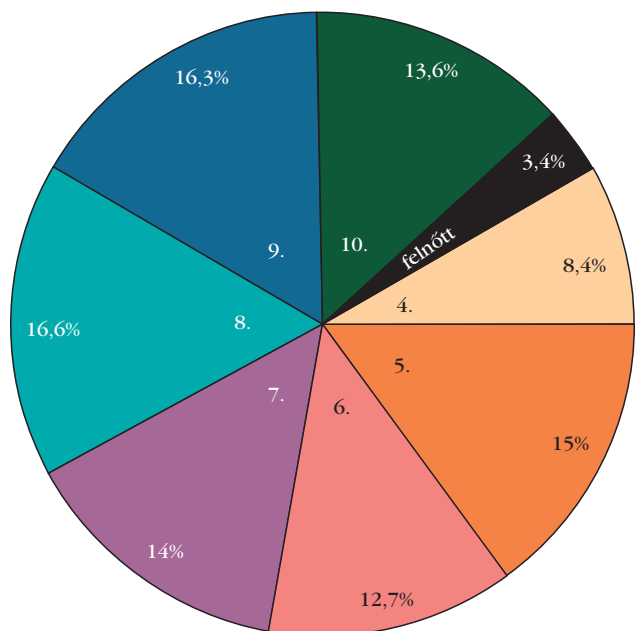
### A megkérdezettek köre

2167 személytől gyűjtöttünk válaszokat és elemeztük azokat: 2093 4–10. osztályos tanulótól és 74 felnőttől (pedagógustól vagy érettségi utáni szakképzésben résztvevőtől). A tanulók közül 234 határon túli (Erdély, Vajdaság, Felvidék) magyar diák volt, a többiek pedig itthoniak. A megkérdezettek koreloszlását az 1. ábra mutatja.

### Adatfelvétel

2017 szeptemberében és novemberében Google Drive űrlapon helyeztük el a 25 kérdést. Ezekből 16-ot *Radnóti Katalin* és *Nabalka István* (2002) könyve [2], valamint *Csapó Benő* és munkatársai [3] tanulmá-

1. ábra. A 2167 válaszadó százalékos koreloszlása, ahol a kördiagram közepéhez közeli számok a diákok osztályának sorszámai.



Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna mesterpedagógus, a Kiskunhalasi Fazekas Mihály Általános Iskola matematika-fizika szakos tanára és igazgatója. A hatásos tanulási-tanítási eljárások alkalmazása mellett azok fejlesztésével és kutatásával is foglalkozik. A tudástérképek tanulás- és gondolkodásfejlesztő módszeréről könyvet és folyóiratcikket írt. Tapasztalatait pedagógus szakvizsgát adó képzésben a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem oktatójaként is továbbadja.



Horváth Gábor fizikus, az MTA doktora, egyetemi tanár, az ELTE Biológiai Fizika Tanszék Környezetoptika Laboratóriumának vezetője. A vizuális környezet optikai sajátosságait és az állatok látását tanulmányozza, továbbá biomechanikai kutatásokat folytat. Számos szakmai díj és kitüntetés tulajdonosa. Évtizedek óta aktív tudományos ismeretterjesztői munkát is folytat előadások és cikkek formájában.

nya alapján fogalmaztunk meg, 3-at a mértékegységekkel kapcsolatos tudás feltárására, 5 kérdés pedig a fizika tantervi követelményekhez kevésbé, a hétköznapi fizikai jelenségek értelmezéséhez viszont jobban kapcsolódott. A tesztválaszok összegyűjtésében fizikaszakos pedagógusok és intézményvezetők segítettek. A tesztkitöltés ellenőrzött körülmények között történt.

## Tesztkérdések és válaszaik elemzése

Vizsgálatunkban 25 tévhit, vagy más jellemző hiba előfordulásának gyakoriságát számszerűsítettük. Alább felsoroljuk e kérdéseket és a rájuk adható válaszokat, az utóbbiak végén zárójelben megadva, hogy a megkérdezett 2167 személy hány százaléka választotta őket. A válaszok előtti – jel a helytelenségre utal, a + jel pedig a helyességet jelzi. Minden tesztkérdést fizikai elemzés követ.

### 1. A testek ..., ha erő hat rájuk.

- csak akkor mozognak (35,9%)
- + mozgásállapota csak akkor változik (29,1%)
- mindkét állítás igaz (35,1%)

A megkérdezettek több, mint kétharmada (70,9%) nem ismerte (mert közel a fele még nem tanulta), vagy nem tudta alkalmazni *Newton* I. törvényét. Ők még mindig *Arisztotelész* logikáját vallják, ami szerint a mozgás fenntartásához erő kell. Nem a newtoni mechanika szerinti „mozgásállapota csak akkor változik” kiegészítést tették, hanem azt, hogy „csak akkor mozognak”. Pedig az erő fogalmát a mozgásállapot megváltoztatását okozó hatásból alakítjuk ki, sőt, *Newton* tehetetlenségről szóló törvénye már az általános iskolában is tananyag. A diákoknak nincs tapasztalatuk arról, mi történik, ha a testekre nem hat erő. Egy test hatásmentes állapotban mozogni csak a világűrben tudnának megfigyelni, de ekkor meg felvetődne a viszonyítási rendszer problémája: mihez képest mozog a test?

### 2. Az egyforma méretű és alakú testek ... esnek le.

- ++ azonos sebességgel (30,5%)
- + közül a nehezebbek gyorsabban (55,8%)
- közül a könnyebbek gyorsabban (13,7%)

A méret, szokás szerint, itt is a lineáris kiterjedésre (például gömb esetén a sugárra) utal, miáltal két egyforma alakú és térfogatú testről (például gömbről) van szó, amelyek sűrűségei egyformák vagy különbözők, de az utóbbiról nincsen információ a kérdésben, mint ahogyan arról sem, hogy levegőben vagy légüres térben történik-e az esés. Ezen információhiány tette lehetővé a diákok fizikai gondolkodóképességének tesztelését: (i) Ha ugyanis levegőbeli esésről van szó (elsőre nyilván mindenki erre gondolhatott, hiszen természetes vákuum csak a Föld légkörén túli űrben lehet), akkor a mindkét test esetén azonos légellenállási és felhajtó erő miatt csak akkor eshetnek azonos sebességgel (+1. válasz), ha

azonos a sűrűségük, vagyis a tömegük/súlyuk, (ii) máskülönben levegőben a nehezebb esik gyorsabban (+2. válasz), mert a lefelé ható súly és a fölfelé ható légellenállási és felhajtó erő lefelé ható különbsége nagyobb, mint a könnyebb testnél. (iii) Ha viszont légüres térben történik az esés, akkor a sűrűségüktől (és méretüktől meg alakjuktól) függetlenül mindkét test azonos sebességgel esik (+1. válasz). Tehát, a testek ismeretlen sűrűségétől és a környező közegtől is függ a helyes válasz!

Habár az 1. válasz helyesnek tekinthetőségére két érv (i, iii) is kínálkozott (ezt jelzi a ++), mégis csak a megkérdezettek kevesebb, mint harmada (30,5%) voksolt mellette. A válaszadók nem sokkal több, mint fele (55,8%) a 2. válaszra tippelt, ami mellett csak egy érv szólt (ezt jelzi a +). Őket például a fákról lehulló levelek lassú esésének tapasztalata zavarhatta meg, s nem vették figyelembe, hogy a levelek az alakjuknak köszönhető nagyobb közegellenállási erő miatt esnek lassabban, mint például egy kavics. Hogy a megkérdezettek 13,7%-a miért hitte, hogy a könnyebb testek esnek gyorsabban, azt még csak nem is sejtjük. Bizonyosodott tehát annak fontossága, hogy középiskolában érdemes visszatérni e fizikai kérdéskörre is.

### 3. Összeöntünk 20 °C-os és 50 °C-os vizet. A hőmérsékletük ...

- 70 °C lesz. (23,5%)
- + 20 és 50 °C közt lesz. (58%)
- 35 °C lesz. (18,5%)

A megkérdezettek valamivel kevesebb, mint fele (42%) abban a tévhitben szenvedett, hogy a különböző hőmérsékletű, összeöntött vizek hőmérsékletértéke összeadódik (23,5%) – mint például a hőenergiajuk –, vagy beáll a számtani közepük (18,5%), függetlenül a tömegüktől. 58%-uk viszont helyesen vélte, hogy a közös hőmérsékletük az eredeti kettő között lesz (a tömegarányuktól függően).

### 4. A fénymeg van sebessége?

- + igaz (75,8%)
- nincs, végtelen gyorsan terjed (14,7%)
- nincs, mert nem anyag (9,5%)

A megkérdezettek közel negyede (24,2%) az egyik rossz választ választotta. A 4–6. osztályosok még nem tanultak fizikát, *Ole Christensen Rømer*ről pedig még a 7–8. osztályosok sem tanulnak. Ezért nem meglepő, hogy sokan nem tudták, hogy *Rømer* (1644–1710) dán csillagász 1676-ban elsőként mérte meg a fénysebességet az *Io* Jupiter-hold periódusidejének változása alapján, és *Armand Hippolyte Louis Fizeau* (1819–1896) 1849-ben mérte a fénysebességet híres tükrös-fogaskerekes kísérletében, továbbá, a fény egy részecske-hullám kettős természettel bíró anyag. A 4–8. diákok *Albert Einstein* fotonjáról sem tudhatnak még, s arról sem, hogy a foton kölcsönhatva az atomokkal, molekulákkal, fotoelektronokat kelthet, amely fényelektromos jelenség magyarázatáért Einsteint (1879–1955) fizikai Nobel-díjjal jutalmazták 1921-ben, s mindez a manapság oly elterjedt napelemcellák mű-

ködésének alapját képezi. E kérdésünkkel is a gyermeki naiv elméleteket próbáltuk pedagógiai céllal feltárni.

#### 5. Hogyan képzeled el a testek anyagának szerkezetét?

- folytonos (21,8%)
- + részecskékből áll (78,2%)

Majdnem minden ötödik (21,8%) megkérdezett nem hallott *Demokritosz* (i.e. 470–370 körül) ókori görög filozófus részecskékre épülő anyagfelfogásáról, sem *John Dalton* (1766–1844) modern atomelméletéről, vagy az elektron, proton és neutron – *Joseph John Thomson* (1856–1940), *Ernest Rutherford* (1871–1937) és *James Chadwick* (1891–1974) általi – felfedezéséről. Ezért, amikor majd mindezt tanítjuk, tudnunk kell, hogy e felfedezések ismerete nélkül a diákoknak milyen képzetük van az anyagról.

#### 6. Az energia ...

- keletkezik és felhasználódik. (64,6%)
- + csak átalakul. (35,4%)

A megkérdezettek majdnem kétharmada (64,6%) sajnos nem volt tisztában az energiamegmaradás törvényével. Ők azon naiv hétköznapi tapasztalatuktól vezérelve élhetik mindennapjaikat, hogy a (például hő-, elektromos, atom-) energia valahol keletkezik, onnan fölvehető (megvásárolható), majd különböző célokra (például fűtésre, világításra, közlekedésre) felhasználható. Ezek szerint fogalmi váltást kell elérnünk: a hétköznapi energiafogalom helyére, annak átértelmezésével kell kialakítanunk a fizika által ez alatt a szó alatt értett energiafogalmat. Ez más (talán nehezebb) feladat, mintha semmit se tudna róla a diák.

#### 7. Az oltóanyag a fecskendőbe ... miatt jut be.

- + külső légnyomás (45,4%)
- vákuum szívóhatása (54,6%)

A megkérdezettek valamivel több, mint fele (54,6%) a légnyomás mibenlétének *Evangelista Torricelli* (1608–1647) és kortársai által történt tisztázása előtti világképben élhet még manapság is, amely szerint a vákuum egy saját szívóhatással bíró entitás. Pedig fizikaórán nyilván nekik is tanították a Torricelli-kísérleteket és/vagy a magdeburgi féltékeket, amelyeket több lóval sem lehetett egymástól szétválasztani.

#### 8. A lufi azért emelkedik fel, mert ... a levegőnél.

- könnyebb (38,9%)
- + kisebb sűrűségű (61,1%)

A megkérdezettek valamivel több, mint harmada (38,9%) nem volt tisztában a súly és a tömegsűrűség közti különbséggel. Nekik akkor lett volna igazuk, ha a kérdés azonos térfogatú léggömbgázra és levegőre vonatkozott volna. Persze a kérdésben implicit módon benne rejtett az, hogy a léggömbbéli gáz sűrűsége a külső levegőnél egy kritikus értéket meghaladóan kisebb, különben nem emelkedhetne föl a levegőben.

#### 9. Minek van nagyobb belső energiája?

- + 1 kg 0 °C-os víznek vagy (37,9%)
- 1 kg 0 °C-os jégnek (62,1%)

A megkérdezettek kicsivel több, mint kétharmada (62,1%) nem volt tisztában azzal, hogy mivel a 0 °C-os jég fölveszi az olvadáshőt és ugyanolyan (0 °C) hőmérsékletű vízzé olvad, ezért a víz belső energiája nagyobb a jégénél. Az olvadáshő ahhoz kell, hogy a jég kristályrácsát a H<sub>2</sub>O-molekulák hőmozgása szétrombolja és a szilárd jég folyékony vízzé olvadjon ugyanazon a hőmérsékleten.

#### 10. Mit mérünk a mérleggel?

- + tömeget (49,2%)
- súlyt (50,8%)

A megkérdezettek közel fele összekeverte a tömeg és a súly fogalmát, annak ellenére, hogy fizika órán nyilván tanították, hogy az utóbbi az előbbi *g*-szerese, ahol hazánkban  $g \approx 9,81 \text{ m/s}^2$ . Pedig a mai digitális mérlegek is grammban jelzik ki a rájuk helyezett tárgyak hatását (tömegét). Radnóti és Nahalka [2] szerint: „nem állíthatjuk, hogy egyértelmű lenne, a gyerekek súlyos vagy anyagmennyiséghez kötött, esetleg már a tehetetlenség tulajdonságát is valamilyen szinten hordozó tömegfogalommal rendelkeznek”. De milyen tömegfogalmat alakíthatunk ki 7. és 8. osztályos gyerekekben? Radnóti és Nahalka [2] négy oldalon keresztül vezetik el az olvasót a gyermekek naiv tömegfogalmáig. A súlyerő fogalmának kialakítása könnyebb feladatnak bizonyul, mert a többi (leggyakrabban a súrlódási és rugó-) erőhöz hasonlóan mérjük. Így könnyebben tudatosul a tanulóban, hogy a tömeg és a súly két, eltérő fogalom. Mivel rugós erőmérőt használunk súlymérésre, ezért az eszköz elnevezése is segíti a súlynak erőként értelmezését. Általános iskolában gyakran 100 g tömegű anyag súlyával szemléltetjük az 1 newton. A fizikát tanító tanárok sem egysegűek a „mérleggel mit mérünk” kérdésben. A Sulinet digitális tudásbázisban ezt találják a diákok: „Ha a mérleg egyik tálcájába elhelyezzük az ismeretlen tömegű mérendő testet, akkor az a súlyával erőt fejt ki a tálcára, illetve a tálcán keresztül a fémrúdra, ami a tengely körül elfordul. Ennek ellensúlyozására a másik tálcára is pontosan akkora ismert tömegű testet kell elhelyezni, hogy az általa kifejtett erőhatás a fémrudat vízszintes helyzetben tartsa. Láthatjuk tehát, hogy a mérleg valójában a testek súlyát hasonlítja össze. Mivel azonban nyugalomban az azonos tömegű testek súlya azonos, a kiegyensúlyozó test ismert tömege azonos a mérendő test ismeretlen tömegével. Ezt a tömegmérési módot sztatikai *tömegmérésnek nevezzük.*” A fizikatanároknak így érdemes a mérleggel való tömegmérésben megegyezniük.

#### 11. El bírnál vinni egy bőröndöt, ha arannyal lenne teli?

- igen (29,7%)
- + nem (70,3%)

E kérdéssel is a sűrűség, tömeg és súly fogalmakban való eligazodást, a becslés és következtetés ké-

pességét mértük. Mivel  $1 \text{ dm}^3$  arany 19,3 kg, ezért még a kézipoggyászként feladható kis bőrönd is 1,5 mázsánál nehezebb lenne. A magukat elég erősnek tartó fiúk „igen” válaszát sem fogadtuk el jónak, hiszen nem egyszerűen megemelni, hanem vinni kelle-e meglehetősen súlyos arany mennyiséget.

12. *A gázoknak nincs súlyuk, így a levegőnek se.*

- igaz (44,7%)
- + hamis (55,3%)

Abból a mindennapos tapasztalatból, hogy a levegő nyomását (ránk nehezedő súlyát) nem érezzük és a hétköznapi gázok általában fölfelé szállnak, a megkérdezettek majdnem fele (44,7%) azt hitte, hogy a gázok a levegővel együtt súlytalanok. Ők még nem tanulhatták (7. osztály alatti évfolyamok) vagy elfelejtették Torricelli víz- és higanyoszlopos, légszivattyús kísérleteit. Az e kérdésre adott válaszokban az lesz az izgalmas, amikor majd az évfolyamonkénti különbségeket vizsgáljuk, a fogalom változásának ütemét. Ilyen pedagógiai elemzéseket egy másik cikkben végeztünk [4].

13. *Abol nincs levegő, ott súlytalanság lép fel.*

- igaz (60,5%)
- + hamis (39,5%)

A súlytalanság fogalmával zömében a földi légkörön túli űrben játszódó tudományos-fantasztikus filmekben vagy a tudományos ismeretterjesztő tv-csatornákon találkozhatunk. Ezért gondolhatta a megkérdezettek 60,5%-a, hogy a súlytalanság előfeltétele a légnélküliség. Ők nem hallhattak arról, hogy a földi légszivattyúk vákuumhoz közeli terében soha sincsen súlytalansághoz közeli állapot. Arról sem értesülhettek, hogy például a 146 m magas brémai ejtőtorony (*Fallturm*) légritka függőleges csatornájában majdnem szabadon eső kísérleti kapszulában közel 9 másodpercig vagy a parabolikus pályán szinte szabadon zuhanó repülőgépekben néhány percig is súlytalansághoz közeli állapot uralkodik, amit tudományos kísérletekben, fantasztikus filmek jeleneteinek forgatásakor vagy pilóták/űrhajósok kiképzésében használnak.

14. *A földet a káros kozmikus sugaraktól az ózonréteg védi meg.*

- igaz (86,1%)
- + hamis (13,9%)

A megkérdezettek túlnyomó többsége (86,1%) ösztetevésztette a korpuszkuális kozmikus sugárzást a Nap ultraibolya sugárzásával, aminek kisebb hullámhosszúságú összetevőjét (UV-C-t és UV-B zömét) a földi légkör ózonrétege elnyeli, miáltal védi a Föld felszínén elő, erre érzékeny szervezeteket. Pedig fizika- és földrajzórán hallhattak az elektromos töltéssel bíró és az elektromosan semleges, kozmikus eredetű részecskékről, valamint a hasonló összetételű napszélről, kémiaórán pedig az ózon fotonelnyelés hatására bekövetkező bomlásáról is. Ugyancsak fizika- és/vagy földrajzórán találkozhattak a földi

mágneses térrel és annak a töltött részecskéket eltérítő, sarkok felé terelő hatásáról, amit a Lorentz-erő okoz. Ugyanezen órák valamelyikén netán a Föld van Allen-féle sugárzási öveiről is értesülhettek már, amelyek a sarkkörök fölött közel 1000 km magasságban bekövetkező mágneses tükrözés miatt csapdába ejtik a kozmikus sugárzás töltött részecskéit. Végül, az északi és déli sarki fényről (*Aurora borealis*, *A. australis*) is hallhattak már, ami ugyancsak szoros kapcsolatban áll a kozmikus sugárzástól védő földi magnetoszféra szerkezetével. Mindezzel a megkérdezettek sajnos csak 13,9%-a lehetett többé-kevésbé tisztában.

15. *Ha 5 °C-os kinti hőmérsékletben kinyitjuk a 20 °C-ra fűtött épület ajtaját, akkor 25 °C-ra is változhat bent a levegő.*

- igaz (20%)
- + hamis (80%)

Minden 5. megkérdezett (20%) abban a tévhitben szenvedett, hogy a léghőmérséklet egy additív mennyiség, s így az épületbe áramló kinti levegő hőmérséklete hozzáadódhat a bentiehez. Arra nem gondoltak, hogy ha ez így lenne, akkor egyszerű szellőztetéssel is fűteni lehetne a lakásokat. Sőt, a kinti levegő beltérbe való szivattyúzásával korlátlan hőforráshoz juthatna az emberiség, ami megoldhatná a Föld égető energiagondjainak zömét.

16. *Az elektromos áram egy anyag, ami a vezetékben folyik.*

- igaz (35,5%)
- + hamis (64,5%)

A megkérdezettek közel harmada (35,5%) még az elektromosság elektronokban és/vagy ionokban testet öltő korpuszkuális mibenlétének fölfedezése előtti kor (Joseph John Thomson, 1906: fizikai Nobel-díj részben az elektron felfedezéséért) azon hitében volt, hogy az elektromos áram valamilyen folytonos folyadék-szerű anyag, pedig úgy a fizika-, mint a kémiaórán sűrűn találkozik a diák az elektronokkal és különféle ionokkal. E fölfogás hasonlít *Joseph Black* (1728–1799) hőanyagához (calorikum), aminek létét 1798-ban *Benjamin Thompson*, alias gróf Rumford (1753–1814) cáfolt híres ágyúcsőfűrási kísérletével.

17. *A Nap a Föld körül kering.*

- igaz (24,2%)
- + hamis (75,8%)

Az e tesztkérdésre adott 24,2%-os, meglepő „igaz” válasz inspirálta cikkünk alcímét: Mégsem mozog a Föld? Nagyon elkeserítőnek tartjuk, hogy *Kopernikus*, *Galilei* és *Kepler* tanainak már általános iskolai tanítása ellenére is a megkérdezettek majdnem negyede még mindig azt hiszi, hogy a Föld körül kering a Nap (és nem fordítva). Még sajnálatosabb, hogy ez a hibaarány még a felnőttek körében is magas, 18,9% volt! Ezek szerint hiába hallanak a diákok ennek ellenkezőjéről a fizika- és földrajzórán, vagy néznek (?) csillagászati ismeretterjesztő filme-



ket a tudományos televízió-csatornákon, vagy láthatnak tudományos-fantasztikus szórakoztató mozifilmeket, az ott hallottak és látottak nem hatnak rájuk, nem rögzülnek memóriájukban, és a napkorong mindennap tapasztalható égi körívpályájának naiv, arisztotelészi értelmezése kerekedik felül kozmikus világnézetükben. E durva hiba okaként meggyőződésünk szerint bizonyosan nem a tankönyvek vagy a tanárok kárhoztathatók, sokkal inkább a szóban forgó diákok tájékozatlansága, érdektelensége. Szegény Galileo Galilei [5] és *Jókai Mór* [6] forogna sírjában, ha megtudná, hogy jónéhány diák szerint mégsem mozog a Föld...

18. A kő azért süllyed el a tóban, mert nehezebb a tó vizénél.

- igaz (65,3%)
- + hamis (34,7%)

A megkérdezettek majdnem kétharmada (65,3%) összekeverte a tömegsűrűség fogalmát a tömegével/súlyával. Radnóti és Nahalka [2] említi Arisztotelész tanítását a könnyű és nehéz dolgok felfelé és lefelé „törekvéséről”, amihez hasonlót a gyerekek is konstruálnak. A 18. állítás csak azon feltétellel lenne igaznak tartható, ha közel azonos térfogatú kőről és vízről lenne szó, amikor is az előbbi nehezebb, ezért az süllyed el. De a feltett kérdésből e feltétel egyáltalán nem következik. A kérdés egy átlagos kő (amit kézzel fölemelve bedobhatunk a tóba) és egy normál tó (ami minimum több  $m^3$  térfogatú) összes vízmennyiségének súlyára utal, amelyek közül az utóbbi a nagyobb. E gondolatmenet már szerepelt a 8. léggömbös kérdésnél. Pedagógiai szempontból fontos, hogy ha a diák a kérdésben látja a sűrűség szót, akkor kevesebbet hibázik. Tehát a felismerés szintjén bírja a fogalmat, csak felidézni nem tudja a gyakorlati alkalmazásokhoz.

19. Melyik a nagyobb mértékegység?

- $kg/m^3$  (55,7%)
- +  $g/cm^3$  (19,3%)
- azonosak (24,9%)

Ezek szerint a megkérdezettek zöme (80,6%) problémával küzdött a mértékegységek átváltásakor, és kicsivel több, mint a fele (55,7%) azt gondolta, hogy a  $kg/m^3$  nagyobb, mint a  $g/cm^3$ , valószínűleg azért, mert a kg ezerszer nagyobb a grammnál.

20. Melyik test gyorsabb?

- az 1 km/h vagy (37,2%)
- + az 1 m/s sebességű (46,6%)
- azonosak (16,2%)

Kicsivel több, mint a megkérdezettek felének (53,4%) gondolai voltak e mértékegységek egymásba történő átváltásával is, és nem sokkal több, mint harmaduk (37,2%) azt hitte, hogy a km/h-ban megadott sebesség nagyobb, mint a m/s-ban megadott, vélhetően azért, mert a km ezerszer hosszabb a m-nél. E mértékegységek ismertebbek, mint a sűrűségé, ezért kisebb e kérdés hibaráta, mint a 19. kérdésé.

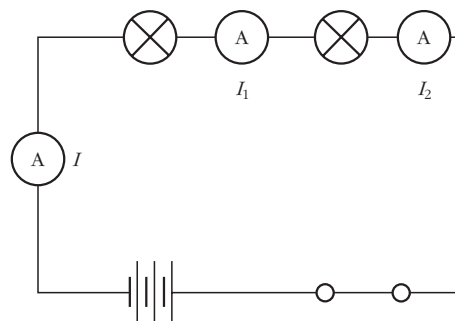
21. Lehet-e kölcsönhatás az elektromos töltéssel rendelkező és a semleges testek között?

- + igen, vonzás (35,5%)
- nem (42,8%)
- igen, taszítás (21,7%)

Az iskolában az elektromos megosztás (polarizáció) miatti vonzást tanulják a diákok, amit egyszerű kísérlettel szokás szemléltetni: például egy szigetelő ronggyal megdörzsölt műanyagvonalzó töltést kap, ami vonzza például egy elektromosan szigetelő, töltés nélküli (semleges) papírfecnit vagy egy elektromosan vezető, semleges alufólia-darabkát. E kérdés erre vonatkozott. Aki a testek közti vonzó gravitációra gondolt, annak is az 1. válaszra kellett tippelnie, helyesen. A tájékozottabbak gondolhattak volna az atommagokbeli elektromos töltésű protonok és elektromosan semleges neutronok között ható erős kölcsönhatás vonzására is. Nekik is az 1. választ kellett volna választaniuk. De a kérdés nem elemi részecskékre, hanem makroszkopikus testekre utalt. Ugyanezért nem gondoltuk, hogy a diákokat megzavarhatná az iskolában nem is tanított gyenge kölcsönhatás, amiben elektromos töltésű elektronok, valamint  $W^+$  és  $W^-$  bozonok, továbbá elektromosan semleges neutrínók és Z-bozonok vesznek részt, amelyek között szintén felléphetnek vonzó és taszító erők is.

22. Sorba kapcsoltunk két fogyasztót. Több ponton mértük az áramerősséget. Mi a véleményed, mennyit mutattak egymáshoz képest?

- az  $I_1$  a legnagyobb (24,5%)
- + mindhárom érték ugyanakkora (38,7%)
- az  $I_1$  a legnagyobb (36,8%)



2. ábra. A 22. kérdéshez tartozó kapcsolás.

A megkérdezetteknek csak valamivel több, mint harmada (38,7%) tudta, hogy soros kapcsolású elektromos áramkör minden pontjában azonos az áramerősség. Közel negyede (24,5%) azt hihette, hogy a fogyasztókon (lámpákon) áthaladó – pontosabban, azokból kilépő – áramerősségek valamiképpen összegződnek (mint például párhuzamos kapcsoláskor a feszültségek), 36,8%-uk pedig számunkra ismeretlen okból vélte a két fogyasztó közti szakaszban folyó áramot maximálisnak.

23. Milyen irányban örvénylik a lefolyóban a víz?

- Az északi féltekén az óramutató járásával megegyező irányban. (27,1%)

- Az északi és déli féltekén ellentétes irányban a Coriolis-erő miatt. (36,7%)
- + A lefolyó vizének forgásirányát más hatások, véletlenszerűen alakítják. (36,2%)

Habár a forgó rendszerekben fellépő Coriolis-féle tehetetlenségi erő nem iskolai fizikatananyag, földrajzórán hallanak róla a diákok, mikor például a ciklonok/anticiklonok északi és déli féltekei ellentétes forgásirányáról tanulnak. A diákok gyakran hallhatnak róla a tudományos ismeretterjesztő tv-csatornákon és néha a szórakoztató mozifilmekben is. Utóbbira egy példa a *Szupercella* című amerikai akciófilm (2013, angolul: *Escape plan*, rendező: Mikael Häfström, főszereplők: Arnold Schwarzenegger, Sylvester Stallone), amiben egy börtönhajó földrajzi szélességét a Sarkcsillag horizont fölötti szögmagassága és a mosdókagylóban lefolyó víz örvényiránya alapján határozzák meg. E filmben a diákok azon közkeletű tévhittel szembesülnek, miszerint a mosdókagylóból lefolyó víz örvényiránya attól függ, hogy az északi vagy déli féltekén vagyunk-e. Korábban mi is vizsgáltuk e tévhitet a mostaninál sokkal kisebb, csak 9 fős diákcsapaton [7]. Jelenlegi, 2167 fős felmérésünkben azt kaptuk, hogy a megkérdezetteknek csak közel harmada (36,2%) találta el a helyes választ. Ezen alacsony találati arányért szerintünk zömében a szórakoztató médiumok felelősek, amelyekben a mozifilmeken túl a világhálón elérhető, turisztikai attrakciókról szóló bemutatók is láthatók. Ezek közé tartozik például az ecuadori Egyenlítő mentén turistáknak tartott, szélhámosnak nevezhető „demonstrációs kísérlet” (<https://www.youtube.com/watch?v=MyZ-WNwjZV0>), amelyben az Egyenlítőtől 3 méterre északra lévő helyről átmenve az Egyenlítőtől 3 méterre elhelyezkedő délre, megfordul a mosdókagylóban lefolyó vízörvény forgásiránya. Számításokkal kiderül, hogy például egy vízmolekula az Egyenlítőtől észak/délre 3 méterre lévő, 20 cm sugarú mosdókagylóban 1 m/s sebességű lefolyásakor jobbra/balra a molekulából O- és H-atomok távolságának csak 1,4%-ával tér el a Coriolis-erő hatására, ami elhanyagolhatóan parányi a vízörvény forgásirányát meghatározó más, sokkal nagyobb erőhatásokhoz képest [7]. A Coriolis-erő hatása a Földön csak olyan nagy rendszerekben érzékelhető, mint például a hosszútávú szelek (például ciklonok, anticiklonok, passzát-szelek) és tengeráramlások [8, 9].

#### 24. Miért nem célszerű déli napsütésben a növényeket locsolni?

- + Mert a nagy melegben gyorsan elpárolog a kilocsolt víz, ami csökkenti a víz hasznosulását. (39,5%)
- Mert a növényeken megtapadó vízcseppek nagytölcseként összegyűjtik a napfényt, ami kiegészíti a leveleket. (46%)
- A hideg víz fagyáshoz hasonló sérüléseket okoz a melegben fölhevült növényeken. (14,5%)

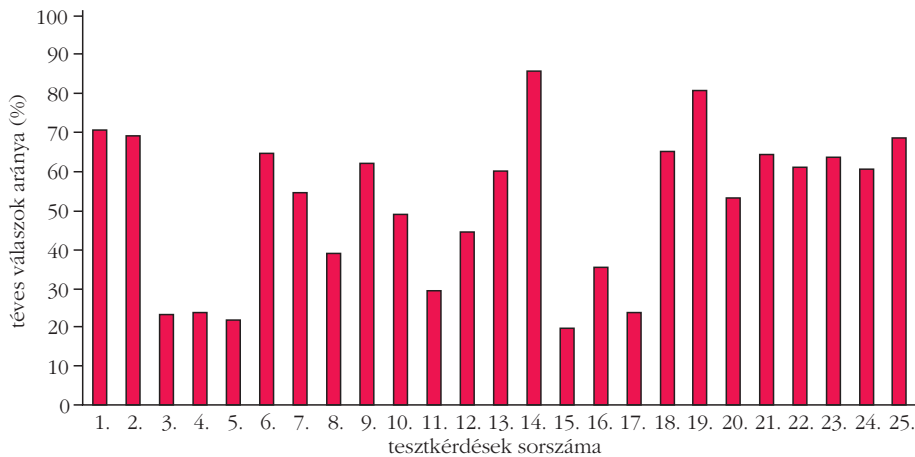
A helyes választ a megkérdezetteknek csak valamivel több, mint harmada (39,5%) találta el, 46%-uk egy

elterjedt tévhit alapján döntött, a többiek pedig egy meglehetősen fizikaiatlan magyarázat mellett voksoltak. A szóban forgó biooptikai tévhit olyannyira beivódott a köztudatba, hogy még a fizikaoktatási kánon részét is képezi, amennyiben a 2006. május 15-i gimnáziumi fizika érettségi feladatsor egyik feladata volt, továbbá az *Egységes érettségi fizika feladatgyűjtemény* 2152. feladata is ugyanígy szól [10]. Ezzel szoros kapcsolatban áll két másik közkeletű tévhit is, amelyek szerint (i) a vízcseppekkel borított emberi bőr napozáskor égési sérüléseket szenvedhet, és (ii) az erdőtüzeket vízcseppek is kelthetik azáltal, hogy az elszáradt leveleken maradt esőcseppek napfényfókuszálással meggyújtják azokat. Számítógépes modellezéssel megmutatható, hogy a vízszintes leveleken megülő gömbölyded vízcseppek csak alacsony (13°–23°) napmagasságok mellett képesek az alattuk lévő sima levélfelszínre fókuszálni a napfényt, különben a levél alá vagy fölé esik a fókusz [11]. Besugárzási kísérletekkel viszont kiderült, hogy még ekkor sem keletkezik napégés a leveleken, mert ilyen alacsony napállások mellett ehhez már túl gyenge a napfény [12]. E jelenségkör azonban Janus-arcú, mert ugyancsak kísérletek tisztázták, hogy a megfelelően hosszú víztaszító szőrökkel borított vízszintes leveleken ülő vízcseppek magas napállás esetén képesek égési sérülést okozni a leveleken, ha pont olyan magasságban tartják a cseppeket a szőrök, hogy fókuszuk a levélfelszínre esik [12]. De az ilyen szőrös levelek csak ritkák, így ezen elterjedt vélekedés végül mégis tévhitnek bizonyult. Még várat magára, hogy e tévhitet a kánonból kizorítsa a helyes magyarázat. Ebben segítenek a fizika- [13] és biológiatanároknak [14] e témában írt közérthető tanulmányok is.

#### 25. Miért csúszik jól a korcsolya a jégen?

- Mert olyan keskeny a korcsolya éle, hogy alig hat rá a jég súrlódása. (48,2%)
- A vékony korcsolyaél alatt létrejövő nagy nyomás miatt mindig megolvad a jég, s az így keletkező vízfilmen könnyű a csúszás. (20,5%)
- + A korcsolya éle és a jég közti súrlódási hő megolvasztja a jeget, s az így keletkező vízfilmen könnyű a csúszás. (31,3%)

Hétköznapi, sokakat érdeklő és érintő kérdés ez. Az elterjedt magyarázatok megegyeznek abban, hogy a könnyű csúszás oka a korcsolya éle és a jég közti kicsi súrlódás, ami pedig a korcsolyaél és a jég között kialakuló vízfilm kenő hatásának köszönhető (a víz belső súrlódása kicsi). E vízfilmért gyakran okolják a jég fagyás/olvadáspontjának a nyomás növekedésével való csökkenését. Egyszerű számítással ellenőrizhetjük ennek igaztalanságát [15, 16]: Egy átlagember súlya 700 N, egy korcsolya élhossza 30 cm, élének szélessége pedig 1 mm körüli. Ha egy átlagember egy lábon egyensúlyoz a korcsolyán, akkor az annak élén fellépő nyomás 23 bar, ami közel negyede a 100 barnak, amelynél a jég olvadáspont-csökkenése 0,73 °C. Ezért, ha a jég hőmérséklete –0,73 °C, még ekkor is túl kevés az egylábas korcsolya nyomá-



3. ábra. A 25 tesztkérdésre adott hibás válaszok százaléakai. Ha a két kimeneti lehetőségű 2. kérdésnél az 1. választ tekintjük helyesnek, akkor a hibaráta 69,5%.

sa ahhoz, hogy a jég megolvadjon. Ahhoz, hogy a korcsolyaélen támadó 23 bar nyomás megolvassza a jeget,  $-0,16$  °C-nál nem hidegebb jégen kellene egy lábom korcsolyázni. Márpedig a természetben vagy a műjégpályákon ennél jóval hidegebb jégen szokás és lehet korcsolyázni. Mindezt tehát tévhitnek számít azt gondolni (a megkérdezettek 20,5%-a vélte így), hogy a korcsolya könnyű csúszását biztosító vízhatárért a nyomás miatti olvadáspont-csökkenés a felelős. E vízfilm keletkezéséért a súrlódási hő miatti jégolvadás a ludas, amit a megkérdezetteink 31,3%-a tudott, vagy legalább vélte. A korcsolya élének eleje mindig olyan, friss jégre fut rá, amelyen még nincs vízhatár, miáltal a korcsolya elején nagy a súrlódási hő, ami folyamatosan olvasztja a jeget. Az él hátsó részén így már hat a vízfilm súrlódási erőt csökkentő kenése. A megkérdezettek majdnem fele (48,2%) viszont abban a fizikailag tévhitben szenvedett, miszerint a korcsolya igen vékony éle miatt alig lép fel súrlódás közte és a jég között. Ennél még a nyomás miatti olvadáspont-csökkenésben hívők is több fizikai ismeretről tettek tanúbizonyságot.

## Következtetések

A 14., 23., 24. és 25. kérdésekben foglalt fizikai jelenségek nem tartoznak szorosan az általános és a középiskolai tananyaghoz, mégis véleményt formálnak és mondanak róluk a közbeszédben. E kérdések feltevésével arra is választ kerestünk, hogy a fizika tudományában jelenleg érvényes magyarázatok mennyire közismertek.

A 3. ábra a tesztkérdésekre adott hibás válaszok százalékeit mutatja. A 25 kérdésből 15-ben a megkérdezetteknek több mint fele a fizika tudományával nem összeegyeztethető nézetekkel bírt. Fizikatanárként e tévhit makacs létezésével tehát számolnunk kell. Nem mindegy, hogy egy teljesen új fogalmat kezdünk kialakítani a tanulóknak, vagy esetleg mélyen gyökerező, már meglévő fogalmat kell átértelmeztetnünk, azaz a fogalmi váltásban segítenünk nekik. Egyszerűbb a feladatunk akkor, ha a tudáshiány

okozza a tévhitet, helytelen válaszokat. Ha például a korpuszkuláris kozmikus sugárzással megismerkedik a diák, akkor már nem fogja azonosítani azt az elektromágneses UV-sugárzással.

A kérdésekre adott válaszok értelmezésekor kerülni érdemes azon kérdést, hogy mit tudnak a megkérdezettek. Inkább azt célszerű firtatni, hogy mit hisznek, vallanak, választanak a felkínált válaszok közül. Habár a válaszok megoszlása szerint a megkérdezettek nem véletlenül

választottak (a szórások nagyok voltak: kettős és hármas választásoknál 13–86%, illetve 9–76% volt a hibaráta értéke), e válaszok nem feltétlenül a tudásukat tükrözik. Például a Coriolis-erővel, a vízcseppek általi napéggéssel, vagy a korcsolya alatt keletkező hővel kapcsolatos számítások eredményeit a diákok nem tudják, nem tudhatják, hiszen felsőfokú fizikai tanulmányokat nem végeztek. Mégis határozottan megjelennek a válaszok között a közkeletű tévhit, így nem a véletlen műve a helyes válaszokhoz képesti szignifikánsan nagyobb arányuk. Miben hisznek a 10–15 éves tanulók, sőt, a felnőttek is? Többnyire abban, ami tudományosnak tűnik. Az áltudományok éppen erre építenek.

Komoly kihívásnak számít, hogy évszázadokon át kitartó téves, vagy az uralkodó paradigmáknak ellentmondó, közismert magyarázatok elfogadása helyett diákjaink a fizikaórákon tanultakat alkalmazzák a jelenségek magyarázatához. Ehhez segít, ha feltárjuk tanulóink előzetes tudását és vélekedéseit. Azt reméljük, hogy cikkünkkel ebben segítünk a fizikatanároknak. Legalább azzal, hogy néhány tesztkérdéshez releváns tudománytörténeti kiegészítéseket vagy napjainkban elvégzett mérések eredményeit bemutató tanulmányokat kapcsolunk hozzá, amelyek cáfolnak néhány, a természettudomány szempontjából helytelen vélekedést, tévhitet.

## Irodalom

1. Korom Erzsébet: Az iskolai tudás és a hétköznapi tapasztalat ellentmondásai. In: Csapó Benő (szerk): *Az iskolai tudás*. Osiris Kiadó, Budapest (1998)
2. Radnóti Katalin, Nahalka István: *A fizikatanítás pedagógiája*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2002)
3. Csapó Benő, Korom Erzsébet, Molnár Gyöngyvér: *A természettudományi tudás online diagnosztikus értékelésének tartalmi keretei*. Oktatókutató és Fejlesztő Intézet, Budapest (2015)
4. Nagy-Czirok Lászlóné: Tévkepzetek és fogalmi váltások. – Hogyan változik a tanulók természettudományos világlképe? *Új Pedagógiai Szemle* 2018/3–4 47–72.
4. Arthur Koestler: *Alvajárók*. Európa Könyvkiadó, Budapest (2007) – eredeti címe: *The Sleepwalkers: A History of Man's Changing Vision of the Universe*. Hutchinson & Co. Publishers Ltd., London (1959)
5. Jókai Mór: *És mégis mozog a Föld*. Szépirodalmi Könyvkiadó, Budapest (1984) – eredeti címe: *Eppur si muove*. Pest (1872)

6. Nagy-Czirok Lászlóné Kiszi Magdolna, Horváth Gábor: Coriolis a lefolyóban? Egy elterjedt tévhit iskolai vizsgálata probléma-, élmény- és kutatásalapú módszerrel. *Iskolakultúra* 26/5 (2016) 111–122.
7. Berkes István: *A mindennapok fizikája. Miért unjuk a fizikát?* 9. fejezet: Toinette jól befürdött. 46–47. o. Springer Orvosi Kiadó Kft. (1999) ISBN 963 699 086 7, 284 oldal
8. Tél Tamás: A Coriolis-erő és a modern környezetfizika: a lefolyótól a ciklonokig. *Fizikai Szemle* 56 (2006) 263–267.
9. Medgyes Sándorné: *Egységes érettségi fizika feladatgyűjtemény – Gyakorlófeladatok: Fizika II.* Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest (2011)
10. Egri Ádám, Horváth Gábor, Horváth Ákos, Kriska György: Beégethetik-e napsütésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy tévhitkel terhes biooptikai probléma tisztázása. I. rész: Napfény forgásszimmetrikus vízcseppek általi fókuszálásának számítógépes vizsgálata. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 1–10. + címlap
11. Horváth Gábor, Egri Ádám, Horváth Ákos, Kriska György: Beégethetik-e napsütésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy tévhitkel terhes biooptikai probléma tisztázása. II. rész: Napfény besugárzási kísérletek sima és szőrös leveleken ülő vízcseppekkel. *Fizikai Szemle* 60 (2010) 41–49. + színes borító 3. oldal
12. Egri Ádám, Horváth Gábor, Radnóti Katalin: Beégetik-e napsütésben a leveleket a rájuk tapadt vízcseppek? Egy közismert biooptikai probléma fizikus szemmel. *A Fizika Tanítása* 2013/ március, 3–13.
13. Horváth Gábor, Egri Ádám, Radnóti Katalin: Szabad-e déli napsütésben a növények leveleit öntözni? Egy közismert biooptikai probléma biológus szemmel. *A Biológia Tanítása* 2013/ március, 3–11.
14. Horváth Gábor: Hull a hó és hózik. *Élet és Tudomány* 40 (1985) 108–110.
15. Horváth Gábor: A holdak kötött keringése, az árapály-effektus és az árapályfűtés. *Fizikai Szemle* 41 (1991) 79–88.

## MAI GYEREKNEK LEGALÁBB KÉT ÉLETET KELL ÉLNIÉ!

### Szalayné Tahy Zsuzsanna tanárnővel Kerekes Sándor beszélget

*Egyrészt legyen felkészült az órákon, másrészt mozogjon otthonosan a STEM<sup>1</sup> világában!*

A lenti interjú a robotprogramozás világát és ennek csúcversenyét, a World Robot Olympiad™ (WRO™) magyarországi vonatkozásait bemutató cikknek indult, de sportnyelven szólva, a hajrában rá kellett jönni: minden verseny csak a hab a tortán, a lényeg az odavezető úton és az addig végzett munkában van. Köszönet az éppen doktori disszertációját író és a gyerekek versenyre történő felkészítésében rendkívül elkötelezett Szalayné Tahy Zsuzsanna matematika-, fizika-, számítástechnika-tanárnak, hogy a STEM világában laikus médiamunkásnak felnyitotta a szemét és segítette az előremutató üzenetek megfogalmazásában.

Ma már egyre több magyar iskolának, diáknak és szülőnek is ismerősen cseng a WRO™ mozaikszó, amely a World Robot Olympiad™ rövidítése és egy óriási népszerűségnek örvendő nemzetközi robotprogramozási versenyre utal. A színpompás és frenetikus hangulatú esemény célja, hogy a gyermekeket és fiatalokat közelebb hozza a természettudományos ismeretekhez, tantárgyakhoz, valamint ösztönözze őket a mérnöki, informatikai szakma választására.

Az első robotprogramozási olimpiát 2004-ben rendezték meg Szingapúrban, mára a versenyeken évente több mint 60 ország 20 000 csapata vesz részt. A WRO™ 15 éve tartó seregszemléje egyesíti és segíti a fiatalokat a világ minden tájáról kreativitásuk és problémamegoldó készségük fejlesztésében az MTMI<sup>1</sup> területén. Ebbe a mezőnybe már kijutni is óriási érdem, nemhogy TOP eredményeket elérni. Több magyar csapat is sikeresen szerepelt már, de az eddigi legjobb

helyezést úgynevezett Open Junior kategóriában 2018-ban a budapesti Szent István Gimnázium színeiben induló fiatalok szerezték meg, csapatvezetőjük Szalayné Tahy Zsuzsanna volt, aki 2002 óta a Szent István Gimnáziumban és 2018 óta a Békásmegyeri Veres Péter Gimnáziumban is tanít. Emellett az ELTE Informatika Doktori Iskolában az informatika oktatásának módszereit kutatja. Több csapatot is felkészített már a WRO™ különböző kategóriájú versenyekre. Az előbb említett legjobb helyezést 2018. novemberben Thaiföldön, Chiang Mai-ban megrendezésre kerülő robotprogramozási olimpián sikerült elérni. A világdöntőn 63 országból 8 kategóriában 482 csapat mérte össze tudását, a Szent István Gimnázium diákjai az Open Junior kategóriában 6. helyezést szerezték meg. A szereplést többek között az NI Hungary Kft. is támogatta.



– *Mi a titka egy ilyen kiélezett mezőnyben egy ilyen lenyűgöző eredménynek?*

– Meggyőződésem, hogy a diákjaim sikere elsősorban annak köszönhető, hogy nem én tanítom őket, hanem ők tanulnak és kutatnak, jómagam pedig „csak” arra vigyázok, hogy a versenyeken összegyűjtött sok éves tapasztalatom alapján nagyon félre ne menjenek. Lényeg a játék! Ha ezt sikerül szem előtt tartani, akkor a gyerekek sem görcsölnek, hanem kreatívan, konstruktívan állnak hozzá egy-egy kihívás, vagy nem várt probléma megoldásához. Azt is tudni kell, hogy a Szent István Gimnáziumba kerülő gyerekek zöme nagyon motivált az informatikával kapcsolatban, ezért nekem egy-egy versenyre valóban a krémjéből kerülnek ki a jelentkezők, akik okosak, felkészültek és talpraesettek.



Következzen egy bekezdésnyi ismertető azok számára, akik kíváncsiak, hogy hogyan is zajlik egy ilyen megmérettetés. A LEGO® Robotok programozási nyelve a PLC-programozáshoz hasonló, alapul szol-

<sup>1</sup> A STEM angol rövidítés, ami a következő tudásterületeket foglalja magába: Science (tudomány), Technology (technológia), Engineering (mérnöki tudományok), Mathematics (matematika). Használatos még a magyar rövidítés, amely a Matematikai, Természettudományos, Műszaki és Informatikai terület alapján: MTMI.



A thaiföldi világversenyen a magyar SzIG@HUN csapat – Mozsár Máté, Vajó Péter és Sőre-Vértessy Zsombor – a zsűri előtt mutatja be projektjét és az „extrém körülmények között működő növénytermesztő konténer” modelljét.

gálhat a későbbi PLC-ismeretek könnyebb elsajátításához, alkalmazásához. A versenyen a csapatok a robotjukat LEGO MINDSTORMS® elemekből építik meg, de versenykategóriától függően a többi vezérlő, építőanyag vagy programozási nyelv használata is megengedett. Az ARC (Advanced Robotic Challenge) kategóriában a National Instruments myRIO vezérlőegysége és a MATRIX, TETRIX építőelemek használhatók. A versenyeken 6–25 év közötti fiatalok vehetnek részt. A csapatok 2-3 tagja és egy csapatvezető közösen oldják meg az évente megújuló kihívásokat. Egy csapat csak egy versenykategóriában – Regular, Open, ARC vagy Football – regisztrálhat és indulhat. Magyarországon az Edutus Főiskola 2014-től rendezett WRO versenyeket két kategóriában: Junior High School (JHS) korosztály körülbelül 13 és 15 év közötti fiataloknak és High School (HS) korosztály körülbelül 16 és 19 év közötti fiataloknak. 2016-ban először került Magyarországon megrendezésre a WRO Advanced Robotics Challenge az NI Hungary Kft., a National Instruments a Virtuális Műszerezésért Alapítvány és az Edutus Főiskola szervezésében, amelyen 20 csapat vett részt. A 2017-es évben a WRO™ LEGO® Robot verseny Magyarországon bekerült az emberi erőforrások minisztere 14/2017. (VI. 14.) EMMI rendelete a 2017/2018. tanév rendjéről 3. számú mellékletébe az oktatásért felelős miniszter által anyagilag támogatott tanulmányi versenyek közé.



– *Mekkora kihívás egy-egy nemzetközi verseny költségeinek előteremtése?*

– A legnagyobb gondot az okozza, hogy a támogatók nem akkor jönnek, amikor kellenének, hanem gyakran hónapokkal később. Volt már arra precedens, hogy akkor kapta meg egy csapat eszközvásárlásra a

pénzt, amikor már érettségizett. Így kerül képbe az a huszáros megoldás, hogy egy-egy megkésztet adományának a következő verseny résztvevői örülhetnek, ők a hasznélvezői. A magyarországi fordulók utazási és egyéb költségeit vagy az iskola – ha tudja –, vagy a szülő finanszírozza. A külföldi utazások esetében a kiadások viszont megsokszorozódnak. Ezért fordult elő többször is, hogy a helyi fordulók résztvevő csapatok számára a második hely a legjobb. Lehet, hogy az első hely esetében valamivel nagyobb a dicsőség, de ezzel olyan anyagi terhet vesz magára az iskola, a tanár, a gyermek, amit előteremteni záros határidőn belül, szinte lehetetlen küldetés. Képzeld el azt az abszurd helyzetet, amikor a diákok a döntő pillanat előtt megkérdézik a tanártól, hogy beleadhatnak-e „apait-anyait”, mert akkor nagy valószínűséggel nyerni fognak, de akkor beköszönt a kuncsorgás időszaka, a pénz utáni hajsza. A finanszírozás bizonytalansága az egyik oka annak, hogy bár több iskola szeretne indulni robotépítő versenyeken, de kevesen mernek belevágni. A pályázati alapon, korlátozott létszámban és utólag kifizetett támogatás eleve kiszelektálja azokat, akik anyagilag ezt nem engedhetik meg maguknak. Tovább rontja a „harcis szellemet”, hogy magánszemély vagy gazdasági társaság szintén nem finanszírozhat előre. Egy ilyen, ellentmondásos, kiélezett szituációban el lehet képzelni, hogy mennyire tud egy iskola örülni egy szponzor, így például az NI Hungary Kft. felajánlásának.



Akkor ennél a gondolatmenetnél is következzen plusz információ. Az NI Hungary Kft. anyavállalata a National Instruments a World Robot Olympiad™ globális támogatója. Az amerikai cég kiemelten fontos ügynek tart minden olyan nemzetközi oktatási programot, amely azzal a céllal jött létre, hogy megkönnyítse a fiatalok hozzáférését a természettudományos tárgyakhoz és motiválja őket egy mérnöki vagy informatikai szakma választására. A WRO™ verseny ezt a célkitűzést valósítja meg úgy, hogy ötvözi egy sportesemény izgalmát a robotok tervezésének, építésének és programozásának kihívásával. A National Instruments debreceni leányvállalata, az NI Hungary Kft. számára ennek szellemében évek óta kiemelt fontossággal bír az ilyen típusú programok szervezése vagy szponzorációja.



– *Ha ekkora nehézséget okoz az anyagi háttér megteremtése, miért menedzseli, szervezi a diákok felkészülését, versenyekre való kijutását?*

– Akkor menjünk bele a sűrűjébe! A WRO™ alapjában véve okot adhat arra, hogy miért jöjjenek össze rendszeresen a diákok, de egy céldátumnál, egy versenyenél jóval fontosabb szempont maga az út és ami jellemzi, vagyis a felfedezés, az alkotás, a gondolkodás, a kísérletezés, az együttműködés; összefoglalva: a játék! Az, hogy a diákok együtt legóznak, robotokat építenek és programoznak, ez az a pozitív közösségi élmény, amely motiválhatja, vagy akár orientálhatja a gyerekeket a természettudományos pályaválasztásban. Sokan az általános iskolákból azért választják például a Szent István Gimnáziumot, mert itt van LEGO-szak-

kör. Ugyanakkor azt is tapasztalom, hogy a kezdeti óriási lelkesedést hatalmas fluktuáció követi.

A fiatalok annyira leterheltek más tárgyakból, hogy hiába nagy az érdeklődés a robotprogramozási szakkörre – a jelentkezők létszáma a félszázat is meghaladja – a második hétre már csak 25 fog eljönni. Miért? Mert egy ilyen szakkörnek akkor van értelme, ha nem egyórás, nem kell másnapra leckét írni, időben lefeküdni. Ezért a péntek délutáni szakkör valójában este 8-ig szokott tartani. Az is előfordulhat, hogy a jelentkezők nem férnek el a teremben, vagy nincs annyi eszköz, mint amennyire szükség lenne. Aki csak nézi, hogy a társa mit csinál, az legközelebb nem jön el. A tömeges lemorzsolódás oka mégsem az eszközhiányra, hanem a belső okokra vezethető vissza. A gyerekek többségének a tanulás mellett nem marad szabad kapacitása, ezért nem jut idő a játékra, a közös élményekre. Ezért nem szoktam meglepődni azon, ha a felév végére mindössze öt-hat diák akad, aki szívesen jelentkezik egy-egy hazai vagy nemzetközi versenyre.

Ez a kényszerű hangsúlyeltolódás vezetett ahhoz a felismeréshez, hogy a WRO-n való részvétel nagyon fontos szempont, de ugyanolyan fontos, hogy a versenyen induló három diák mellett száz másik volt már szakkörön. Számomra az az igazi kihívás, hogy a közösség minél motiváltabb legyen és mindenkinek legyen kreativitásban, problémamegoldásban, gondolkodásban sikerélménye. A verseny ehhez célt ad.

– *Hogyan befolyásolja a robotprogramozás a gyerekek pályaválasztását, felsőfokú tanulmányait?*

– A budapesti Szent István Gimnázium egyike a legtöbb mérnökhallgatót adó iskoláknak. Az iskolából nagyon sokan jelentkeznek mérnökinformatikára. Az osztályomból, amelyik még informatikatagozatos volt, például mindössze két ember ment humán szakra, kettő orvosira, egy gazdaságira és az összes többi a mérnökség és az informatika környékén tanult tovább. Az informatikatagozat megszűnésével a szakkörök adnak lehetőséget az MTMI kompetenciák fejlesztésére. LEGO szakkör, programozás szakkörök, érettségi- és versenyfelkészítő szakkörök indulnak, amelyek rendszeresen összekeverednek. A pénteki szakkörön együtt van a LEGO a digitális technikával, mikrokontrollerek programozásával, kábelek forrasztásával, táblázatkezeléssel és prezentációkészítéssel. „Robotprogramozás” címen az automatizálástól a csillagászatig át a zenéig minden területen tapasztalatot szerezhetnek a gyerekek (és miattuk én is).

– *Ha többen programoznak robotokat a középiskolákban, akkor többen mérnökként fognak dolgozni?*

– Én most az informatikaoktatás módszertanából írom a doktorimat az ELTE-n és azt is kutatom, hogy mi lehet az oka a mérnökképzésben tapasztalható lemorzsolódásnak és mit lehet ellene tenni. Az köztu-

dott, hogy a BME-n végzett mérnökök és informatikusok nagyon erős minőségi képzést kapnak, az ott megszerzett diplomával gyakorlatilag bárhol el tudnak helyezkedni. Ha az elmúlt 6 évben felvett hallgatók mindegyike le tudna diplomázni, akkor a mérnökhány is kisebb lenne, de a helyzet ma nem ez. Nagyon sok a rendszerből kihullott hallgató. Erre fókuszálva, a bukás okait elemezve úgy látom, hogy az egész köz- és felsőoktatásban, ezen belül a mérnökképzésben is módszertani szempontból, eszközellátottság területén és oktatói kapacitás területén is nagyon súlyos problémák vannak. Az egyetemek nincsenek felkészülve a mérnökök tömegképzésére.

De a hierarchia alsóbb fokán is lenne mit tennünk! A közoktatásban az informatika, illetve a projektmódszertan, a gondolkodásra való oktatás nem éri el a minimumszintet. Ma az az általános szemlélet a közoktatásban, hogy „tudjál latinul is, mert az az alapműveltség része”, ami teljesen szembe megy azzal a kihívással, hogy olyan gondolkodó emberek akarunk nevelni, akik azután képesek alkotni, akár egy gépet is önállóan összeszerelni. Az informatikaórák számát az utóbbi években például annyira lecsökkentették, hogy aki be szeretne jutni mérnökinformatika szakra, annak külön órát kell vennie, mert ebben az óraszám-ban egyszerűen nem lehet a szükséges tudáshoz hozzájutni. A mérnöki pályát választók jelentős része nincs felkészülve az egyetemi tanulmányokra. Sokan csak azt tudják a programozásról, hogy azzal sok pénzt lehet keresni. A WRO™, a robotprogramozás oktatása segíti a száraz, tudás alapú, a 19. századi oktatási rendszer 21. századnak megfelelő átalakítását. De a robot programozásának megtanulása nem csak a mérnöki pálya választása miatt fontos. A mai gyerekek, mire felnőnek, olyan környezetben fognak élni, ahol, aki nem tudja vezérelni a robotot, azt a robot fogja „irányítani”.

– *Európai országként először a közelmúltban Magyarországn nyerte el a XVI. World Robot Olympiad™ világversenyt rendezésének jogát. Győrbe 2019. november 8. és 10. között az Edutus Főiskola kizárólagos szervezésében várhatóan 60 országból közel 3000 tehetséges versenyző fog érkezni a megmérettetésre. Jelenthet ez egy újabb lökést az informatika megszerkesztésében, népszerűsítésében?*

– A magyar diákok esetében előnyt jelenthet, hogy könnyebb lesz megszervezni a győztes csapatok részvételét, a szükséges anyagi forrásokat előteremteni. Miután a versenyszámok jelentős része a nézők számára közelről nem élvezhető, érdemes lenne megszervezni az élő közvetítést a pályák mellől, mert így több nézőt, elsősorban fiatal lehetne megszólítani, a robotprogramozás élményével megfertőzni.

Ne felejtjük el: *a játék a lényeg!*

# MIT TEGYÜNK, HOGY NE NEVELJÜNK LAPOSFÖLD-HÍVŐKET?

Bognár Gergely  
Révai Miklós Gimnázium és Kollégium, Győr

A reneszánsz ember a múlté, egyetlen ember sem képes átlátni a természettudományok egészét. Őszintén be kell látnunk, hogy saját szakterületünkön kívül bizonytalanul mozgunk. Az általános és a középiskolai fizikaórákba képtelenség oly sok ismeretet bezsűfolni, hogy a padokból kikerülő diákok azokkal felvértezve biztosan szelektálhassanak a tudomány és áltudomány között. A gyerekekben olyan átfogó természettudományos képet kell kialakítani, amelynek segítségével felismerik a tudomány és áltudomány közötti különbséget. A tudományfilozófia e ponton kap szerepet.

A tudományfilozófia fő kérdésre az úgynevezett demarkációs problémára: „mi különbözteti meg a természettudományt az áltudománytól?” nem adható egyszerű, néhány mondatos válasz. Ennek ellenére létezik valamiféle kritériumrendszer, amelynek segítségével elvégezhetjük a szelektálást. Első lépésként le kell szögezni, hogy a tudomány az emberiség tudásának csúcsa, és ismereteink leggazdagabb tárháza. Minden tudományhoz, így a fizikához is tartozik egy egyetemektől, kutatóintézetektől, folyóiratokból, konferenciákból, laboratóriumokból stb. álló intézményi háttér. Az intézményi háttér felállít egy kritériumrendszert, amely szelektál tudomány és áltudomány között. Ragyogó elmével felruházva hosszú éveket kell egyetemeken, doktori iskolák padjaiban tölteni, hogy valaki kutatóvá válhasson. Az adott terület beható ismerete után a kutatók az eredményeiket konferenciákon, szaklapokban megosztják a fizikus társadalommal, akik ellenőrzik és megvitatják azokat, és csak ezután válhat az elmélet a fizika tudományának részévé.

Minden tudományos kutatás fontos eleme a nyilvánosság, a fenti intézményi rendszer publikációs folyamatai pontosan ezt a célt szolgálják. A fizika legújabb eredményei nyilvánosak és hozzáférhetők. Az eredményeket mások új kutatásokhoz felhasználhatják, és ami ennél is fontosabb, a kísérletek és mérések, legalább elviekben megismételhetők. Egy-egy új felfedezés igazolásához nélkülözhetetlen, hogy a kísérleti

eredményeket független laboratóriumok is megerősítsék, a legtöbb esetben csak ezek után válhat elfogadottá az új felfedezés.

Az imént leírtak elméleti átadásán túl, jó lenne gyakorlati feladatokon keresztül is feldolgozni a problémát. Az internet korában néhány kattintással számtalan tudományos és áltudományos írás könnyedén elérhető. Közöttük szemezgetve kiválaszthatunk néhányat, amelyekről a diákoknak el kell dönteniük, hogy azok a fizika tudományához tartoznak-e vagy sem. A feladat elvégzésében a következő kérdések segíthetnek: a vizsgált szöveg tartalmaz-e hivatkozásokat, és azok ellenőrizhetők-e? A tudományosság igényével fellépő elmélet hol jelent meg, szerzője rendelkezik-e tudományos fokozattal, tagja-e valamely fizikus társaságnak? Ellenőrizte-e valaki az újnak gondolt felfedezést, esetleg más folyóiratokban olvashatunk-e recenziókat?

Gyakorló középiskolai tanárként jól tudom, hogy a kerettantervben foglaltakat a rendelkezésre álló órakeretben csak feszített tempóval lehet teljesíteni, ezért a tananyagon felül szinte semmire nem jut idő. Az új Nemzeti Alaptanterv célkitűzései között szerepel a tudomány és áltudomány megkülönböztetését szolgáló kompetencia fejlesztése. A készülő kerettantervben érdemes lenne helyet szorítani ennek, még akkor is, ha ez bizonyos tartalmak kurtításával jár a vázolt probléma feldolgozására. Az aktualitást mi sem tükrözi jobban, mint a laposföld-hívők tábora. Az ókori görögök nemcsak hirdették, hogy a Föld gömbölyű, de meg is mérték annak átmérőjét, a széles körben elterjedt tévhittel szemben a középkorban egyetlen vallási vezető sem hirdette, hogy a Föld lapos. Ki tudná megszámlolni, hogy *Magellán* nagy utazását követően hányan és hányan kerültek azt körbe? A fizikának köszönhetően fél-száz éve kívülről is szemlélhetjük bolygónk gömbölyded alakját, mégis az új évezredben „tudományos” érveket próbálnak felállítani a laposföld-hívők, és számuk nem korlátozódik egy szűk csoportra. Tudományos fél- vagy negyedigazságokból kiindulva, és azokat elferdítve egyesek oly meggyőződéssel hisznek a fény, mint alternatív „táplálék” fogyasztásában, hogy a tévképzeteik nem egy esetben tragédiához vezettek. Mások értelmetlen kütyük és „találmányok” forgalmazásával gazdagodnak meg, kihasználva oly sokak természettudományos inkompetenciáját. Közhelyesen hangzik, ennek ellenére igaz: *ha nem akarjuk, hogy a felnövekvő nemzedék fejében elmosódjon a batár asztrológia és csillagászat, fizika és a varázslás között, komolyan kell vennünk a tudományosság kritériumainak tanítását, a tudományfilozófia gyakorlati alkalmazását.*



Bognár Gergely 2006-ban végzett az ELTE TTK fizikatanári szakán, illetve 2008-ban a PPKE BTK filozófiaszakán. Jelenleg a győri Révai Miklós Gimnázium és Kollégium fizika-filozófia szakos tanára. Érdeklődési területe a fizika és a filozófia határterületei, és a fizika tanításának módszertana, amelyekkel kapcsolatban több publikációja jelent meg.



# GIREP–ICPE–EPEC–MPTL–EÖTVÖS YEAR 2019

Budapest, 1–5 JULY, 2019



Venue: Budapest University of Technology and Economics (BME)

You are invited to join **GIREP–ICPE–EPEC–MPTL–EÖTVÖS YEAR 2019** in Budapest (Hungary) and contribute with physics education experiences

**The conference is jointly organised by:**

- International Research Group on Physics Teaching (**GIREP**),
- European Physical Society, Physics Education Division (**EPS PED**),
- International Conference on Physics Education (**ICPE**) of the Commission C14 of the International Union of Pure and Applied Physics (**IUPAP**),
- Multimedia in Physics Teaching and Learning (**MPTL**)
- Roland Eötvös Physical Society, Hungary (**ELFT**),
- Institute for Computer Science and Control, Hungarian Academy of Sciences (**MTA SZTAKI**),
- Budapest University of Technology and Economics, Hungary (**BME**).

