

# fizikai szemle



2022/9

# Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

**Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.**

**Támogatók: a Magyar Tudományos Akadémia Fizikai Tudományok Osztálya, az Emberi Erőforrások Minisztériuma, Nemzeti Kulturális Alap**

Főszerkesztő:  
**Lendvai János**

Szerkesztőbizottság:

**Bíró László Péter, Bokor Nándor, Czitrovszky Aladár, Füstöss László, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Iglói Ferenc, Kiss Ádám, Ormos Pál, Pálfalvi László, 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:

**Az izlandi Eyjafjalljökull vulkán 2010. április 14-i kitörése és az általa generált vihar.**

A hátsó fedélen:

**Eyjafjalljökull vulkán hamufelhőjének műholdképe három nappal a kitörés után, a betétábra a felhő kiterjedését mutatja az első tízenegy napban. Lásd Bajkó Ildikó írását a 291–296. oldalakon.**

## TARTALOM

**Trócsányi Zoltán:** A részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után 269  
*Milyen új felismerések születtek a Higgs-bozon megfigyelése utáni első évtizedben?*

**Szabó Róbert, Szklenár Tamás, Bódi Attila:** Gépi tanulás a 21. századi asztrofizikában 274  
*Néhány fontos példa a mesterséges intelligencia asztrofizikai alkalmazásával elért új eredmények közül.*

### A FIZIKA TANÍTÁSA

**Vavrik Márton, Vári Gergely Péter:** Schlieren-képkalkotás okostelefonnal 278  
*Az okostelefonnal középiskolákban is jól bemutatható képkalkotás lehetőségét ad több optikai jelenség megismerésére.*

**Végh Péter, Izsa Éva:** Egy apró játék kaotikus kalandjai – 2. rész 281  
*Az írás egy gyerekek körében népszerű játék kaotikusságának vizsgálata, ami alkalmas arra, hogy a kaotikus viselkedést megismertessük a diákokkal.*

**Molnár András, Raffai Péter:** A gravitációs hullámok bemutatása középiskolásoknak – 1. rész – Nemzetközi példák 285  
*A gravitációs hullámok kutatása ma a fizika egyik legújabb és legnagyobb jelentőségű területe, tanításával lehetőség nyílik a középiskolai fizika tananyag jelentős részéhez kapcsolódó folyamatok komplex bemutatására.*

**Bajkó Ildikó:** Felfedező tanulás a középiskolai természettudományokban a vulkáni hamu terjedése alapján 291  
*A diákok nagy lelkesedéssel használják a RePLaT–Chaos-edu nevű programot és a környezeti szennyeződések terjedésének példáján keresztül megismerik a káosz jellemzőit.*

**Horváth Anna, Bámer Balázs, Barnaföldi Gergely Gábor:** Kövessük a fényeket – délibábok numerikus szimulációja 296  
*Az írás olyan, a szerzők által fejlesztett programot mutat be, amely egy tájképből – megfelelő paraméterekkel – délibábos fényképet generál.*

### HÍREK – ESEMÉNYEK

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2022. évi Küldöttgyűlése 302

**Z. Trócsányi:** Particle physics ten years after the discovery of the Higgs boson  
**R. Szabó, T. Szklenár, A. Bódi:** Machine learning in 21<sup>st</sup> century astrophysics

### TEACHING PHYSICS

**M. Vavrik, G. P. Vári:** Schlieren-imaging with smartphone  
**P. Végh, É. Izsa:** Chaotic adventures of a miniature toy – Part 2  
**A. Molnár, P. Raffai:** Introduction of gravitational waves in secondary schools – Part 1 – International examples  
**I. Bajkó:** Exploratory learning in secondary school science based on the spread of volcanic ash  
**A. Horváth, B. Bámer, G. G. Barnaföldi:** Follow the lights – numerical simulation of mirages

### EVENTS

The 2022 Delegate meeting of the Roland Eötvös Physical Society

**Fizikai Szemle**  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT  
megjelenését támogatják:



EMBERI ERŐFORRÁSOK  
MINISZTERIUMA

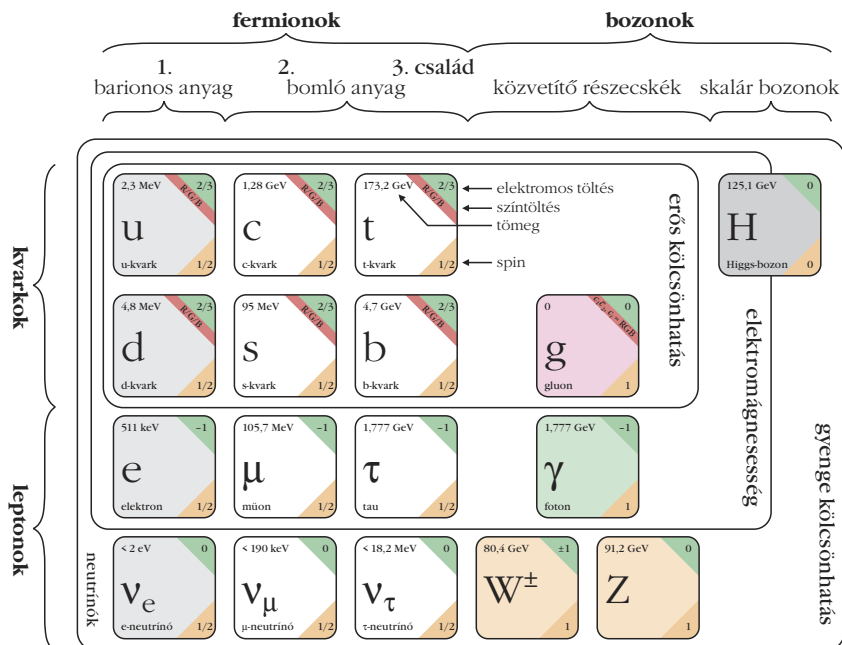
**nka**  
Nemzeti Kulturális Alap



# A RÉSZECSEKEFIZIKA HELYZETE TÍZ ÉVVEL A HIGGS-BOZON FELFEDEZÉSE UTÁN

Trócsányi Zoltán  
ELTE Elméleti Fizikai Tanszék

A Nagy Hadronütköztető<sup>1</sup> ATLAS<sup>2</sup> és CMS<sup>3</sup> kísérletei 2012. július 4-én jelentették be az akkor már közel fél évszázada megjósolt, de hiába keresett Higgs-bozon megfigyelését. Az észlelés korszakalkotó jelentőségű volt. A különleges részecske felfedezése egyszerre adta a részecskefizikai standard modell helyességének végső bizonyítékát, és nyitott új távlatokat a nagyenergiás kísérleti és elméleti kutatásokban. Az elmúlt 10 év során mind a kísérleti, mind az elméleti kutatások jelentős lépéseket tettek a Higgs-bozon tanulmányozásán keresztül a mikrovilág pontosabb megértése felé. Milyen eredményeket hozott az évtized, hol tartunk ma és merre visz az utunk a természet megismerése felé a ma elérhető legkisebb méret- és legnagyobb energiasűrűség-skálákon?



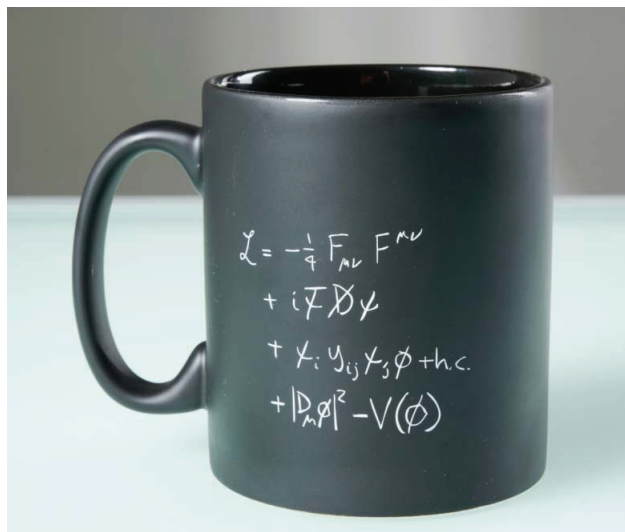
1. ábra. A standard modell mezői. A keretek azokat a mezőket határolják, amelyekre a jelzett erő hat.

## Bevezetés: a részecskefizikai standard modell

A részecskefizikai standard modell [1] rendkívül sikeresen írja le az elemi részecskék bomlási folyamatait és ütközéseit. A modellben három fermioncsalád van (1. ábra), mindegyike két elektromosan töltött kvarkból, egy semleges és egy töltött leptonból áll. A semleges leptonok a neutrínók, amelyeket az íz kvantumszám alapján különböztetünk meg. Ez csupán arra utal, hogy melyik fajta elektromosan töltött leptonnal együtt kelet-

keznek a gyenge erő által közvetített bomlásokban. Az egyes családok között az íz kvantumszámon kívül csak a részecskék tömege jelent különbséget. A fermionok között ható három erő (erős, elektromágneses és gyenge kölcsönhatást) bozonok közvetítik, amelyek értelmezése szimmetriaelvből egyszerűen következik: csupán annyit kell megkövetelni, hogy a modell 2. áb-

2. ábra. A standard modell Lagrange-sűrűségfüggvénye a CERN webshopjában kapható bögrén.



Plenáris előadás a 2022. évi Fizikus Vándorgyűlésen, Veszprém, 2022. augusztus 21. A szerző megköszöni Horváth Dezsőnek a kézirat nyers változatához fűzött hasznos megjegyzéseit.

<sup>1</sup>Nagy Hadronütköztető: LHC, Large Hadron Collider

<sup>2</sup>ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus, egy toroidális LHC-berendezés

<sup>3</sup>CMS: Compact Muon Solenoid



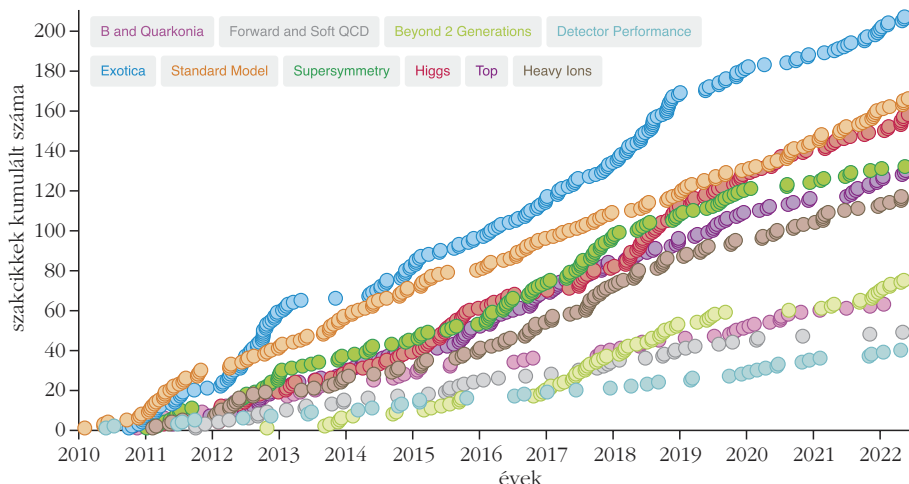
Trócsányi Zoltán fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE Elméleti Fizika Tanszék egyetemi tanára, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. Demény Andrással társszerzője a *Fizika I.* egyetemi tankönyv Mechanika részének, Horváth Dezsővel pedig a *Bevezetés az elemi részecské fizikájába* című, 2019-ben angolul is megjelent tankönyvnek. Emellett ismeretterjesztő előadások és művek rendszeres szerzője. Tudományos közleményeire százezernél több független hivatkozást kapott.

rán mutatott Lagrange-sűrűségfüggvénye ne változzék, ha a fermionmezőkön helyfüggő, az  $SU(3)_C \otimes SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  csoport elemeiből vett mértéktranszformációval hatunk. A C, L és Y indexek arra utalnak, hogy melyik megmaradó töltéshez kapcsolódik a transzformáció: C a *színtöltést* jelöli, L a balkezes dubletet, amelyre az *elektrogyenge izospin* hat, az Y pedig a *hipertöltésre* utal.

A standard modell mérték-szimmetriája miatt a benne szereplő részecskéknek nem lehet tömegük, mert az sértené a szimmetriákat, ami azonban szöges ellentétben áll a kísérleti megfigyelésekkel. Az ellentmondás feloldására 1964-ben több kutató (*François Englert* és *Robert Brout*, tőlük függetlenül *Peter W. Higgs*, illetve szintén függetlenül *Gerald S. Guralnik*, *Carl R. Hagen* és *Thomas W. B. Kibble* a *Physical Review Letters* 13. kötetében, időrendileg ebben a sorrendben) közölte a mára hivatalosan *BEH-mechanizmusként* ismert elméleti modellt. A modell megjósolta egy skaláris részecske létezését, amelyet azonban közel fél évszázadon keresztül hiába kerestek a laboratóriumban. Így a standard modell 2012-ben azzal vált teljessé, amikor felfedezték a máig egyetlen ismert skalárbozont, a Higgs-részecskét (H) [2], amiért Englert és Higgs kapták a 2013. évi Fizikai Nobel-díjat. A modell nem jósolja meg az új részecske tömegét, ezért a Higgs-bozon felfedezéséhez szükséges gyorsító és a detektorok megépítése nem lett volna lehetséges az egyéb elméleti várakozások alapos ismerete nélkül. A BEH-mechanizmus szerint az  $SU(2)_L \otimes U(1)_Y$  mértékszimmétria a természetben rejtve marad, mert a mindent kitöltő BEH-mező alapállapota sérti azt, és csak az  $SU(3)_C \otimes U(1)_Q$  mértékszimmétria észlelhető, ahol Q az elektromágnesség szimmetriájából következő megmaradó elektromos töltést jelöli.

## A ma ismert Higgs-részecske

A nagyjából  $125 \text{ GeV}/c^2$  tömegű skalárbozon első megfigyelése csupán az első lépés volt az LHC rendkívül gazdag kísérleti programjában. A 3. ábra mutatja a CMS együttműködés<sup>4</sup> által közölt tudományos közlemények számának gyarapodását az idő szerint. Az LHC kísérletei által megjelentetett közlemények témájuk szerint három nagy csoportba oszthatók: (i) a standard modell paramétereinek minél pontosabb mérése; (ii) a standard modellbe nem illeszkedő részecskék keresése; (iii) egyéb, ideértve például a standard mo-



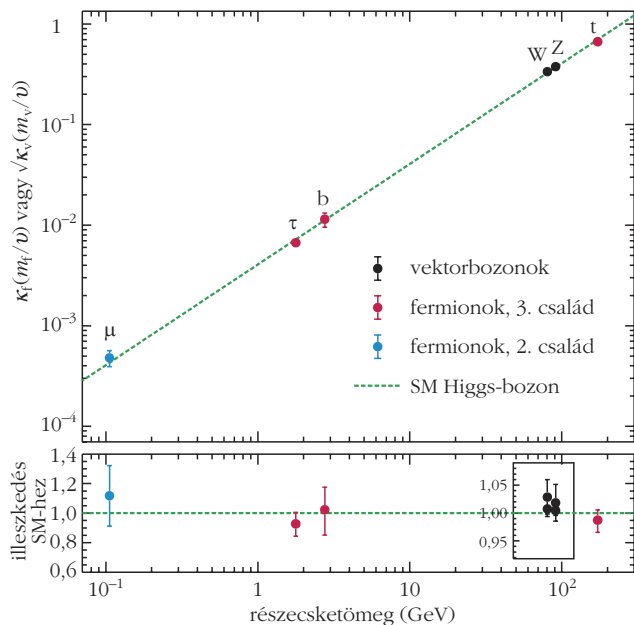
3. ábra. A CMS együttműködés által megjelentetett – 2022 júniusáig összesen 1137 darab – szakcikkvek számának növekedése különböző kutatási munkacsoportokban (csoportokat feliratok színek alapján lehet azonosítani).

dellhez kapcsolódó új, összetett részecskék megfigyelését, a nehézion-fizikai méréseket, detektorfejlesztéssel kapcsolatos munkákat. Szoros értelemben részecskefizikus szemszögből különösen érdekes a harmadik csoport, amely számos korábban elképzelhetetlennek vélt újdonságot tartalmaz. Ilyen például a több mint hatvan új hadron felfedezése, köztük jónéhány újfajta kötött állapottal. Az LHC előtt csak kvark-antikvark, illetve háromkvark kötött állapotokat ismertünk (mezonok és barionok). Az LHCb kísérletben sikerült négy és öt kvark jónéhány kötött állapotát észlelni (tetra- és pentakvarkok). A részecskefizikai standard modell szempontjából azonban érdekesebbek az első két csoporthoz tartozó mérések.

Az első csoport központi eleme a Higgs-bozon tulajdonságainak meghatározása. Ugyanis egy skalár-részecske megfigyelése – noha önmagában megrázó, hiszen korábban nem ismertünk ilyet – még nem jelenti azt, hogy a *standard modell egyetlen skalárbozonját* sikerült felfedezni. Ahhoz kísérletileg be kell bizonyítani, hogy a  $125 \text{ GeV}/c^2$  tömegű skalárbozon minden kvantumszáma akkora, amekkorát a modell előre jelez. Például sok mérés igazolja [3], hogy a felfedezett új részecske pozitív paritású skaláris részecske, akár csak a standard modellben. A legújabb mérés szerint (ATLAS 2022. júliusi bejelentése) a Higgs-bozon tömege  $m_H = (124,94 \pm 0,17) \text{ GeV}/c^2$ . Az eredeti várakozásokhoz képes igen meglepő, hogy sikerült – bár még viszonylag nagy, az értékkel összemérhető bizonytalansággal – azt is megállapítani, hogy a részecske élettartama is a standard modell szerinti érték, mintegy  $1,5 \cdot 10^{-22} \text{ s}$ .

Négyféle folyamatban sikerült megfigyelni keletkezését:  $gluon + gluon \rightarrow H$  (gluonfúzió),  $V + V \rightarrow H$  (vektorbozonok fúziója),  $V \rightarrow V + H$  (sugárzás vektorbozonról),  $gluon + gluon \rightarrow t + \bar{t} + H$  (keletkezés t-kvarkpárral), és hátfélében a bomlását:  $H \rightarrow \gamma\gamma, Z^0 Z^0, Z^0 \gamma, W^+ W^-, \tau^+ \tau^-, \mu^+ \mu^-, bb$  – mindet a mérés bizonytalanságán belül a modelltől számolt gyakorisággal, amihez az elméleti számítások pontosságának elké-

<sup>4</sup>A CMS-hez van a négy nagy LHC kísérlet közül a legjelentősebb magyar hozzájárulás.



4. ábra. A Higgs-részecske csatolásának erőssége az elemi részecskékhez a részecske tömegének függvényében. Az erősségek egyenesen arányosak a részecske tömegével, pontosan, ahogy a standard modell jósolja.

pesztő fejlesztésére is szükség volt. Ebből következik, hogy H csatolása az egyes részecskékhez a modell szerint valósul meg a természetben, mégpedig pontosan a részecskék tömegével arányosan (4. ábra).

Mindez nem jelenti azt, hogy a Higgs-részecske megismerése lezárult volna. A Világegyetem stabilitása szempontjából alapvető kérdés, hogy pontosan milyen a BEH-mező potenciálisenergia-függvénye. A standard modellben ez a függvény nagy energiáskálán instabillá válik (alulról nem korlátos), amelynek részleteiről a [4] *Fizikai Szemle*-cikkben olvashatunk.

Az LHC kísérletei azonban nem csak a Higgs-fizikára összpontosítanak, hanem az összes ismert részecske fizikájának pontos mérésére, valamint új részecskék keresésére is. Anélkül, hogy a részletekbe merülnénk, a nagyenergiájú részecskeütközési kísérletek eredményeit összegezve azt mondhatjuk, hogy az elmúlt évtizedben az LHC kísérletei bizonyították, hogy a 10 éve felfedezett részecske a standard modell Higgs-bozonja és így a teljes elmélet nagy pontossággal leírja a méréseket. Ugyanakkor egyelőre nincs új fizikára utaló jel az LHC láthatárán, annak ellenére, hogy más kísérletekből biztosan tudjuk, hogy van jónéhány felfedezés, amelyek nem magyarázhatók a részecskefizikai standard modellel, ezért mindenképpen a modell kiterjesztését követelik. A továbbiakban ezekkel foglalkozunk.

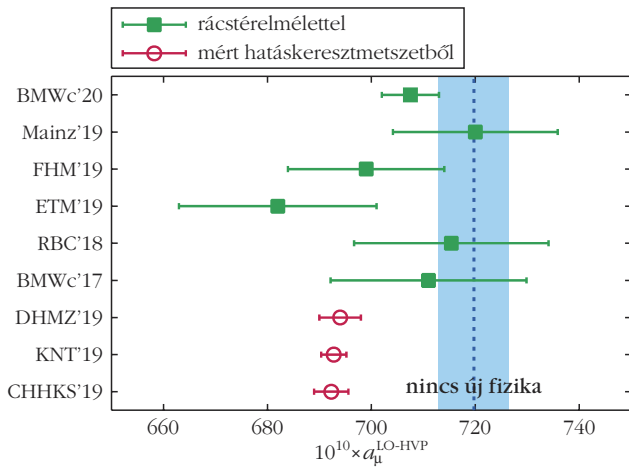
## A standard modell által nem értelmezett kísérleti tények

A standard modellben a neutrínók tömege nulla, ami biztosan nem felel meg a kísérleti tényeknek. Bár a neutrínók tömegét közvetlenül még nem sikerült

meghatározni, az 1998-ban a Super-Kamiokande kísérletben felfedezett neutrínó ízrezgést csak tömeges neutrínók tudnak mutatni. Az ízrezgés azt jelenti, hogy amennyiben a neutrínóknak van tömege, és a kölcsönhatásokban megjelenő íz-, valamint a szabadon haladó tömeg-sajátállapotok különböznek, akkor jellegzetes interferenciajelenség lép fel a neutrínók fajtái között. Az ízrezgésről és felfedezéséről a [5] cikkben írtam részletesen. A neutrínók tömegének elméleti leírásához mindenképpen szükséges, hogy az  $SU(2)_L$  kölcsönhatáson kívül más erő is hasson rájuk. Kézenfekvő feltevés lehetne, hogy ugyanúgy, ahogy a balkezes kvarkoknak is van jobbkezes párja, a neutrínóknak is van, amelyekkel ugyanolyan tömegtagot lehet felírni a leptonok között, mint amilyen a kvarkok között is van. Az ilyen jobbkezes neutrínókról azonban biztosan tudjuk, hogyha léteznek, semmiféle *ismert erő sem hat rájuk* (steril neutrínók), ezért megfigyelni sem tudjuk őket.

Másik kísérleti tény az anyag-antianyag mennyiségi aszimmetriája (*barion-aszimmetria*) a Világegyetemben. Az anyag-antianyag aszimmetriát a standard modell szerint a modellben meglévő CP-aszimmetria (tehát hogy az egyenletek *megváltoznak* egyidejű töltés- és tértükrözéskor) sérti, de nem elegendő mértékben ahhoz, amit a kozmológiai megfigyelések mutatnak (mintegy  $2 \cdot 10^{10}$  antiprotonra eggyel több proton jutott az Ósrobbanáskor). Elegendően nagy CP-aszimmetria nélkül még akkor sem lenne most barion-aszimmetria, ha kezdetben lett volna, mert a standard modell folyamatai megszüntették volna. Valószínűnek tűnik, hogy a megfelelő nagyságú CP-aszimmetria is a neutrínókhoz köthető, bár erre kísérleti igazolás egyelőre nincs (a részletekről a [6] cikkben olvashatunk).

A részecskék világában egyelőre nincs más meggyőző kísérleti adat, amely a standard modell bővítését igényli. Nagyon izgalmasan alakul a müon mágneses momentumára vonatkozó mérések eredménye, mert közel két évtizede több mint 99,9%-os bizonyossággal véljük, hogy eltér egymástól a mért és a standard modellel becsült érték. A Fermilab kutatói által 2021-ben közölt új kísérleti adat az eltérést megerősítette immár majdnem 99,999%-os bizonyossággal. Az új eredménnyel együtt azonban új elméleti becslés is megjelent döntő magyar hozzájárulással [7], amely megkérdőjelezte az eltérés szignifikanciáját. Ugyanis az elméleti becslés többek között tartalmazza a foton vákuumpolarizációjához a hadronok járulékát (HVP-t, tehát azt, hogy mekkora a *virtuális hadronpárok* keletkezésének lehetősége a szabad fotonban). Az ilyen virtuális hadronok energiája lényegében nulla, ahol az erős kölcsönhatás csatolása nagy, ezért a számoláshoz nem alkalmas a perturbációs módszer. A járulék becslése, vagy az elektron-pozitron ütközésben észlelt *valódi hadronkeletkezés* mért hatáskeresztmetszetéből lehetséges az optikai tétel felhasználásával, vagy pedig első elvek alapján rácstérelméleti módszerrel. 2020-ban a Budapest–Marseille–Wuppertal (BMW) rácstérelméleti együttműködés volt az első, amely a



5. ábra. A HVP járulék becslése rácsérelmélettel (több csoport szimulációjának eredményei), illetve a mért hatáskeresztmetszetről. A kék sáv jelöli a mérési eredményt a bizonytalansággal.

mérés pontosságával összemérhetően meg tudta határozni a HVP-t, és azt találta, hogy a müon mágneses momentumára kapott kísérleti érték és elméleti becslés közötti eltérés nem szignifikáns (5. ábra). Ezt az eredményt időközben két másik rácsérelméleti csoport is részlegesen megerősítette.

Másik izgalmas, a CDF (Collider Detector at Fermilab) kísérleti együttműködés által 2022-ben felröppentett hír, hogy a W-bozon  $m_W$  tömege nem akkora, mint korábban ismertük. A TEVATRON gyorsítón gyűjtött adataik kiértékelésével arra jutottak, hogy az a standard modell becslésével egyező  $m_W = (80369 \pm 16)$  MeV világtágnál szignifikánsan nagyobb,  $m_W = (80433,5 \pm 9,4)$  MeV. Az új eredmény értelmezhető lenne új fizikával, azonban a kutatói közösség kételkedve fogadja hitelességét, mert sok más mérés pontosságát is lerontja.

Van azonban a másik végletben, a legnagyobb méretskálákon olyan megfigyelés, amelyre szintén a részecskefizikában remélünk értelmezésre lenni. A Világegyetemben mérhető energiasűrűség sokkal nagyobb, mint a barionos anyag energiasűrűsége, ami azt jelzi, hogy az ismert anyagon kívül léteznie kell tömegvonzást kifejtő, de más erőt alig érző anyagfajtának is, amelyet *sötét anyagnak* hívunk. A sötét anyag létezésére utaló kísérleti tapasztalatokról a [8] cikkben írtam részletesebben. Bár elképzelhető az is, hogy a fekete lyukak sűrűsége és

tömege lényegesen nagyobb a Világegyetemben, mint jelenleg gondoljuk, az is természetes magyarázat lehet, hogy a sötét anyagot a barionos anyaggal alig kölcsönható részecskék alkotják. Ilyen részecskére számos elméleti jelölt van, de kísérletileg még egyiket sem sikerült megfigyelni.

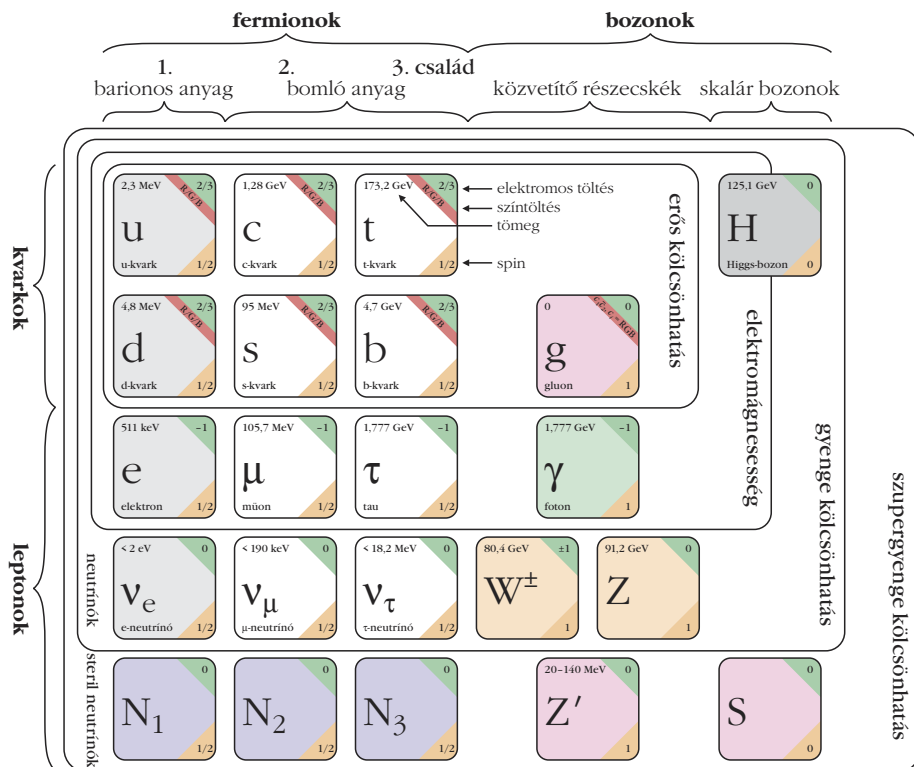
A neutrínók tömege, a barionaszimmetria, a sötét anyag létezése olyan kísérleti tények, amelyek elméleti megértése egyelőre várat magára. Ide sorolhatunk még olyan megfigyeléseket is, mint a Világegyetem gyorsuló tágulása, a BEH-mező potenciális energiájának instabilitása, vagy a kozmológiai infláció, amelyre ugyan közvetlen kísérleti bizonyíték nincs, de több jelenség értelmezéséhez alkalmas modell.

## Merre tovább?

Az LHC eddig a teljes működési ideje alatt remélt adatmennyiség mindössze 5%-át gyűjtötte, de már így is eljutott a felfedezéstől a pontos mérésekig. Ezért aztán az LHC 2022. július 5-én kezdődött 3. és az évtizedünk végén kezdődő 4. működési ciklusai gazdag LHC fizikával, talán új felfedezésekkel kecsegtetnek.

Az elmélet oldaláról fontos előrelépés lehet, ha sikerül a standard modell olyan bővítését felírni, amely a fent említett kísérleti tényeket értelmezni képes. Ehhez háromféle utat ismerünk. A legáltalánosabb az effektív térelméleti megközelítés, amelynek régi példája a Fermi-modell. A Fermi-modell alkalmas volt pontosan leírni például a müon bomlását

6. ábra. A szupergyenge kiterjesztésű standard modell mezői. A keretek azokat a mezőket határolják, amelyekre a jelzett erő hat.



négy-fermion kölcsönhatással. A Lagrange-sűrűség megfelelő kölcsönhatási tagja csak úgy lesz energia-sűrűség dimenziójú, ha a benne szereplő  $G_F$  Fermi-csatolás mértékegysége  $\text{GeV}^{-2}$ , aminek következménye, hogy az elmélet nem lehet érvényes tetszőleges nagyenergiájú folyamatok leírására (szaknyelven: nem renormálható). A Fermi-modell renormálható kiterjesztése a standard modell, amelynek csatolásai dimenziótlan számok. A standard modell szimmetriáit tükröző magasabb dimenziós, és így  $\text{GeV}^{-n}$  ( $n$  pozitív egész szám) mértékegységű csatolásokat tartalmazó kölcsönhatási tagokat is tartalmazó modell a standard modell effektív térelmélete (SMEFT). Amíg azonban a  $G_F$  egyszerűen és pontosan meghatározható a müon életidejének méréséből a Fermi-modellbeli becslésével összevetve, addig a SMEFT 2499 csatolásának paramétereit meghatározni reménytelen kihívásnak tűnik.

Másik bővítési lehetőség a bővítés egyszerűsített modellel. Például a standard modell bővítése jobbkezes steril neutrínókkal és azok tömegtagjával. Ez a bővítés alkalmas lehet a neutrínók tömegének értelmezésére, de aligha jó másra, ezért hasznosságuk korlátos. Ezért inkább a standard modell olyan renormálható bővítését szeretnénk felírni, amely egyszerre tudja értelmezni az összes, a standard modellen túlmutató megfigyelést anélkül, hogy az ismert pontos számításokat a mérhetőség határán túl megváltoztatná. Erre példa lehet a szupergyenge kiterjesztés, amely a standard modellen túl tartalmaz három jobbkezes neutrínót, egy új  $U(1)_Z$  mértékezővel közvetített kölcsönhatást és egy komplex skalármezőt, amelynek vákuuma sérti az új mértékszimetriát [9] (6. ábra). Az új neutrínók kölcsönhatásai a vákuummal tömeget generálnak mind az új jobbkezes, mind a hagyományos balkezes neutrínóknak [10]. Közülük a legkönnyebb lehetséges sötétanyagjelölt [11]. Az új skalármező stabilizálni tudja a vákuumot [12]. Fontos

megválaszolandó kérdés, hogy van-e és ha van, akkor hol az olyan paramétertartomány, amelyben az összes nyitott kérdésre egyszerre tud választ adni az elmélet. Az izgalmas kérdés pedig az, hogy jósol-e a bővített modell olyan új jelenséget, amelyet például az LHC-nél meg tudunk figyelni.

#### Irodalom

1. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. *Fizikai Szemle* 58/7–8 (2008) 246.
2. CMS Collaboration (magyar kutatók részvételével a CMS kísérletben): Observation of a new boson at a mass of 125 GeV with the CMS experiment at the LHC. *Phys. Lett. B* 716 (2012) 30–61.
3. CMS Collaboration (magyar kutatók részvételével a CMS kísérletben): A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery. *Nature* 607 (2022) 60–68; <https://www.nature.com/articles/s41586-022-04892-x>
4. Horváth Dezső: Higgs-bozon és a világ vége vagy kezdete. *Fizikai Szemle* 65/4 (2015) 115; <http://fizikaiszemle.hu/archivum/fsz1504/HorvathD.pdf>
5. Trócsányi Zoltán: Hogyan tegyük láthatóvá a láthatatlant? *Magyar Tudomány* 2016/4 478; <http://www.matud.iif.hu/2016/04/11.htm>
6. Radics Bálint, Trócsányi Zoltán: A CP-sértés nagysága a lepton-szektorban. *Fizikai Szemle* 71/3 (2021) 81. <http://fizikaiszemle.hu/szemle/90>
7. Sz. Borsanyi et al: Leading hadronic contribution to the muon magnetic moment from lattice QCD. *Nature* 593 (2021) 7857, 51–55; <https://inspirehep.net/literature/1782626>
8. Trócsányi Zoltán: A láthatatlan Világegyetem. *Természet Világa* 2013/I. különszám Mikrovilág-2012, 20; <https://www.termvil.hu/archiv/szamok/kulonszamok/mikro/mikro1.pdf>
9. Zoltán Trócsányi: Super-weak force and neutrino masses. *Symmetry* 12/1 (2020) 107; <https://inspirehep.net/literature/1711779>
10. Sho Iwamoto, Timo J. Kärkäinen, Zoltán Péli, Zoltán Trócsányi: One-loop corrections to light neutrino masses in gauged  $U(1)$  extensions of the standard model. *Phys. Rev. D* 104/5 (2021) 055042; <https://inspirehep.net/literature/1861571>
11. Sho Iwamoto, Károly Seller, Zoltán Trócsányi: Sterile neutrino dark matter in a  $U(1)$  extension of the standard model. *JCAP* 01/01 (2022) 035; <https://inspirehep.net/literature/1860519>
12. Zoltán Péli, Zoltán Trócsányi: Vacuum stability and scalar masses in the superweak extension of the standard model. *Phys. Rev. D* 106 (2022) 055045; <https://inspirehep.net/literature/2067427>

**Magyar Fizikus Vándorgyűlés 2022**

**A Fizikai Szemle**

**kéri a Magyar Fizikus Vándorgyűlés előadóit**

**és a posztereket bemutatókat, hogy eredményeiket**

**osszák meg a folyóirat olvasóival is!**

# GÉPI TANULÁS A 21. SZÁZADI ASZTROFIZIKÁBAN

Szabó Róbert,<sup>1,2,3,4</sup> Szklenár Tamás,<sup>1,2,3</sup> Bódi Attila<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

<sup>2</sup>CSFK, MTA Kiváló Kutatóhely

<sup>3</sup>MTA CSFK, Lendület Lokális Kozmológia Kutatócsoport

<sup>4</sup>Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizikai Intézet

A gépi tanulás mindennapjaink részévé vált, használja a közösségi média, a bankszektor, a közlekedés és a telekommunikáció is. Nem tudjuk kikerülni: akkor is alkalmazzuk, hogyha azt tudatosan nem is ismerjük fel.

Ez alól a csillagászat és az asztrofizika sem kivétel. Sok esetben azt is mesterséges intelligencia szabályozza, hogy egy távcső vagy műszer mit mérjen éppen, nem is beszélve a különböző égitestek detektálásáról, klasszifikációjáról, a felvételek feldolgozásáról és arról, miként gyorsíthatjuk fel a hatalmas számításiigényű szimulációinkat.

E csendes forradalom érzékeltetésére végeztünk egy keresést a „gépi tanulás” kulcsszóra a csillagászati cikkek kivonataiban a NASA Astrophysics Data System<sup>1</sup> adatbázisa segítségével. Az ezredfordulón még csak 56, 2010-ben már 889, egy évtizeddel később pedig nem kevesebb, mint 35 659 kivonat tartalmazta ezt a varázsszót. Ez nem is csoda, hiszen a létező és a hamarosan megvalósuló csillagászati adatbázisok által tárolt adatmennyiség valóban csillagászati mértékű.

A Vera C. Rubin Observatórium „Legacy Survey of Space and Time” (LSST) égboltfelmérése 150–500 petabájt fotometriai adatot és képet gyűjt majd össze az optikai és a közel infravörös hullámhossztartományokban.

A kutatásokat a Magyar Tudományos Akadémia LP2018-7/2021 számú Lendület projektje támogatta.

<sup>1</sup>Lásd: <https://ui.adsabs.harvard.edu/>



Szabó Róbert a CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet igazgatója. Fő kutatási területe a pulzáló változócsillagok megfigyelése-modellezése. Továbbá galaktikus archeológiával, exobolygókkal, űrtávcsöves megfigyelésekkel és nagy égboltfelmérésekkel is foglalkozik. 2018-tól az MTA CSFK Lokális kozmológia Lendület-csoportot vezeti. A következő évtized egyik legfontosabb földfelszíni csillagászati projektje, a Vera Rubin Observatórium LSST égboltfelméréséhez csatlakozó magyar kutatók képviselője.



Szklenár Tamás szoftverfejlesztőként dolgozik Szabó Róbert Lendület-csoportjában. Érdeklődési területe a gépi tanulási módszerek és azok alkalmazásai. Emellett kettőscsillagokkal is foglalkozik. Szintén tagja az LSST Konzorciumnak.

Még nagyobb adatmennyiséggel számol a „Square Kilometer Array” rádióantenna-rendszer: a kutatók a tárolt mérések adatmennyiségét 2030-ra 5 zettabájtra<sup>2</sup> teszi. Ahhoz, hogy ezzel a hatalmas adatmennyiséggel lépést tartsunk és képesek legyünk feldolgozni, a gépi tanulási módszerek alkalmazása elkerülhetetlen. A téma mélysége miatt e cikkben csak néhány szubjektíven kiválasztott, érdekes területet említünk meg (1. ábra).

## Anomáliák keresése, az „ismeretlen ismeretlenek” felfedezése

A csillagászati kutatások egyik fő célja az új asztrofizikai jelenségek felfedezése. Az eddig nem ismert jelenségek több formában is megjelenhetnek: lehet az egy különböző felvételeken furcsa formákat felvett alakzat vagy a begyűjtött adatsorok között megbúvó különleges mérési eredmény.

A jelenleg futó égboltfelmérő programok, mint az Európai Űrügynökség Gaia asztrometriai missziója, a Pan-STARSS,<sup>3</sup> a ZTF<sup>4</sup> és a hamarosan induló LSST<sup>5</sup> különlegessége, hogy nem csak egy előre meghatározott objektumlistáról készít felvételeket vagy méréseket, hanem az összes objektumról, amely az adott műszer adottságait tekintve mérhető. E megfigyeléseknek köszönhetően olyan érdekesítő égitestek felfedezése vált lehetővé, mint például az ‘Oumuamua, az első csillagközi térből érkezett vándor, amely a Naprendszeren is keresztülhaladt, vagy a Boyajian-csillag (KIC 8462852), az „ismert Világegyetem egyik legrajtélyesebb csillaga”, amelynek fényességváltozásai annyira szokatlanok, hogy egy ponton magyarázatként felmerült egy idegen civilizáció által

<sup>2</sup>1 zettabájt = 1 milliárd terabájt

<sup>3</sup>Panoramic Survey Telescope And Rapid Response System, <https://panstarrs.ifa.hawaii.edu/pswww/>

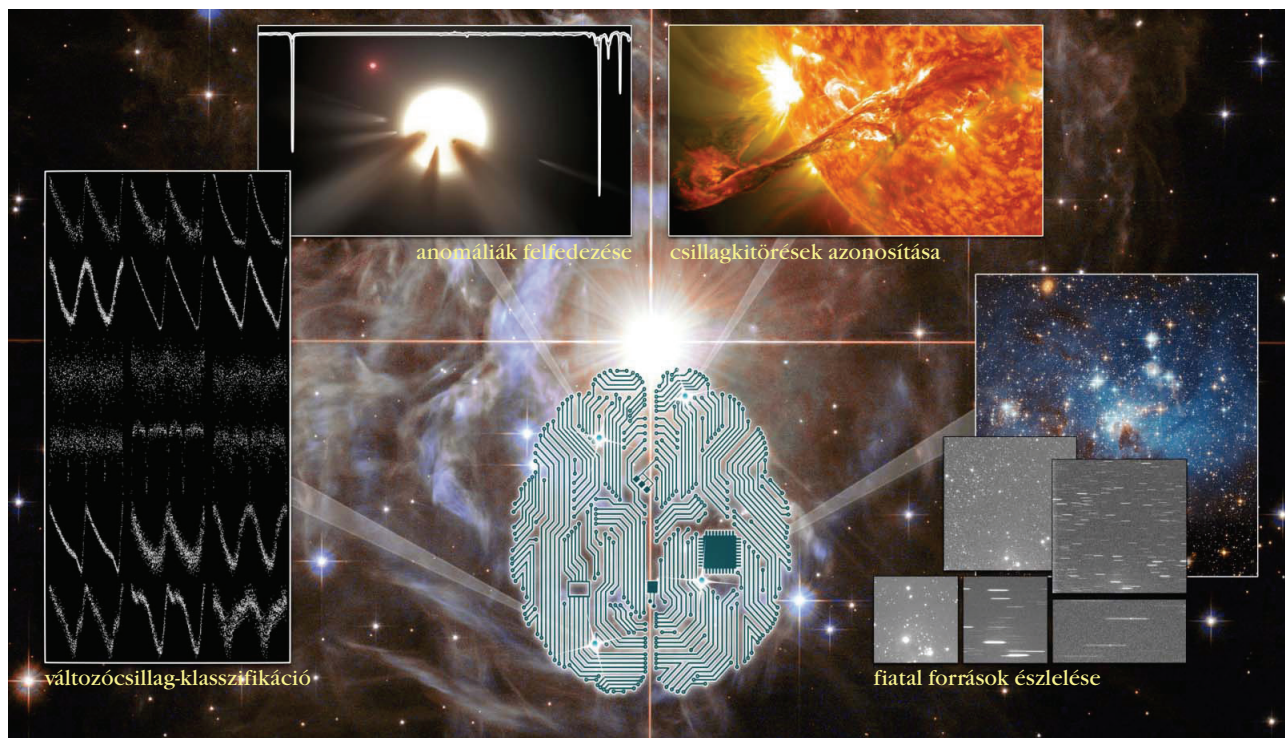
<sup>4</sup>Zwicky Transient Facility, <https://www.ztf.caltech.edu/>

<sup>5</sup>Vera C. Rubin Observatórium, Legacy Survey of Space and Time, <https://www.lsst.org/>



Bódi Attila a Csillagászati Intézet posztdoktori kutatója, Szabó Róbert Lendület-csoportjában dolgozik. Kutatási témái: változócsillagok, gépi tanulási és klasszifikációs módszerek. Az LSST Konzorcium tagja.





1. ábra. A gépi tanulás tipikus alkalmazásai a csillagászatban az objektumok detektálásán kezdve a klasszifikáción át az anomáliák kereséséig.

létrehozott megastruktúra is. Az exponenciálisan növekvő adatmennyiség emberek által történő feldolgozása az eddig megszokott manuális úton már nem kivitelezhető, így szükségessé vált olyan automatizált rendszerek kialakítása, amelyek képesek ellátni ezt a feladatot. Ez vezetett ahhoz, hogy immár a csillagászati kutatások is alkalmazzák a gépi tanulási módszereket, akár anomáliák keresésére is.

Az elmúlt években elvégzett kutatások példája mutatja ezen módszerek eredményességét. Egy kutatócsoport 2019-ben feldolgozta az Open Supernova Catalog<sup>6</sup> nyers adatait és olyan jelenségeket fedeztek fel az adatsorok között, amelyek rendkívül ritka szupernóva-szerű események, vagy nem is szupernóvák [1]. Egy másik csoport ugyanebben az évben új módszereket mutatott be a rendellenes röntgenforrások kimutatására nagy felbontású spektroszkópiát alkalmazva [2]. Megint mások 2021-ben előálltak egy módszerrel, amivel megtalálhatók az élhető zónában lévő exobolygók, „második Földek” [3]. Természetesen a millió dolláros kérdés az, hogy képesek vagyunk-e megtalálni a tűt a szénakazalban, azaz megtalálni és alaposan megvizsgálni azokat az érdekes és fontos – akár Nobel-díjas felfedezést érő – égitesteket, amelyek megbújnak olyan égboltfelmérő programok által létrehozott több milliárd adatsor között, mint amelyet az LSST projekt Chilében épülő, Charles Simonyiról elnevezett távcsöve<sup>7</sup> fog szolgáltatni néhány éven belül.

<sup>6</sup>Lásd: <https://sne.space/>

<sup>7</sup>Lásd: <https://noirlab.edu/public/programs/vera-c-rubin-observatory/simonyi-survey-telescope/>

## Klasszifikáció, avagy tanítsuk meg „látni” a számítógépet!

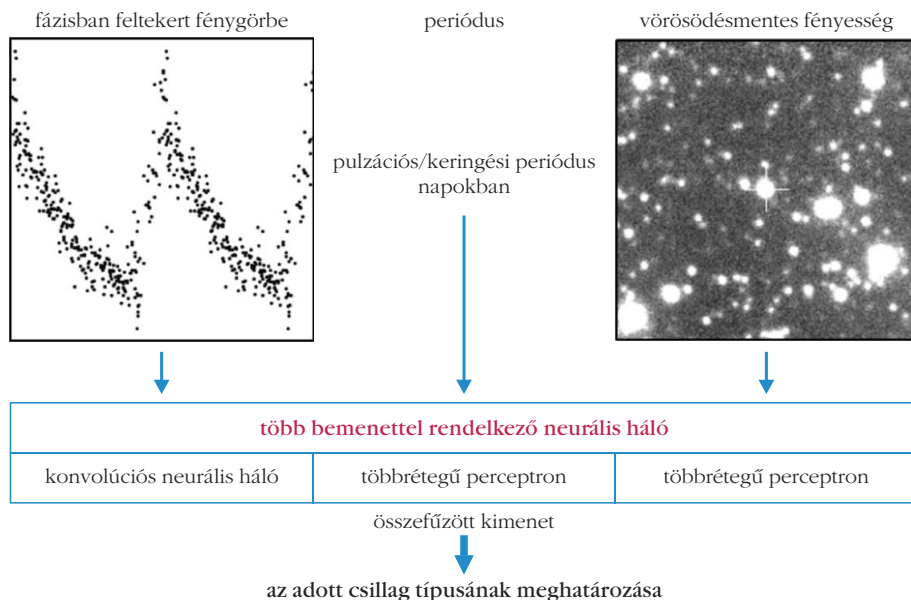
A nagy égboltfelmérő programok a különböző csillagokról, galaxisokról és más égitestekről milliónyi, sőt milliárdnyi felvételt, spektrumot, pozíciót és sajátmozgásadatokat gyűjtöttek be. Ahhoz, hogy értelmet adjunk ezen adatoknak, gépi segítségre van szükségünk. A csillagászatban használt gépi tanulási módszerek legfőbb kísérleti területe a klasszifikáció. Kézenfekvő például galaxisok képeit csoportosítani megjelenésük (alakjuk, spirálkarjaik száma, kölcsönhatók vagy torzultak-e stb.) alapján. Az asztrofizika másik fontos területe a változócsillagok tanulmányozása. Ezen égitestek fényessége időben változik, valamilyen külső (például fedés) vagy belső ok (pulzáció) miatt. Ezek a csillagok segítenek a csillagászati távolságmérésben, illetve általuk megérthetjük a csillagok belsejében lejárló folyamatokat, sőt, a galaxisok létrejöttéről és fejlődéséről is információt hordoznak. A csillagászok általában rendelkeznek az egyes csillagok fényességváltozásait jellemző fénygörbékkel.<sup>8</sup> A klasszifikáció történhet a fénygörbe alapján, akár manuálisan (ekkor egy kutató a számítógép előtt ülve egyesével végignézi a fénygörbét), akár mesterséges intelligencia alkalmazásával. Ez utóbbinál gyakori, hogy a fénygörbét jellemző matematikai paraméterek (átlag, szórás, nullátmenetek száma, egyéb statisztikai mennyiségek) alapján kategorizálnak az algoritmusok.

<sup>8</sup>Fénygörbe: fényesség változása az idő függvényében.

De mi történik akkor, ha a korábbi módszereket felváltjuk *képalapú* gépi tanulási eljárásokkal? Csoportunk éppen egy ilyen módszert publikált nemrégiben [4, 5]. Ebben nagy pontosságú algoritmust fejlesztettünk ki, hogy a különböző típusú változócsillagok fénygörbéit, *mint képeket* osztályozhassuk (2. ábra). Ha egy jól képzett csillagász dolgozik ilyen adatokkal, pusztán *a fénygörbe alakja alapján* nagy biztonsággal képes megmondani az adott csillag típusát. Ha további adatok is rendelkezésre állnak, mint például a fényességváltozás periódusa, a besorolás szinte tökéletes lesz. A folyamat viszont emberi időskálán nézve lassú, nagyságrendileg percnként csak néhány tucat fénygörbe azonosítása lehetséges és ez a tempó nem is tartható túl sokáig. Az általunk kifejlesztett módszerek motivációja pontosan az emberi agy működése volt, segítségével meg tudjuk közelíteni, sőt, akár túl is szárnyalhatjuk az emberi klasszifikáció pontosságát, mindezt olyan sebességgel, amely messze túlmutat az emberi képességeken. A létrehozott neurális háló, a „Multiple-input Neural Network” konvolúciós és sűrű rétegekből épül fel, képi és numerikus adatok együttes feldolgozását végzi el. Módszerünk képes megkülönböztetni a változócsillagok altípusait is, és néhány perc alatt fénygörbék képeinek millióit klasszifikálja. Így a csillagászok immár ténylegesen a kutatómunkára fordíthatják figyelmüket és nem kell az akár hónapokig is eltartó, igencsak unalmas klasszifikációs folyamatokat végezniük. Természetesen ahhoz, hogy ezek a gépi tanulási alapuló módszerek működjenek, szükség van emberek által egyszer már beazonosított, „felcímkézett” forrásokra.

## Objektumok érzékelése – hogyan különböztethetjük meg az égitesteket?

Mint sok más tudományterület, a csillagászat is nagymértékben támaszkodik a képkalkotó eszközökre. Az égboltfelmérő programok hatalmas adatmennyiséget állítanak elő – akár több terabájtot egyetlen éjszaka alatt –, amely szokásos módszerekkel emberi időskálán már nem feldolgozható. A gépi tanulási módszereket alkalmazva képesek vagyunk felismerni és csoportosítani Naprendszerünk üstököseit és aszteroidáit, a Világegyetem távoli galaxisait, sőt megtalálhatjuk saját csillagvárosunk, a Tejútrendszer halójában az általa mára bekebelezett törpegalaxisok maradványait is.

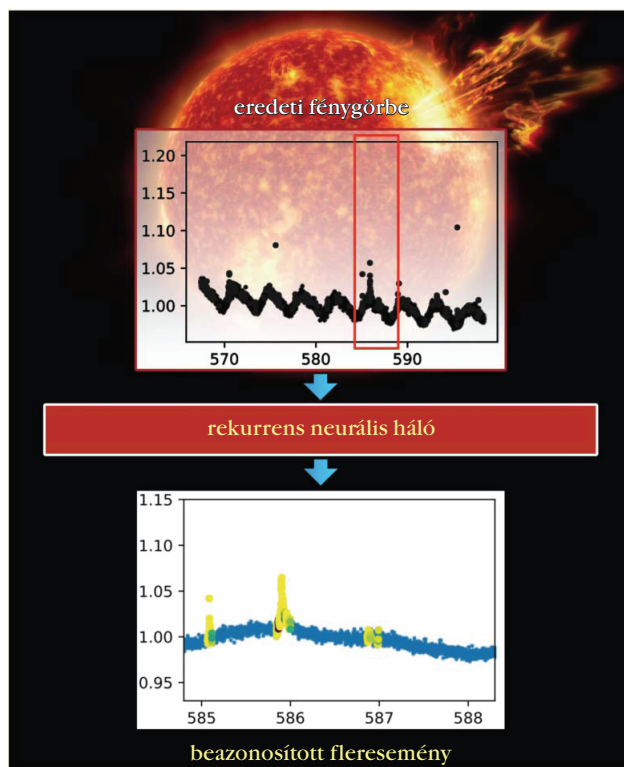


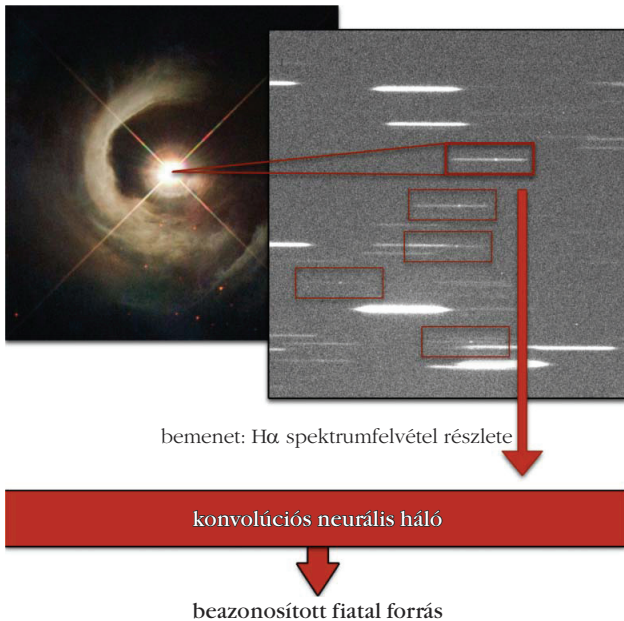
2. ábra. Periodikus változócsillag-fénygörbék képalapú osztályozásának sematikus rajza.

Vida Krisztián és társai [6] által kifejlesztett rekurrens neurális háló a TESS adatait elemezve azonosít be flereket (3. ábra). Ez többek között fontos információval szolgál az adott csillag működésével kapcsolatban, amely az exobolygó kutatások során is segít a kutatóknak a távoli, de élhető világok keresésében.

Egy másik alkalmazás a fiatal csillagforrások (Young Stellar Object, YSO) beazonosítása. Ezek az égitestek a csillagok fejlődésének korai stádiumában

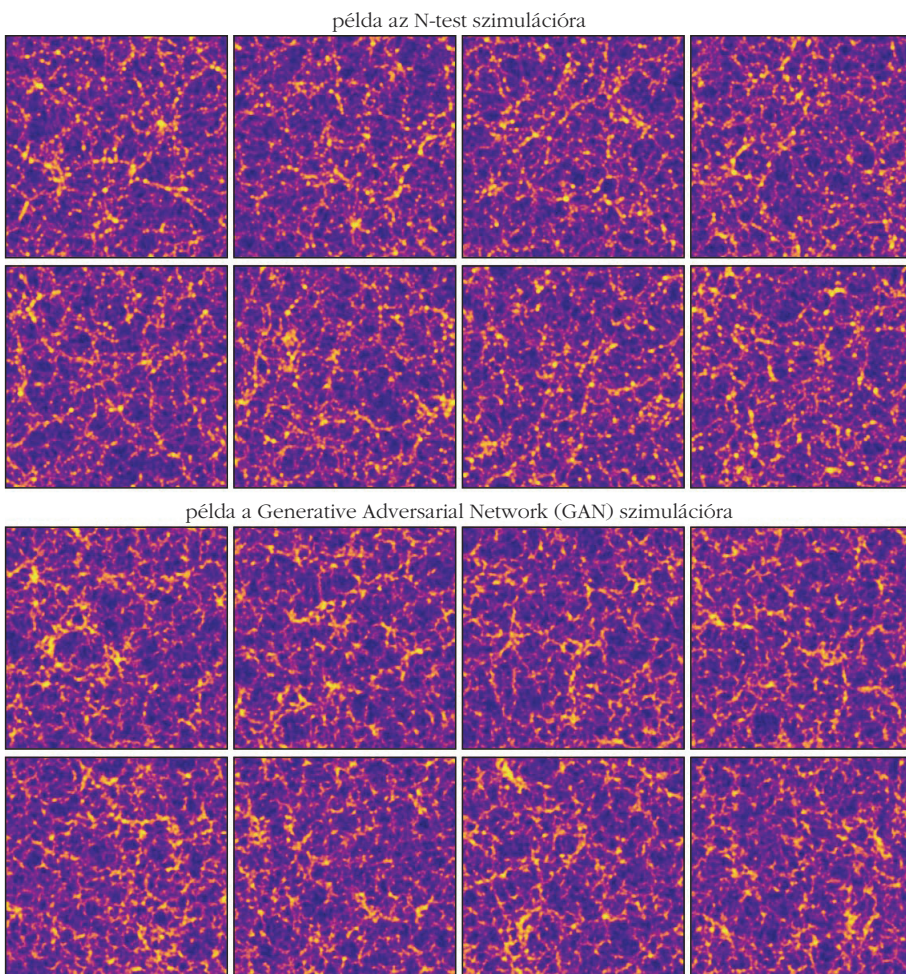
3. ábra. Csillagkitörések beazonosítása Kepler és TESS adatsorokban rekurrens neurális hálók használatával.





4. ábra. Fiatal csillagok képalapú azonosítása a H $\alpha$  emissziós vonal segítségével, konvolúciós háló használatával, alacsony felbontású spektrumokon.

5. ábra. A Rodríguez és társai által létrehozott GAN háló nagyságrendekkel képes meggyorsítani a rendkívül erőforrásigényes N-test szimulációkat, amelyekkel többek között Világegyetemünk szerkezetének fejlődési fázisait lehet modellezni.



találhatók, protocsillagok, vagy a fősorozati fejlődési állapot előtt állnak. Habár egy egyszerű felvételen ténylegesen csillagszerűek, spektrumuk erős emissziós vonalat mutat a H $\alpha$  hullámhosszán. Ilyen spektrumfelvételeket alkalmazva kifejlesztettünk egy olyan, szintén képalapú konvolúciós neurális hálót, amely nagy pontossággal képes ezen forrásokat megkülönböztetni a fősorozati csillagoktól (4. ábra).

## Hogyan turbózzuk fel numerikus szimulációinkat gépi tanulás segítségével?

A nagy kozmológiai szimulációk rendkívül erőforrásigényesek, hiszen több milliárd kozmikus részecske által kifejtett tömegvonzással számolnak, beleértve a sötét anyagot is. Ez annak ellenére is szűk számítási keresztmetszethez vezethet, hogy a szuperszámítógépek teljesítménye egyre nagyobb. Ez nem is csoda, hiszen ilyenkor az egész Világegyetemet modellezzük! A GAN hálózatok (Generative Adversarial Network) segíthetnek ebben a problémában [7]. Ez a gépi tanulási módszer képes olyan kozmikus szimulációkat generálni, amelyek gyakorlatilag megkülönböztethetetlenek a valós szimulációk-

től. Számításteljesítményben azonban hatalmas a különbség: egy GAN háló tizedmásodpercek alatt létrehozza azt, amihez hagyományosan több órányi szuperszámítógép-ido szükséges (5. ábra).

A kozmológia nem az egyetlen terület, ahol komplex szimulációkra van szükség. Az égi mechanikával kapcsolatos számítások is ide tartoznak. E számításokban sokkal kevesebb test hatását kell figyelembe venni, azonban esetleg évmilliárdos időskálán kell eldönteni, hogy egy adott bolygórendszer stabil marad-e vagy szétesik. Az elmúlt években felfedezett több mint 5000 exobolygó még sürgetőbbé teszi ezen tesztek elvégzését. Tetemes mennyiségű, több bolygóval rendelkező rendszerek mozgásainak direkt integrálása még a mai számítási kapacitás mellett sem megvalósítható. Ennek ellenére a gépi tanulási rendszerek akár 5 nagyságrenddel(!) is felgyorsíthatják ezt a folyamatot [8] azáltal, hogy fizikai jellegzetességeket (káoszindikátorok, mozgásrezonanciák, az excentri-

cításokban vett különbségek stb.) tanulnak meg a szimulációk kezdeti szakasza alapján. Ezeket használva a módszer pontos előrejelzéseket képes tenni az adott rendszerek évmilliárdokkal későbbi stabilitását illetően is.

## Összefoglalás

A mesterséges intelligencia alkalmazása – ahogy néhány példán keresztül megmutattuk – az asztrofizika szerves része lett, legyen szó akár galaxisok, távoli csillagok vagy exobolygók vizsgálatáról, akár ritka objektumok kereséséről az elképesztően hatalmas csillagászati adatbázisokban, akár égitestek milliárdjainak osztályozásáról, vagy összetett és bonyolult szimulációk futtatásáról. A bevezetőben is említett folyamat folytatódik, ezen módszerek beépülése a tudományba megállíthatatlan és hamarosan olyan általánossá válhat, mint egy függvény illesztése adatainkhoz, vagy egy Monte-Carlo-szimuláció végrehajtása.

A sikerek ellenére egy fontos probléma továbbra is fennáll, mégpedig az, hogy miként biztosítható a gépi tanulási döntések értelmezhetősége és az automatikus osztályozás vagy anomáliadetektálás mögött lévő fizika feltárásának lehetősége. Véleményünk szerint ez legalább ugyanennyire fontos, mint több millió objektum osztályozása másodpercek alatt, vagy a lehető legelősebb kép létrehozása a zajos megfigyelésekből. Marad tehát feladat a legújabb (asztro)fizikus nemzedéknek is.

## Irodalom

1. M. V. Pruzhinskaya, K. L. Malanchev, M. V. Kornilov és mtsai, *MNRAS* 489 (2019) 3591.
2. Y. Ichinohe, S. Yamada, *MNRAS* 487 (2019) 2874.
3. Y. Sarkar, K. Bhatia, S. Saha, M. Safonova, S. Sarkar, *MNRAS* 510 (2022) 6022.
4. T. Szklenár, A. Bódi, D. Tarczay-Nehéz és mtsai., *ApJL* 897 (2020) L12.
5. T. Szklenár, A. Bódi, D. Tarczay-Nehéz, K. Vida, Gy. Mező, R. Szabó, <https://arxiv.org/abs/2209.02310>
6. K. Vida, A. Bódi, T. Szklenár, B. Seli, *A&A* 652 (2021) A107.
7. A. C. Rodríguez, T. Kacprzak, A. Lucchi és mtsai., *Comp. Astrophysics and Cosmology* 5 (2018) 4.
8. D. Tamayo, M. Cranmer, S. Hadden és mtsai., *PNAS* 117 (2020) 18194.

## A FIZIKA TANÍTÁSA

# SCHLIEREN-KÉPALKOTÁS OKOSTELEFONNAL

Vavrik Márton – BME TTK, ELTE TTK, ELKH Energiatudományi Kutatóközpont

Vári Gergely Péter – Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium

A Schlieren-képalkotás (schliere: csík) egy sűrűségeloszlást vizualizáló technika. Cikkünkben bemutatjuk, hogyan lehet ezt a kísérletet laboratóriumi környezeten kívül is bemutatni, lehetőséget adva szélesebb közönségnek különböző optikai jelenségek megismerésére.

Schlieren-képalkotással vizualizálhatók a levegő sűrűségváltozásai, áramlásai, például egy gyertya lángja (1. ábra), izzóból felszálló meleg levegő, a lélegzet vagy köhögés maszkban és maszk nélkül, a kéz- és testmeleg, illetve bármilyen nagyobb, például dezodor vagy hajszárító által okozott légmozgás. A

módszer alkalmas üveglapok, átlátszó műanyag eszközök különböző gyártási hibáinak felfedezésére is. Ezeket igen nagy érzékenységgel mutatja ki.

## Kísérleti felállás

A módszerhez szükséges egy homorú gömb- vagy parabolatükör, amelynek kétszeres fókuszsíkjába egy fényforrást és egy kamerát helyezünk úgy, hogy a fényforrás fényét a kamera szenzorára fókuszáljuk (2. ábra). Ha közvetlenül a parabolatükör előtt bármi-



Vavrik Márton a BME Fizikus Msc hallgatója Nukleáris Technika specializáción. 2018 óta foglalkozik fúziós plazmafizikával, gyakornok az Energiatudományi Kutatóközpontban. Ezen kívül az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye magyar csapatának felkészítője és volt versenyzője, illetve az Ifjú Fizikusok Regionális Tornájának egyik főszerzője.



Vári Gergely Péter a Budapesti Fazekas Mihály Gyakorló Általános Iskola és Gimnázium tanulója természettudományi tagozaton. Az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenyének, illetve az Ifjú Fizikusok Osztrák Versenyének résztvevője. Az utóbbin 2022-ben a magyar csapat tagjaként harmadik helyeztként ezüstérmet szerzett.



1. ábra. Gyertyaláng hője által keltett áramlás egy általunk készített Schlieren-felvételen.

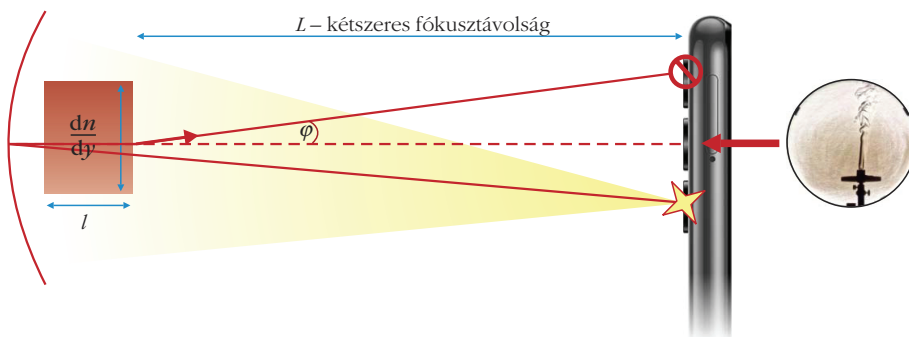
lyen törésmutató-gradienst hozunk létre, az a kamerára vetülő nyalábot enyhén kitéríti. Fontos, hogy ezt a tükrökhöz közel tegyük, mert így, amikor a fénysugár a másik irányba, a tükrö felé halad, a tükrö és a sűrűséggradiens közötti eltérés kicsi lesz, és ezzel elkerülhető a kép megkettőződése.

Ha a visszavert fénynyaláb egy részét kitakarjuk a fókuszpontban, például egy borotvapengével, az az eltérülő fénynyaláb intenzitására jobban/kevésbé hat, így a kamerában intenzitásbeli változásokat észlelhetünk.

## Kísérlet okostelefonnal

Ez – az általában laboratóriumban elvégzendő – kísérlet kivitelezhető mindösszesen egy parabolatükörrel és egy okostelefonnal. Így könnyebben szállítható és egyszerűbben bemutatható, hiszen egy testben van a szükséges fényforrás és kamera, illetve utóbbi kis apertúrája lehetővé teszi, hogy eltakarás sem szükséges a kísérlet elvégzéséhez, mert ezt maga az apertúra

2. ábra. A kísérleti összeállítás: az okostelefon vakuját a parabolatükörre irányítjuk úgy, hogy az a fényt a kamerába fókuszálja. Ha egy sűrűséggradienst helyezünk a tükrö elé, eltérül a fény és nem a kamerába érkezik vissza, fekete képet adva.



végzi el, ha a fényforrás fókuszált képét a kamera lencséjének szélére irányítjuk. Mivel a tükrö a teljes ráérkező fényintenzitást a kamerára fókuszálja, a kísérlethez sötétítés sem szükséges.

A kísérlet jól bemutatható a szinte bármely okostelefonnal, azonban a legtöbb parabolatükör fókusz távolsága átmérőjénél jóval nagyobb, tehát a kétszeres fókusz távolság alacsony térszög alatt látszódnak, és a telefonok főkamérája nagy látószögű, így a legtöbb esetben 3–10-szeres nagyítás mellett látni jól a tükröt. Ezért olyan okostelefont hasznos választani, amelyik kisebb látószögű lencsékkel is rendelkezik. Kísérleteinkhez a Samsung jóvoltából egy Galaxy S22 Ultra készüléket használhattunk, amelynek kamérája 10-szeres beépített optikai zoommal rendelkezik, így digitális zoom használat nélkül remek felvételeket tudunk készíteni. A támogatást ez úton is köszönjük.

A kísérlet elengedhetetlen része egy megfelelően pontos parabolatükör vagy homorú gömbtükrö, aminek nem kell hullámhossz-pontosságúnak lennie, de fontos, hogy elég pontos legyen ahhoz, hogy a pontforrás fényét egy, az apertúránál kisebb térfogatba fókuszálja. Borotválkozó tükrökkel is kísérleteztünk, de ezek túlságosan torzítottak. Felmerült, hogy saját tükröt készítsünk egy tálra fóliát kifestítve, majd a tálban csökkentve a légnyomást, a behorpadó fólia paraboloid felületet vesz fel.

## A bemutatás folyamata

A kísérletet a telefon kamerájával nézzük, és ez akkor a leglátványosabb, ha a hallgatóság élöben látja a kameraképet. Erre a legegyszerűbb és a legbiztosabb mód, hogy a telefont, annak csatlakozóján keresztül egy (például USB-C – HDMI) kábellel összekötjük egy megfelelő kijelzővel vagy vetítővel. Ha ilyen kábel nem áll rendelkezésre, egyes megjelenítők képesek vezeték nélkül is fogadni a telefon jelét. Ezt a funkciót remote display / cast / DeX néven találhatjuk. Ha ez sem működik, de egy laptopot rá tudunk csatlakoztatni a megjelenítőre, akkor a laptopra is hasonló funkciókkal küldhetjük a telefon képét, de egy remote access (például link to windows) alkalmazással elérhetjük róla a telefon teljes felületét, így képernyőjét is élöben láthatjuk. Ilyenkor viszont gyakran szaggat a kép, időben nem folytonosnak látjuk a telefon képernyőjét.

Vannak olyan alkalmazások (például droidcam) amelyek a telefont webkamera-ként használhatják, de ekkor körülményes a zoom és a kontraszt állítása.

A bemutatót kísérletekkel érdemes kezdeni, mert így azonnal felkelthető a hallga-

tóság érdeklődése. Ha már kivetítjük a telefon képernyőjét, és be akarjuk mutatni a kísérlet elméleti magyarázatát, például a fénysugarak útvonalát, akkor ezt prezentáció formájában tehetjük meg, amit a telefonon előadva nem kell bajlódniuk a kivetítéssel.

Azért is érdemes kísérletekkel kezdeni, mert előre be tudjuk állítani a kísérlet geometriáját, bár e folyamatnak is lehet ismeretterjesztő aspektusa: a telefont a tükörhöz közel helyezve a kamera képén kis torzítással látszódik az egész telefon. Kapcsoljuk be a vakut, és a tükörrel párhuzamosan, mozgatással úgy a telefont, hogy fénypontját a tükör közepén lássuk. Innen lassan távolabbra húzva, a fénypontot közepén tartva, látjuk, ahogy annak mérete folyamatosan nő, egészen addig amíg a kétszeres fókuszba érünk, ahol a teljes tükröt egyenletesen megvilágítva látjuk. Ezzel is szemléltethető a homorú tükör képalkotása.

Ilyenkor a vakuból a tükrre eső összes fény a kamerába érkezik, szükség lehet a kamera fényérzékenységének manuális beállítására, bár ezt általában automatikusan elvégzi. Ha fényintenzitás túl nagy a kamerának, használjunk a vaku előtt egy intenzitás-csökkentőt (például kormos üveget vagy egy vékony műanyagdarabot). Kísérleteinkhez ezeket 3D-ben nyomtattuk. A felállítás akkor működik a legjobban, ha a kétszeres fókuszban egy kicsit oldalra mozgatjuk, hogy a tükröt szürkének lássuk.

## Elvégezhető kísérletek

A leglátványosabb kísérlet egy gyertya vagy izzólámpa által felmelegített felszálló levegő áramlása. Gyertya esetében általában jól látszik a levegő lamináris-turbulens átmenete is.

A tükör elé egy üvegdarabot tartva (3. ábrán balra fent) láthatjuk az üvegdarab vastagságbeli egyenetlenségeit és belső feszültségeit, amelyek törésmutató-gradienseket okoznak.

Ha egy poharat meleg, illetve hideg vízzel (vagy jéggel) töltünk meg, az általa felmelegített vagy lehűlt levegő fel, illetve lefelé száll, hiszen sűrűsége eltér a környezetétől, és ez a Schlieren-képen látható.

Egy hajszárító által kifújott meleg levegő (3. ábrán balra lent), vagy eltérő sűrűségű gáz (3. ábra) is igen látványosan látható, és jól illusztrálható vele a turbulens viselkedés.

Ha elég pontos a kísérleti beállítás, látható az emberi testmeleg (3. ábrán jobbra lent) és lélegzés, utóbbi esetében demonstrálható a szájmászk hatékonysága is.

## A kísérleti összeállítás tulajdonságai

A kamera és a fényforrás igen közel találhatók egymáshoz, ezért az optimális beállításnál mindkettő közel van a tükör optikai tengelyéhez, a tükör kómatorzításai minimálisak, tehát szebb Schlieren-kép érhető el.

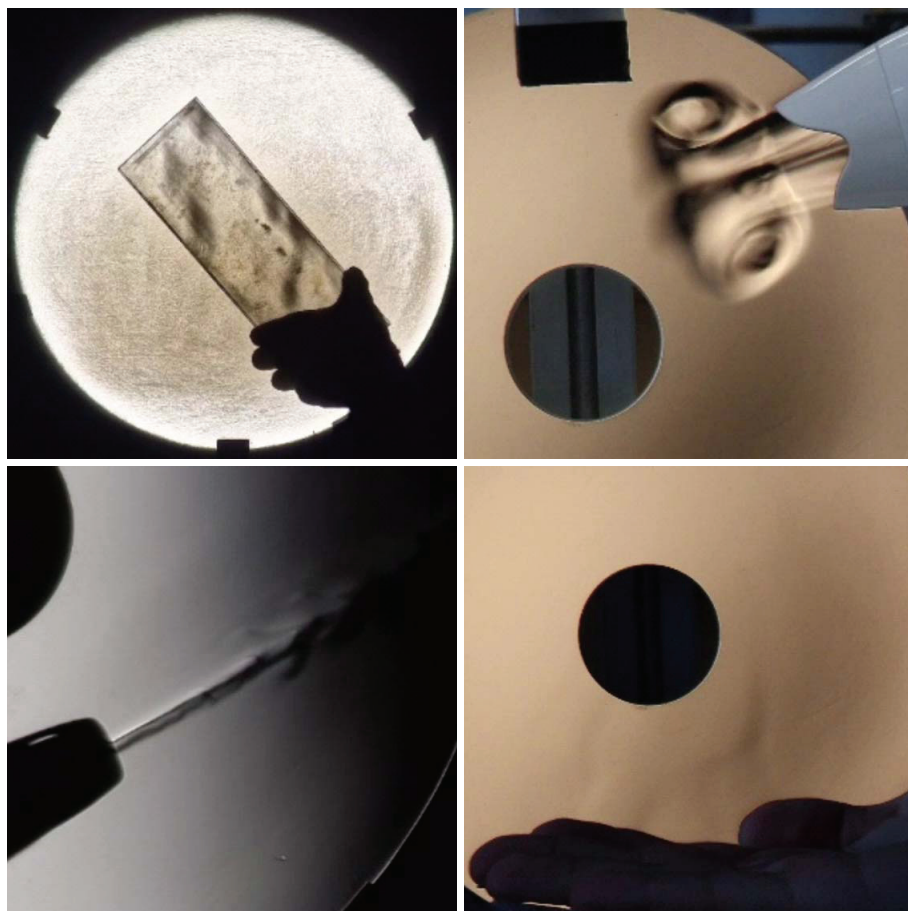
Ha nem jó minőségű a tükör, tehát a fókuszpont torzításai összemérhetők az eltérésekkel, a fényforrás képével vagy a kis apertúránkkal, a tükröt eleve nem teljesen megvilágítottként látjuk, és szinte lehetetlen jó Schlieren-képet létrehozni.

Kísérleteinkhez egy 20 cm átmérőjű, paraboloid teleszkóptükröt kaptunk kölcsön az OMI Optika Kft.-től, amit ezúton is köszönünk.

## Sűrűségrekonstrukció

Az elterülés egyenesen arányos a sűrűséggradienssel, ezért egy nem nulla méretű fókuszpont esetén az eltérés-intenzitás függvény a megfelelő tartományon mo-

3. ábra. Néhány elvégezhető kísérlet: üveglappal, hajszárítóval, meggyújtatlan gázgyújtóval és kézmeleggel.



noton lesz. Ha ezt az összefüggést kimérjük, az intenzitás alapján a kép pontjaiban rekonstruálható a sűrűséggradiens, annak segítségével pedig a sűrűségeloszlás.

Ez a rekonstrukció fontos több alkalmazáshoz, de nem elengedhetetlen része a kísérletnek, illetve megértése egy középiskolás számára igen nehéz lehet.

## Alkalmazások

A tényt, hogy Schlieren-képet okostelefonnal is lehet készíteni, az International Young Physicists' Tournament versenyre való készülés folytán fedeztük fel.

A versenyre való felkészülés során feladatunk volt meghatározni, mekkora forgatónyomatékat képes kifejteni egy hőforrás fölé függesztett papírspirál. Ehhez viszont elengedhetetlen volt a sebességtér tulajdonságainak meghatározása. Az elkészített felvételeket elemezve azt állapítottuk meg, hogy az általunk vizsgált tartományban a levegő konstans vertikális sebességgel rendelkezik. A módszert német üveggyártó mesterek fejlesztették ki síkúvegek egyenletességének ellenőrzésére, és erre használják ma is, például az autóiparban.

Egyikőnk MSc diplomamunkájának témája is az eljáráshoz kapcsolódik: az Energiatudományi Kutatóközpontban az ITER fúziós berendezéshez szállítandó, fagyasztott hidrogénpelletteket kilövő berendezés (SPI) fejlesztése során akarjuk meghatározni a kiszabaduló gyorsítógáz mennyiségét és térbeli eloszlását, hogy minimalizálhassuk azt.

## Összefoglalás

Úgy gondoljuk, hogy a Schlieren-képkeltés okostelefonnal történő elvégzése sok lehetőséget ad különböző optikai jelenségek széles körben történő megismerésére, köztük több középiskolás számára is jól bemutatható.

A kísérleteink során készült videók elérhetők a <https://youtube.com/playlist?list=PLoi9kVsM6Zh6d16vunD1HasHÜoCM-vI0R> címen, ami az itt látható QR kód segítségével megnyíló lejátszási lista. Amennyiben kérdése van, vagy csak felkeltettük érdeklődését, bizalommal írjon a [vavrik.marton@reak.bme.hu](mailto:vavrik.marton@reak.bme.hu) e-mailcímrre!



# EGY APRÓ JÁTÉK KAOTIKUS KALANDJAI – 2. rész

Végh Péter – Vistatec

Izsa Éva – Budapest-Fasori Evangélikus Gimnázium

## A konzervatív eset

Eddig azt az esetet vizsgáltuk, amikor csak az egyik súrlódó spinner forgott szabadon, a másikat pedig mi forgattuk állandó szögsebességgel, ezzel „gerjesztve” az elsőt. A számítógépes szimulációval azonban megvizsgálhatjuk azt az esetet is, amit a valóságban nem tudunk előállítani, azaz amikor mindkét spinner szabadon foroghat, és nincs súrlódás. Ez már teljesen konzervatív mozgás.

A cikk szerzői köszönetet mondanak *Tél Tamás* tanár úrnak, akinek kitartása, biztatása, támogatása, segítsége nélkül a cikk nem jöhetett volna létre. Ugyanígy köszönettel tartozunk *Nagy Péter* tanár úrnak a Dynamic Solver program megismeréséért.



*Végh Péter* a Debreceni Egyetem fizikus szakán szerzett diplomát, majd műfordítóval, később pedig szakfordítóval foglalkozott. Jelenleg a Google-nak dolgozik nyelvi lektorként.

Mivel ezt a mozgást a valós spinnerekkel nem tudjuk bemutatni, így a videofelvétel helyett erről a „kísérletről” egy, a program által szimulált változatot nézhetünk meg.<sup>5</sup>

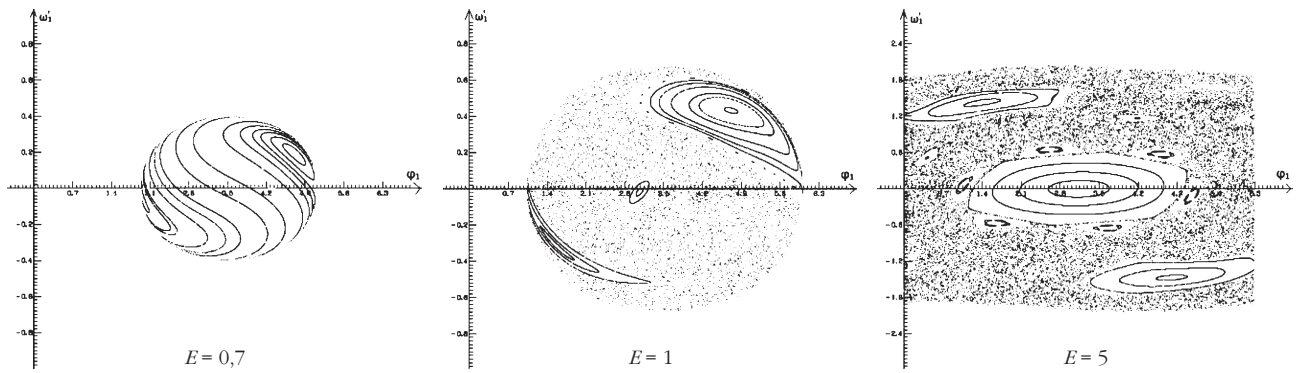
Ilyen esetben a rendszer mozgását a (2) és (3) egyenletek írják le, és a rendszer állapotát négy változó jellemzi ( $\varphi_1$  és  $\varphi_2$ ,  $\omega'_1$  és  $\omega'_2$ ), a fázistér pedig 4 dimenziós.

Egy 4 dimenziós teret azonban elég nehéz lenne ábrázolni, ezért itt is „trükkökhöz” folyamodunk.

<sup>5</sup>A program által szimulált mozgás: <https://youtu.be/-b5sxJ4hwk4>



*Izsa Éva* azt ELTE-n szerzett matematika-fizika majd informatika szakos tanári diplomát. Jelenleg az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása programjának hallgatója, a Budapest-Fasori Evangélikus Gimnázium és a Pestszentlőrinc-Pestszentimrei Felnőttek Általános Iskolája és Gimnáziuma tanára.



11. ábra. Állandó energiájú rendszerek (A Dynamic Solver program által szolgáltatott ábra.)

A grafikonok kezdőfeltételei:

$E' = 0,7$

$\varphi_{10}$	5,01	3,71	3,42	4,93	5,00	4,76	3,75	4,25	2,60	2,09	2,18	2,57	2,37	2,08
$\omega'_{10}$	0,00	-0,25	0,30	0,07	-0,04	0,15	0,32	-0,35	0,28	0,10	0,17	-0,22	-0,17	-0,12

$E' = 1$

$\varphi_{10}$	1,99	2,92	3,11	3,64	1,67	4,14	4,59	5,81	3,00	1,32	2,32	3,26	3,96
$\omega'_{10}$	0,28	-0,08	0,52	0,48	-0,39	0,46	0,44	0,1	-0,03	-0,22	-0,46	0,49	0,47

$E' = 5$

$\varphi_{10}$	6,08	1,74	0,44	1,85	3,72	5,68	2,51	2,76	5,18	4,14	1,07	4,52	3,02
$\omega'_{10}$	-1,15	0,42	1,27	0,21	-0,23	-1,33	0,68	1,52	1,76	1,17	1,48	-1,49	-0,14

Első lépésként gondoljunk arra, hogy ha a rendszer konzervatív, és elindítjuk valamilyen kezdőállapotból, akkor csak olyan pontokat járhat be, amelyekben a teljes energiája megegyezik a kezdeti energiával. Vagyis a mozgás fázistérbeli trajektóriája végig egy olyan pont-halmazon, olyan „hiperfelületen” marad, amihez egy konkrét energiaérték tartozik. Ezért az ábrázolásnál mindig egy ilyen konkrét energiájú felület vizsgálatára szorítkozunk. Csak olyan kezdőhelyzetekből indítsuk el a rendszert, amelyek ugyanahhoz az  $E$  energiához tartoznak. Biztosak lehetünk abban, hogy a rendszer a későbbiekben sem fogja elhagyni ezt az  $E$  energiájú felületet, hiszen konzervatív, így a különböző kezdő-pontokból indított mozgások mind ugyanazon a hiperfelületen maradnak, és jól összehasonlíthatók.

A négy kezdeti változó,  $\varphi_{10}$  és  $\varphi_{20}$ ,  $\omega'_{10}$  és  $\omega'_{20}$  egyértelműen meghatározza az energiát. Tekintsük ezt az energiát a rendszer egy paraméterének, és fejezzük ki belőle az egyik változó kezdeti értékét ( $\omega'_{20}$ -at).

A rendszer energiaegyenlete:

$$E = \frac{1}{2} m r^2 (\omega_1^2 + \omega_2^2) + \frac{k Q^2}{r \sqrt{\left(\cos \varphi_1 - \cos \varphi_2 - \frac{d}{r}\right)^2 + (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2)^2}}$$

Az egyenlet jobb oldalának első tagja a két spinner forgási energiája, a második tag pedig a töltések köz-

ti kölcsönhatási energia (vagyis az elektrosztatikus potenciális energia).

Dimenziótlanjuk az energiát is, legyen  $E = E' \varepsilon$ , ahol  $\varepsilon$  a rendszer karakterisztikus energiája,  $E'$  pedig már egy dimenziótlán szám. A részletes levezetésből kiderül, hogy  $\varepsilon$ -t érdemes így választani:

$$\varepsilon = \frac{k Q^2}{2 r}$$

Ezek felhasználásával adódik, hogy:

$$\omega'_{20}{}^2 = E' - \omega'_{10}{}^2 - \frac{2}{\sqrt{(\cos \varphi_{10} - \cos \varphi_{20} - D)^2 + (\sin \varphi_{10} - \sin \varphi_{20})^2}}$$

Vagyis az  $\omega'_{20}$ -at sikerült kifejeznünk a rendszer (dimenziótlanjított) energiájával.<sup>6</sup> Mostantól tehát az  $\omega'_{20}$  megadására nincs szükség, helyette az energiát használjuk paraméterként.

Egy állandó energiájú felületet kiválasztva tehát egy 3 dimenziós altérhez jutunk, azonban ennek az

<sup>6</sup>Az energiaegyenlet és az energia dimenziótlanjításának részletes levezetése: <https://sites.google.com/view/spinner-cikk/tartalom/9-energiaegyenlet-az-energia-dimenzi%C3%B3tlanj%C3%ADt%C3%A1sa>





ábrázolása sem könnyű egy 2 dimenziós felületen. Ezért próbáljuk a dimenziószámot tovább csökkenteni. Ehhez az úgynevezett *Poincaré-metszetet* [8] használhatjuk. Ami azt jelenti, hogy nem a teljes, 3 dimenziós alteret fogjuk ábrázolni, csupán annak egy síkmetszetét. Vagyis csak azokat a pontokat, amelyekben a mozgás trajektóriája átdöf egy adott síkot. (Jelen esetben azt a síkot választottuk, amelyben a második spinner  $\varphi_2$  értéke éppen  $\pi/2$ ).

Miért hasznos ez az ábrázolás? Mert ha egy mozgás periodikus, akkor ismételten ugyanabban a pontban fogja metszeni a síkot, mint korábban. Ha a síkmetszet zárt görbe, akkor ez kváziperiodikus mozgást jelent. Ha a megjelenő pontok semmiféle szabályosságot nem mutatnak, akkor pedig a rendszer mozgása kaotikus, ahogy a stroboszkopikus metszeten (9. ábra) is tapasztaltuk.

A 11. ábráson különböző energiájú rendszereket mutat be. Egy adott energiánál több különböző kezdőállapotból indítottuk a rendszert ahhoz, hogy a képen látható ábrákat kapjuk.

Megfigyelhetjük, hogy az energiát növelve a rendszer mozgása kezdetben egy zárt tartományra korláto-

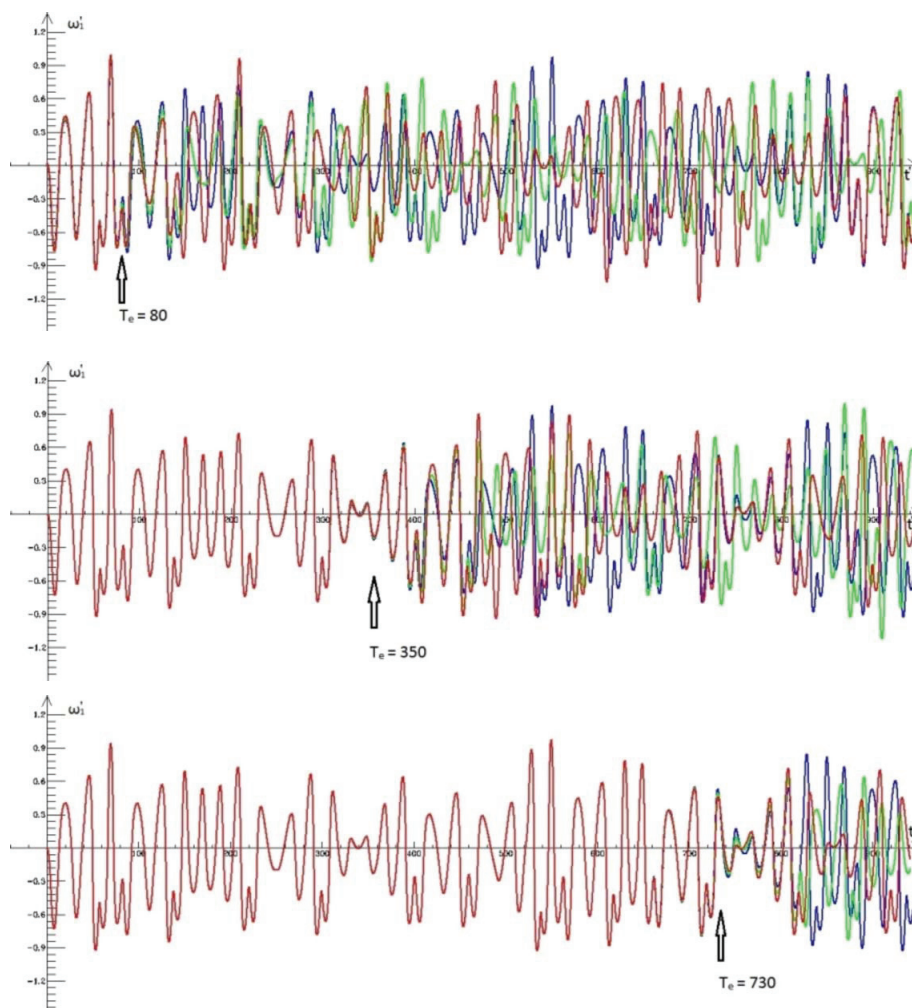
zódik, ami növekszik, majd a zártság megszűnik. Utóbbi azt jelenti, hogy a vizsgált spinner a mozgása során „átfordul”, míg az előbbi esetben a szögelfordulás megmarad a  $0-2\pi$  vagy még szűkebb tartományban.

Az is látható, hogy az első esetben egyáltalán nincsenek kaotikus tartományok. Ezért megfogalmazhatjuk azt a gyanút, hogy a mozgás kis energiákon nem kaotikus, hiszen a döféspontok nem véletlenszerűen jelennek meg a Poincaré-metszeten, hanem kizárólag zárt görbék mentén helyezkednek el. Az energiát növelve a rendszer kaotikussá válik, a síkon egyre meghatározóbb lesz a véletlenszerű pontok tartománya. De a síkon nemcsak a kaotikus tartomány növekszik, hanem azon szigetek száma is, amelyekben a mozgás kváziperiodikus.

## A pillangóeffektus mérőszáma

Korábban már volt szó arról, hogy a káosz egyik legjellemzőbb tulajdonsága a kezdeti feltételekre való rendkívüli érzékenység. Ez mind a konzervatív, mind a disszipatív káoszra igaz. Most ismét vizsgáljuk a disszipatív (súrlódásos) esetet!

12. ábra. Néhány fáklyadiagram, rendre  $\Delta\omega'_{10} = 10^{-2}$ ;  $10^{-6}$  és  $10^{-10}$  kezdőérték-eltéréssel. A további közös értékek:  $D = 2,4$ ;  $k = 0,02$ ;  $\varphi_{10} = 0$ ;  $\varphi_{20} = 0$ ;  $T'_{20} = 20$ ;  $\omega'_{10} = 0 + \Delta\omega'_{10}$ . (A Dynamic Solver program által szolgáltatott ábra.)



A kezdeti feltételekre való érzékenység szemléletes kimutatására a 4. ábrán kívül az úgynevezett *fáklyadiagramot* is alkalmazhatjuk. Ez nem más, mint több idődiagram egymásra rajzolva, amelyekben a kezdeti feltételek csak nagyon kis mértékben térnek el. Mi most a gerjesztett spinner  $\omega'_1$  szögsebességét ábrázoltuk az idő függvényében (12. ábra). Az egymásra rajzolt 3 különböző színű diagramhoz tartozó mozgások anynyiban különböznek egymástól, hogy a kezdeti szögsebességük ( $\omega'_{10}$ ) kismértékben eltérő. Az első diagramon például a 3 mozgás kezdeti  $\omega'_{10}$  értéke rendre: 0; 0,01 és 0,02, vagyis az egyes görbék  $\omega'_{10}$  értékének eltérése  $\Delta\omega'_{10} = 10^{-2}$ . Ugyanez az eltérés a 2. diagramon már csak  $10^{-6}$ , a 3. diagramon pedig mindössze  $10^{-10}$ . (A kísérletsorozatban használt paraméterek és kezdőértékek:  $D = 2,4$ ;  $k = 0,02$ ;  $\varphi_{10} = 0$ ;  $\varphi_{20} = 0$ ;  $T'_{20} = 20$ ;  $\omega'_{10} = 0 + \Delta\omega'_{10}$ .)

Azt látjuk, hogy a közeli kezdőfeltételekből indított mozgások grafikonjai egy ideig egymáson haladnak, majd egy idő után hirtelen szétválnak egymástól. Minél kisebb a kezdőfeltételek  $\Delta\omega'_{10}$  eltérése,

annál később történik meg ez a szétválás. A szétválás előtt minden mozgás hasonló, vagyis a jelenség a szétválásig jelezhető előre. Ezt a szétválási időt nevezik *előrejelzési időnek* (a grafikonokon  $T_e$ ), és a pillangóeffektus ettől kezdve érvényesül szembeszökően.

Ezt felismerve a fákljadiagramot felhasználhatjuk arra is, hogy kvantitatív állítást fogalmazzunk meg a mozgások széteséséről, azaz megpróbáljuk meghatározni, hogy milyen összefüggés van a kezdeti eltérés nagysága és az előrejelzési idő között.

A 13. ábra grafikonján azt ábrázoltuk, hogy különböző  $\Delta\omega'_{10}$  értékek esetén mennyi idő telik el addig, amíg a grafikonok szétválása már szabad szemmel is jól kivehető, ami körülbelül  $\Delta\omega' = 0,05$  eltérést jelent a görbék között. 10 ilyen fákljadiagramot készítettünk exponenciálisan csökkenő  $\Delta\omega'_{10}$  értékekkel  $\Delta\omega'_{10} = 10^{-2}$ -től  $10^{-11}$ -ig, amelyekből a 12. ábrán 3 látható, ezeken az előrejelzési idők értéke körülbelül 80, 350, és 730 időegység, de a 13. ábra mind a 10 eset adatait tartalmazza.

A 13. ábra grafikonjából azt látjuk, hogy az összefüggés exponenciális jellegű, hiszen a kapott görbe jó közelítéssel egy egyenes, amikor a vízszintes tengelyt logaritmikusan vettük fel.

Ennek értelmezéséhez felidézzük a különbségek növekedésére kaotikus rendszerekben jellemző összefüggést [8., 5.4.2. egyenlet]:

$$\Delta\omega'_1(t') = \Delta\omega'_{10} e^{\lambda t'}. \quad (5)$$

Ez az egyenlet azt fejezi ki, hogy ha a rendszert két különböző, egymáshoz közeli állapotból indítjuk, akkor a  $\Delta\omega'_1(t')$  eltérés az idővel exponenciálisan növekszik. De az eltérés arányos magával a  $\Delta\omega'_{10}$  kezdeti eltéréssel is. A kitevőben szereplő  $\lambda$  állandó a rendszer úgynevezett *Ljapunov-exponense*. Ez határozza meg az eltérés növekedésének ütemét, vagyis ez az állandó fejezi ki, hogy a rendszer mennyire kaotikus, mennyire erősen érvényesül benne a pillangóeffektus.

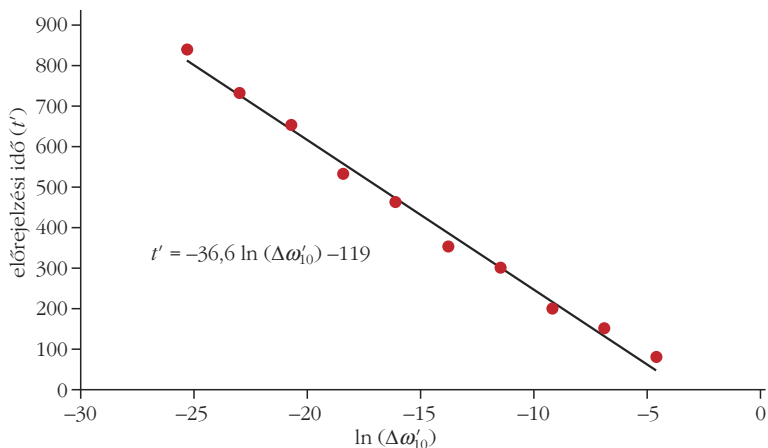
A 13. ábráról leolvasható, hogy a pontok jó közelítéssel egy egyenesre illeszkednek, amelynek egyenlete:

$$t' = -36,6 \ln(\Delta\omega'_{10}) - 119.$$

Ha az (5) egyenletet úgy alkalmazzuk, hogy benne  $\Delta\omega'_1(t')$  az a különbség, amit már szabad szemmel is fel tudunk ismerni az ábrán,  $t'$  pedig az ehhez tartozó időpont (azaz az előrejelzési idő), akkor átrendezve a következőt kapjuk:

$$t' = -\frac{1}{\lambda} \ln(\Delta\omega'_{10}) + \frac{1}{\lambda} \ln(\Delta\omega').$$

Ez az összefüggés előrejelzés időként ismert az irodalomból, a Ljapunov-exponens és a kezdeti különbség közötti kapcsolat (lásd például (5.58) [8]-ban).



13. ábra. Az előrejelzési időkből és a kezdeti különbségekből kapott grafikon. (A Dynamic Solver program által szolgáltatott ábra.)

A két egyenletet összehasonlítva leolvasható, hogy

$$\frac{1}{\lambda} = 36,6.$$

Vagyis

$$\lambda = 0,027.$$

Érdekeség, hogy a  $\Delta\omega'$  (a szabad szemmel észrevehető eltérés) szubjektív érték, de a fenti módon számolt Ljapunov-exponens nem függ ennek nagyságától. Ami nem meglepő, hiszen a Ljapunov-exponens magát a rendszert jellemzi, így független kell legyen a vizsgálat módszerétől.

## Konklúzió

Egy egyszerű, hétköznapi játékon keresztül tudtunk nagyon érdekes fizikai jelenségeket bemutatni, vizsgálni. Az egyszerű kísérletek, maga az eszköz bármelyik órán bemutatható, a jelenségek vizsgálatának mélységét már az adott csoport tudásához, érdeklődéséhez igazíthatjuk. A spinnerek külön érdeme, hogy teljesen átlagos, hétköznapi eszközként lehetőséget adnak egy olyan jelenséggel – a káosszal – való ismerkedésre, amely a középiskolai tananyagban nem része, de mindennapjainkban szinte mindenhol jelen van.

Bár a differenciálegyenletek nem a hétköznapi órák részei, maga a szoftveres szimuláció azonban bemutatható a diákoknak anélkül is, hogy a mozgásegyenletek levezetésébe vagy akárcsak felírásába mélyebben belemennénk. Emellett a szoftver alkalmas a teljesen egyszerű, tanórai példák szimulálására is.

A konzervatív káosz vizsgálatánál megállapítottuk, hogy mint a legtöbb ilyen káosz esetében, itt is létezik a fázistérben kaotikus és nem kaotikus tartományok, amelyek jól elkülönülnek egymástól és nem átjárhatók. A disszipatív gerjesztett káosznál pedig megjelentek a kaotikus attraktorok.

Végezetül megadtunk egy módszert a Ljapunov-exponens egyszerű becslésére a fákljadiagramok segítségével.

# A GRAVITÁCIÓS HULLÁMOK BEMUTATÁSA

## KÖZÉPISKOLÁSOKNAK – 1. rész

### Nemzetközi példák

Molnár András – Német Nemzetiségi Gimnázium, Budapest  
Raffai Péter – ELTE TTK Fizikai Intézet

A gravitációshullám-kutatás napjainkban a fizika, különösen az asztrofizika egyik legújabb és legnagyobb jelentőségű területe, így tanításával és a társadalomhoz való eljuttatásával fontos foglalkozni. Oktatási szempontból különösen előnyös, hogy ezen keresztül lehetőség nyílik a fizika komplex bemutatására, mivel a különböző folyamatok a középiskolai tananyag jelentős részéhez kapcsolódnak. E kurrens téma kapcsán előkerül a geometriai optika, a hullámok jellemzői, a csillagászat, az interferencia, a perdületmegmaradás, az elektromágneses hullámok de még a Brown-mozgás is.

A kétrészes cikksorozatunk első részében bemutatjuk, hogy milyen nemzetközi (angol nyelvű) példák vannak a téma bemutatására. A második részében ismertetni fogunk egy általunk készített online kurzust, amely átfogó képet hivatott adni a gravitációshullám-csillagászatról.

### Mik a gravitációs hullámok?

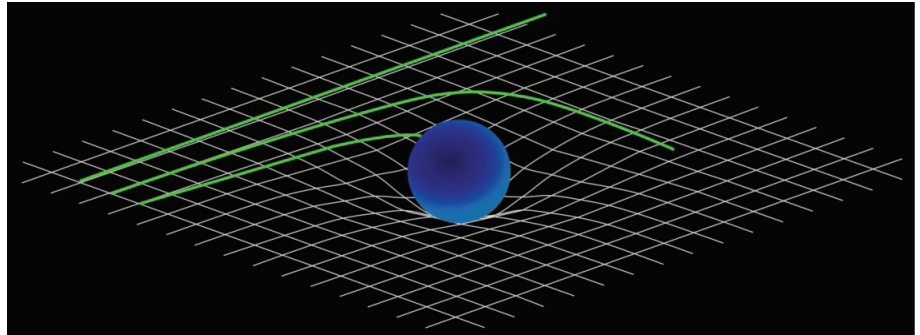
Albert Einstein számításai után száz évvel, 2017-ben kapta meg a fizika Nobel-díjat a gravitációs hullámok felfedezéséért a *LIGO–Virgo Collaboration* három prominens képviselője: *Barry Clark Barish*, *Kip Stephen Thorne* és *Rainer Weiss*.



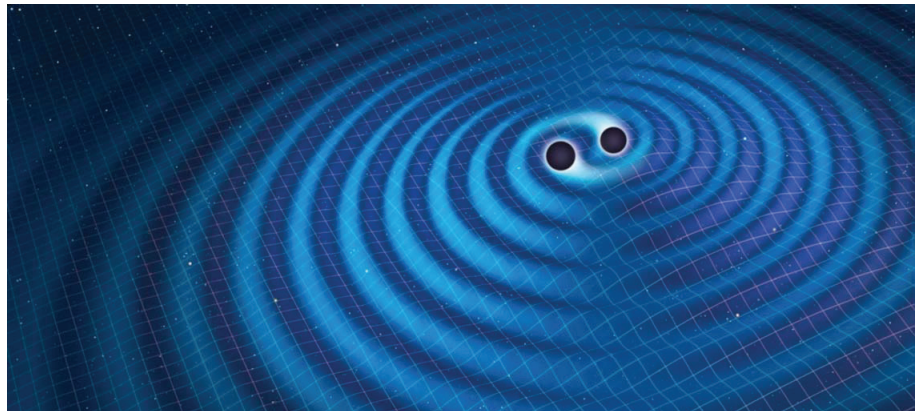
*Molnár András* harmadéves doktorandusz az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Programjában. 2016 óta a Német Nemzetiségi Gimnázium fizikatanára. A LIGO–Virgo–KAGRA Collaboration nemzetközi kutatói együttműködés tagja, amely a gravitációs hullámok 2015-ben történt első közvetlen észlelését is jegyzi. Kutatási témája a gravitációshullám-asztrofizika tanítása középiskolában, valamint a fizika népszerűsítésének lehetőségei.



*Raffai Péter* asztrofizikus az ELTE Fizikai Intézetének adjunktusa. 2007 óta a LIGO–Virgo–KAGRA Collaboration tagja. Kutatásában gravitációshullám-források modellezésével, adatfeldolgozó módszerek fejlesztésével és gravitációshullám-detektorok adatainak kiértékelésével foglalkozik. Szakmai érdeklődésébe a gravitációs hullámok asztrofizikai és kozmológiai alkalmazásai, valamint a többcsatornás csillagászat tartozik.



1. ábra. A tömeggel rendelkező testek körül meggörbül a téridő, így az egyenes vonalú mozgás fogalma megváltozik [1].



2. ábra. Bespiráló fekete lyukak által keltett gravitációs hullámok [2].

Az általános relativitáselmélet alapjaiban szakít a gravitáció newtoni felfogásával. Ennek értelmében a tömeggel rendelkező testek között nem lép fel gravitációs erő, hanem a téridő geometriáját változtatják meg, meggörbítve azt. Azaz a tömegek körül az idő és a távolságok torzulnak, így a többi test egy torzult koordináta-rendszerben mozog (1. ábra). Ezt látjuk úgy, mintha a gravitációs erő befolyásolná a testek mozgását.

A téridő görbülete nem statikus, a tömegek mozgásából adódóan folyamatosan változik. Az ilyen zavarok hullámként terjednek a téridőben, ezeket nevezzük gravitációs hullámoknak (2. ábra).

Két térpont között áthaladva a gravitációs hullámok összehúzzák és megnyújtják a pontok közti távolságot. Transzverzális hullámok lévén a haladási irányra merőleges síkban, váltakozva egy adott irányban nyúlást és rá merőlegesen összehúzódást okoznak. E hatást az interferométerek segítségével

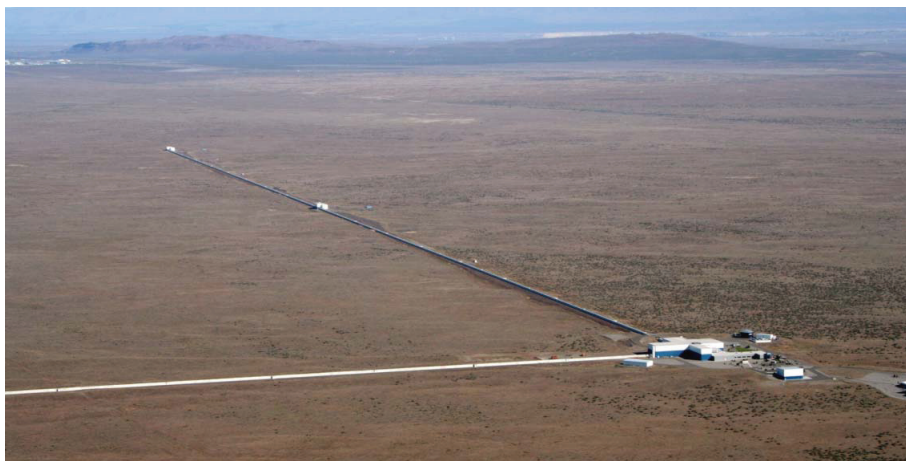
ki lehet mutatni. E gravitációs hullám annál nagyobb hosszváltozást okoz az interferométer karjaiban, minél hosszabbak azok. A *Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory* (LIGO) esetén a karok hossza 4 km (3. ábra), amelyekben a nyalábok több százszor oda-vissza pattognak, így növelve meg a hatásos karhosszt. A műszer ezzel képes kimérni azt, ha a karok egymáshoz képesti hosszváltozása egy atommag méretének tízezred részével egyenértékű! Ilyen érzékenységre szükség is van, hiszen a beérkező hullámok tértorzító hatása még egy közeli, a Napéhoz mérhető tömegű testek fénysebességhez közeli mozgásánál is csak ilyen kicsiny mértékű. A mérés precizitásából adódóan rendkívül nagy jelentősége van a zajszűrésnek, hiszen a detektorok környezetében minden apró rezdülésnek erősebb hatása lehet, mint egy elhaladó gravitációs hullámnak.

A jelenlegi detektorok a 30–3000 Hz frekvenciájú gravitációs hullámok észlelésére alkalmasak. A gravitációs és a hanghullámok között sok analógiát lehet felfedezni (például az emberi hallástartomány lefedi a detektorok frekvenciatartományát). A látás-hallás analógiát használva mondhatjuk, hogy az eddigi elektromágneses megfigyelésekkel csupán láttuk az Univerzumot, de a gravitációs hullám-detektorok segítségével ma már „hallgatni” is tudjuk a Világegyetem rezdüléseit. Valóban egy új érzékszerv áll rendelkezésünkre az asztrofizika rejtélyeinek megoldására.

A jelenleg potenciálisan észlelhető hullámok forrásai lehetnek például bespirálózó kompakt kettősök (például két, egymás körül keringő, majd összeolvadó fekete lyuk), nem forgásszimmetrikus neutroncsillagok és olyan nagyenergiájú robbanások, mint amilyenek a gamma-kitörések vagy a szupernóva-robbanások.

## Tanórai keretek között feldolgozható anyagok

Az itt szereplő anyagok úgy dolgozzák fel a gravitációs hullám-kutatás egy-egy szűkebb területét, hogy azt tanórán vagy szakköri keretek között is be lehet mutatni a diákoknak. Előnyük, hogy gyakorlatias, foglalkoztató feladatot kapnak a diákok, nincs szükség sok elméleti tudásra hozzájuk.



3. ábra. A hanfordi LIGO obszervatórium madártávlatból (Washington, USA) [3].

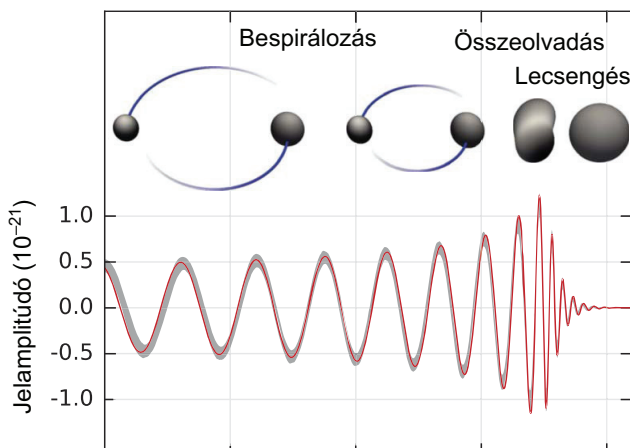
## GW Workshop

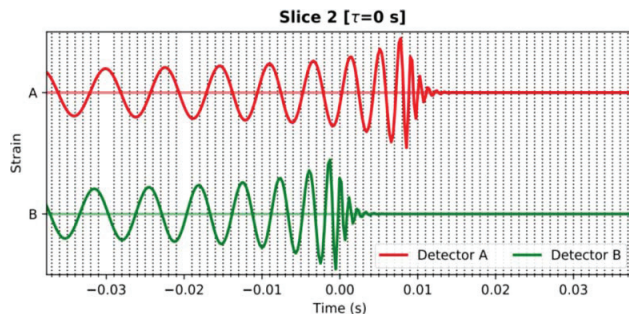
Az egyik legnépszerűbb oktatási anyag a *Chris North* (Cardiff University) által fejlesztett *Gravitational Waves Hands-on Workshop* [4]. Az oktatási anyag középiskolásoknak szól, két 45 perces foglalkozásból áll, és két nehézségi szinten érhető el (közép és haladó a 14–16, illetve a 16–18 éves korosztály számára). A két szint közti fő különbség a matematikai számítások nehézsége.

A workshop egy hatperces videóval indul, amely áttekintést ad a gravitáció elméletének fejlődéséről *Newtontól* Einsteinig, illetve elmagyarázza a gravitációs hullámok keletkezését és lézerinterferenciás észlelését. Az ezt követő fő rész az adatelemzés bemutatása. A diákok csoportokban dolgoznak, két különböző feladaton (egy csoport egyféle feladaton).

Az első feladattípusnál a diákok megismerkedhetnek a bespirálózó kettősökből származó gravitációs hullámok alakjával, továbbá a gravitációs hullám-detektorok adataiból kinyerhető jelamplitúdó-idő grafikonokkal (4. ábra). Az ilyen típusú jelek három fő szakaszra oszthatók: a bespirálózásra, az összeolvadásra és a lecsengésre. A bespirálózás során a perdulatmegmaradás jegyében a keringés egyre gyorsul,

4. ábra. A bespirálózó kettősök hullámformája a jel három fázisában (bespirálózás, összeolvadás, lecsengés) [5].





5. ábra. A két detektor által észlelt jel. Jól látható az időkülönbség [5].

tehát a jel frekvenciája nő, továbbá a kibocsátott gravitációs hullám, így az észlelt jel amplitúdója is egyre nagyobb lesz. Ez azonban a folyamat időskáláján egy viszonylag lassú felívelés, így rövid időintervallumon a frekvencia és az amplitúdó állandónak tekinthető. A forrás fényévekben vett távolságát az összeolvadási hátralévő időből, az adott időben jellemző frekvenciából és amplitúdóból meghatározható egy megadott összefüggés segítségével. A csoport két grafikont kap: egyet a teljes jelről és egyet a bespirálózás egy rövid szakaszáról, amiről már leolvasható a frekvencia (illetve természetesen az amplitúdó és az összeolvadásig hátralévő idő is). A grafikonnál leolvasott adatokból tehát a csoport meghatározza a forrás távolságát.

A haladó verzióban itt három különbség van. Az egyik mindössze annyi, hogy a képlet más alakban kerül megadásra, így egy kis egyenletrendezésre is szükség van. A másik különbség, hogy elérhető a valódi jelekhez jobban hasonlító, zajt is tartalmazó grafikonok. Ezeknél a diákok láthatják, hogyan lehet meglátni a jelformát a zajos adatsorokban. Végül az úgynevezett *chirp-tömeget* is ki kell számolniuk a diákoknak (nap tömegben), ami a két komponens tömegének speciális kombinációjaként áll elő:

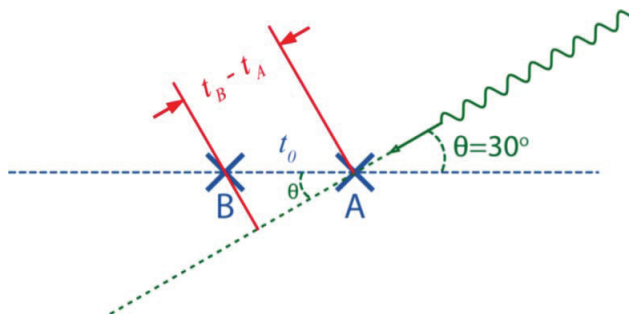
$$M_{\text{ch}} = \frac{(m_1 m_2)^{3/5}}{(m_1 + m_2)^{1/5}},$$

ami azért lényeges, mert ez határozza meg, hogy a jel frekvenciája milyen ütemben növekszik.

A második feladattípus a forrás égi elhelyezkedésének meghatározását mutatja be. Ehhez egy egyszerű geometriai feladatot kell megoldani. Két detektoros észlelésnél jól látható, hogy mekkora időkülönbséggel érkezett meg a hullám a két interferométerhez (5. ábra). A két (LIGO) detektor távolsága ismert,  $d_0 \approx 3000$  km. A gravitációs hullámok fénysebességgel terjednek, ezért ha a két detektoron áthaladó egyenesen található a forrás, akkor az időkülönbség egyszerűen:

$$t_0 = \frac{d_0}{c} = \frac{3000 \text{ km}}{300\,000 \text{ km/s}} = 0,01 \text{ s}.$$

Ha más irányból érkezik a gravitációs hullám jele (természetesen a legtöbb esetben ez az eset fordul



6. ábra. Az időkülönbség meghatározása egyszerű trigonometriával [5].

elő), egyszerű trigonometriával (6. ábra) kapjuk meg a következő összefüggést:

$$t_B - t_A = t_0 \cos(\theta),$$

ahol  $t_A$  és  $t_B$  a jel csúcának időpontja az  $A$  és  $B$  detektoroknál,  $\theta$  pedig a gravitációs hullám beesési szöge a detektorokat összekötő egyeneshez képest. Az időkülönbség egy grafikonról olvasható le, amin a két detektor által észlelt jel látható, természetesen valamikorra időbeli késéssel. A beesési szög meghatározásában a fenti összefüggést ábrázoló grafikon segít, így nincs is szükség a koszinusz ismeretére a szög kiszámításához, egyszerűen leolvasható a függvényről. Természetesen két eredmény lesz, hiszen nem tudni, hogy például 30 vagy  $-30$  fokok szögből érkezett a jel. Végül az adatok alapján egy táblázatból ki kell választani, hogy melyik fiktív galaxis volt a jel forrása, illetve hogy mekkora a forrásgalaxis (és így a jel) vöröseltolódása.

A haladó verzió ennél a feladatnál egy harmadik detektor adatainak hozzáadásával bemutatja a több-detektoros észlelés előnyét lokalizáció szempontjából, továbbá a diákok nem kapják meg a segédgrafikon az egyenlet megoldásához.

A csoportmunka végén a kétféle feladaton dolgozó csoportok keverednek egymással, az adatok egyesítésével pedig becslést adnak a  $H_0$  Hubble-állandó értékére a Hubble–Lemaître-törvény alapján:

$$v = H_0 d.$$

Az első csoport adja ehhez a galaxis  $d$  távolságát, a második pedig a  $z$  vöröseltolódást, amiből meghatározható a galaxis távolodásának sebessége ( $v = zc$ ). Végül ezt az értéket összehasonlítják a Hubble-állandó irodalmi értékével. Ez a rész megegyezik a két szinten.

Egy jelszimuláló widget [6] segítségével a diákok láthatják azt is, hogy a jel alakjából miként lehet következtetéseket levonni a forrás össztömegére és távolságára.

A workshop zárásaként a diákok még egy hatperces videót láthatnak, amely bemutatja az interferometrikus gravitációs hullám-keresést, továbbá néhány fontos észlelés részleteit ismerteti.

A GW Workshop anyagainak magyar fordítását a LIGO ELTE tagcsoportja 2022-ben készíti el.

## GW activities

A Penn State University *Center for Gravitational Wave Physics* intézete két anyagot állított össze a jelkeresés bemutatásához. A *Searching for Gravitational Waves in Noisy Data* [7] egy viszonylag egyszerű, rövid tananyag a kutatók által végzett jelkeresés bemutatására. A rövid bevezető után a diákok zajhoz adott jeleket, valamint sablonokat kapnak különböző típusú, modellezett gravitációs hullámok jelalakjáról. A diákoknak mindegyik jelhez meg kell találniuk a hozzájuk legjobban illeszkedő sablont. Ezután gondolatébresztő kérdéseket tárgyalnak meg közösen az osztállyal, amely kapcsán a tanulók beleképzelhetik magukat a tudományos közösség munkájába. Ezt a tevékenységet részben a téma bevezetésére tervezték, továbbá néhány fogalom és módszer megismertetésével felkészíti a diákokat az *Einstein's Messengers* című tudományos ismeretterjesztő film megtekintésére is.

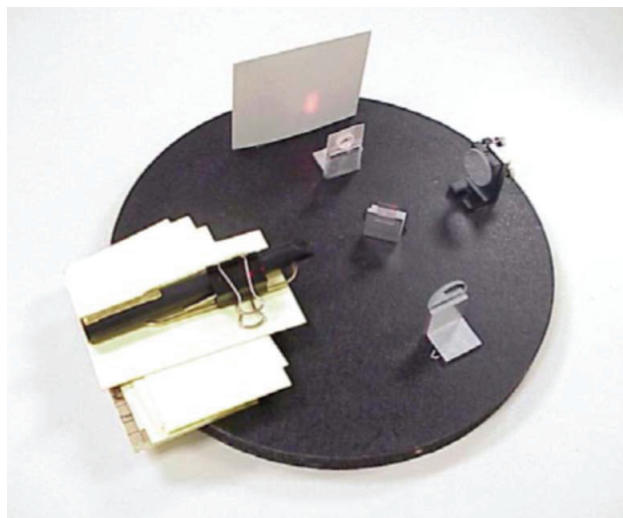
Az *Extraction of Astrophysical Information from Simulated Signals* [8] összetettebb tananyag, célja szintén egyrészt az említett film érthetőbbé tétele, továbbá a diákok megismerhetik a paraméterbecslés folyamatát, azaz hogy a jelek alakjából miként lehet meghatározni a gravitációs hullámok forrásainak tulajdonságait. Itt középiskolás szinthez képest nagyon összetett matematikai összefüggésekkel kell dolgozniuk a diákoknak, ezért ezt a tananyagot csak az erre fogékonyabbakkal érdemes feldolgozni. Az *Einstein's Messengers* nem érhető el magyarul, de helyettesíthető a magyar gyártású *Hullámvadászok* című alkotással.

## Asztali interferométer

A LIGO Lab két leírást készített 9–12. évfolyamos diákoknak egy osztályteremben összeállítható Michelson-interferométer megépítéséhez (7. ábra). Az egyik egyszerűbb, ragasztóval rögzített interferométer [9], a másik modernebb, mágneses verzió [10]. Az eszközök kicsit költségesek és nehezen beszerezhetőek, de ha van rá lehetőség, akkor egy nagyon modern és izgalmas kísérleti berendezéssel dolgozhatnak a diákok. Mivel az interferométer összeállítása alapvetően egyszerű (két síktükör, egy féligáteresztő tükör, egy lézer fényforrás és egy ernyő/fényérzékelő), így a diákok is könnyen össze tudják állítani. A leírások ezen túl néhány ellenőrző kérdést is tartalmaznak, ezeket azonban érdemes kiegészíteni. Jól be lehet mutatni vele az interferencia jelenségét, továbbá könnyebben érthetővé válik a gravitációshullám-detektorok működése is.

## Valós adatok feldolgozása

A középiskolai fizika tananyaghoz kevésbé kapcsolódik, ám a kutatói munka fontos része az adatelemzés. Az itt tárgyalt oldalakon láthatunk néhány példát, hogyan lehet akár középiskolások számára is érthetővé tenni, miként zajlik az adatok kiértékelése a valódi megfigyelések során.



7. ábra. A diákok által összeállítható asztali interferométer [11].

## Learning Path

A *Gravitational Wave Open Science Center* (GWOSC) a LIGO és a Virgo kollaborációk közös projektje, ahol nyilvánosan elérhető az obszervatóriumok valós adatai [12]. Ezek feldolgozásához, elemzéséhez és értelmezéséhez is segítséget kaphatunk a honlapon. A *Learning Path* egy rövid, közérthető bevezetőt ad a gravitációs hullámok témaköréhez.

A *GW Workshopnál* látott két videóval és a *Waveform Fitterrel* indít. Ezután következik egy hosszabb, főleg szöveges rész a hullámokról, különösen a frekvencia fogalmáról. A téma feldolgozása a forrás és a frekvencia kapcsolatára van kiélezve. A hangszerektől indul: a nagyobb méretű hangszerek mélyebb (alacsonyabb frekvenciájú) hanghullámokat keltenek. Az elektromágneses hullámokon történő gyors átvezetés után (hidegebb csillagok alacsonyabb frekvenciájú, vörösebb fényt bocsátanak ki, míg a melegebb csillagok magasabb frekvenciájú, kékebb fényt) következik a gravitációs hullámok frekvenciája. Itt az anyag a bespiráló kettősökre tér ki, ahol a nagyobb tömegű kettősök alacsonyabb, a kisebb tömegűek magasabb frekvenciájú hullámokat hoznak létre. Mindez interaktív formában, elsősorban hangfájlok, szemléltető képek és animációk segítségével kerül bemutatásra.

A következő rész összetettebb, itt az adatfeldolgozás egy szeletével ismerkedhet meg az érdeklődő. Konkrét példák, a beépített alkalmazások segítségével magunk állíthatjuk elő a különböző jeleket, zajokat és szűréseket. Bemutatásra kerül a különböző frekvenciák együttes megjelenése, a fehér- és a vörösjaj természete, továbbá két jelfeldolgozó módszer: a fehérítés és a sávszűrés. Végül, ezek megfelelő használatával egy zajban elrejtett gravitációshullám-jelet is fel lehet fedezni.

E tananyag utolsó szekciója a valódi észlelések vizsgálata. Itt mindhárom detektor összes eddigi gravitációshullám-észlelésének eredeti adatsora készen elérhető, továbbá a jelfeldolgozás után kapott adatok, amelyekben már észre lehet venni a jelet is.

## Data analysis tutorial

A GWOSC fő tananyaga az adatelemzést mutatja be olyan mélységig, hogy a tutorialok elvégzése után már önállóan lehessen végezni az adatok feldolgozását [13]. Erre – természetesen – a kutatók programokat használnak, ezért a tananyag nagy részében a tanulók programozást (Python nyelven) sajátítanak el. Fontos leszögezni, hogy ez egyáltalán nem középiskolás oktatási anyag, gyakran a kollaboráción kívüli kutatók használják arra, hogy saját szakterületükhöz kapcsolódóan jussanak információhoz a detektorok méréseiből. Több száz tudományos szakcikk jelent már meg a GWOSC adatainak felhasználásával. Az anyag hosszában és nehézségében is kihívást jelent, de az elkötelezett, a kutatások iránt érdeklődő tehetséges diákoknak jó belépő lehet a tudomány világába.

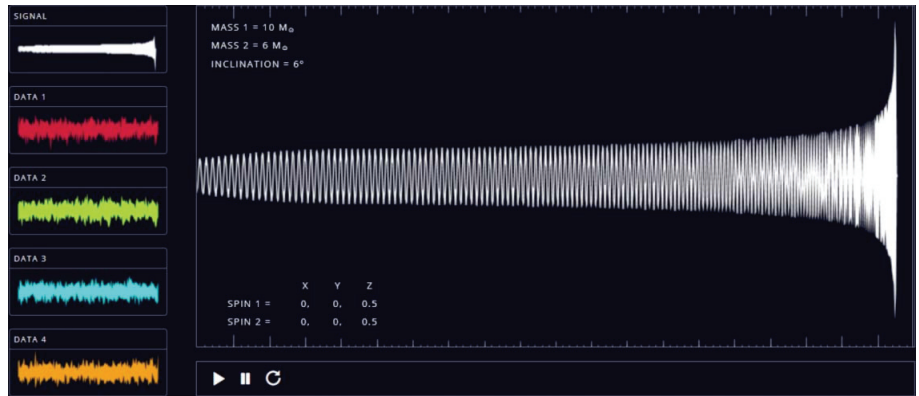
Nem szükséges programozási előismeret a tutorialok elvégzéséhez, minden fontos alapot meg lehet tudni belőlük, a nem használt dolgokra pedig nem tér ki, így mennyisége még befogadható. Az adatfeldolgozást konkrét példákon keresztül lehet gyakorolni, ezért a végére már az összes elérhető adat feldolgozhatóvá válik. A végén rövid ismertetőket tartalmaz arról is, hogy miként lehet asztrofizikai forrásokat keresni az adatokban. E tudás birtokában pedig már teljesen nyílt végű feladatokat – mit szeretnénk kideríteni az adatokból – lehet meghatározni.

## Játékok

Néhány egyszerű mobiltelefonos és számítógépes játék is készült már a gravitációs hullámokhoz kapcsolódóan. Ezek segítségével a hagyományos tanuláshoz sokkal élvezetesebb formában találkozhatunk a téma néhány aspektusával. A játékokon keresztül sokkal könnyebben bevonódnak a diákok a tanulási folyamatba, így ezek segítségével maradandó tudásra tehetnek szert.

### Black Hole Hunter

A *Black Hole Hunter* online játék [14] a zaj és a jel kapcsolatát mutatja be. A jelkeresés azon alapul, hogy a gravitációs hullám-jelek jelamplitúdó-idő grafikonját könnyen át lehet alakítani hangfájlokká, mivel az eddig észlelt gravitációs hullámok frekvenciája pont a hallás tartományába esnek. Tehát, ha a gravitációs hullámokat hangfájllá alakítjuk és lejátszuk egy hangszóróval, akkor a hullám jellegzetességeit hallhatjuk. A



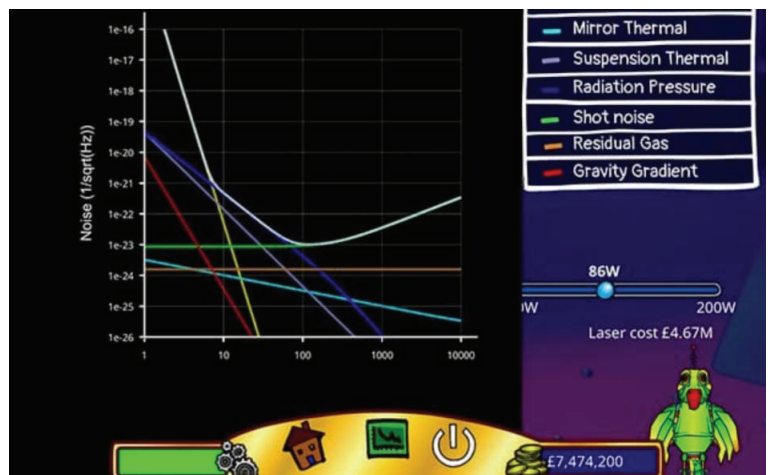
8. ábra. *Black Hole Hunter*: négy zajos hangfájlból kell kiválasztani azt, amelyik tartalmazza a szimulált gravitációs hullám-jelét [15].

játék során minden szinten kapunk egy szimulált, bespiráló kettősből származó gravitációs hullám-jelét, amelyet meghallgathatunk. Ezután négy adatsort meghallgatása után meg kell találnunk, melyikben bújik meg a keresett jel (8. ábra). A keresést az adatsorokban jelenlévő erős zaj nehezíti. A játék előrehaladtával különböző jellegű, egyre halkabb jeleket kell megtalálni. A jeleknél feltüntetésre kerülnek a forrás asztrofizikai tulajdonságai (tömeg, perdület, pálya dőlésszöge) és a szintek teljesítése során további érdekes alapszereplőket kaphatunk a gravitációs hullámokról. Így a téma népszerűsítése mellett edukációs jellege is van a játéknak. Az oldal magyar nyelven is elérhető a cikk szerzőinek fordításában.

### Space-Time Quest

A *Space-Time Quest* [16] játék során lépésről-lépésre megépíthetjük saját gravitációs hullám-detektorunkat. Eközben természetesen az oktatási cél is érvényesül: játékos formában kerülnek bemutatásra a detektoroknál tapasztalható nagymértékű zaj csökkentésének módjai. A játék során egy megadott pénzügyi keret áll rendelkezésünkre, amelyet a lehető legjobban kell beosztanunk annak érdekében, hogy minél érzékenyebb detektort hozunk létre (9. ábra). A tervezés

9. ábra. A szimulált detektor érzékenységi görbéje a *Space-Time Quest* játékban [17].



során egy érzékenységi grafikonon végigkövethetjük, hogy milyen hatása van az általunk tervezett beruházásoknak, azaz mennyire sikerült csökkenteni a különböző – szeizmikus, hőmozgás, hőtágulás, sugárnyomás, sörét, maradék gáz és a gravitációs – forrásokból származó zajt.

A játék a detektor helyének kiválasztásával kezdődik. Az, hogy város közelébe, vagy például sivatagba telepítjük, befolyásolja a költségeket, a környezeti zajt és a kutatók elérhetőségét. Ezután a detektor összetételét kell meghatároznunk, amelynek három fő eleme van: a környezet, a rezgéscsillapítás és az optika. A környezethez tartozik a föld alatti elhelyezéssel csökkenthető gravitációs és szeizmikus zaj. A vákuumpumpák a maradék gáz mennyiségét hivatottak mérsékelni, a hűtés pedig a két termodinamikai eredetű zajt csökkenti. A rezgéscsillapításnál a tükrrendszer felépítését határozhatjuk meg. A tükrök száma és a felfüggesztés hossza csökkenti a szeizmikus zajt, utóbbi a hőtágulásból adódót is. A tükrök tömege a sugárnyomás és a hőtágulás zaját csökkenti, viszont a tükrök hőmozgását növeli. Az optikai összetételnél meghatározhatjuk a lézer teljesítményét, illetve a tükrök anyagát és felületét. Ezek szinte a zaj összes formájára hatással vannak. Miután összes pénzünket elköltöttük, lefuttathatunk egy megfigyelést. Ekkor megtudjuk, milyen távolságból vagyunk képesek gravitációs hullámokat érzékelni, és láthatjuk, mennyi és milyen típusú gravitációs hullámot sikerült detektálni. A toplistán megtekinthetjük, milyen eredményeket értek el a legjobbak. A különböző zajtípusok bemutatása mellett a játék megtanítja, hogy milyen módon lehet ezeket kiküszöbölni a detektoroknál (10. ábra). A detektorok felépítésével és az egyes részek funkcióival is jobban meg lehet ismerkedni.

A játék magyar fordítását az ELTE LIGO tagcsoportja 2022-ben készíti el.

### Black Hole Pong

A *Black Hole Pong* [18] nem tekinthető oktatási anyagnak, de jó bevezető lehet a kisebbeknek a fekete lyukak világába. A játék a klasszikus Pong játékot jeleníti meg egy kicsit új formában. A különbség annyi, hogy itt nem egy lapát áll rendelkezésünkre a labda visszatérésére, hanem egy-egy fekete lyukat irányít a két játékos. Ezek gravitációs hatásával kell visszaparittyázni az ellenfél térfelére egy csillagot. Az veszít, aki háromszor nem tudja visszaküldeni a csillagot.

### Tanároknak szóló programok

Végül megemlítenénk két programot, amelyek nem a diákoknak, hanem a tanároknak szólnak a gravitációs hullámokról, illetve azok tanításáról.



10. ábra. *Space-Time Quest*: a környezeti zajforrásokat elszigetelő lehetőségek [17].

### International Physics and Astronomy Educator Program

Vírusmentes időkben minden év nyarán kerül megrendezésre az *International Physics and Astronomy Educator Program* [19] a LIGO Hanford Observatóriumnál az Egyesült Államokban. Ezen az egyhetes intenzív tanfolyamon a résztvevők megismerkednek az általános relativitáselmélet és a gravitációshullám-asztrófizika alapjaival, továbbá oktatási anyagokat, osztálytermi gyakorlati tevékenységeket sajátítanak el. Ezen túl lehetőség nyílik beszélgetni a modern fizika és a csillagászat szakértőivel is, meg lehet látogatni történelmi és tudományos jelentőségű helyszíneket. A megbeszélések témái a gravitációs hullámok mellett a nukleáris fizikát és a többcsatornás csillagászatot is felölelik. A program célja a modern fizika középiskolai oktatásának előmozdítása azáltal, hogy a tanároknak lehetőséget biztosít a fizikai ismereteik elmélyítésére és a fizika iránti szenvedélyük felélénkítésére egy olyan környezetben, ahol a világ minden tájáról érkező tanárok kicserélhetik ismereteiket és tapasztalataikat. Ennek megfelelően előfeltétel a jó angol kommunikációs készség. A program részvételi díja a legutóbbi megrendezéskor 300 dollár volt, amely hozzájárul az egyheti szállás, étkezés és a repítéri transzfer költségeihez. Ezek nagy részét a LIGO és más támogatók fedezik.

### Online course

A Sonoma State University készített két online elérhető írásos kurzust a gravitációs hullámokról (*Waves and Gravity*) és a megfigyelésükről (*Detecting Gravitational Waves*) [20]. Ezek nem csak tanároknak készültek, hanem a gravitációshullám-kutatás fizikai hátterét mutatják be. A második kurzus nehézségét tekintve középiskolások számára is befogadható, ezért érdeklődő diákoknak jó lehet, az első viszont egyetemi szintű matematikai eszköztárat igényel, így erre kevésbé alkalmas. A tanári háttérismeretek bővítéséhez viszont kiváló összefoglaló a témában.



## Záró gondolatok

Látható, hogy számos oktatási anyag készült már a gravitációs hullámok témakörében. Ezek segítségével a diákok megismerkedhetnek a gravitációs hullámok létrejöttének elméleti hátterével és az adatfeldolgozás különböző elemeivel. A fogalmak alapos felépítése nélkül mutatják be az adott területet, hiszen nincs ilyen jellegű céljuk.

A téma fizikai alapjairól és a csillagászati felfedezésekről azonban eddig még nem készült átfogó oktatási anyag. Ezen ür betöltésére született meg az *Einstein öröksége: csillagászat gravitációs hullámokkal* [21] című online kurzus, amelyet a cikk második részében ismertetünk.

### Irodalom

1. <https://blog.waikato.ac.nz/physicsstop/wp-content/uploads/sites/5/2020/09/Capture.jpg>
2. <https://images.immediate.co.uk/production/volatile/sites/4/2020/09/GettyImages-685026451-crop-96eb04b.jpg?quality=90&crop=4px%2C0px%2C931px%2C401px&resize=931%2C396>

3. <http://ligo.elte.hu>
4. <https://blogs.cardiff.ac.uk/physicsoutreach/workshops/gravitational-waves/online/>
5. <https://blogs.cardiff.ac.uk/physicsoutreach/workshops/gravitational-waves/online/>
6. <http://data.cardiffgravity.org/waveform-fitter/>
7. [http://cgwp.gravity.psu.edu/outreach/activities/template\\_activity](http://cgwp.gravity.psu.edu/outreach/activities/template_activity)
8. [http://cgwp.gravity.psu.edu/outreach/activities/hands\\_on\\_activity/](http://cgwp.gravity.psu.edu/outreach/activities/hands_on_activity/)
9. [https://dcc.ligo.org/public/0117/T1400762/001/interferometer\\_2014.pdf](https://dcc.ligo.org/public/0117/T1400762/001/interferometer_2014.pdf)
10. [https://dcc.ligo.org/public/0004/T0900393/001/Magnetic\\_MichelsonDCC.pdf](https://dcc.ligo.org/public/0004/T0900393/001/Magnetic_MichelsonDCC.pdf)
11. [https://dcc.ligo.org/public/0117/T1400762/001/interferometer\\_2014.pdf](https://dcc.ligo.org/public/0117/T1400762/001/interferometer_2014.pdf)
12. <https://www.gw-openscience.org/path/>
13. <https://www.gw-openscience.org/tutorials/>
14. <https://blackholehunter.org/>
15. <https://blackholehunter.org/>
16. <https://www.laserlabs.org/spacetimequest.php>
17. <https://www.laserlabs.org/spacetimequest.php>
18. [http://www.gwoptics.org/processing/blackhole\\_pong/](http://www.gwoptics.org/processing/blackhole_pong/)
19. <https://www.ligo.caltech.edu/WA/page/lho-ipa-pd>
20. <https://universe.sonoma.edu/moodle/>
21. <https://webuni.hu/kepzes/einstein-es-a-gravitacios-hullamok>

# FELFEDEZŐ TANULÁS A KÖZÉPISKOLAI TERMÉSZETTUDOMÁNYOKBAN A VULKÁNI HAMU TERJEDÉSE ALAPJÁN

Bajkó Ildikó

Szent István Gimnázium, Budapest és  
ELTE Fizika Doktori Iskola, Fizika Tanítása Program

Az elmúlt években különböző tanítási modulokat alakítottam és próbáltam ki középiskolás diákok számára a kaoszfizika témában. Új lehetőség nyílt a kaosz tanítására a RePLaT–Chaos-edu nevű program megjelenésével, amelyet középiskolások számára fejlesztettek ki, szimulálva a vulkánkitörésekből származó anyagok légköri terjedését. A tanulók a RePLaT–Chaos-edu-t kísérleti eszközként használhatják a szennyező anyagok légköri terjedési jellemzőinek tanulmányozására.

Köszönetemet fejezem ki PhD témavezetőimnek, *Haszpra Tímeának* és *Tél Tamásnak*. Köszönöm a Szent István Gimnázium tanulói lelkes munkáját.



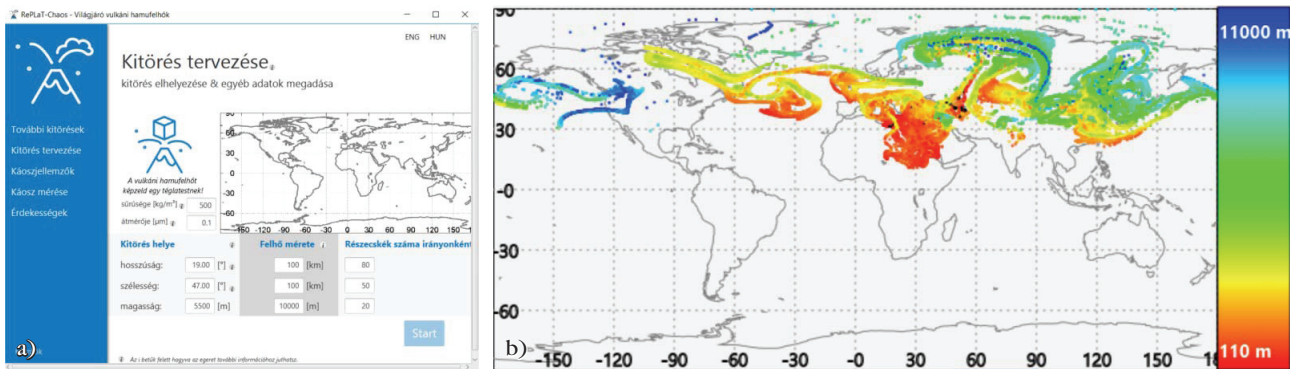
*Bajkó Ildikó* Kolozsváron, a Babeş-Bolyai Tudományegyetemen szerzett fizikusi és fizikatanári diplomát 1995-ben. 2009 óta a budapesti Szent István Gimnázium fizikatanára. 20 éve tanulmányozza a kaoszfizika középiskolai taníthatóságát tanórák, szakörök és projektek keretében. Az ELTE Fizika Doktori Iskola Fizika Tanítása Program PhD-hallgatója.

A környezeti szennyeződések terjedésének példáján keresztül megismerik a kaosz jellemzőit, például a kezdeti feltételekre való érzékenységet (pillangóhatás), a szabálytalan mozgást és a bonyolult, de strukturált (fraktál) szerkezetet. Ezzel a könnyen használható programmal sikerült felkeltem a tanulók figyelmét a kaosz fontosságára a környezeti jelenségekben. Tapasztalataim szerint a RePLaT–Chaos-edu teljes sikernek bizonyult: eredményes kísérleti eszköz, és a diákok nagy lelkesedéssel használják.

## Új lehetőség a szennyeződésterjedés fizikájának megismerésére

A RePLaT–Chaos-edu [1, 2] nevű program nagyon jól alkalmazható a szennyeződések terjedésének területén, másrészt új perspektívát nyit a középiskolai fizika és akár a fizikai földrajz oktatásában, különös tekintettel a környezeti áramlásokra [3–5].

A RePLaT–Chaos-edu-t *Haszpra Tímea* fejlesztette ki [3, 6] középiskolások számára, a vulkánkitöréseket követően a hamufelhők légköri terjedésének



1. ábra. Bottka B. 9. osztályos tanuló tervezte vulkánkitörés. a) Kitorés indítása 2010. április 14-én, 5,5 km-es magasságban egy  $100 \text{ km} \times 100 \text{ km} \times 10 \text{ km}$ -es nagyságú téglatest alakú felhővel (a részecskék sűrűsége  $500 \text{ kg/m}^3$ , részecskeátmérő  $0,1 \mu\text{m}$ ). b) A felhő alakja 2010. április 24-én, a színek a magasságot jelzik (sötétkék a legmagasabb).

nyomon követésére. A program a felhasználó által kiválasztott földrajzi helyen és magasságban kibocsátott szennyeződéshőlk légköri terjedését szimulálja az Eyjafjaljökull vulkán izlandi kitörésének 2010. április 14–24. időintervallumában, megfigyelésen alapuló meteorológiai adatok, például a földgömb légkörének egészét lefedő, különböző magasságú szél- és hőmérsékletmezők segítségével (a program tartalmazza a szükséges meteorológiai adatokat is).

A program ingyenesen letölthető [1]. A programmal különböző vulkáni hamufelhők légköri terjedése szimulálható többféle beállítási lehetőség mellett. A felhőt alkotó részecskék száma, kezdeti elhelyezkedése, mérete és egyéb tulajdonságai megadhatók. A program minden egyes időlépésben a meteorológiai adatok alapján kiszámítja a szennyeződéshőlk részecskéinek új helyét, és 6 óras időközönként az adatokat fájlba is kiírja. Emellett meghatározza a felhő méretét és a légkörből még nem távozott részecskék arányát. Ezek két, a terjedés kaotikusságát leíró mennyiség – a méretet jellemző nyúlási ütem, valamint a részecskék kiülepedésének gyorsaságát leíró élettartam – meghatározásához szükségesek. A program lehetőséget nyújt e két, kaotikus viselkedést számszerűsítő mennyiség meghatározására is. A program bemutatásáról magyar nyelvű cikk nem született.

## A RePLaT-Chaos-edu program használata a középiskolában

Az eddigi középiskolai tapasztalatokról angolul olvashatunk [5, 6]: a programmal kisebb létszámú ismerkedtek diákok a Berzsényi Dániel Gimnáziumban és a Káoszfizika-Környezetfizika projekt keretében a Szent István Gimnáziumban [5], illetve nagyobb létszámú a Szent István Gimnáziumban egyetlen tanóra keretében [6]. E cikk a program bemutatásán kívül ez utóbbi tanítási kísérlet eredményeit összegzi.

Megvizsgáltam, hogyan tudják a tanulók önállóan, útmutatás nélkül használni a programot. 123 – 9. 10., 11. és 12. osztályos – tanulót vontam be a kutatásba. A diákoknak egy 45 perces fizikaóra keretében kellett

felfedezniük a program használatát. Lehetőségük volt két-három fős csoportokban együttműködniük.

A tanulók a következő feladatokat kapták:

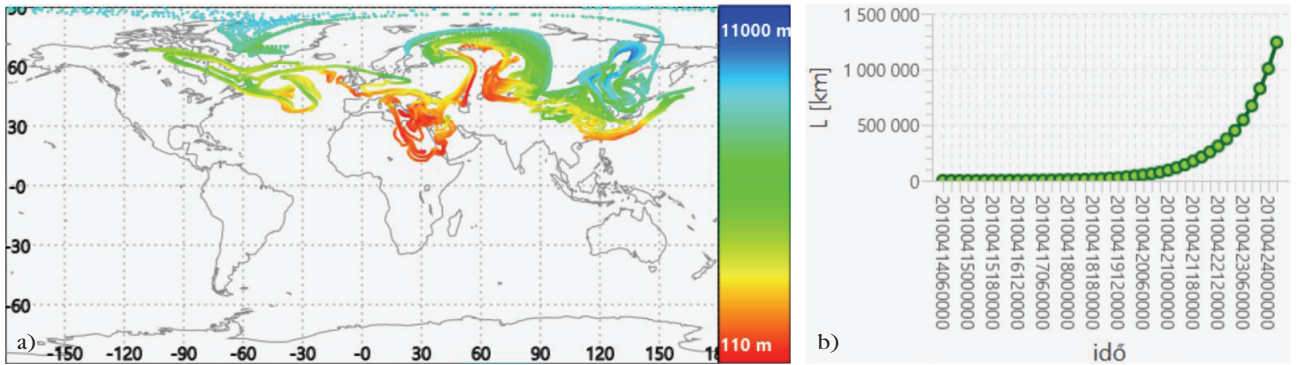
1. Ismerkedjenek meg a programmal.
2. Tervezzenek saját vulkánkitörést (erre is lehetőséget ad a program bármely földrajzi helyen).
3. Jellemezzék a vulkáni hamufelhő mintázatának alakulását.
4. Keressenek hasonló mintázatokat a természetben.

Arra kértem őket, hogy írásban, képekkel illusztrálva mutassák be tapasztalataikat, felfedezéseiket. Az eredmények a következők:

1. A tanulók alaposan felfedezték a programot, a beépített vulkánkitörések [6] megismerésének lehetőségén messze túljutva.

2. 123 diákból 118-an bemutattak képet vulkánkitörésük terjedési mintázatáról vagy videót a mintázat kialakulásáról. Erre az 1. ábrán látható példa.

3. A tanulók meglepődtek, milyen messzire és milyen mintázat mentén terjed a vulkáni hamu. Felismerték, hogy a hamufelhők nem tintafolt- vagy festékfolt-szerűen terjednek a légkörben, hanem egy kezdetben kicsi, kompakt szennyezőfelhő hamarosan erősen megnyúlik, majd szálassá, visszakanyarodó szerkezetűvé válik. Ennek oka az, hogy a tintafoltot mikroszkopikus diffúzió, míg a szennyezőanyag szétszóródását erős légköri szelek szabályozzák, amelyek nem egyenletesen fújnak. E szimulációkkal szemléletessé vált, hogy a vulkáni hamufelhők néhány napon belül bonyolult, de jól szervezett fonális szerkezetekben terjednek a légkörben, amelyek a félteke nagy részét lefedik. Így érthetővé válik, hogy ez a jellemzőjük a felelős azért, hogy a bekövetkezett vulkánkitörések után bizonyos időre, kiterjedt földrajzi régiókban szükség lehet a légi forgalom leállítására (mint, ahogyan az Eyjafjaljökull kitörése esetében történt). A tanulók rájöttek, hogy ha egy nagyon kisméretű vulkáni felhőt hoznak is létre, annak kiterjedése és így az általa lefedett földrajzi terület gyorsan növekszik. A kezdetben egymáshoz közeli részecskék rövid időn belül távol kerülnek egymástól. A tanulók közül sokan (több mint 30%) észrevették és bemutatták a szelek hatását.



2. ábra. Vonalnyúlás: a) Keresztély Zs. 9. osztályos tanuló által generált kitérés. Kezdeti feltételek: a magasság 5500 m, a kezdeti hossz 400 km. b) A grafikon a felhő  $L$  hosszát mutatja az idő függvényében. A szimulálás szerint 10 nap alatt körülbelül 3000-szeresére nő a kezdeti hossz.

4. A tanulók nagyon izgalmasnak találták a hasonló mintázatok keresését a természetben. A vulkáni szennyezés légköri terjedéséhez hasonló, általuk talált leggyakoribb mintázatok a következők voltak: olajszenyezés terjedése a víz felszínén, különböző festékek keveredése, színes folyadék terjedése átlátszóban, elfűjt gyertya füstje – ezek mind jó példák a kaotikus keveredésre. A környezeti áramlásokkal kapcsolatos folyamatok is szép számban megjelentek a hasonló mintázatok keresésekor: időjárás-előrejelzés esetén látható képek, tornádó képe felülről, szennyeződések terjedése a tengerekben vagy óceánokban, radioaktív szennyeződések terjedése. Sok esetben az internetről vett fotókkal illusztrálták megállapításaikat.

## A tanulók felfedezései

A tanulók játszva fedezték fel a program lehetőségeit: megváltoztatták a különböző paramétereket, kísérleti eszközként használva a programot. Számomra központi fontosságú volt, hogy miként boldogulnak a tanulók a káosz jellemzőinek meghatározásával, hiszen eddigi kutatásaim központi kérdése volt a káosz középiskolai tanításának kérdése [8, 9].

Sok diák meghatározta a nyúlási ütemet. Ez a mennyiség azt a tényt tükrözi, hogy a szennyezőanyag-felhő  $L$  hossza exponenciálisan növekszik a  $t$  idővel, azaz

$$L(t) \sim 10^{ht},$$

ahol a  $h$  kitevőt a nyúlási ütem [1–6]. Ez a szám az eredetileg közeli pontok eltávolodási sebességét jellemzi, vagyis a pillangóeffektus [10, 11] erősségét a folyamatban. A nyúlási ütem meghatározására egy diák által benyújtott példa látható a 2. ábrán.

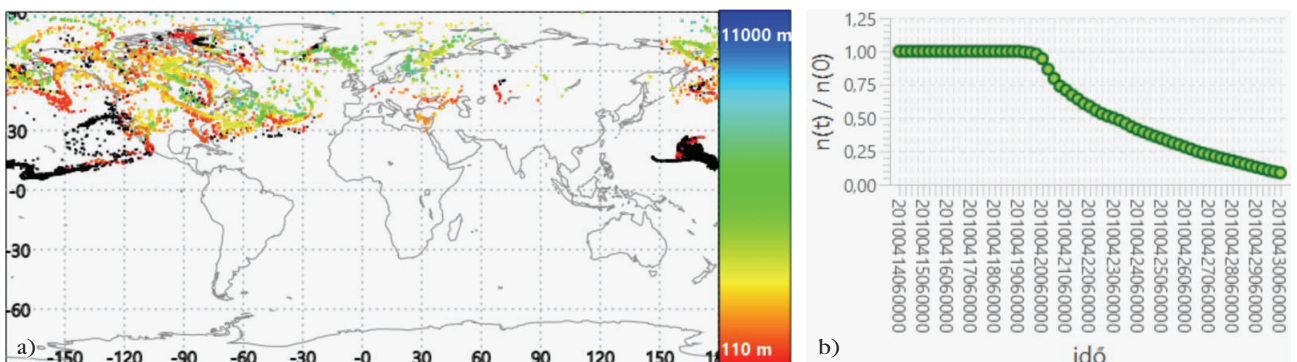
Érdeemes megemlíteni, hogy noha a diagramot a tanulók egyharmada elkészítette, nem mindenki számította ki közülük a nyúlási ütemet. Mindenképpen siker, hogy sokan megértették a nyújtás exponenciális jellegét, és becslést adtak mértékére. Érzékelték, hogy a kezdeti hossz 10 nap után többeszeresére nő. A diagram alapján illesztést követően a program a nyúlási ütemre 0,353 1/nap értéket számolt.

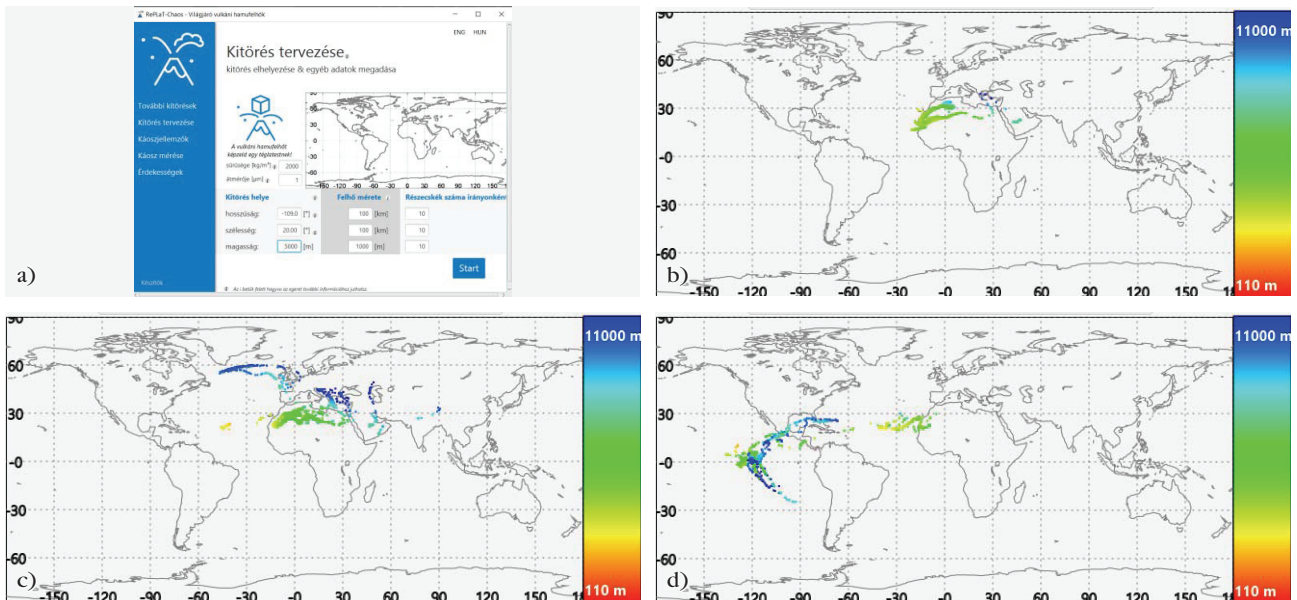
A RePLaT–Chaos-edu segítségével megmérhető a részecskék  $T$  élettartama [1–6], ami azt a sebességet jellemzi, amellyel a szennyező hamufelhők üledő részecskéi elhagyják a légkört. Ehhez a még levegőben lévő hamurészecskék arányának időfüggését kell vizsgálni. A 3. ábra szemlélteti, hogy a légkörből még le nem üledett részecskék száma  $t_0$  idő után exponenciálisan csökken. Ez az  $n(t)$  szám  $t_0$ -ig alig változik, de utána gyorsan, exponenciálisan csökken:

$$n(t) \sim 10^{-(t-t_0)/T}, \text{ ha } t > t_0.$$

A grafikon alapján  $t_0 = 6$  nap,  $T = 10$  nap. Ez azt jelenti, hogy a hamurészecskék (sűrűségük  $1000 \text{ kg/m}^3$  és

3. ábra. Kísérlet az élettartam meghatározására. a) Horváth Zs. 9. osztályos tanuló által generált kitérés (fekete jelöli a felszínt már elért részecskéket). b) A grafikon a légkörből még le nem üledett hamurészecskék számának a kezdeti részecskeszámhoz viszonyított arányát mutatja az idő függvényében.





4. ábra. Részlet Hajjas Á. 11. osztályos tanuló dolgozatából. A kezdeti szélesség kis eltérése nagyon nagy különbséget eredményez a gázfelhő méretében is, és a szennyezett területek kiterjedésében is, amint azt a képek szemléltetik. Minden más bemeneti adat teljesen megegyezik a 3 esetben az a) ábrán feltüntetettekkel. A három vulkánkitörés esetében az egyetlen eltérés a földrajzi szélességekben van: b) 20° É, c) 22° É, d) 17° É.

átmérőjük  $5 \mu\text{m}$ ) tizede több mint két héttel a kitörés után is még a légkörben van. A tanulók azt is láthatták, hogy a felszín elért részecskék mintázata szintén szálas fraktálszerkezetű. Volt olyan tanuló, akinek nehézségei voltak az illesztéssel, a teljes intervallumra exponenciális illesztést alkalmazott, és megfelekedezett a  $t_0$  létezéséről, de nagyságrendileg neki is jó eredmény adódott.

A diákok körülbelül 30%-a készítette el az élettartam és a vonalnyúlás diagramot is. Akadtak illesztési nehézségek a  $h$  nyúlási ütem és a  $T$  élettartam meghatározásakor. Az illesztési nehézségeket látva, a következő alkalomkor mindenképp előzetes tanári útmutatást tervezek a kaosz jellemzőinek meghatározását megelőzően. Céloom most annak felmérése volt, hogy önállóan miként boldogulnak a program adta lehetőségekkel. Közülük néhányan (7 tanuló) meggyőző példákat találtak a pillangóeffektusra, azaz a kezdeti feltételekre vonatkozó érzékenységre [12]. Idézek egy diák beadványából: „...egy viszonylag kis változás, ezért meglepőnek tartom, hogy elég intenzíven befolyásolta az eredményt.” Ez nagyon fontos lépés volt, nem kértem, hogy keressenek ilyet. Az egyetlen kérés az volt, hogy kísérletezzenek a paraméterekkel. Tanárként nagy öröömre szolgált, hogy beküldött munkáikban láthattam ezeket a felfedezéseket. Példaként álljon itt a 4. ábra.

## A RePLaT–Chaos-edu használata a középiskolai kaoszoktatás keretében

Kaosztanítási moduljaim [13, 14] során kézműveskedünk, a kaotikus sodródást vizsgáljuk a márványozással [15], azaz festékeket keverünk össze a víz felszínén, és a mintákat levonjuk papírra vagy más hor-

dozóra (gyertya, tojánhéj). A folyamat során a tanulók megtapasztalják, hogyan alakulnak a keveredési mintázatok. Ezt követően az így kapott mintázatokat összevetjük a környezeti áramlások során látható mintázatokkal. A tanulók felismerik, hogy a két esetben hasonlóak a minták: festékek keveredésekor (például márványozás) és környezeti szennyeződések terjedésekor – akár valós esetről készített fényképről, akár szimulációról van szó. A RePLaT–Chaos-edu használata során rájönnek, hogy a vulkánkitörések esetén hasonló mintázatokat láthatunk, mint amikor festékeket keverünk össze. A márványozás során (5.a ábra) tapasztaltakhoz hasonló indás, elágazó-visszakanyarodó szerkezetek jelennek meg a környezeti jelenségekben, mint például víz felszínén a szennyező hab képződésekor (5.b ábra). A tanulóknak lehetőségük volt összevetni a festékek keveredéséből született alkotásaikat és a ribizliszörp pudinggal való keverésének mintázatát (5.c ábra), vagy a légkörben terjedő vulkáni hamu mintáját (5.d ábra). Arra a következtetésre jutottak, hogy a kaotikus jelenségekre jellemző szálas, fraktálszerkezetek nagyon különböző térbeli léptékekben fordulhatnak elő, amint azt az 5. ábra szemlélteti.

A tanulók jelentős része észlelte a szelek hatását a szennyezőanyagok terjedésében a RePLaT–Chaos-edu programmal való kísérletezés során. Azt is sokan megállapították, hogy a program segít megérteni a nagy léptékű légköri keringést, a globális légkörcsét [16–18]. A diákok felismerték azt a tényt, hogy a vulkáni hamu csak az egyik féltekén terjed szét a program által biztosított időintervallumon belül. A meteorológiában jól ismert tény, hogy gyakorlatilag nincs anyagszállítás az egyenlítőn keresztül. A hallgatók erre is magyarázatot adtak munkáikban: ennek oka az egyenlítő mentén kialakuló erős feláramlás.

A RePLaT–Chaos-edu program ugyanakkor jól illeszkedik a káoszfizika általános tanításához is. A RePLaT–Chaos-edu programban *Káoszjellemzők* menüpont alatt bemutatásra kerül a nyúlási ütem és az élettartam. Ezt hasznosnak találták a tanulók az egyéni, felfedező munkájuk során is, idézek tőlük: „A RePLaT–Chaos-edu jól felépített program, a használati útmutató szükséges hozzá, vagy pedig a program alapos megismerése, de ezek után nagyon jól lehet használni. Nagyon érdekes és tanulságos.” A programban a *Káoszjellemzők* és a *Káosz mérése* menük segítették a tanulókat a káosz jellemzőinek felfedezésében, azonban tapasztalatom szerint tanári útmutatásra is szükség lehet, mivel önállóan csak a tanulók 30%-a rajzolta meg a káosz két jellemzőjének meghatározásához szükséges diagramokat.

Az elemi érdeklődés felkeltésére a káoszfizika iránt ugyanakkor ajánlom a *Mi a káosz? Kísérletekre és megfigyelésekre alapozott bevezetés a kaotikus jelenségek fizikájába – Interaktív tananyag középiskolások iskolai vagy online tanulásához* honlapot [19], illetve a *Káoszfizika: mit tanítsunk bárom leckében?* [20] angol nyelvű cikket. Összhangban ezekkel a káosz jellemzőinek három fontos aspektusára fókuszáltam: 1) A pillangóhatás megtapasztalása a kezdeti feltételek kismértékű változtatása következtében. 2) Kaotikus mennyiségek mérése. 3) A kaotikus jelenségekre jellemző fonalas, fraktálszerű mintázat, ahogy a káoszt bevezető egyetemi tankönyv is sugallja [12].

Ezért ajánlom a RePLaT–Chaos-t a fizika mellett a földrajz órákra is, továbbá olyan projektekhez, amelyek környezeti áramlásokkal vagy környezetszennyezés terjedésével kapcsolatosak.

Idézek egy diák ezzel kapcsolatos beadványából: „Amikor megkaptam a feladatot, kíváncsi voltam, hogyan adja vissza a program az ismert széláramlatokat, és kellemesen meglepődtem. Nagyon jó volt látni, hogy a szelek miként befolyásolják a vulkáni hamu terjedését, lerakódását, és végig lehetett követni szépen az egész folyamatot.”

A felfedezésen alapú tanulás megvalósítása a természettudományos oktatásban köztudottan képes növelni a tanulók motivációját a természettudományos tanulás iránt, és elősegíti a tudományos gondolkodást [21]. Ezt a gyakorlatban is megtapasztaltuk, és láthattuk, hogyan játszanak a diákok, és motivációjuk hogyan növekedett. Összességé-

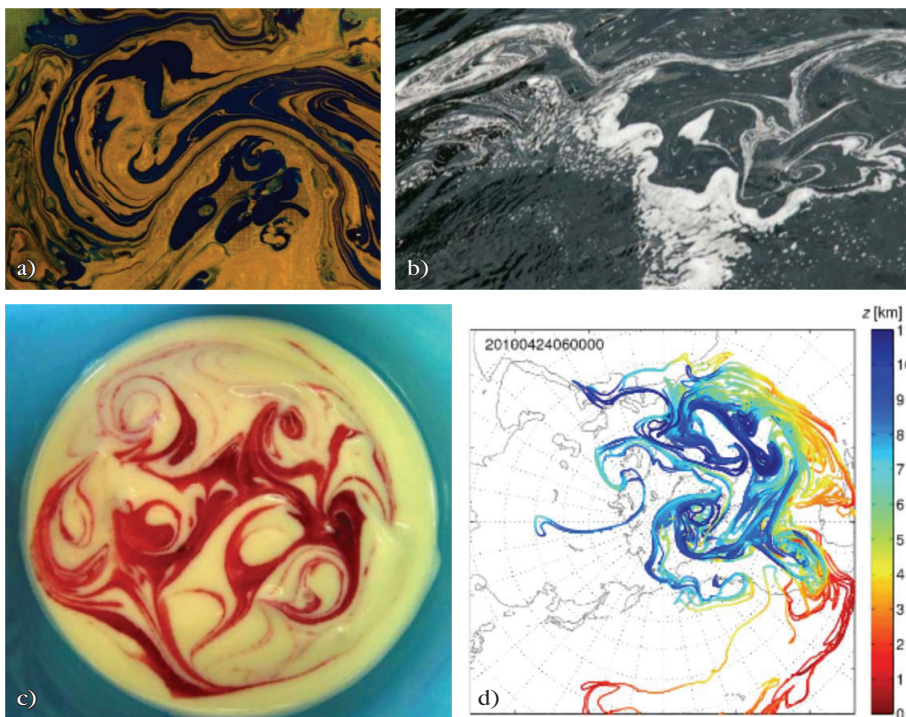
ben a diákok nagyon élvezték a program használatát, nem csak játszadoztak, hanem felfedezték a lehetőségeket. Örömteli volt látni őket ebben a flow állapotban [22]. Lehetőségem volt megtapasztalni, hogy a felfedezésen alapuló tanítás miként teszi élvezetessé, feltáróvá és ezáltal sikeressé az egész folyamatot. Érdemes megjegyezni, hogy ez a program jó alapötletet, keretet teremthet gamifikációhoz [23] is, egy vulkánkitörés köré izgalmas történetet lehet építeni.

## Összegzés

A diákokat nagyon motiválta a program használata, nemcsak játszottak, hanem fel is fedezték a különböző lehetőségeket. Megkérdeztem őket, hogy milyen volt az alkalmazás használata. Idézem néhány választukat: „Soha nem volt még ilyen tanulási élményem.” „Jó volt vele játszani.” „Izgalmas volt.” Ahogyan a válaszok mutatják, és a tapasztalatom is ezt erősíti meg, a RePLaT–Chaos-edu használata nagyon jó lehetőség a felfedező tanulásra.

A RePLaT–Chaos-edu egy könnyen kezelhető és szabadon hozzáférhető program. Segít a tanulók figyelmét felhívni a káosz fontosságára a környezeti jelenségekben. Bár eredetileg a program nem erre van kihegyezve, a káosz olyan fontos tulajdonsága, mint a pillangóhatás, könnyen kimutatható, felfedezhető a segítségével, és a káosz fontos jellemzői mérhetőek vele.

5. ábra. a) Márványozás során kapott fraktálok szálal mintázata – 10 cm-es nagyságrend (fotó: szerző). b) Víz felszínén szennyező hab mintázata duzzasztógát előtt – 10 m-es nagyságrend (fotó: Károlyi Gy.). c) Ribizliszörp keveredési mintája pudingban – 1 cm-es nagyságrend (fotó: szerző). d) Vulkánkitörést követően gázfelhő mintázata – 1000–10 000 km-es nagyságrend. A szimuláció mintha a Fujiból (Japán; 3776 m, szélesség: 35°10' É, hosszúság: 138°40' K.) származó gázfelhőt mutat 10 nappal a kitörés után (2010. április 24-én). A színek magasságot jelölnek (a RePLaT–Chaos-edu program beépített esete).



## Irodalom

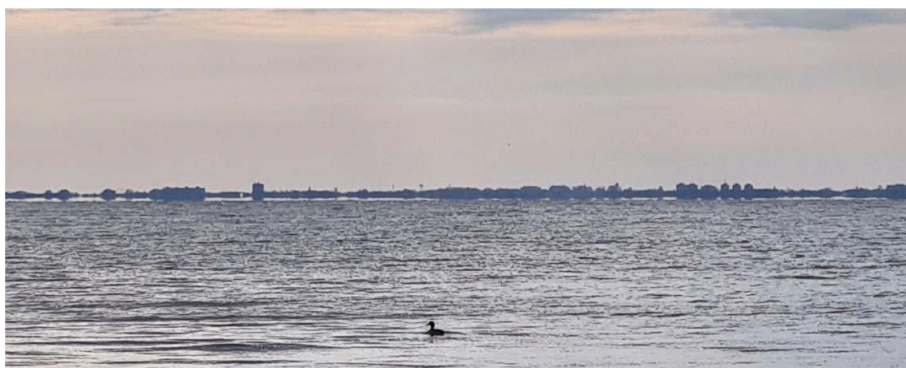
1. <http://theorphys.elte.hu/fiztan/volcano/#edu>
2. T. Haszpra: *RePLaT–Chaos-edu* – A légköri szennyeződésterjedés kaotikus vonásainak szemléltetésére. Elméleti háttér és felhasználói dokumentáció (2018); [http://theorphys.elte.hu/fiztan/volcano/RePLaT-Chaos-edu\\_hu.pdf](http://theorphys.elte.hu/fiztan/volcano/RePLaT-Chaos-edu_hu.pdf)
3. T. Haszpra: A simple educational application to discover the chaotic nature of atmospheric advection. *Atmosphere* 11 (2019) 29.
4. T. Haszpra, T. Tél: Topological entropy: a Lagrangian measure of the state of the free atmosphere. *J. Atmosph. Sci.* 70 (2013) 4030–4040.
5. T. Haszpra, T. Tél: Escape rate: a Lagrangian measure of particle deposition from the atmosphere. *Nonlin. Proc. Geophys.* 20 (2013) 867–881.
6. T. Haszpra, M. Kiss, É. Izsa: RePLaT–Chaos-edu: an interactive educational tool for secondary school students for the illustration of the spreading of volcanic ash clouds. *J. Phys.: Conf. Ser.* 1929 (2021) 012079.
7. I. Bajkó: Inquiry-based Science Teaching – The Use of RePLaT–Chaos Application TIM Conference (2022) – közlésre elfogadva
8. I. Bajkó: Chaos Physics in Secondary School – A Material Applicable in Online Teaching. *Horizons of mathematics, physics and computer sciences* 50 (2021) 22–34.
9. I. Bajkó: Chaos Physics in High School – Challenges in Multimedia Application GIREP Conference (2022) – közlésre elfogadva.
10. E. N. Lorenz: *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, London (1995)
11. J. Gleick: *Káosz: Egy új tudomány születése*. Göncöl Kiadó (1999)
12. Tél T., Gruiz M.: *Kaotikus dinamika*. Universitas Kiadó (2002)
13. Szatmáry-Bajkó Ildikó: „Káoszt”? – Azt! – Káoszelmélet a középiskolában. *Fizikai Szemle* 56/11 (2006) 376–380; <http://fizikai szemle.hu/archivum/fsz0611/Szatmari-BajkoI.pdf>
14. Szatmáry-Bajkó Ildikó: Káosz kísérletek a középiskolai fizika oktatásban. In: Juhász András, Tél Tamás: *Fizikatanítás tartalmasan és érdekesen*. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizika Doktori Iskola, Budapest (2010); <http://users.atw.hu/fizkonf/program/proc/szekcio-poszter/Szatmary-Bajko.pdf>
15. I. Szatmáry-Bajkó: Handicraft and aesthetic experience in teaching chaos physics. In: A. Király, T. Tél: *Teaching Physics Innovatively*. ELTE, Budapest (2016) p. 15; <http://fiztan.phd.elte.hu/letolt/konfketet2015.pdf>
16. A. Gróf: From Pressure Maps and Wind Velocity to Northern Lights and Other Fascinating Phenomena on the Rotating Earth. *Phys. Teacher* 59 (2021) 103–107.
17. A. I. V. Vörös: Panel debate on energy production in high school physics teaching. *AIP Conference Proceedings* 2018 (2020) 060008.
18. M. Pető: Teaching atmospheric physics using Arduino-based tools. *AIP Conference Proceedings* 2018 (2020) 060003.
19. <http://theorphys.elte.hu/fiztan/chaosH/>
20. T. Tél: Chaos physics: what to teach in three lessons? *Phys. Educ.* 56 (2021) 045002(8) [http://theorphys.elte.hu/tel/pdf\\_pub/PEd56.pdf](http://theorphys.elte.hu/tel/pdf_pub/PEd56.pdf)
21. C. P. Constantinou, O. E. Tsvitanidou, E. Rybska: What Is Inquiry-Based Science Teaching and Learning? In: *Professional Development for Inquiry-Based Science Teaching and Learning*. Springer (2018) 1–23.
22. J. Nakamura, M. Csíkszentmihályi: Flow theory and research. In: *Handbook of positive psychology*. Oxford University Press (2009) 195–206.
23. M. Kalogiannakis, S. Papadakis, A. Zourmpakis: Gamification in Science Education. *A Systematic Review of the Literature Education Sciences* 11 (2021) 22.

# KÖVESSÜK A FÉNYEKET – DÉLIBÁBOK NUMERIKUS SZIMULÁCIÓJA

Horváth Anna, Bámer Balázs, Barnaföldi Gergely Gábor  
Wigner Fizikai Kutatóközpont

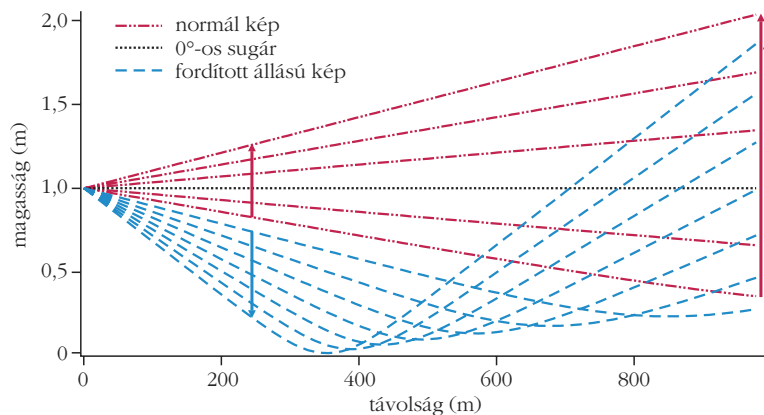
„Tán a fényes délibábot?  
Hisz olyat már sokat látott...”  
Petőfi Sándor: *Arany Lacinak*

Rengeteg misztikus történet, legenda kezdődik úgy, hogy a főhős egy sűrű erdőben világgosságot lát, amelynek azután a nyomába ered. A fény forrása általában valamilyen kétes szándékú lény – manó, tündér, boszorkány –, mint az előbb-utóbb kiderül, de addigra már késő visszafordulni. Talán biztonságosabb lenne hősünk számára, ha a fényforrás helyett inkább az összes fény sugarat egyszerre kezdené el követni, elvégre azok mind a bűbájtól indulva tartanak felé. Lehetséges-e a fényutak egyenkénti visszakövetése, azaz a *ray tracing*? Nos, a számítógépes grafikában igen, úgyhogy



1. ábra. Délibáb a Balaton fölött (Siófok Balatonfüredről fotózva). Az épületek és fák a távolban „visszatükröződnek” egy vízszintes vonal mentén.

reméljük, hősünk nem felejtette otthon a laptopját. Ekkor csak arról kell megbizonyosodnunk, hogy félrevezethet-e a fény sugarak? Ami azt illeti... igen. A



2. ábra. Fény elhajlása aszfaltút fölött. A környezeti hőmérséklet  $38,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , a sugarak  $-0,18^{\circ}$ – $0,06^{\circ}$  alatt indulnak a vízszinteshez képest  $0,02^{\circ}$ -os lépésekben.

légtörési viszonyoktól függően a fény különféle görbült útvonalakon haladhat – fejjel lefelé álló „tükröképeket”, a föld felett lebegni látszó „mesebeli” tájakat, repülő hajókat hozhat létre [1–4]. Hősünknek tehát nagyon óvatosnak kell lennie.

Jelen cikk a délibábok (*fata morgana*) természeti jelenségét mutatja be egy általunk fejlesztett számítógépes szimuláció segítségével. A program sugárkövetés módszerével egy tájképből a megfelelő légtörési paraméterek beállítása után délibábos képet generál. A kód szabadon letölthető és oktatási célokra felhasználható [5].

## Mi a délibáb?

A délibáb egy optikai jelenség, amit a fénysugarak elhajlása okoz változó törésmutatójú közegben. Nevét a Messinai-szorosban megfigyelhető jelenségről kapta, amelyet az olasz hajósok az Artúr-mondakörből ismert Morgan tündérről (Artúr király nővéréről, Morgan le Fay) asszociálták. Magyar neve, a „délibáb” kissé félrevezető, hiszen kialakulásához nem szükséges, hogy dél legyen, sőt bármely égtáj felé fordulva látható, a Nap állásától függetlenül. Általában egy fordított kép jelenik meg a valódi látvány alatt; vízszintes tengely menti „tükröződésnek” tűnik (1. ábra), de

A kutatást a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) OTKA K135515 és a 2020-2.1.1-ED-2021-00179 projektjei támogatták. A számítási erőforrásokat a Wigner Tudományos Számítási Laboratórium (WSCLAB) (korábban Wigner GPU Laboratórium) biztosította. Köszönjük *Berényi Dánielnek*, *Cserti Józsefnek* és *Dávid Gyulának* a hasznos tippet és diskusziókat.



*Horváth Anna* 2018-ban szerzett a BME TTK-n BSc fizika diplomát, 2021-ben pedig szintén a BME-n MSc fizikus diplomát, mely keretein belül 2020-ban ERASMUS programon vett részt a finnországi University of Oulu egyetemen. Jelenleg az ELTE Fizika Doktori Iskola PhD hallgatója, valamint a Wigner FK tudományos segédmunkatársa.

nem tükröződésről van szó. A délibáb létrejöttéhez a közegben (jelen esetben levegő) hőmérséklet-különbségnek kell kialakulnia. Nyaranta, amikor a nap felmelegíti a földfelszín legfelső rétegét (például az autópályákat, sziklákat, sivatagot), a talajközeli légrétegek melegebbek lesznek a föntebb elhelyezkedőknél. Hasonló hőmérséklet-eloszlás alakulhat ki tavak [6], tengerek fölött a reggeli, illetve délelőtti órákban, mikor a levegő még hidegebb a víznél. Állandó nyomáson a különböző hőmérséklet-értékekhez (az egyetemes gáztörvény alapján) különböző sűrűségek és így különböző törésmutatók tartoznak. A törésmutató-különbség a rétegek között a fény elhajlását okozza; a fordított kép, ami délibábként megjelenik, ezeken az elhajlott sugarakon keresztül érkezik el hozzánk, a megfigyelőkhöz.

A jelenség pontos megértéséhez elsőként vizsgáljuk meg a fénysugarak délibáb esetén. A 2–4. ábrák a későbbiekben ismertetett számítógépes program segítségével készültek. A 2. ábrán azt láthatjuk, hogyan haladnak a fénysugarak a forró aszfalt fölött egy meleg nyári napon. Ha a szemünk a 2. ábra bal oldalán, 1 m-es magasságban, a sugarak találkozásánál helyezkedne el, akkor a jobb oldalon elhelyezkedő tárgyról érkező sugarak a grafikon vonalainak megfelelően érkeznének a szemünkbe. Egy tárgy összes pontjáról a fénysugarak minden irányban elindulnak, de értelemszerűen csak azokat látjuk, amelyek a szemünkbe érkeznek. Délibábok kialakulása esetén egy adott pontból nem csak egy sugár jut el hozzánk, hanem egy másodlagos is. A 2. ábrán piros szaggatott-pontozott vonallal jelöltük azokat a sugarakat, amelyek az egyenes állású képet hozzák létre, amit normális körülmények között látnánk. Ezek a sugarak a földtől elég távol haladnak ahhoz, hogy ne hajoljanak el (a törés-



*Bámer Balázs* 2001-ben végzett a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karán mérnök–informatikusként. Azóta szoftverfejlesztőként dolgozik jórészt beágyazott C++ feladatokon. Jelenleg a Wigner FK Nehézion-fizikai Kutatócsoportjában tudományos segédmunkatárs.

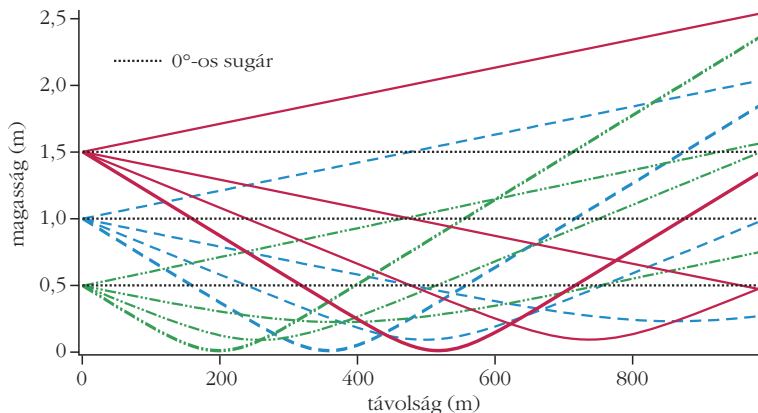


*Barnaföldi Gergely Gábor* 2001-ben szerzett diplomát az ELTE TTK fizikus és csillagász szakán, 2006-ban pedig PhD fokozatot. Jelenleg a Wigner FK RMI Nehézion-fizikai Kutatócsoportját vezeti, ahol az erősen kölcsönható anyag fázisait vizsgálja elméleti szimulációkkal a CERN ALICE kísérletében, valamint kompakt csillagokban is.

mutató az első pár cm-en változik a legtöbbet), így a látott kép a szokásos módon képződik. A fordított állású kép kialakulását a szaggatott késsel jelölt sugarak szemléltetik. Ezek eredetileg a talaj irányában indulnak el, viszont a változó törésmutató hatására visszakanyarodnak, és ugyancsak eljutnak a szemünkbe. Ha jobban megfigyeljük az optikai utakat, láthatjuk, hogy ezek a sugarak keresztezik egymást, és az fog a legalacsonyabbról a szemünkbe érkezni, ami a tárgy legmagasabb pontjáról indult – tehát a tárgy tetejét alul fogjuk látni. A pontozott feketével jelölt sugár induláskor a vízszintessel  $0^\circ$ -os szöget zár be. Ez a sugár szintén elhajolhat, de a földtől távol csak elhanyagolható mértékben.

Megvizsgálhatjuk, hogy miként változik a kép, amit látunk, ha különböző magasságokból nézünk a tárgy (tárgy) felé. (Az egyes sugarak nézőponttól függetlenül ugyanolyan szög alatt indulnak.) Érdekes megfigyelni a 3. ábrán szemléltetett álló és fordított képek arányait, ami eltér az egyes esetekben. A legmagasabb nézőpontból (piros folytonos görbék) induló vastag vonal a földhöz legközelebb visszaforduló sugarat reprezentálja. Ha összehasonlítjuk a többi nézőpont leglejjebb jutó sugarával (vastaggal kiemelve minden esetben), akkor láthatjuk, hogy a piros folytonos jut el a legalacsonyabbra a jobb oldalon, míg a zöld pontozott-szagatott a legmagasabbra. Ez azt jelenti, hogy ha lentebbről nézünk a délibábra (zöld pontozott-szagatott), akkor a fordított képen a tárgy jóval magasabb pontjai is látszódnak. Különböző magasságokból nézve azonban máshol fog látszódni a „tükrötengely”, amit körülbelül a fordulópontra húzott érintő ad meg az egyes esetekben. Alacsonyabbról nézve magasabbra kerül; a zöld pontozott-szagatott sugarak nem jutnak olyan közel a tárgy aljához, mint a folytonos pirosak. Megjegyezzük, hogy a délibáb minden esetben levág valamennyit a tárgy aljából, illetve a tárgy előteréből, hiszen azok helyén jelenik meg a fordított kép.

A 4. ábrán különböző távolságokból „nézhetünk” a délibábra. Az előző grafikonhoz hasonlóan itt is vastag vonal jelzi azokat a sugarakat, amelyek még anélkül haladnak el a földfelszín fölött, hogy beleütköznenek és elnyelődnenek. Természetesen minél messzebről nézünk valamit adott látószög alatt, annál több „fér bele a képbe”, viszont a délibáb és a primer kép aránya nem triviálisan változik. Ha távolabbról nézzük, a fordított kép a tárgy magasabb pontjairól származik (szaggatott zöld görbék), míg ha közelebről, akkor a „visszatükröződésben” inkább a tárgy alját látjuk (piros szaggatott-pontozott). Nem egyszerű arányosságról, átskálázásról van szó, hiszen, ha megfigyeljük, például a



3. ábra. Fény elhajlása aszfaltút fölött, különböző szemmagasságokkal. A környezeti hőmérséklet  $38,5^\circ\text{C}$ , a sugarak  $-0,18^\circ$ ,  $-0,12^\circ$ ,  $-0,06^\circ$ ,  $0^\circ$  és  $0,06^\circ$  alatt indulnak.

szaggatott zöld vastag görbe metszi a zöld vízszintet, míg a piros szaggatott-pontozott vastag közel sem éri el a piros vízszintet.

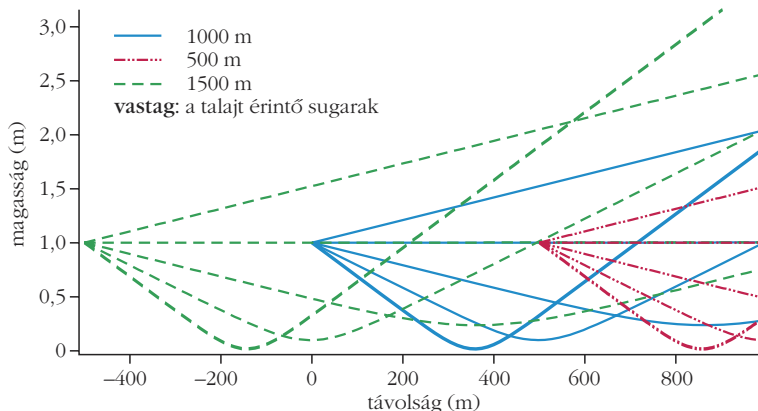
Összegzésképpen elmondható, hogy délibábot tulajdonképpen bármilyen távolságból láthatunk, sőt akár egy tanteremben is [7] létrehozható egy fűtött felület segítségével. Nyílt terepen (vizek fölött, pusztán, autópályán) több tíz kilométeres távolságokban elhelyezkedő objektumok képét is „tükrözheti” a változó törésmutatójú közeg.

## Milyen hőmérsékleti viszonyok kellene a délibáb megfigyeléséhez?

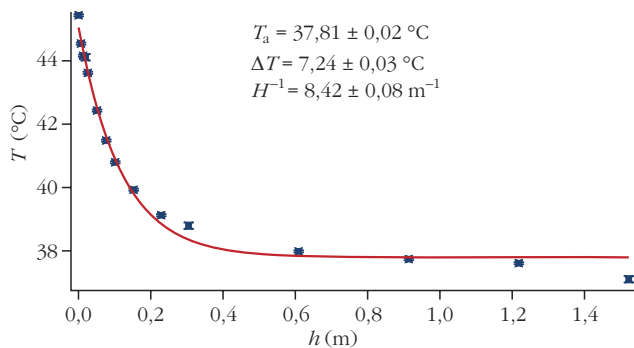
Délibáb megfigyeléséhez nem kellene különleges természeti körülmények, ami szükséges: a tiszta látási viszonyok és a jó térbeli geometria mellett (szóval, ha nem egy hegységben, vagy az erdő közepén próbálkozunk) a talaj és a levegő közti akár néhány fokos hőmérséklet-különbség is okozhat észrevehető jelenléget. Hazánkban leggyakrabban az alföldeken, vizek fölött, illetve autópályák mentén találkozhatunk vele.

A hőmérsékleti viszonyok vizsgálatához az 5. ábrán bemutatott mérési adatokat használtuk, amelyeket aszfaltút fölött mértek a nyári napi maximum hő-

4. ábra. Fény elhajlása aszfaltút fölött, különböző távolságok esetén. A környezeti hőmérséklet  $38,5^\circ\text{C}$ , a sugarak  $-0,18^\circ$ ,  $-0,12^\circ$ ,  $-0,06^\circ$ ,  $0^\circ$ , valamint  $0,06^\circ$  alatt indulnak.







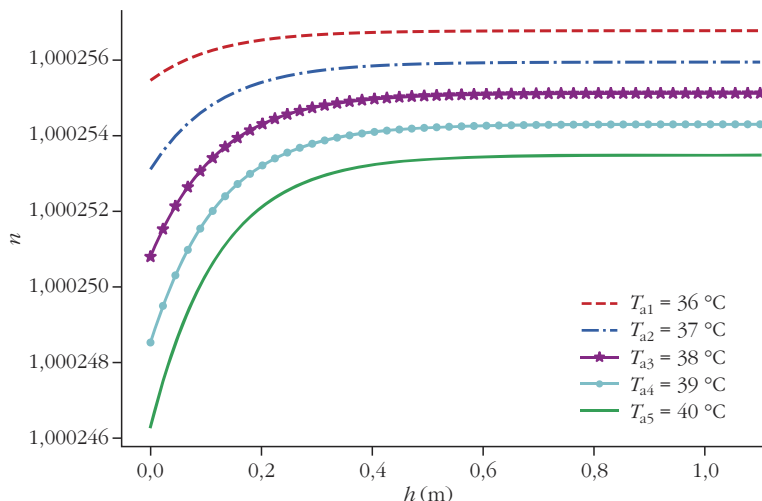
5. ábra. Hőmérséklet-eloszlás a földtől mért magasság függvényében. A mérési pontokra exponenciális függvényt illesztettünk, a függvény paraméterei az ábrán olvashatók.

mérséklet idején [8]. A grafikon a hőmérsékletet mutatja a felszíntől mért magasság függvényében. Az adatokra exponenciális függvényt illesztettünk, és több ugyanilyen mérés felhasználásával [8] alkottunk egy modellt, amely a levegő hőmérsékletének megadásával leírja a hőmérséklet magasságtól való függését szintén exponenciális formában:

$$T(h) = T_a + \Delta T e^{-h/H},$$

ahol  $T_a$  a környezeti hőmérséklet,  $h$  a talajtól mért távolság,  $\Delta T$  a kialakuló hőmérséklet-különbség,  $H$  pedig a karakterisztikus hossz, ami a hőmérséklet-változás gyorsaságát jellemzi (térben). A levegő hőmérséklete a talajtól akkora távolságban mérendő, ahol a Nap által felmelegített járdának már nincsen rá hatása, és állandónak tekinthető. A grafikonon jól látszik, hogy a hőmérséklet az első 10 cm-en változik a legjelentősebben, 20 cm-re a talajtól pedig már egyre inkább egy konstans értékhez tart, ami a környezeti hőmérséklet, a levegő hőmérséklete. Hasonló hőmérsékletprofil alakul ki nem csak egy járda vagy autótűt, hanem például egy lapos fűtőtest vagy egy tó fölött is, ahol a víz melegebb a levegőnél. Mivel a legnagyobb hőmérséklet-változás (hőmérséklet-gradiens) a földhöz közel alakul ki, ezért

6. ábra. Az  $n$  törésmutató függése a földtől mért magasságtól, különböző környezeti hőmérsékletek esetén.



a fény útja is ott hajlik el a legjobban. A sugarakat bemutatató ábrákon is látható, hogy a görbék sokáig szinte egyenesen haladnak, és egészen közel a talajhoz görbülnek csak el jelentősen. A délibáb kialakulásának kulcsa tehát legfőképp a felszínhez közel elhelyezkedő légréteg hőmérsékleti viszonyaiban rejlik.

A  $n$  törésmutatót a  $T$  hőmérsékletértékekből egy egyszerű összefüggés [9], az

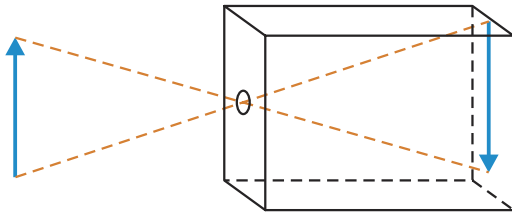
$$n = 1 + \frac{7,86 \times 10^{-4} p}{273,15 + T}$$

segítségével határoztuk meg, ahol figyelembe vettük még a  $p$  légköri nyomást, a páratartalom hatását viszont elhanyagoltuk. A nyomás a modell felállítása során konstans, 101 kPa volt. A törésmutató értékei a talajtól mért távolság függvényében a 6. ábrán láthatók. Mivel a hőmérséklet és a törésmutató között széles tartományon közel lineáris az összefüggés, a profil jellegében nagyban leköveti a hőmérsékletét: a legnagyobb változás az első 10 cm-en történik. Láthatjuk, hogy a talajtól távolabb nagyobb a törésmutató; itt található az optikailag sűrűbb közeg, ahol a fény lassabban halad, és ami felé haladás közben elkanyarodik. Megjegyezzük, hogy más jellegű hőmérséklet-eloszlások esetében is ki tud alakulni délibáb, amikor például a levegő melegebb a talajnál. Ilyenkor a fordított kép a valódi fölött jelenhet meg.

## Kövessük a fényt, vagy inkább a fénysugarakat!

A fényutak kirajzolásához a számítógépes grafikából (játékok, animációs filmek) ismert sugárkövetés módszerét használtuk, amely például az erre a feladatra specializált hardveren, egy videokártyán (GPU) gyorsan fut. Az eljárás lényege, hogy a fénysugarakat a szemünk (vagy a kamera) pozíciójából indítjuk a „lefotózni” kívánt kép minden pixelének irányába, és megnézzük, hova érkezik egy 3D-s elrendezésben. Ha például egy adott fénysugár egy almán ér véget, akkor tudjuk, hogy a sugárhoz tartozó pixel olyan színű lesz, mint az alma az adott pontban. Mindez azért lehetséges, mert optikában a fényutak megfordíthatók, így teljesen mindegy, hogy a valódi haladási irányukban követjük-e őket végig, azaz a tárgytól a szemünk felé, vagy pedig fordítva.

A délibábokat szimuláló programunkban lyukkamera-elrendezést használtunk (7. ábra), valamint az eikonál-egyenletet a fény útjának lekövetésére. Az ábrán a fordított kép az ernyőn látható, amelynek minden egyes pontjából egy fénysugarat indítunk a lyuk felé. Ezután következik a sugárkövetés, amely során megnézzük, hova érkezik. Az ábrán a fényutakat egyenes vonalak jelölik, és a számítógépes gra-



7. ábra. A lyukkamera sematikus ábrája.

fikában is inkább erre koncentrálnak, a törőfelületet nem számítva, viszont a délibábok szimulálására ez nem elegendő. Ahogy azt a 2–4. ábrákon láthatuk, a délibábok kialakulásakor a fénysugarak elhajlanak, ezért szükség van egy egyenletre, ami ezt a helyfüggő elhajlást meghatározza. A Snellius–Descartes-törvény is használható a jelenség leírására, de nem ezt alkalmaztuk, hanem az eikonál-egyenletet, amely numerikusan kevesebb hibát okoz, és jobban alkalmazható folytonos közeg leírására. Az egyenlet a hullámegyenletből vezethető le a rövid hullámhosszú határesetben [10], és a hullámfüggvény  $\varphi$  fázisára van felírva, ami a hullámfront terjedési idejével arányos:

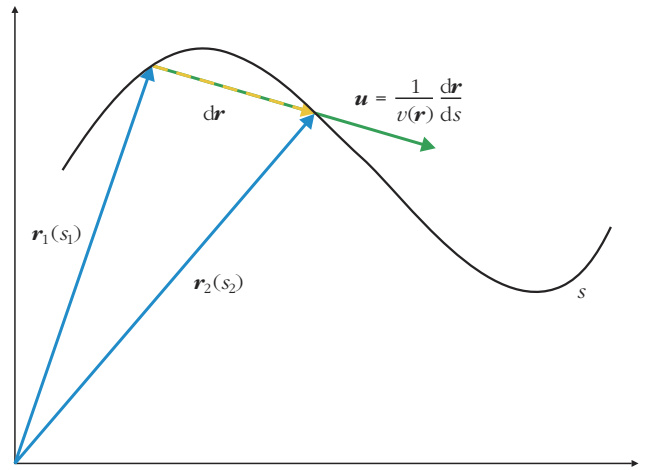
$$|\nabla\varphi|^2 = \frac{1}{v(\mathbf{r})^2},$$

ahol  $v$  a közegbeli terjedési sebesség. Ebből a parciális differenciálegyenletből felírhatók [11] a pályaeigenletek közös differenciálegyenletekre való visszavezetéssel, amelyeket a program a pálya mentén felintegrál, és a fénysugarak meghatározására használ:

$$\frac{d\mathbf{r}}{ds} = v(\mathbf{r})\mathbf{u}(\mathbf{r}),$$

$$\frac{d\mathbf{u}(\mathbf{r})}{ds} = -\frac{1}{v(\mathbf{r})^2}\nabla v(\mathbf{r}),$$

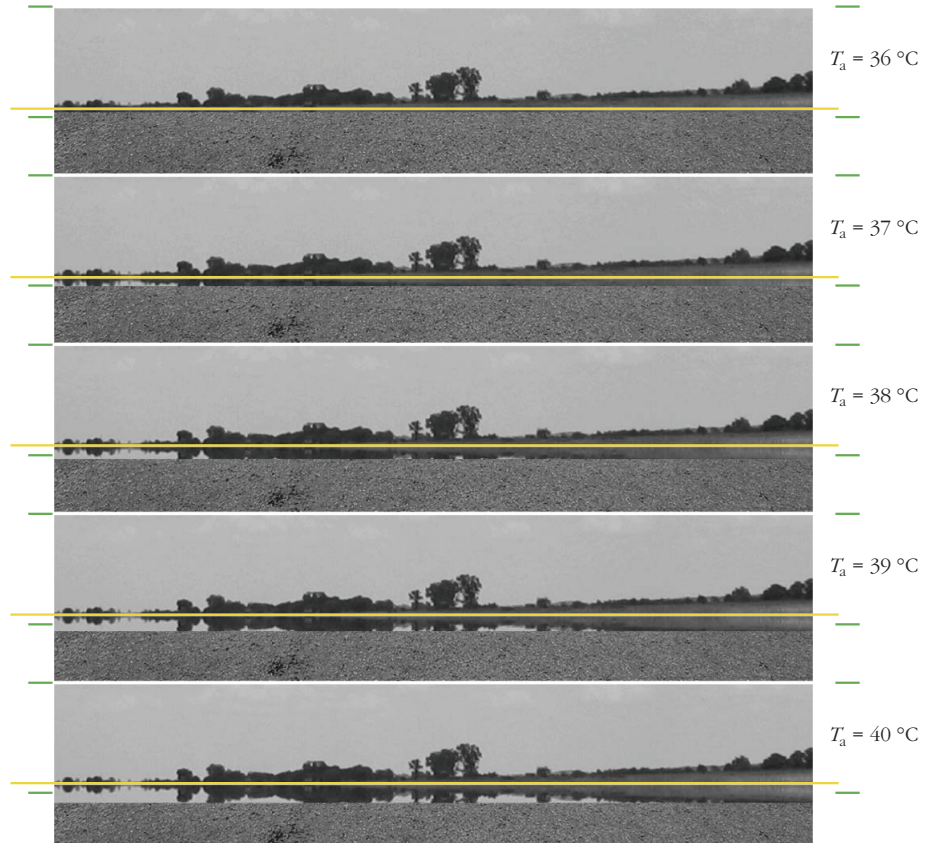
ahol  $\mathbf{r}$  a helyvektor,  $\mathbf{u}$  a lassúságvektor ( $d\mathbf{r}/ds/v(\mathbf{r})$ ) és  $s$  pedig a pályamenti hossz. A pályaeigenletek megadják, hogy adott infinitezimális  $ds$  elmozdulás esetén, ami a pálya mentén történik, mi lesz a helyvektor  $d\mathbf{r}$  megváltozása (8. ábra). Ez a törésmutató függvénye, hiszen  $v = c/n$ , ahol  $c$  a vákuumbeli fénysebesség. Modellünkben a törésmutató a talajtól mért távolság függvénye, és ezt az eloszlást kapja meg a program a fénysugarak kiszámolásához adott beállított környezeti paraméterek mellett. Az egyenleteket Runge–Kutta numerikus integrálási módszerekkel oldjuk meg.



8. ábra. Differenciák a sugárkövetés során.

Az általunk fejlesztett program szabadon felhasználható tanulási, oktatási célból. Segítségével elhelyezhetünk egy tárgyat (kép) általunk választott távolságban, és a hőmérsékleti viszonyok, geometria beállítása után visszakapjuk, hogy mit látnánk akkor, ha köztünk és a lehelyezett tárgy között a megadott körülmények uralkodnának: a fénysugarak elhajlanának, és délibábot hoznának létre. A program segítségével figyelembe vehető többek között a Föld görbülete, és annak hatásai a látványra. A kód az [5] helyről tölthető le, ahol a használat részletes leírása is megtalálható.

9. ábra. Látvány az aszfaltút fölötti hőmérséklet-eloszlás felhasználásával 1000 m-es távolságból, 1 m-es szemmagassággal, öt különböző környezeti hőmérsékletértékre.



## Numerikus szimulációk

A szimulált képek a fizikai beállításoktól függenek. A szemmagasság a 9. ábra képein rendre 1 m volt, és a Föld görbületét is figyelembe vettük. A környezeti hőmérséklettől való függést a 9. ábra [12] segítségével mutatjuk be, ahol az aszfalt feletti hőmérséklet-eloszlás modelljének felhasználásával készítettünk szimulációkat. A tárgysíktól vett távolság 1000 m volt, a tárgy magassága (tehát a szimuláció alapjául megadott képé) 15 m. A sárga folytonos vonal a „tükörtengely” jelöli, a zöld vonások a kép szélét. A szimulációk alján látható „fű” nem része a sugárkövetésnek. Ez valójában a kép előtere, utólag van hozzáadva, hogy a képek egyformák legyenek. Modellünkben a két réteg között kialakuló  $\Delta T$  hőmérséklet-különbség lineárisan növekvő függvénye a környezeti hőmérsékletnek. Ez a lineáris összefüggés csak magasabb hőmérséklet-tartományban, körülbelül 36 °C-tól használható. Minél magasabb a környezeti hőmérséklet, annál erőteljesebb a hőmérséklet-változás és a kialakuló fordított kép mérete is. Nagyobb  $T_a$  esetén a tükörtengely magasabban helyezkedik el, a fordított kép tengelyhez közelebb eső része pedig függőleges irányban egyre inkább összenyomódik.

A 9. ábra képeiből egy szemléltető videót is készítettünk, ami a [13] helyen tekinthető meg. Az animáción a látvány a környezeti hőmérséklet növekedésével változik.

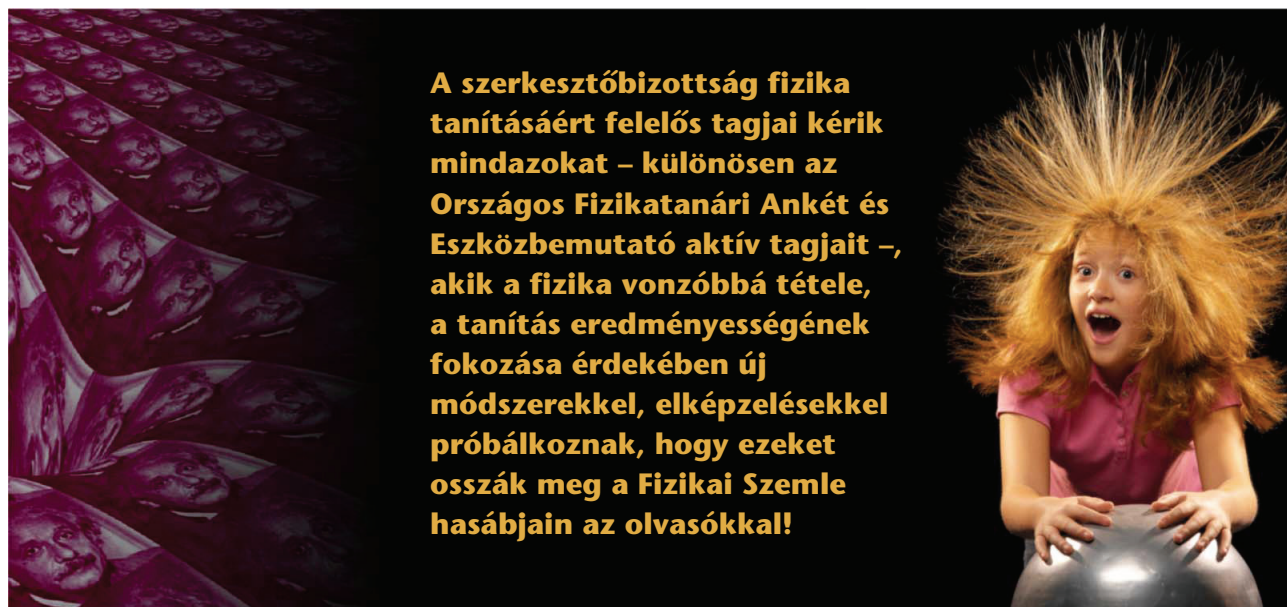
## Összegzés, kitekintés

A Wigner Tudományos Számítási Laboratórium jelen cikkben bemutatott projektjében folytatott kutatásunk célja a fényelhajlás jelenségének vizsgálata változó törésmutatójú közegben. A programfejlesztés során derült ki, hogy a jelen cikkben felvetett probléma

megoldását használhatjuk egy közismert természeti jelenség szimulálására. A kifejlesztett programkód és a mellékelt videók használhatók akár a délibáb kialakulásának bemutatására a fizika tanítása során, akár szabadon továbbfejleszthetők más, komplexebb problémák esetére is, amilyen például a gravitációs lencsézés [14].

## Irodalom

1. J. Blanco-García, J. B. V. Dorrió, F. Ribas-Pérez: Photographing Mirages Above the Sea Surface. 8<sup>th</sup> International Conference on Hands-on Science at Ljubljana, Eslovenia (September 2011)
2. W. H. Lehn: Exact temperature profile for the hillinar mirage. *American Journal of Physics* 69 (2001) 598; doi: 10.1119/1.1333098
3. T. Kosa, P. Palffy-Muhoray: Mirage mirror on the wall. *American Journal of Physics* 68 (2000) 1120; doi: 10.1119/1.1286311
4. P. R. Barker, P. R. M. Crofts, M. Gal: A superior „superior” mirage. *American Journal of Physics* 57 (1989) 953; doi: 10.1119/1.16138
5. <https://gitlab.wigner.hu/bamer.balazs/numerical-simulate-mirage/-/tree/fizikai-szemle-aszfalt>
6. Selker, J. S., L. The´venaz, H. Huwald, A. Mallet, W. Luxemburg, N. van de Giesen, M. Stejskal, J. Zeman, M. Westhoff, M. B. Parlange: Distributed fiber-optic temperature sensing for hydrologic systems. *Water Resour. Res.* 42 (2006) W12202, doi:10.1029/2006WR005326
7. Nabil W. Wakid: Temperature profile and double images in the inferior mirage. (2019) arXiv:1911.03507
8. D. Duncan: *Influence of Pavement Type on Near Surface Air Temperature*. (2011) All Theses, 1277.
9. J. Stone, J. Zimmerman: *Index of Refraction of Air*. (2001), <https://emtoolbox.nist.gov/Wavelength/Documentation.asp> – utoljára látogatva: 2022. 08. 01.
10. Horváth J.: *Optika – Elektromágneses fényelmélet*. Tankönyvkiadó, Budapest (1966)
11. A. Rüger: *Dynamic Ray Tracing and its Application in Triangulated Media*. Dissertation, ProQuest, Ann Arbor, USA (1993)
12. A szimulációk bemenetétül használt képek forrása a Hortobágy (tájegység) Wikipedia-oldala: [https://hu.wikipedia.org/wiki/Hortobágy\\_\(tájegység\)#/media/Fájl:Racka\\_4.jpg](https://hu.wikipedia.org/wiki/Hortobágy_(tájegység)#/media/Fájl:Racka_4.jpg) – utoljára látogatva: 2022. 07. 29.
13. <http://fizikaiszemle.hu/extra/hortobagy>
14. Berényi Dániel a gravitációs lencsézés bemutatására programkódot fejlesztett: <https://github.com/Wigner-GPU-Lab/SchwarzschildRaytracer>



**A szerkesztőbizottság fizika tanításáért felelős tagjai kéri mindazokat – különösen az Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató aktív tagjait –, akik a fizika vonzóbbá tétele, a tanítás eredményességének fokozása érdekében új módszerekkel, elképzelésekkel próbálkoznak, hogy ezeket osszák meg a Fizikai Szemle hasábjain az olvasókkal!**

## AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT 2022. ÉVI KÜLDÖTTGYŰLÉSE

Az Eötvös Társulat 2022. május 7-én az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kara Ortway-termében tartotta meg Küldöttgyűlését. A hagyományok szerinti napirend előtti előadást idén *Derényi Imrétől* (ELTE Biológiai Fizika Tanszék) hallhatták a küldöttek és érdeklődők *Szomatikus evolúció fizikus szemmel – Miért élhetnek sokáig a többsejtű élőlények?* címmel. A nagy sikert aratott előadásra több kérdés is érkezett a hallgatóságtól. Reméljük, hogy a szerző azt cikk formájában a *Fizika Szemle* olvasóihoz is eljuttatja majd.

*Ormos Pál* elnök köszöntötte a jelenlévőket, és a határozatképesség megállapítása után megnyitotta az ülést. A 2021 szeptembere óta hivatalban lévő elnök bizik abban, hogy sikeres évet fog zárni a Társulat, amelynek működését a Covid-járvány előreláthatólag már nem fogja veszélyeztetni. A 2021-es évről, annak szakmai és gazdasági történéseiről *Groma István* főtítkári beszámolójában értesülhetnek a küldöttek.

A köszöntő után a Küldöttgyűlés egyhangúlag elfogadta a napirendet, valamint a Szavazatszámlláló Bizottságot és a jegyzőkönyv-hitelesítőket.

### Főtítkári beszámoló

Groma István először a 2021. évi közhasznúsági jelentésről, majd a 2022. évi költségvetésről beszélt.

A 2021-as év pénzügyileg egy gyengébb év volt, hiszen a Covid-járvány hatásai még erősen érződtek. Rendezvényeket csak az év második felétől lehetett tartani. A Társulat vagyona: 13.475.000.- forint, a tárgyévi eredmény 1.000.- forint (49.847.000.- forint kiadással szemben 49.848.000.- forint bevétel). Az SZJA 1%-ból 928.000.- forinttal gazdagodott a közösség, a magánszemélyek által fizetett tagdíj 5.319.000.- forint volt – mindkettő nőtt 2020-hoz képest.

Félő volt, hogy a 2021-re prognosztizált nagy értékű mínuszt nem tudja ledolgozni a Társulat, de az év pozitív értékkel zárult, ami azért fontos, mert két egymást követő negatív eredményű év a közhasznúság, így például a felajánlott SZJA 1%-ok jogosultságának elvesztésével járna.

Az évek óta bejártatott célzott támogatások – működési költségre, versenyekre, tanfolyamokra, tudományos díjakra, *Fizikai Szemlére* –, valamint a jogi tagdíjak mellett a *Wigner Jenő hazalátogatott* című

könyv kiadására kapott összesen 6.500.000.- forint támogatás jelentősen segítette a pozitív gazdasági eredmény elérésében.

### Tudományos tevékenység, kutatás

A tudományos tevékenység és kutatás területén a tudományos eredmények közzététele, azok megvitatásának színteret adó tudományos konferenciák, iskolák, előadások, valamint más tudományos rendezvények szervezése és lebonyolítása a Társulat kiemelt feladatai közé tartoznak.

A Covid-járvány a 2021. évben is erősen megnehezítette Társulat működését és anyagi helyzetét, hiszen még mindig volt csak megtartható rendezvény. Az alábbiakat sikerült megrendezni:

- Vákuumtechnika Tanfolyam (2021. augusztus 23–27., Debrecen, 43 fő)

- Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam (2021. szeptember 14–16., Zalakaros, 167 fő)

- Fizikus Doktoranduszok Országos Konferenciája (2021. szeptember 16–18., Balatonvilágos, 31 fő)

A területi és szakcsoportok által szervezett előadások például az Anyagtudományi Szemináriumok, a Részecskefizikai Szemináriumok, az *Atomoktól a csillagokig* előadássorozat, amely ma a hazai fizika világában – több milliós letöltéssel – messze a legnépszerűbb sorozat.

### Szakmai folyóiratok, kulturális örökség megővése

- A Társulat hivatalos folyóirata az 1951 óta havonta megjelenő *Fizikai Szemle*, amelyet a Társulat tagjai a tagdíj fejében kapnak. Egyre több tagunk választja az elektronikus kiadást (498 fő), amit a Titkárság küld ki. A *Fizikai Szemle* honlapját folyamatosan bővítjük, szépitjük. 2018-tól megtalálhatók a *Fizikai Szemle* honlapján a <http://fizikaiszemle.hu/mellekletek> címen a csak interneten keresztül elérhető anyagok (például prezentációk, képek, videók stb.).

Muszáj beszélni az újság jövőjéről, hiszen a *Szemle* főszerkesztője, *Lendvai János* 2023 januárjától nem vállalja e megterhelő tevékenységet. Nagyon fontos minél előbb új főszerkesztőt találni. A *Szemle* havi nyomdai költsége körülbelül 500 ezer forint, amiben benne van *Kármán Tamás* műszaki szerkesztőnek kifizetett összeg is. A változás okán a jövő évtől meg kívánják újítani a *Szemlét*, hogy hatékonyabb tudjon lenni. Ennek jegyében a szerzőktől a – majd kialakítandó – előírásoknak megfelelő, már szinte nyomdakész cikkeket kapunk, amelyekkel csak össze kell állítani a lapot.

Készült a Küldöttgyűlési jegyzőkönyv felhasználásával.

A 2021-re készült el *Mibály Katalin Anna, Lévai Péter, Kormos István* és Kármán Tamás szerkesztésében a már említett *Hazalátogatott Wigner Jenő* című könyv. A Társulat vállalta e fizikus társadalom számára fontos könyv kiadását, amihez az MNB 4 millió forintot, a Paksi Atomerőmű 1,5 millió, a Wigner Fizikai Kutatóintézet és a Nukleáris Társaság fél-fél millió forintot biztosított. A kötet a Társulat Titkárságán megvásárolható.

– Kulturális örökségünk megóvása érdekében rendszeresen koszorúzzuk fizikus nagyjaink síremlékeit, emléktábláit, 2021-ben a járványhelyzet miatt ezekre sajnos nem került sor.

#### *Tehetséggondozás, képességfejlesztés, ismeretterjesztés*

Eötvös Loránd missziója volt, hogy segítse a fiatalokat és a tanárképzést. E gondolat jegyében a Társulat különböző fizikaversenyek nyújt segítséget az általános iskolás diákoktól kezdve az egyetemi oktatásban részt vevő hallgatókig.

– A Társulat általában az alábbi országos és helyi fizikaversenyeket rendezi meg: Öveges József-, Eötvös Loránd-, Ortway Rudolf nemzetközi, Szilárd Leó-, Mikola Sándor-, Bay Zoltán-, Budó Ágoston-, Hatvani István-, Lánzos Kornél-fizikaversenyek, valamint a Várázstorony vetélkedő. 2021-ben ezen versenyek nagy részét csak online formában tudtuk megvalósítani.

A Társulat szervezésében felkészítés folyik az Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenyére. A magyar csapat a 2021. júliusi nemzetközi versenyen szépen szerepelt.

– A Társulat Tehetségpontja alkalomszerűen tart foglalkozásokat gyerekeknek. 2021-ben sajnos ezek is elmaradtak.

#### *Köznevelés, tanártovábbképzés*

– A tanártovábbképzés a Társulat oktatási szakcsoportjai, valamint területi csoportjai szervezésében folyik. Az Oktatási Szakosztály 2021-ben is megszervezte az akkreditált továbbképzésként elismert *Országos Fizikatanári Ankét és Eszközbemutatót*, amelyet 135 tanár részvételével Vácon tartott 2021. október 22. és 25. között. Az Ankét új ismeretek megszerzésének lehetőségét, módszertani segítséget, valamint tapasztalatcserét kínál a tanárok számára. Ezen kívül bemutathatják a saját maguk által készített eszközöket is.

– Kiemelten foglalkozunk a fizika és általában a természettudományok közoktatásban betöltött szerepével.

– Az Ericsson-díjjal és a Rátz Tanár Úr Életműdíjjal jutalmazott fizikatanárok kiválasztását a Társulat ezzel foglalkozó díjbizottsága végezte 2021-ben is.

#### *A 2022. évi költségterv*

Eredmény összesen: –425.000.- forint, ez a viszonylag nagy negatív szám elsőre ijesztőnek tűnik, de van még remény arra, hogy sikerül a bevételt növelni és év végére eltüntetni ezt a negatív eredményt.

Egyik fontos bevétel a tagdíj, amit idén az inflációval még összeegyeztethető mértékben, 500-tól 1.000.-forintig emeltünk meg. Különbözik az online és a

postai úton kapott *Fizikai Szemle* tarifája, véleményünk szerint még mindig elég sokan kérnek papír alapú *Fizikai Szemlét*, hiszen a tanároknak és az iskoláknak fontos, hogy legyen náluk egy kinyomtatott példány.

Elég sok a célzott támogatás, ezek mind növelik a bevételt, viszont mivel célzottak, így csak közvetítők vagyunk. Ilyenek például a versenyekre, Öveges-versenyre vagy az Ifjú Fizikusok Nemzetközi versenyére érkezők.

A támogatások között található egy csekély, az MTA-tól működésre kapott összeg. Az Akadémián most forrásnövelés történt, így reális esély van arra, hogy nagyobb, akár milliós nagyságrendű támogatást nyerhessen el a Társulat. A *Fizikai Szemlének* az elmúlt években mindig megérkezett az MTA 4 millió forintos és az NKA körülbelül 1 millió forintos támogatása.

Az idei év kiemelkedő eseménye a Fizikus Vándorgyűlés, amelyet 2022. augusztus 21–24-ig Veszprémben, a Pannon Egyetemen szervezünk meg. Ez a rendezvény lehetőséget ad a Társulat fiatalabb tagjainak is, hogy munkájukat bemutassák a széles hazai szakmai közösség előtt.

Ezen kívül a nagyobb 2022. évi rendezvények:

– IRPA Konferencia, European Congress on Radiation Protection, 2022. május 30. – június 3.

– Avalanche 2022 Statphys Konferencia, 2022. augusztus 29. – szeptember 2.

– Sugárvédelmi Továbbképző Tanfolyam, 2022. szeptember 13–15.

– Fizikatanári Ankét és Eszközbemutató, 2022. október 22–25.

2021-ben változás történt a Társulat tisztségviselőinek összetételében. Figyelemreméltó változás a Díjbizottságban történt, *Kamarás Katalin* elnök lemondott, egy évre *Sólyom Jenő* vállalta a tisztséget, ennek leteltével tőle *Beke Dezső* fogja átvenni az elnöki pozíciót, viszont ő jelenleg egészségügyi problémával küzd. A Díjbizottsághoz már beérkeztek a jelölések, így a munka már gőzerővel folyik.

Groma István a zárzó előtt megköszönte a Titkárság egész éves maximális munkáját, megköszönte a figyelmet és átadta a szót Ormos Pál elnöknek, aki megköszönve a beszámoló felkérte a Felügyelő Bizottság elnökét, hogy tartsa meg beszédét az elkészített jelentésről.

## A Felügyelő Bizottság jelentése

*Vida Ádám* megköszönte a szót, és a beszámoló előtt két gondolatot fűzött az elmondottakhoz.

1. Megerősítette a Főtitkár által elhangzottakat, véleménye szerint is érdekli az embereket a fizika, sajnos a koronavírus-járvány ideje alatt elburjánzottak a hiteltelen információk, de az *Atomoktól a csillagokig* és a többi, a főtitkári beszámoló diáin szerepelt platformok olyan hitelesek, hogy érdemes hallgatni és létezésüket terjeszteni. Ez remek lehetőség a fiatalok

bevonására, akik majd pályáivük megfelelő részén be kell lépjenek a Társulatba.

2. A Küldöttgyűlés előtti előadásban hallhattuk, hogy mennyire fontosak az alapok, miből építkezik egy élőlény. Ez a kép teljesen összevág az alapító, Eötvös Loránd víziójával, a tanártovábbképzéssel.

Ezen intermezzo után rátért a jelentésre. A Felügyelő Bizottság feladata egy gazdasági és egy működési jelentés elkészítése volt.

Az új Bizottságban vannak új tagok, de biztosítva van a folytonosság is. Egyrészt a kapott anyagokból táplálkoztunk, másrészt tapasztalatból. A gazdálkodási jelentést *Deme Ilona* állította össze.

### *Pénzügyi összefoglaló a 2021-es gazdálkodásról*

A gazdálkodási év folyamán a Titkárság munkatársainak munkavégzését nehezítették a koronavírus miatti korlátozások, a rendezvények szervezésével kapcsolatos szigorú előírások betartása. A feladatellátást részben otthoni munkavégzéssel, a személyes kapcsolattartást – amikor a járványhelyzet azt lehetővé tette – ügyeleti rend bevezetésével igyekeztek biztosítani. A rendkívüli helyzet ellenére a gazdálkodási évre tervezett tanfolyamok, rendezvények, továbbképzések többségét megszervezték, vagy online formában megtartották. Erőfeszítéseiket siker koronázta, ami megmutatkozott a Társulat egyszerűsített éves beszámolójában szereplő adatokban. A gazdálkodási évben a bevételek növekedtek, év végére az éves beszámoló eredménykimutatásában hiány nem mutatkozik.

Kiemelendő a *Hazalátogatott Wigner Jenő* könyv, amelynek gondozása hatalmas vállalkás volt az Elnökség részéről, a gazdasági jelentés adatait vizsgálva kijelenthető, hogy a vártnál is jobb eredmény született.

### *2022. évi pénzügyi terv*

A bevételeket óvatosan, a biztos támogatói körre tervezték. Az év elején rendelkezésre álló adatok alapján a 2022. évi összesített pénzügyi tervben 425 ezer forint hiány mutatkozik. Amennyiben a Titkárság munkatársai megbízást kapnak konferenciák szervezésére, újabb támogatókat sikerül felkutatni, várhatóan az éves beszámolóban nem mutatkozik veszteség.

A gazdasági és működési jelentéseket a Felügyelő Bizottság megvitatta, egyhangúlag elfogadta; azokat a Küldöttgyűlésnek is elfogadásra ajánlja. Vida Ádám megköszönte a figyelmet és átadta a szót elnök úrnak.

## Vita és nyílt szavazás a főtítkári beszámolóról és a Felügyelő Bizottság jelentéséről

*Kádár György* elmondta, hogy a 2021. évi Küldöttgyűlésen bemutatta a *Bay Zoltán 120* konferenciához kapcsolódó kiadványt, amelyből még most is van és bárki hozzájuthat. Megígérte, hogy 20-25 példányt küld a Társulatnak és a Titkárságon hozzá lehet majd jutni.

Lendvai János, aki 6 éve a *Fizikai Szemle* főszerkesztője kért szót, hiszen elhangzott, hogy a *Fizikai Szemle* korszerűsítésre szorul. Feltette a kérdést, hogy a jelenlevők közül, ki tartja fontosnak a *Szemlét*, a válasz egyhangú igen volt. Ki mondja azt, hogy a *Szemle* nem jó így, ahogy van. Ormos Pál szöveg közbe és elmondta, hogy ezt senki sem állította és e téren nincs semmi probléma.

Lendvai János reagált arra, hogy az elnökség részéről felmerült, miszerint Kármán Tamás korszerűtlen szoftverrel dolgozik, helyette template-et kellene használni. Elmondta, hogy a korszerűsítés és a hasonló dolgok általában akkor merülnek fel, amikor pénzkérdésről van szó. Az utóbbi elnökségi ülésen az Elnökség tárgyalta Kármán Tamás felvetését, hogy a 8 éve változatlan tiszteletdíját 17%-kal kéri emelni. Kármán Tamás egy személyben több feladatot lát el: olvasószerkesztő, nyelvi lektor, képszerkesztő, grafikai szerkesztő, ő találja ki az adott számhoz illő címlapot, fizikus végzettsége miatt ő az utolsó szakmai lektor és végül tördelőszerkesztő. Ezen kívül kapcsolatot tart a szerzőkkel, valamint az adminisztráció egy része is rá hárul. A *Szemle* jelenlegi formai minősége, tördelése, ábrái, helyesírása, stílusa teljesen felülmúlja a szakásos és az elvárható szintet.

Lendvai János lemondott a főszerkesztői pozíciójáról és legkésőbb az év végével új főszerkesztőt kell találni. Szerinte a főszerkesztő az összes munka 15%-a, ami sokkal könnyebben pótolható, mint a maradék 85%, amelyet a Kármán Stúdió teljesít, nagyon kevés támogatással a Társulat vezetésétől.

Véleménye szerint a *Fizikai Szemle* termel annyit, hogy ez a fizetésemelés beleférjen. Továbbá fontos szempont, hogy egyidejű főszerkesztő és a műszaki szerkesztő váltásból semmi jó nem jöhet ki, csak a *Szemle* romlása, majd megszűnése. Őt Kármán Tamás tanította be a munkára, ha utódját és saját utódját senki sem tanítja be, ugyancsak a *Szemle* megszűnése prognosztizálható. Kérte, hogy az Elnökség – amíg lehet – Kármán Tamást tartsa meg ebben a feladatban, mert ez a legjobb biztosíték a *Szemle* eddigi, vagy akár jobb minőségű megjelenésének.

Ormos Pál megköszönte a megszólalást, amelyre reflektált. A *Fizikai Szemlét* régóta ismeri, az nagyon jó és tradicionális folyóirat, amelynek megtartása ilyen színvonalon a Társulat egyik alapvető kötelessége, ezért mindent meg fognak tenni. János kiváló főszerkesztő, és világos, hogy a *Szemle* minőségében döntő szerepe volt. Nagy gond, hogy 2022. év végével befejezi, szerencsére van még idő az új főszerkesztőt találni, ami nehéz feladat. Másrészt véleménye szerint mindig mindent lehet fejleszteni, bízik abban, hogy Jánost bele tudják vonni az utódlásába. A technikai részletekbe most nem ment bele, de megígérte, hogy a legjobb tudása és a legjobb akarata szerint fognak ezzel a kérdéssel foglalkozni.

Groma István kénytelen reagálni a pénzügyi dolgokra. Láthatták, hogy a 2022-es tervre kijött a durván fél millió forint mínusz, jelen pillanatban felelősen nem tud semmilyen ígéretet tenni, hiszen a közhasz-

núság elvesztése a tét. Azonban nem fordulhat elő, hogy a *Fizikai Szemlét* nem adja ki a Társulat, valamilyen megoldást biztosan fognak találni.

Kármán Tamás, aki 30 éve műszaki szerkesztője a folyóiratnak szintén szót kért. Ma gyakorlatilag bármilyen formában, elektronikus úton kapott anyagot – ha szakmailag helytálló – elfogadunk és közlésre alkalmassá teszünk. Ha a *Fizikai Szemle* részletesen megadná, hogy miként nézzenek ki a cikkek, akkor várhatóan sokkal kevesebb írás érkezne, hiszen a megfelelő színvonalon való megvalósítás nagyon sok plusz terhet róna a szerzőkre. A *Fizikai Szemle* sajnos nem az a folyóirat, ahol tolonganak a szerzők, már most is nehézségbe ütközik tartalmas írásokkal feltölteni a lapot.

Ormos Pál köszöni szépen a hozzászólást, ő hisz Kármán Tamásnak és nagyra becsüli a munkáját. A felvetett problémákban felelősségteljes döntést kell hozni, mert nagyon sokat lehet ártani, amit azután szinte lehetetlen visszafordítani. A Szemle nagyon jó, méltósága van és ezt mindenáron fenn kell tartani.

Lendvai János: amennyiben ez így van, az némileg megnyugtató számára és köszöni, hogy tényleg komolyan veszik az ügyet.

*Moróné Tapody Éva* a társulati tagok létszámának emelését tartja fontosnak. Jó lenne, ha az új tagok már egyetemistaként csatlakoznának a Társulathoz. Meg kell gondolni-találni, hogy mi lehet vonzó a hallgatóknak. Továbbá fontos lenne olyan szolgáltatást – mint például a Társulat honlapjáról letölthető hasznos tanítási segédanyagokat – kínálni, ami segíti a tanárok munkáját.

Groma István: még az előző Elnökséggel megpróbálták közös tagságot elindítani a Magyar Fizikushallgatók Egyesületével, haladtak, de a Covid-járvány ebbe is beleszólt.

*Szigeti Balázs* (volt MAFIHE-elnök): egyetemista hallgató csak akkor fog csatlakozni, ha megéri neki, ha valami pluszt kap a tanulmányaihoz.

*Kiss Jolán* elmondta, hogy amióta tanít, azóta talán, ha két Ankéton nem vett részt. Ezekről a rendezvényekről mindig rengeteg élménnyel és tapasztalattal tért haza és mindig sok baráttal találkozott, akikkel egyébként régen látták egymást.

*Sebestyén Zoltán* elmondta, hogy gondoljunk *Szabó Attilára*, aki kétszer nyerte meg a Nemzetközi Fizikai Diákolimpiát és még más tudományterületen is szerzett ezüstérmet. Sportolóként mindezekért 80 millió forint jutalomban részesült volna. Javasolja, hogy az oktatás stratégiai fontossága miatt terjesszék a felelős miniszter elé, hogy ugyanolyan juttatást kaphassanak a tudományos diákolimpiai győztesek, mint a sportolók.

Ormos Pál egyetért az ötlettel, bár szkeptikus. Viszont már most is tárgyalnak a Klebelsberg Központtal a Fizikatanári Ankétot támogatásáról, hiszen elfogadhatatlan, hogy az egyébként is alul fizetett fizikatanárok a teljes Ankét költségét maguk fizessék ki.

Ehhez csatlakozott Kádár György, aki főtítkársága idején mindig részt vett – hiszen nagyszerűnek tartotta-tartja – az Ankétokon, ahol csakis pozitív embereket ismert meg. A Társulat a természettudományok fontosságának ügyét valamilyen formában a Minisztérium elé kellene tárja, itt akár petícióra is lehet gondolni.

Ormos Pál: ez valóban feladatunk és igyekszünk teljesíteni a céljainkat.

*Pesznyák Csilla*, a Sugárvédelmi Szakosztály vezetője kért szót. Az ő területükön is jellemző a szakemberhiány, ezért kezdtek projektek felé tekinteni. Az Európai Nukleáris Oktatási Hálózatba beletartozik minden, ami nukleáris, orvosi fizika, biztonságtechnika, valamint a radiokémia. Ennek keretében sikerült elnyerni egy 7 millió eurós pályázatot, ebben megjelennek a középiskolai tanárok, akik így Európai Unió szinten felértékelődnek. Próbálnak természettudományi tanárszekciót létrehozni és nukleáris versenyt indítani középiskolásoknak. A szervezetnek 50 európai egyetem a partnere. 2,5 millió eurós alapot hoztak létre, ide minden BSC-s, MSC-s, PhD-s hallgató, aki valahogyan kapcsolódik a nukleáris szakirányhoz, ösztöndíjra pályázhat.

Groma István kérte, hogy majd a Fizinfn és/vagy a *Fizikai Szemlében* jelenjen meg erről összefoglaló.

## A szavazás eredményének kihirdetése

A vita után szavazott a Küldöttgyűlés, amely egyhangúlag elfogadta a főtítkári beszámolót, a 2022-es pénzügyi tervet, majd a Felügyelő Bizottság jelentését.

A szavazás végén az Elnök úr megköszönte Groma István főtítkár úr kiváló munkáját, aki mindent nagyon jól a kezében tart, amelyért rendkívül hálás neki. Továbbá megköszönte a Titkárság kiváló munkáját is, *Pónya Melindának* és *Soós Hajnalkának*.

A zárás előtt még Lendvai János kért szót: hagyomány és elvárás, hogy a Vándorgyűlés előadásait megjelentetjük a *Fizikai Szemlében*, így kérte, hogy aki ott előadó lesz, küldje be az előadása anyagát. A *Fizikai Szemle* mindig kevés cikkel dolgozik, így ezúton is a cikkírára buzdított mindenkit.

Végül Ormos Pál megköszönte, hogy ilyen sokan eljöttek és határozatképes ülést tudtak tartani. „Találkozunk a Vándorgyűlésen” szavakkal bezárta a Küldöttgyűlést.



