

# fizikai szemle

A Higgs-bozon 10 éve

Szilárd Leó 125

Reflektorfényben  
a James Webb

2023/2

# Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira

Az ELFT Díjbizottsága jelöléseket, illetve pályázatokat vár a Társulat 2023. évi kitüntető érmeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira. Kérjük a Társulat szakcsoportjait, területi csoportjait és valamennyi tagunkat, hogy a kitüntetésre érdemes kollégákat és tudományos eredményeiket bemutató javaslatokat legkésőbb **2023. március 10-ig** szíveskedjenek eljuttatni a Társulat titkárságára (1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint 3., elft@elft.hu). A tudományos díjakat a kutatók saját kezdeményezésükre is megpályázhatják.

A Társulati díjakra a jelölések/pályázatok benyújtására szolgáló adatlapok letölthetők az ELFT honlapjának díjszekciójából (<http://elft.hu/tarsulattol/dijak/>), ahol egyben az elbírálási eljárás részleteire vonatkozó ismertetés is megtalálható. Kérjük, hogy a jelölések megfogalmazásában vegyék figyelembe az ismertető információit. Az ismertetés minden díjat hozzákapszol legalább egy szakcsoport kutatási területéhez, amely szakcsoport ajánlásának beszerzése ajánlatos, de nem kötelező. A tudományos díjak elnyerésének nem előfeltétele a társulati tagság.

A mellékletek nagy részének elegendő a nyilvános (speciális esetben a Díjbizottság tagjaira korlátozott) adatbázisokból történő elérhetőségének megadása.

A társulati kitüntetések, valamint a tudományos és felsőoktatási díjakat várhatóan az ELFT Küldöttgyűlésen, 2023. május 13-án adjuk át.

## Társulati kitüntetések

**Eötvös Loránd Fizikai Társulat Érem** adományozható a Társulat azon tagjának, aki a fizika területén hosszú időn keresztül folytatott kutatási, alkalmazási vagy oktatási tevékenységet, valamint a Társulatban kifejtett munkásságával kiemelkedően hozzájárult a fizika hazai fejlődéséhez;

**Prométheusz éremmel** – „A fizikai gondolkodás terjesztéséért” – tüntethető ki az, aki a fizikai műveltség terjesztéséhez országos hatással hozzájárult;

**Eötvös Plakett** elnevezésű emléktárgy adományozható annak a társulati tagnak, aki hosszú időn keresztül aktív társadalmi munkával járul hozzá a Társulat egészének vagy valamelyik csoportjának, szakcsoportjának eredményes működéséhez; olyan személynek, aki társadalmi munkában vagy egyéb módon rendkívüli mértékben nyújt segítséget a Társulat célkitűzéseinek megvalósításához; neves külföldi vendégnek a Társulat valamely rendezvényén tartott előadása alkalmából.

A két éremről és a plaketról a Társulat Elnöksége dönt és arról a Küldöttgyűlést majd tájékoztatja.

## Tudományos díjak

A Társulati Díjak különböző időszakokra kiterjedő, a kiválóság eltérő jegeit hordozó eredményeket ismernek el. Ezeket két fő kategóriába soroljuk.

1.) Hosszabb időszakban egyenletesen magas színvonalon, számos tématerületen megnyilvánuló tevékenységet kíván elismerni, röviden „**Életműdíj**” az alábbi társulati díjak:

**Bozóky László-díj** – „A sugárfizika és a környezettudomány területén hosszú időn át végzett magas színvonalú munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”;

**Bródy Imre-díj** – „Magas színvonalú elvi megfontolásokkal a fizika alkalmazási területén hosszú időn át végzett színvonalas munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”;

**Selényi Pál-díj** – „Az alapvető jelenségek kísérleti vizsgálatában, továbbá azokon alapuló technikai eszközök nagy eredetiségű fejlesztésében hosszú időn át végzett magas színvonalú munkásságért, nemzetközi érdeklődést kiváltó eredményekért”.

2.) Pályájuk induló szakaszán, egységes témakörben, több éven át önállóan folytatott projektben elért, kiemelkedő nemzetközi visszhangot kiváltott kutatási eredmény elismerésére szolgál, röviden „**PhD fokozat után – MTA-doktori cím előtt díj**”:

**Budó Ágoston díj** – „Az optika és a molekulafizika területén, elsősorban kísérleti vizsgálatokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó kiemelkedő eredményért”;

**Detre László-díj** – „A csillagászatban, valamint bolygónkkal és annak kozmikus környezetével foglalkozó fizikai kutatások területén elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó kiemelkedő eredményért”;

**Gombás Pál-díj** – „A kvantumelmélet atom- és molekulafizikai alkalmazásában, továbbá a statisztikus fizikában végzett elméleti kutatásokkal elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

**Gyulai Zoltán-díj** – „A szilárdtestek és a kondenzált anyag fizikájának kísérleti módszerekkel történő kutatásában elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

**Jánossy Lajos-díj** – „A nagyenergiás fizika (kozmosz sugárzás, részecskefizika és nehézion-fizika) kísérleti kutatása és a kísérleti eredmények fenomenologikus értelmezése területén elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

**Novobátzky Károly-díj** – „Az elméleti fizikai kutatásokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

**Schmid Rezső-díj** – „Az anyag molekuláris szintű szerkezetét felderítő, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

**Szalay Sándor-díj** – „Az atom- és atommagfizikában, illetve ezek interdiszciplináris alkalmazási területén elért, jelentős nemzetközi figyelmet kiváltó, kiemelkedő eredményért”;

**Szigeti György-díj** – „A lumineszcencia és félvázató kutatásokban elért, jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért”.

A tudományos díjakból évente összesen legfeljebb hat adományozható, odaítélésük a Társulat Díjbizottságának javaslata alapján az Elnökség hatáskörébe tartozik. Aki jelenleg valamilyen funkciót/tisztséget tölt be az ELFT-ben, az az illető nem terjeszthető fel díjra.

## Oktatási díj

**Marx György felsőoktatási díj**: „A fizika felsőfokú (egyetemi és főiskolai) oktatásában és a tanárképzésben sok évtizedes kiemelkedő alkotó- és nevelőmunkáért”.

Groma István  
főtítkár

Ormos Pál  
elnök

1891

# TÍZ ÉVVEL A HIGGS-BOZON FELFEDEZÉSE UTÁN: ÚJ FIZIKA NYOMÁBAN AZ LHC-N

2012. július 4-e emlékezetes nap a fizikában: ekkor jelentették be az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (CERN) Nagy Hadronütköztetőjének (LHC) ATLAS- és CMS-együttműködése, hogy kimutattak egy különleges részecskét, a Higgs-bozont, a részecskefizika standard modelljének utolsó hiányzó elemét. Az évtizedek munkájával elért felfedezés új korszakot nyitott: bizonyítást nyert az elemi részecskék tömegét keltő, 1964-ben javasolt Brout–Englert–Higgs (BEH) mechanizmus, amely a világunkat kitöltő Higgs-mezőn és az elektrogyenge szimmetria spontán, azaz az alapállapot általi véletlenszerű sértésén alapul.

Bár az új skalárbozon tulajdonságai az elmúlt évek egyre pontosabb méréseiben remek egyezést mutatnak az elmélet jóslatával – ahogy erről 2021. márciusi és áprilisi számunkban *Horváth Dezső* számolt be –, a standard modell minden bizonnyal kiegészítésre szorul. A legnyilvánvalóbbat említve csupán: sikerei ellenére sem tudja leírni a Világegyetem energiamérlegében domináns sötét anyagot és sötét energiát. Ráadásul az új részecske tömegének értéke – a modell 19 szabad paraméterének egyike – érdekes kérdéseket vet fel az elmélet kiterjesztésének irányáról, sőt még a *Világegyetem stabilitásáról* is. Februári számunk tematikus részének első cikkében erről olvashatunk *Péli Zoltán* és *Trócsányi Zoltán* tollából. A BEH-potenciál és a csatolási erősségek érdekes tulajdonságainak körülménye után, megtudhatjuk, hogy aggodalomra azért nincs okunk. Bár a Világegyetem metastabil állapotban van, várható élettartamához képest a szokásos asztrofizikai időskála (például Napunk 5 milliárd éves várható élettartama, vagy a Világegyetem 14 milliárd éves kora) csupán egy pillanatnak tűnik.

A Higgs-bozon felfedezésének 10. évfordulója alkalmából 2022 novemberében a Magyar Tudományos Akadémián és az Eötvös Loránd Tudományegyetemen tartott rendezvények nem csupán a felfedezéshez vezető utat és az új részecskéről és a standard modelltől azóta szerzett tudásunkat foglalták össze, hanem a részecskefizika jövője felé is kitekintettek. Vajon mit tud az LHC a legégetőbb nyitott kérdésekről mondani? Második cikkünk ezt veszi számba. Hol tart a *sötét anyag* keresése? Sikerül-e további forrását találni az *anyag-antianyag aszimmetriának*, ami anyagdomináns Univerzumunk létrejöttét lehetővé tette? Felfedezhetünk-e *nehéz steril neutrínókat*, amelyek segíthetnek megmagyarázni a három könnyű neutrínó picit, de nem nulla tömegét?


Természetesen nem hagyhatjuk figyelmen kívül az egyik leggyakrabban feltett kérdést sem. Tíz eszten-

dővel az elméletet megalkotó fizikusoknak, *Peter Higgs*-nek és *François Englert*-nek Nobel-díjat hozó kísérleti felfedezés után, vannak-e már jelei az LHC adataiban az olyan nagyon várt, új *egzotikus jelenségeknek*? Az elmúlt évek egyik legizgalmasabb kutatási területe az ízfizikához kapcsolódik. A B-hadronok félleptonos bomlásait vizsgálva elektront, müont és tauleptonot tartalmazó végállapotokra több kísérletben is (BaBar, Belle, LHCb) eltéréseket figyeltek meg a várokozástól. Vajon ezek a *leptonuniverzalitás-anomáliák* az új fizika régen várt jelei, vagy esetleg a nagy kihívást jelentő mérések szisztematikus torzításából adódnak? Ha valóban a standard modellen túlra mutatnak, esetleg a *nagy egyesített elméletek* által jóslott *leptonokvarkok* állnak a háttérben, amelyek az LHC rekord energiájú proton-proton ütközési adataiban elegendő ütközési energia esetén közvetlenül is megjelenhetnek? Erről szól harmadik cikkünk.

A fentiek közül néhány kérdésre talán már a következő pár év választ hoz az LHC harmadik futási szakasza eddigieket megduplázó mennyiségű nagyenergiás adathalmazának, vagy a Belle II 2030-ig megszázszorozódó B-hadron bomlásainak analízisével.

Azonban a mikrovilág felderítése türelmet, folyamatos erőforrás-befektetést, generációról generációra fejlődő kísérleti berendezéseket, egyre kifinomultabb adatfeldolgozási módszereket, és mindenek fölött felkészült, lelkes diákok és oktató-kutatók generációit igényli. A Magas Luminozitású Nagy Hadronütköztető (HL-LHC) az évtized végén kezdi majd el működését, a következő generációs neutrínókísérletek is tervezés, építés alatt állnak. A magyar szakmai közösség fontos szerepet játszik a nagy nemzetközi kísérleti projekteknél, köztük a Higgs-bozont is felfedező CMS-kísérletben, valamint a nagy pontosságú fenomenológiai számítások és a modellépítés elméleti erőfeszítéseiben is.

A részecskefizika következő évtizede minden bizonnyal izgalmas eredményekben és új kihívásokban gazdag lesz, és közelebb visz majd minket, hogy megértsük miből áll, hogyan működik többségében sötét Univerzumunk, felfedezzük, milyen (esetleg további térbeli dimenziókat tartalmazó) geometria, milyen (magas energiákon megjelenő) szimmetriák, és milyen (eddig nem ismert) elemi erők irányítják. A Higgs-bozon felfedezése kiemelkedően fontos mérföldkő volt ezen a hosszú úton.

  
Pásztor Gabriella  
vendégszerkesztő

# Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat havonta megjelenő folyóirata.

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

Megbízott főszerkesztő:  
Iglói Ferenc

Szerkesztőbizottság:  
Asbóth János, Biró László Péter, Czitrovsky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczki Bence, 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:

A James Webb-űrteleszkóp leghosszabb (5–30  $\mu\text{m}$  közötti) hullámhosszakra érzékeny MIRI műszerének felvétele az M74 spirálgalaxisról (image credit: ESA/Webb, NASA & CSA, J. Lee, PHANGS–JWST Team).

A bűtő belő borítón:

Felül a felvétel a távoli Világegyetem eddigi legmélyebb és legélesebb képe. Alul a Déli Gyűrű-kód nevű planetáris kód.

A hátsó fedélen:

Felül a „Teremtés Oszlopai” csillagkeletkezési régió, a Sas-kód részei. Alul az L1527 jelű sötét felhőben eddigi rejtőzködő protocsillag.

## TARTALOM

Pásztor Gabriella: 10 évvel a Higgs-bozon felfedezése után: új fizika nyomában az LHC-n	37
Péli Zoltán, Trócsányi Zoltán: Metastabil Világegyetem <i>A standard modell szerint a Világegyetem metastabil állapotban van, de várható élettartamához képest a szokásos asztrofizikai időskála csupán egy pillanatnak tűnik.</i>	39
Pásztor Gabriella: Az Univerzum titkai és a Nagy Hadronütköztető: nyitott kérdések a részecskefizikában <i>Az írás olyan megfigyeléseket tárgyal, amelyeket bizonyítéknak tekintetünk arra, hogy a standard modell nem a végső szó, és mögötte megalkotható egy mélyebb elmélet („új fizika”).</i>	43
Pásztor Gabriella: Jelek a standard modellen túlról? Leptonuniverzalitás-anomáliák és leptokvark-keresés a Nagy Hadronütköztetőn <i>Vannak-e jelei az LHC adataiban olyan új egzotikus jelenségeknek, amelyek a standard modellen túlmutató fizikával magyarázhatók?</i>	48
Hargittai István, Hargittai Balázs: Szilárd Leó emlékezete <i>A 125 éve született Szilárdról Wigner így írt: „soha nem találkoztam senkivel, akiben több lett volna a képzelőerő és az eredetiség”.</i>	53
<b>REFLEKTORFÉNYBEN</b>	
Szalai Tamás: A James Webb-űrteleszkóp <i>A James Webb-űrteleszkóp folyamatosan közli a szenzációs felvételeit, ezekből mutatunk be egy kisebb válogatást.</i>	57
Schmid Rezső-díj 2022: Fábíán Margit <i>A díjazott eddigi szakmai pályáját és közeljövő terveit ismerteti.</i>	60
<b>A FIZIKA TANÍTÁSA</b>	
Csernovszky Zoltán, Horváth Ákos: Alacsony hőmérsékletű $\gamma$ -Stirling-motor tesztelése <i>A Stirling-motorok külső hőbevezetésű, égéstermék kibocsátása nélkül működő hőerőgépek. Ezek beüzemeléséről és tanórai demonstrálásáról szól a cikk.</i>	62
Horváth Dezső: Hozzászólás Keresztesi Miklós cikkéhez	69
<b>HÍREK – ESEMÉNYEK</b>	
Jelölési/pályázási felhívás az Eötvös Loránd Fizikai Társulat kitüntetettjeire, valamint felsőoktatási és tudományos díjaira <i>Szigeti Balázs Endre, Rábóczki Bence, Dobos Csenge: Mafihe, avagy 35 éve a fizikushallgatók szolgálatában</i>	37
G. Pásztor: 10 years after the discovery of the Higgs boson: In search of new physics at the LHC	70
Z. Péli, Z. Trócsányi: Metastable Universe	
G. Pásztor: Secrets of the Universe and the Large Hadron Collider: Open Questions in Particle Physics	
G. Pásztor: Signs from beyond the Standard Model? Lepton universality anomalies and leptokvark search at the Large Hadron Collider	
I. Hargittai, B. Hargittai: The memory of Leó Szilárd	
<b>IN THE SPOTLIGHT</b>	
T. Szalai: The James Webb Space Telescope	
Schmid Rezső price 2022: Margit Fábíán	
<b>TEACHING PHYSICS</b>	
Z. Csernovszky, Á. Horváth: Low temperature $\gamma$ -Stirling engine testing	
D. Horváth: Comment on Miklós Keresztesi's article	
<b>EVENTS</b>	

Fizikai Szemle  
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



EMBERI ERŐFORRÁSOK  
MINISZTERIUMA



Nemzeti Kulturális Alap



# METASTABIL VILÁGEGYETEM

Péli Zoltán, Trócsányi Zoltán  
Eötvös Loránd Tudományegyetem, Elméleti Fizikai Tanszék

„Nem az számít, hogy milyen szép az elméleted,  
vagy mennyire vagy okos.  
Ha nem egyezik a mérésekkel, akkor hibás.”

*Richard P. Feynman*

A részecskefizikai standard modell az elemi részecskéket és azok kölcsönhatásait, azaz a köztük ható erőket írja le [1]. A standard modellben számolt jóságotok példátlan pontossággal egyeznek a kísérletek eredményeivel, ilyen az elektron anomális mágneses momentuma, amelyre az elméleti jóságot 10 értékes jegyig megegyezik a mért értékkel. A modell által jósolt, nulla spinű és elektromosan semleges skalárrészecskét, a Higgs-bozon 2012-ben figyelték meg [2–4]. Cikkünkben a Higgs-bozonhoz tartozó potenciálisenergia-sűrűség viselkedésével, és teátrálisan fogalmazva, Világegyetemünk sorsával ismerkedünk meg. Mint később kiderül, ez a potenciális energia nagy energiákon alulról nem korlátos – a mező értékének növekedésével a potenciális energia minden határon túl csökken –, ezért a hozzá tartozó alapállapot, tehát világunk nem stabil.

## A Higgs-bozon a standard modellben

A standard modell kvantummező-elméleti modell. Úgy tekintünk benne a részecskékre, mint a teljes teret kitöltő kvantummezők rezgéseire. Ezekhez a

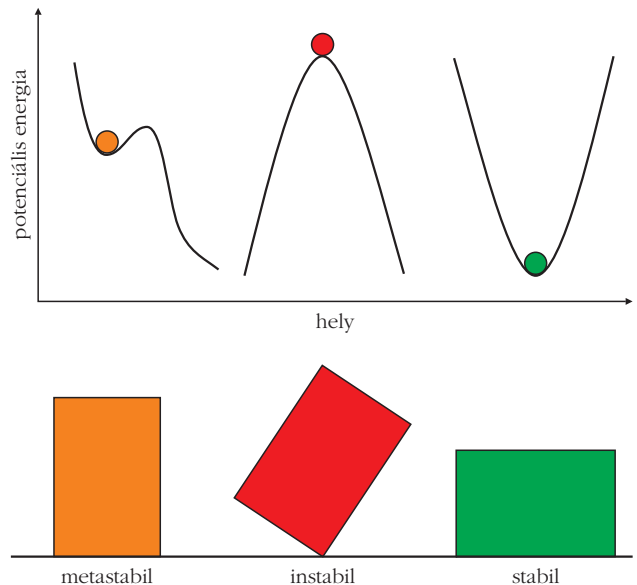
A szerzők hálásak *Pásztor Gabriellának* a kézirat gondos olvasásáért és hasznos megjegyzéseier.



*Péli Zoltán* fizikus, posztdoktori kutató az ELTE Elméleti Fizikai Tanszékén. Ezt megelőzően a debreceni ELKH–DE Részecskefizikai Kutatócsoportban, illetve a DE Kísérleti Fizikai Tanszékén dolgozott adjunktusként. Érdeklődési és korábbi kutatási területei a funkcionális renormálási csoport alkalmazása, továbbá az inflációs kozmológia. Jelenlegi kutatási területe a standard modellen túli fizika fenomenológiája.



*Trócsányi Zoltán* fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE Elméleti Fizika Tanszék egyetemi tanára, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. *Demény András*sal társszerzője a *Fizika I.* egyetemi tankönyv Mechanika részének, *Horváth Dezső*vel pedig a *Bevetés 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.



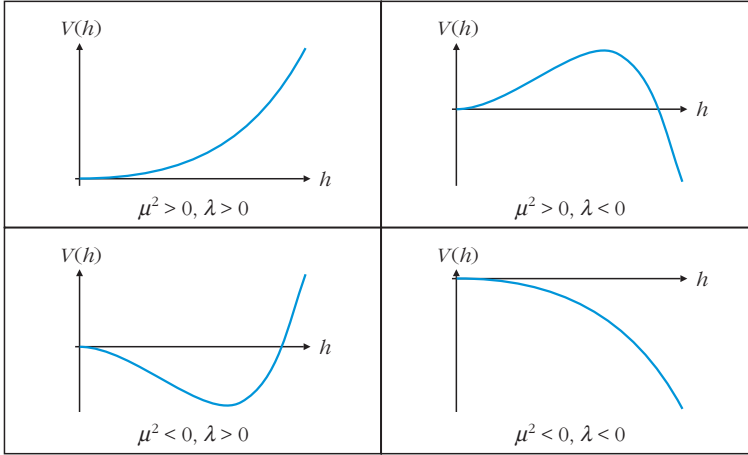
1. ábra. A potenciálisenergia-függvény kvalitatív eltérő szélsőértékei. A szélsőértékekhez a fizikai rendszer nyugalmi állapotai tartoznak. Szemléletesen egy téglá állapot – a tömegközéppontja talajtól mért távolságának a függvényében – lehet stabil, metastabil és instabil.

rezgésekhez jól meghatározott energia és tömeg tartozik. Az egyes mezők rezgései – energiájukat leadva – rezgésbe hozhatnak más mezőket is, ezzel leírva a részecskék bomlását és keletkezését. A kölcsönhatásokra szigorú szimmetriákat írunk elő, hogy azok pontosan adjanak számot a valóságban megfigyelt részecskefolyamatokban észlelt szabályosságokról. Itt azonban elakadunk: ha a szimmetriák teljesülnek, akkor a modell szerint az összes elemi részecske tömege nulla, és fordítva, ha a részecskéknek megfelelő tömeget adunk azzal elrontjuk a szimmetriákat, és többé nem írjuk le helyesen a kölcsönhatásokat.

Az ellentmondást a Brout–Englert–Higgs vagy röviden BEH-mechanizmussal tudjuk feloldani. Eszerint a standard modellben szereplő kvantummezők<sup>1</sup> az előírt szimmetriák által megengedett módon mind kölcsönhatnak a BEH-mezővel. Ez csak akkor lehetséges, ha a BEH-mező elektromosan semleges és spinje nulla.

Abban az esetben, ha a BEH-mező potenciális energiájának minimuma nem a nullában, hanem vé-

<sup>1</sup>Kivéve a nulla tömegű fotonhoz és gluonhoz tartozó kvantummezőket.



2. ábra. Az (1) BEH-potenciál alakja a  $\mu^2$  és  $\lambda$  paraméterek különböző előjelei mellett. Ha  $\lambda > 0$  akkor a potenciál alapállapota stabil és a nulla ( $\mu^2 > 0$ ) vagy a véges  $v$  ( $\mu^2 < 0$ ) helyen van. Ezzel szemben nullánál kisebb  $\lambda$  értékek mellett csak metastabil  $\mu^2 > 0$  vagy instabil  $\mu^2 < 0$  állapotok létezhetnek.

ges  $v$  helyen van, akkor a mező kis rezgései is a  $v$  érték közelében lesznek.

Ekkor a többi mező elemi gerjesztése is arányos lesz  $v$ -vel, valamint az adott mező BEH-mezővel vett kölcsönhatási erősségével, amelyet csatolásnak nevezünk. Ezek a  $v$ -vel arányos tagok az egyes részecskék tömegét jelentik a modellben.

Egy általános  $V(x)$  potenciális energiának három minőségileg eltérő szélsőértéke lehet amit az 1. ábrán szemléltetünk. A legmélyebb minimum helye jelöli ki az alapállapotot.

A BEH-mező potenciális energiasűrűsége

$$V(h) = \frac{1}{2} \mu^2 h^2 + \frac{1}{4} \lambda h^4 \quad (1)$$

alakú. A  $V(h)$  függvénynek  $\mu^2$  és  $\lambda$  előjelétől függően különböző szélsőértékei lehetnek, amelyeket a 2. ábrán szemléltetünk. Az (1) függvény minimuma  $v > 0$  helyen csak úgy lehetséges, ha  $\mu^2 < 0$  és  $\lambda > 0$ , ami egyben stabil állapotot is jelent.

## A BEH-potenciálról részletesen

Az, hogy az (1) potenciális energiában csak  $h$  páros hatványai jelennek meg a megkövetelt szimmetriák következménye. De miért nem tartalmaz  $h^4$ -nél magasabb hatványú tagot? A rövid válasz a renormálhatóság, amelynek pontos és részletes magyarázatától eltekintünk. Azonban dimenzióanalízissel könnyen megérthető, hogy mikor renormálható egy elmélet. A részecskefizikában az SI helyett a természetes egységrendszert használjuk, amikor minden mennyiség mértékegysége az energia – vagy az Einstein-képlet szerint ezzel egyenértékűen a tömeg – mértékegységének egész kitevős hatványa. Így a mértékegységek jellemzéséhez elegendő az energiaegység kitevőjét használni, amelyet tömegdimenzióknak hívunk. Ez

alapján az  $E$  energia, a  $p$  lendület, az  $m$  tömeg, az  $l$  távolság és a  $t$  idő tömegdimenziója

$$\begin{aligned} \dim E &= \dim p = \dim m = 1, \\ \dim l &= \dim t = -1. \end{aligned} \quad (2)$$

A négydimenziós téridőben a  $\phi$  skalár- és a  $\psi$  fermionmezők tömegdimenziója

$$\dim \phi = 1 \quad \text{és} \quad \dim \psi = \frac{3}{2}, \quad (3)$$

az energiasűrűségé pedig  $\dim V = 4$ . Ebből következik, hogy az (1) függvényben a  $\lambda$  csatolás tömegdimenziója éppen nulla, hiszen a  $h$  skalármező:

$$\begin{aligned} \dim \lambda &= \dim \left( \frac{V}{h^4} \right) = \dim V - 4 \dim h = \\ &= 4 - 4 \cdot 1 = 0. \end{aligned} \quad (4)$$

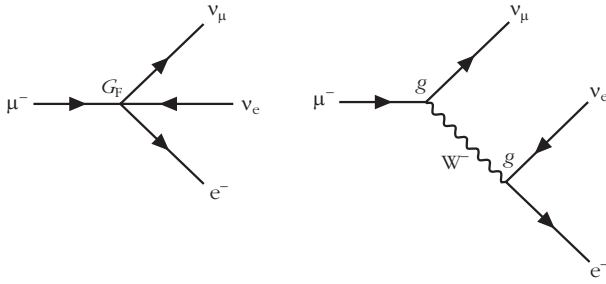
Ha azonban a mezők magasabb hatványait tartalmazó tagok is szerepelnek a potenciálisenergia-sűrűségben, akkor azok csatolásainak negatív tömegdimenziója lesz. Ilyen például a Fermi-féle négyfermionos kölcsönhatás, amellyel Fermi a  $\beta$ -bomlást írta le 1933-ban. A kölcsönhatás erőssége a  $G_F$  Fermi-állandó, amelynek tömegdimenziója

$$\dim G_F = 4 - 4 \dim \psi = 4 - 4 \cdot \frac{3}{2} = -2. \quad (5)$$

A  $G_F$  csatolás meghatározható a gyorsan bomló müon élettartamának megméréséből. A folyamatot a 3.a ábra mutatja, amely alapján kiszámolható a müon élettartama, majd azt összevetve mérési eredménnyel adódik a Fermi-csatolás értéke  $G_F \approx 1,166 \cdot 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$ .

A Fermi-modell nagyon pontosan adja sok kistömegű részecske élettartamát, de nem ad a mérésekkel megegyező becslést, ha a bomló részecske energiája meghaladja a Fermi-csatolás által meghatározott energiaskálát, az  $1/\sqrt{G_F}$ -et, azaz nagyságrendileg a 100 GeV-et. Pontosan ez a helyzet minden kvantummező-elméletben: ha egy csatolás tömegdimenziója negatív, akkor modellünket csak véges energiaskáláig alkalmazhatjuk. Ezért nem is renormálható, mert a renormálhatóság elvileg végtelen nagy energiaskálán is értelmes elméletet jelent. Éppen ezért egy teljesnek vélt (renormálható) modellben nincsenek dimenziós csatolások.

A Fermi-modell felírása után közel negyven évvel a standard modell a  $\beta$ -bomlást a gyenge kölcsönhatással magyarázta: a négyfermion-kölcsönhatás két hármas kölcsönhatásra esik szét, amelyeket a gyenge kölcsönhatást közvetítő W-bozon köt össze. A standard modell szerint a müon tényleges bomlási folyamata a 3.b ábrán látható. Itt a  $g$  csatolás tömegdimenziója



a) Müionbomlás a Fermi-elméletben. A négy fermion kölcsönhatása  $G_F/\sqrt{2}$  erősségű egy közös vertexben. b) Müionbomlás a standard modellben. A fermionpárok és a W-bozon kölcsönhatása  $ig/(2\sqrt{2})$  erősségű.

3. ábra. A müionbomlást leíró Feynman-gráf a Fermi-elméletben (a), illetve a standard modellben (b). Balról jobbra olvasva a folyamat  $\mu^- \rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_e + e^-$ . A részecskék terjedését jelentő vonalak kölcsönhatási pontban találkoznak, amelyet szakszóval *vertexnek* hívunk.

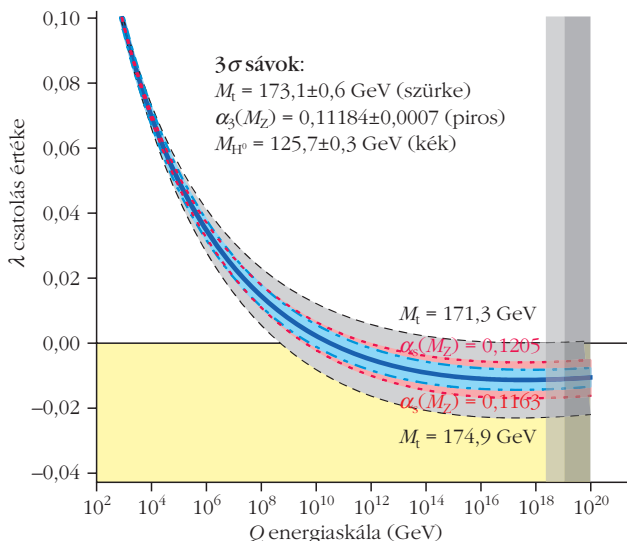
$$\begin{aligned} \dim g &= 4 - 2 \dim \psi - \dim W = \\ &= 4 - 2 \cdot \frac{3}{2} - 1 = 0, \end{aligned} \quad (6)$$

tehát a standard modell renormálható. Ennek pontos bizonyításáért kapta Gerardus 't Hooft és Martinus J. G. Veltman az 1999. évi fizikai Nobel-díjat [5].

A bomlást közvetítő W-bozon, nagy tömege miatt,  $-1/M_W^2$  tényezővel elnyomja a folyamat valószínűségét. Ez alapján a Fermi-csatolás kapcsolata a standard modellel

$$\begin{aligned} \frac{G_F}{\sqrt{2}} &= \left( i \frac{g}{2\sqrt{2}} \right)^2 \left( -\frac{1}{M_W^2} \right) = \\ &= \frac{g^2}{8} \frac{1}{(g v/2)^2} = \frac{1}{2 v^2}. \end{aligned} \quad (7)$$

4. ábra. A  $\lambda$  Higgs-négyescsatolás a  $Q$  energia függvényében. A színes sávok a kezdeti feltételek változtatását jelentik az ábrán feltüntetett bizonytalanságok háromszorosával. Megjegyezzük, hogy Gauss-eloszlású véletlen változónál annak esélye, hogy egy későbbi mérés a  $3\sigma$  bizonytalanság által kijelölt sávon kívül essen 0,3%.



A két modellt ily módon kapcsolatba hozva ki lehet fejezni a BEH-mező  $v$  minimumhelyét a pontosan mért Fermi-állandóval:

$$v = \sqrt{\frac{1}{\sqrt{2} G_F}} \approx 246,22 \text{ GeV}. \quad (8)$$

A Higgs-bozon felfedezésekor megmérték a részecske tömegét is, mégpedig

$$M_{H^0} = \sqrt{2\lambda} v \approx 125,1 \text{ GeV}, \quad (9)$$

amellyel kifejezhetjük a  $\lambda$  csatolás értékét  $\lambda \approx 0,129$ . Fontos hangsúlyozni, hogy  $\lambda$  értékét nem közvetlenül mértük meg. Ehhez olyan folyamatot kellene megfigyelni, amelyben három vagy négy Higgs-bozon találkozhat. Ha az így kísérletileg megmért érték eltérne a  $\lambda = 0,129$  értéktől, akkor az azt jelentené, hogy a  $V(h)$  függvény nem írja le teljesen a valóságot. Tehát olyan új fizikára utalna, amely nem része a standard modelleknek.

## Futó csatolások

A renormálható kvantummező-elmélet jóslata szerint az egyes kölcsönhatások erősségei függenek a vizsgált részecskefolyamat energiájától [6]. A leginkább közismert csatolás, amellyel fizikatanulmányaink során találkozunk az  $\alpha$  finomszerkezeti állandó,<sup>2</sup> amely az elektromágneses kölcsönhatás erősségét jellemző szám. Értéke a Millikan-kísérlet szerint közelítőleg  $1/137$ . A Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető (LEP) részecske-kölcsönhatásaiban a finomszerkezeti állandó értéke  $1/128$ -nak adódott. A LEP-ben a részecskefolyamatok jellegzetes  $Q$  energiaskálája  $Q \approx 91,2$  GeV, a Millikan-kísérleté pedig 0 GeV. Azt tapasztaljuk tehát, hogy a finomszerkezeti „állandó” nem is állandó, mert az elektromágneses kölcsönhatás erőssége nő a folyamatot jellemző energia növekedésével.

Általánosan, a csatolások energiatüggését a kvantummező-elméletben jól meghatározott eljárással lehet megkapni. Eredményül annyi egyenletet kapunk, ahány csatolás van az elméletben.<sup>3</sup> Az egyenletrendszer teljes megoldásához minden csatolás kezdeti értékét meg kell adni egy tetszőlegesen rögzített  $Q_0$  energiaskálán. A kezdeti értékeket mérésekből nyerjük, és ismeretükben megjósolhatjuk a csatolások értékét tetszőlegesen más  $Q$  skálán. Azt feltételezzük, hogy maga a kvantummező-elmélet elveszíti érvényességét az  $M_{Pl} \approx 10^{19}$  GeV Planck-tömegnek hívott energia felett, mert a Planck-tömeg túl semmi nem

<sup>2</sup>A természetes egységrendszerben  $\alpha = e^2/(4\pi)$ , ahol  $e$  az elemi töltés.

<sup>3</sup>Pontosan szólva, csatolt elsőrendű differenciálegyenlet-rendszer adódik.

biztosítja, hogy a téridő az általunk ismert szerkezetű. Ezért a gyakorlatban megköveteljük, hogy  $Q < M_{\text{Pl}}$ . A kezdeti feltételek birtokában kiszámolhatjuk a  $\lambda(Q)$  függvényt [7], és ezt ábrázolva (4. ábra) nem várt meglepetésben lesz részünk. Körülbelül  $10^{10}$  GeV energiánál a  $\lambda$  csatolás nullánál kisebbé válik. A növekvő  $Q$ -val csökkenő  $\lambda$  oka az, hogy a BEH-mező csatolása a fermionokkal negatív járulékot ad a  $\lambda(Q)$ -t vezérlő differenciálegyenletbe. A kezdeti feltételek közül ezért a legfontosabbak  $M_{H^0}$  értéke és  $M_t$ , azaz a standard modellben a legnehezebb fermion, a t-kvark tömege. Értelemszerűen, ha  $M_{H^0}$  nagyobb, akkor a  $\lambda(Q)$  is nagyobb lesz. Ha  $M_t$  kisebb, a hozzá tartozó BEH-mező-t-kvark csatolás is kisebb, tehát a  $\lambda(Q)$ -hoz kisebb negatív járulék adódik, azaz  $\lambda(Q)$  nagyobb lesz. Így az előjelváltás is nagyobb energián történik. Ezt szemlélteti az 5. ábra az  $M_{H^0}$ - $M_t$  síkon.

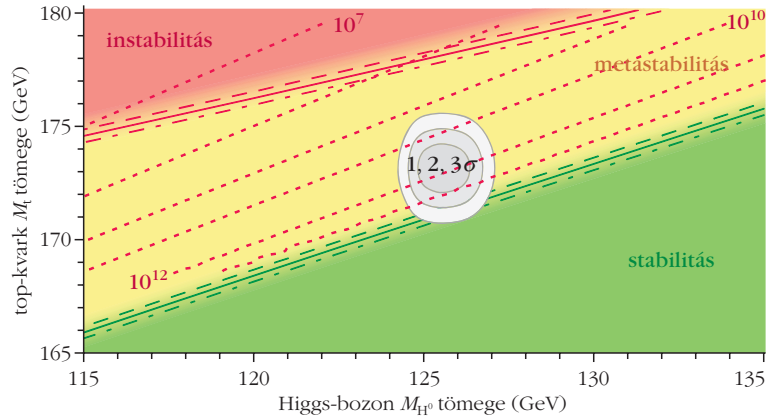
## A Világegyetem stabilitása

Negatív  $\lambda$  értékeknél az (1) egyenletben definiált  $V(h)$  függvény nem lesz többé alulról korlátos a  $h$  mező nagy értékei esetén és  $v$  pedig csak lokális minimum lesz, ahogy a 2. ábra jobb felső függvényalakja mutatja. Így a  $v$  helyen vett BEH-mezőérték nem az energetikailag legkedvezőbb alapállapotot jelenti.

Rendkívül érdekes, hogy a standard modell az 5. ábra alapján  $2\sigma$  bizonyossággal azt jósolja, hogy a BEH-potenciál metastabil. A metastabilitás azt jelenti, hogy annak várható ideje, hogy a BEH-mező a jelenlegi minimumból mélyebb minimumba kerüljön az általunk megfigyelhető Világegyetemben, meghaladja a Világegyetemünk korát.

A jelenséget a következőképpen képzelhetjük el. A mikrovilágra érvényes határozatlansági reláció megengedi az energiamegmaradás sérülését a sérülés mértékével fordítottan arányos ideig. Így ha kvantumfluktuációk következtében olyan Higgs-bozon keletkezik, amelynek energiája meghaladja a kritikus  $Q_c \approx 10^{10}$  GeV értéket, és az két másik Higgs-bozonra bomlik, akkor a folyamatban a csatolás erőssége  $\lambda(Q)$  lesz. Tehát a bomlás helyén a BEH-mező instabil lesz, és ez az instabilitás továbbterjed a BEH-mezőben, hiszen az instabil potenciális energia globális minimumhelye  $v$ -nél energetikailag kedvezőbb (alacsonyabb).

Hasonló jelenség játszódik le a túlhűtött víz megfagyása során:  $0^\circ\text{C}$  alatt a víz stabil állapota a jég. Ha a folyékony, de túlhűtött, tehát  $0^\circ\text{C}$ -nál hidegebb vizet egy pontban zavar éri (például megütjük), akkor ab-



5. ábra. A BEH-potenciál stabilitása a  $\lambda(Q)$  függvényt leginkább befolyásoló bemeneti paraméterek, a Higgs-bozon és a top-kvark tömegének a függvényében. A sűrűn szaggatott piros vonal azt a GeV-ben megadott  $Q$  energiaskálát jelenti, ahol  $\lambda$  előjelet vált. A zöld és piros régiók határain a folytonos és a ritkán szaggatott vonalak mutatják a bizonytalanságot az erős kölcsönhatás csatolási erősségének bemeneti értékében, amelyet a 4. ábrán tüntettünk fel. A szürke régiók az  $M_{H^0}$  és  $M_t$  kísérleti értékei körüli, a 4. ábrán alkalmazott bizonytalanságoknak megfelelő 1, 2, illetve  $3\sigma$  bizonytalansági tartományokat jelölik.

ból a pontból kiindulva teljes egészében hirtelen jéggé fagy, miközben energia szabadul fel, és ezért felmelegszik [8].

A Világegyetemre nézve a helyzet nem katasztrófális, amit az is bizonyít, hogy itt vagyunk. A standard modell jóslata szerint metastabil állapotban vagyunk, amelynek várható élettartama legalább  $10^{100}$  év [9], ami az Univerzum jelenlegi életkoránál mintegy  $10^{90}$ -szer hosszabb.

A részecskefizikában a standard modell alapállapotának – azaz a vákuum – stabilitása erősen kutatott terület. Sokan osztják azt a véleményt, hogy léteznie kell olyan standard modellen túli fizikának, amely stabilizálja a BEH-potenciális energiát.

## Irodalom

1. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. *Fizikai Szemle* 58/7 (2008) 246.
2. Pásztor Gabriella: Higgs-vadászat @ CERN. *Fizikai Szemle* 62/10 (2012) 358.
3. Veszprémi Viktor: A Higgs-bozon kutatása: befejezett vagy csak most kezdődik? *Fizikai Szemle* 2020/4 (2020) 118.
4. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmei – 1. rész: a Higgs-bozon keresése. *Fizikai Szemle* 71/2 (2021) 37.
5. <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/1999/summary/>
6. Trócsányi Zoltán: A kvantum-szindinamika szerepe nagyenergiájú részecskeütközések értelmezésében. *Fizikai Szemle* 57/3 (2007) 73.
7. G. Degrandi, S. Di Vita, J. Elias-Miro, J. R. Espinosa, G. F. Giudice, G. Isidori, A. Strumia: Higgs mass and vacuum stability in the Standard Model at NNLO. *JHEP FUNC* 08 (2012) 098.
8. P. G. DeBenedetti, H. E. Stanley: Supercooled and Glassy Water. *Physics Today FUNC* 56 (2003) 40–46, valamint Veritasium: *Supercooled Water – Explained!* (video) YouTube (2011), <https://youtu.be/ph8xusY3GTM>
9. D. Buttazzo, G. Degrandi, P. P. Giardino, G. F. Giudice, F. Sala, A. Salvio, A. Strumia: Investigating the near-criticality of the Higgs boson. *JHEP FUNC* 12 (2013) 089.

# AZ UNIVERZUM TITKAI ÉS A NAGY HADRONÜTKÖZTETŐ: NYITOTT KÉRDÉSEK A RÉSZECSEKEFIZIKÁBAN

Pásztor Gabriella  
ELTE TTK Fizikai Intézet

A Higgs-bozon 2012-es felfedezésével [1–4] a CERN Nagy Hadronütköztetője, az LHC két óriás detektorát, az ATLAS-t és a CMS-t megépítő és működtető nagy nemzetközi együttműködések teljessé tették a részecskefizika standard modelljének [5] utolsó fejezetét is. Ez azonban távolról sem jelenti azt, hogy ismerjünk az elemi részecskéket és kölcsönhatásait leíró alapvető elméletet, hiszen a standard modell számos kérdést nyitva hagy [6–8], és csupán egy effektív elméletnek tekinthető, amely igen pontosan leírja a laboratóriumban napjainkban elérhető energiákon a mikrovilág működését.

Az Univerzum titkai közül szemezgetünk ebben a cikkben, olyan megfigyeléseket tárgyalva, amelyeket bizonyítéknak tekinthetünk arra, hogy a standard modell nem a végső szó, és megalkotható egy mélyebb elmélet („új fizika”) mögötte. Érintjük a sötét anyag természetét, az anyag-antianyag aszimmetriát és a neutrínók tömegét. Friss eredmények segítségével azt is felvillantjuk, hogyan járul hozzá az LHC ezen nyitott kérdések vizsgálatához.

## Sötét anyag

Számos kozmológiai megfigyelés – a galaxisok forgásgörbéitől, a gravitációs lencsézés vizsgálatán át, a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás [9, 10] szerkezetének pontos feltárásáig – egységes képet fest elénk az Univerzum energiamérlegéről. Eszerint az ismert „látható” (dominánsan barionos) anyag 5%-ot, a gravitációs hatásán keresztül észlelt sötét anyag (dark matter, DM) [11, 12] 26%-ot, míg a Világegyetem gyorsuló

tágulásáért felelős sötét energia [13, 14] 69%-ot tesz ki. *A standard modell sem a sötét anyag, sem a sötét energia természetéről nem ad útmutatást.*

A titokzatos sötét anyag összetételére rengeteg javaslat született új egzotikus részecskék feltételezésével. Ezek közül a legnépszerűbbek között vannak a *gyengén kölcsönható nehéz részecskék* (például a legkönnyebb szuperszimmetrikus részecske, ha az semleges), a *steril neutrínók* (ezekre később visszatérünk), az erős kölcsönhatás CP-problémájára megoldást kínáló *axionok* [15] vagy ahhoz hasonló *axionszerű részecskék*. Ezekben az a közös, hogy tömeges részecskék, amelyek az ismert barionos anyaggal igen gyengén hatnak kölcsön (a kölcsönhatás erőssége legfeljebb az ismert gyenge kölcsönhatás erősségét érheti el). Ez azt jelenti, hogy a sötét anyag kimutatására laboratóriumi kísérletekben is lehet remény.

A sötét anyagot hagyományosan három egymástól alapvetően eltérő módon vizsgálhatjuk. *Közvetett észlelés* során a sötét anyag önkölcsönhatásából származó nagy energiájú fotonok, neutrínók vagy kozmikus töltött részecskék energiaspektrumát mérjük és hasonlítjuk össze a kozmológiai és részecskefizikai modellekkel. *Közvetlen észleléskor* (általában a föld alatt, például bányákban elhelyezett) nagyméretű detektorokban keressük a sötét anyag ritka kölcsönhatásait a detektor atommagjaival. Végül *nagyenergiás részecske-ütközésekben* keletkező sötétanyag-részecskék nyomát is kutatjuk. Jelenleg az LHC rekord tömegközépponti energiájú (2022 óta 13,6 TeV) proton-proton ütközései nyújtják ez utóbbira a legjobb lehetőséget.

A kimutatás feltétele, hogy az ütközésben a sötét anyag mellett valamilyen látható részecske is keletkezzon, hiszen az előbbi (a standard modell neutrínóihoz hasonlóan) nem hagy nyomot a detektorban (mivel csatolási erőssége a normál barionos anyaghoz igen kicsi). A detektorban a látható részecskék lendülete fog egyensúlyt tartani *a sötét anyag által elvitt „hiányzó”*

$$-p_{\text{hiányzó}} = \sum p_{\text{megfigyelt részecskék}}$$

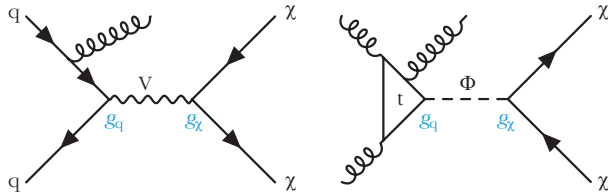
lendülettel az ütközőnyalábos kísérletekben. A teljesség kedvéért meg kell jegyezni, hogy a kalibrációs eljárás során – a fizikai objektumok lendületének mérésekor – a lehető legnagyobb pontossággal vesszük figyelembe a detektor felbontásából adódó torzítást, illetve részecskezápork (szakszóval jetek) esetén az esetlegesen keletkező, szintén láthatatlan neutrínók átlagos hozzájárulását is.

Az írás a Higgs-bozon felfedezésének 10. évfordulója alkalmából a Magyar Tudományos Akadémián és az Eötvös Loránd Tudományegyetemen rendezett tudományos és ismeretterjesztő programokon tartott két előadás alapján készült.

A szerző hálás Horváth Dezsőnek és Trócsányi Zoltánnak a kézirat gondos átolvasásáért és hasznos megjegyzéseikért.



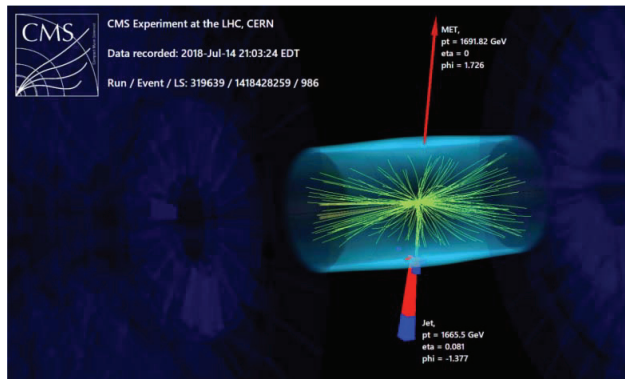
Pásztor Gabriella részecskefizikus, az MTA–ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport vezetője, a CERN LHC CMS együttműködést vezető testület tagja. Részt vett a Higgs-bozon felfedezésében. Fő kutatási területe a részecskefizika standard modelljén túlmutató jelenségek kutatása. A CMS-kísérlet BRIL luminozitásmérő rendszerének projektmenedzszerként korszerű mérőberendezések működtetését, valamint tervezését és megépítését is irányítja az LHC új nagy intenzitású adatgyűjtési szakaszára.



1. ábra. Egyszerűsített modellek vektorbozon (bal oldal) és skalárbozon (jobb oldal) közvetítő részecskével sötétanyag-részecskék ( $\chi$ ) párkeltésére az LHC p-p ütközéseiben. A kezdeti állapotú protonok kvarkjai az erős kölcsönhatáson keresztül gluont sugároznak ki, amelynek hatására a végállapotban egy részecskezápör jelenik meg.

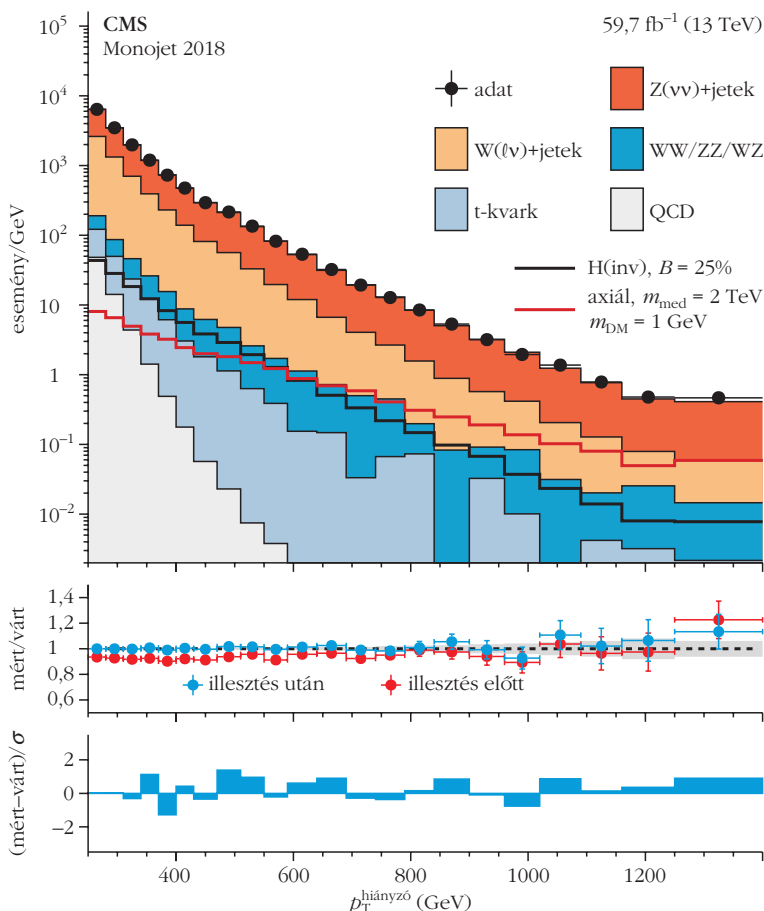
A sötétanyag-részecskék általában valamilyen közvetítő részecske bomlásából származnak, amelynek különböző modellekbeli tulajdonságai igen változatosak lehetnek. Ez motiválja az úgynevezett egyszerűsített modelleken (1. ábra) alapuló analíziseket, ahol a szabad paraméterek csupán a közvetítő (mediátor) és a sötétanyag-részecske tömege ( $m_{\text{med}}$  és  $m_{\text{DM}}$ ), illetve a közvetítő csatolási erőssége a kezdeti állapotú standard modell részecskéhez, például a kvarkokhoz, valamint a sötétanyag-részecskékéhez ( $g_q$  és  $g_\chi$ ). A hatáskeresztmetszet-korlátokat aztán újraértelmezhetjük részletesen kidolgozott (például szuperszimmetriát, további térbeli dimenziókat vagy más új fizikát tartalmazó) modellekben is.

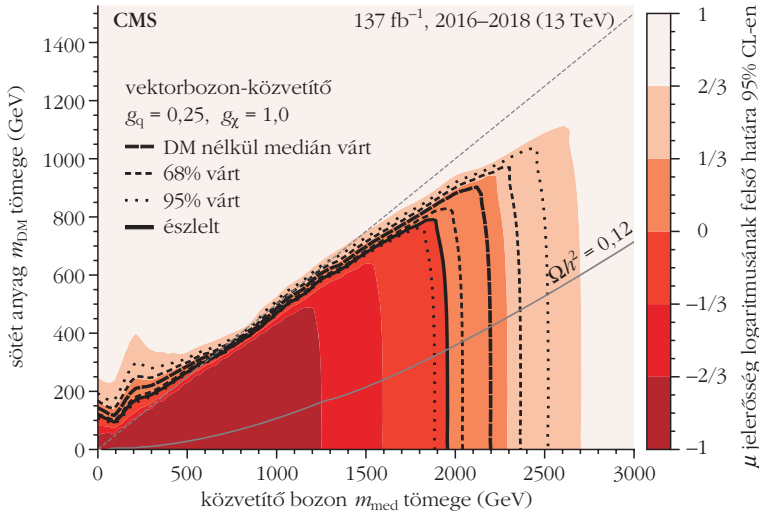
A sötét anyag vizsgálatára az egyik legérzékenyebb, az erős kölcsönhatás nagy csatolási erőssége miatt gyakorinak várt végállapot egyetlen részecskezápört (jetet) tartalmaz. Ilyen esemény képe látható a 2. ábrán. A kezdeti állapotban lévő kvarkokból kisugárzott gluon keltette részecskezápör lendülete tart egyensúlyt a távozó (nem észlelt) sötét anyag lendületével. Az ilyen eseményekben mért hiányzó lendület eloszlásának (3. ábra) vizsgálatával tanulmányozhatjuk a hipotetikus sötétanyag-részecskék keletkezését. A mért és a standard modellből várt eloszlás összehasonlításából, Monte-Carlo-szimulációk alapján meghatározva a feltételezett új részecske észlelésének hatásfokát a detektorban, megmérhetjük a keletkezési hatáskeresztmetszetet, illetve – szignifikáns eseménytöbblet hiányában – erre felső korlátot kapunk. Ezt összehasonlítva a sötétanyagmodell hatáskeresztmetszet-jóslatával, a paraméterértékekre becslést vagy korlátot adhatunk meg. Ezt szemlélteti a 4. ábra a már említett egyszerűsített, vektorbozon-közvetítőt tartalmazó négyparaméteres modellben (1. ábra bal oldal) a közvetítő részecske-tömeg – sötétanyag-részecske-tömeg síkon a csatolási erősségek adott értéke mellett. A csatolási erősségekre is – adott tömegek esetén – hasonló módon lehet megszorításokat adni.



2. ábra. Egy részecskezápört és hiányzó lendületet (piros nyíl) tartalmazó esemény a CMS-kísélet adataiból. Egy nyálacsomag-találkozás során átlagosan nagyjából 40 elemi proton-proton ütközés játszódik le, az ezekből keletkező (többnyire alacsony lendületű) töltött részecskék nyomait a belső nyomkövető detektorban vékony vonalak jelölik. Az 1. ábrán látható nagy lendületátadással járó folyamatból származó, az elektromágneses és hadronkaloriméterben megállított részecskék energiáját csonka gúlák szemléltetik [16].

3. ábra. A hiányzó lendület nyálacbirányra merőleges vetületének nagysága ( $p_T^{\text{hiányzó}}$ ) egyetlen részecskezápört tartalmazó eseményekben a CMS-kísélet 2018-as adataiban. A mért adatok eloszlását (fekete körök) a standard modellből várttal (kitöltött egymásra helyezett hisztogramok) összevetve következtethetünk a sötétanyag-részecskék esetleges keletkezésére. Szembetűnő, hogy a standard modell folyamatokban sötét anyag hiányában is észlelünk hiányzó lendületet a keletkező neutrínók, illetve a detektor nem tökéletes lendületfelbontása miatt. Egy 2 TeV tömegű (axiál)vektorbozon-közvetítőt és 1 GeV tömegű sötétanyag-részecskét feltételező elméletből (1. ábra bal oldal) várt eloszlás szemlélteti, hogy sötét anyag jelenlétében a legmagasabb hiányzó lendületet tartalmazó események száma nagyjából 10%-kal nő meg [16].





4. ábra. A hiányzó lendületet és egyetlen részecskezápport tartalmazó események analiziséből nyert korlátok az egyszerűsített, vektorbozon-közvetítőt tartalmazó modell tömegparamétereire a közvetítőrészecske csatolásának az ábrán feltüntetett értékei esetén. A 3. ábrán látható enyhe eseménytöbblet hatására az észlelt korlát (fekete folytonos vonal) gyengébb, mint a sötét anyag hiányában várt (vastag szaggatott vonal) 68% és 95% konfidenciatartománnyal). Az észlelt sötétanyag-sűrűségnek megfelelő paraméterkombinációk értékeit a szürke folytonos vonal jelzi. A jobb oldali színskálának megfelelő árnyalatok az adott pontban a  $\mu$  jelerősség logaritmusára kapott felső korlátot mutatják 95% konfidenciaszinten (CL). A jelerősség a mért és a sötétanyagmodellből számolt hatáskeresztmetszet hányadosa. A modellben ennek zérushelye adja meg a közvetítőrészecske és a sötétanyag-részecske tömegére az alsó korlátot [16].

A mérési eredmények természetesen más egyszerűsített (vagy teljesen kidolgozott) sötétanyagmodellekben is értelmezhetők. A közvetítőrészecske tömegére kis sötétanyag-részecske tömeg esetén 1,5–2,0 TeV alsó korlát adódik a különböző modellekben [16]. Érdekes megemlíteni, hogy ez az egyetlen egyszerű végállapotra összpontosító keresés a Higgs-bozon láthatatlan bomlásainak arányára, Kaluza–Klein-gravitont tartalmazó további térbeli dimenziókat feltételező modellek [17] paramétereire, illetve könnyű kvark – neutrínó párhoz csatoló leptokvark<sup>1</sup> tömegére is tud megszorításokat tenni. Ez azt is jelenti, hogy egy anomália megjelenése esetén a mögötte lévő új fizika felismerése komoly kihívást ad a kutatók számára, hiszen különböző modellek hasonló eltéréseket, egzotikus jelenségeket is jósolhatnak.

## Anyag-antianyag aszimmetria

A látható „Univerzum anyagból épül fel” kijelentés triviálisnak tűnik. Azonban az elfogadott standard kozmológiai elmélet szerint az ősrobbanás után anyag és antianyag azonos arányban keletkezett, így felvetődik a kérdés: *hogyan alakult ki az anyag dominanciája?*

<sup>1</sup>A leptokvarkok olyan feltételezett részecskék, amelyeknek sem lepton-, sem barionszáma [18] nem nulla, így egy lepton-kvark párba bomolhatnak, vagy lepton-kvark kölcsönhatásból keletkezhetnek.

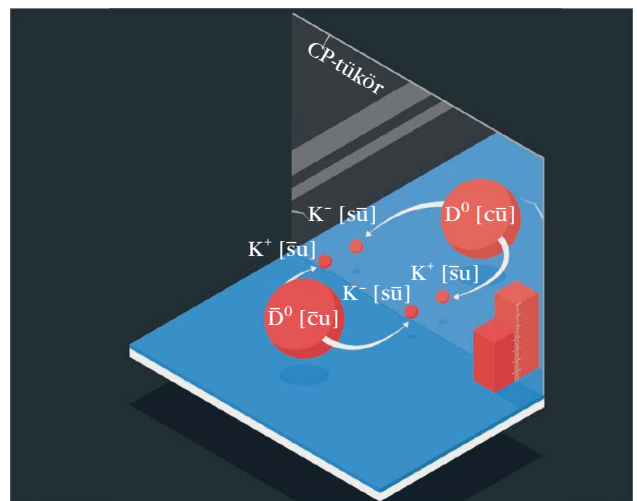
Az egymással kölcsönhatásba lépő anyag és antianyag megsemmisül, a felszabaduló energia pedig elsősorban fotonpárok formájában szétsugárzódik. A kozmológiai megfigyelések – köztük a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás [9, 10] és a könnyű elemek előfordulási gyakorisága [12] – szerint, amíg az antianyag teljesen eltűnt, egy milliárd anyagrészecskéből egy megmaradt: ma ezek építik fel az Univerzumot.

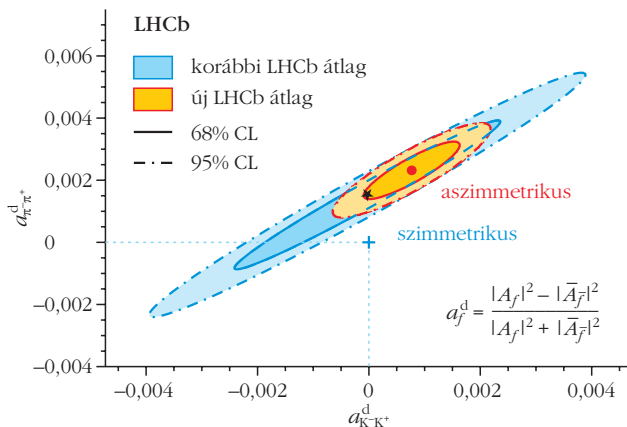
Ehhez szükséges három feltétel egyike, hogy *az anyag és az antianyag bomlási gyakoriságai kis mértékben eltérjenek*. Laboratóriumban például kimutatták, hogy a c- és anti-u-kvarkból álló  $D^0$  mezon és  $\bar{D}^0$  antirészecskéje [18] különböző valószínűséggel alakul át  $K^+K^-$  párokká (5. és 6. ábra) [19]. Az eddig megismert ilyen, úgynevezett CP (töltéstükrözés  $\times$  tértükrözés) aszimmetriát mutató folyamatokat a standard modell a  $3 \times 3$ -as, a kvarkízek keveredését leíró Cabibbo–Kobayashi–Maskawa (CKM) mátrixban [20] megjelenő komplex fázis segítségével tudja leírni [5], azonban ezek túl ritkák, hogy megmagyarázzák az anyagi Univerzum kialakulását.

Az LHC-kísérletek ezért nagy erővel kutatnak a *CP-sértés további forrásai* után a nehéz kvarkokat, elsősorban b-kvarkokat tartalmazó hadronok bomlásaiban, de további folyamatokat is keresnek például kiterjesztett (több skalárbozont tartalmazó) Higgs-sektort feltételezve.

A következő fejezetben említendő neutrínókísérletek (lásd például [21, 22]) új eredményei arra utalnak, hogy jelentős *CP-sértés léphet fel a leptonszektorban* is, amit a Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata (PNMS)

5. ábra. Példa a CP-sértésre: a  $D^0$  és az  $\bar{D}^0$  mezonok nem azonos valószínűséggel bomlanak  $K^+K^-$  párokká annak ellenére, hogy a két folyamat CP-tükrözöttje egymásnak.





6. ábra. Az LHCb-kísélet mérései szerint a  $D^0$  mezonok bomlása  $K^+\pi^-$ , illetve  $\pi^+\pi^-$  mezonpárokra sérti a CP-szimmetriát: a szimmetriasértés mértékéről a  $D^0 \rightarrow f$  folyamatra az  $a_f^d$  közvetlen CP-aszimmetriaparaméter ad információt. Az új eredmények a két paraméter egyidejű illesztéséből elsőként bizonyítják, hogy  $a_{\pi^+\pi^-}^d$  szignifikánsan különbözik nullától, valamint az  $a_{K^+\pi^-}^d$  mérési bizonytalanságát is jelentősen lecsökkentették. Az eltérés a CP-szimmetrikus viselkedéstől  $3,8\sigma$ . Az eredmények összehasonlítása a legpontosabb elméleti számításokkal tisztázhatja, hogy a c-kvark szektorban észlelt CP-sértés megegyezik-e a standard modell jóslatával, vagy új dinamika megjelenésére utal [19].

mátrix tud beépíteni a kiterjesztett, neutrínóíz-rezgést is tartalmazó standard modellbe [20, 23].

Az anyag-antianyag aszimmetria egy másik feltétele a *barionszám megmaradásának sérülése* [18]. Ilyen folyamatok például az erős és az elektroyenge kölcsönhatást magas energiákon közös keretbe foglaló *nagy egyesített elméletekben* megjelenhetnek. Ezek bizonyos jóslatait az LHC-n is ellenőrizhetjük izanomáliák és egzotikus állapotok (például leptokvarkok) kutatásával, amelyekről a következő cikkben még szót ejtünk.

## A neutrínók tömege

A standard modellben az elemi anyagi részecskék, a kvarkok (például a protont és a neutront felépítő u- és d-kvark), valamint a leptonok (legismertebb képviselőjük az elektron) tömege a Higgs-mező és a részecskék között ható, úgynevezett Yukawa-kölcsönhatásból származik [20, 24]. Ezt az teszi lehetővé, hogy a mindent kitöltő Higgs-mező, amelynek kvantumgerjesztése a Higgs-bozon, vákuumbeli várható értéke nem nulla, a mérések szerint  $\langle v \rangle = 246$  GeV [25].

Nézzük meg közelebbről az erős kölcsönhatásban is résztvevő kvarkok és a csupán elektroyenge kölcsönhatást érző leptonok (az elektromosan töltött elektron, müon és tau lepton, illetve a hozzájuk tartozó semleges neutrínók) három családjának tulajdonságait, hogy megértsük, miért nem eredhet a csupán gyenge erőt érző neutrínók tömege a standard modell Yukawa-kölcsönhatásából. Mindkét csoport tagjai feles spinű fermionok két kiralitásállapottal, amely jobb- vagy balkezes lehet. Ezek különbözőképpen

vesznek részt a gyenge kölcsönhatásban, mivel a töltés szerepét játszó gyenge izospin 3. komponense [18] a jobbkezes állapotokban  $T_3 = 0$ , a balkezesekben pedig a neutrínókra  $T_3 = +1/2$ , az elektromosan töltött leptonokra  $T_3 = -1/2$  [26]. A Yukawa-kölcsönhatás során a fermionok kiralitása (és ezzel kölcsönhatási tulajdonsága) megváltozik. A *neutrínók* az eddigi kísérletek szerint mindig balkezesek, nincs jobbkezes állapotuk (ezt hívják maximális paritássértésnek), tehát *nem kaphatnak tömeget a standard modell Yukawa-kölcsönhatásából*.

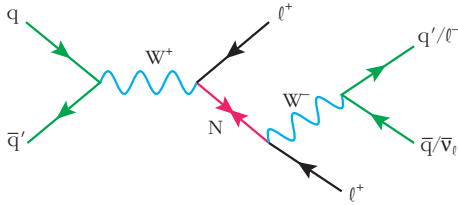
Azonban számos kísérleti eredmény bizonyítja, hogy a neutrínók íze megváltozhat, azaz például egy elektronneutrínó müonneutrínóvá alakulhat át, és fordítva [22, 23, 27]. E kvantummechanikai jelenség valószínűsége függ a neutrínóállapotok tömegnégyzetkülönbségétől. Egyenlő tömegek esetén az átalakulás valószínűsége nulla, azaz a neutrínók nem lehetnek azonosan nulla tömegűek. A mérések alapján a tömegnégyzetek különbsége néhány százalék pontossággal  $\delta m^2 \cong 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$  és  $\Delta m^2 \cong \pm 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$  [28].

Hogyan oldható fel ez az ellentmondás? Léteznie kell egy jobbkezes ( $T_3 = 0$ ), „steril” neutrínóállapotnak, amely nem vesz részt a gyenge kölcsönhatásban sem. A(z egyelőre hipotetikus) *steril neutrínó* csak a gravitációs és a Higgs-kölcsönhatást érzi.

Ebben az esetben is marad még egy kérdés: *a neutrínók tömege miért olyan kicsi a többi elemi fermion tömegéhez képest?* A töltött leptonok és a kvarkok tömege széles tartományt ölel fel: a legkönnyebb elektron 511 keV, míg a legnehezebb t-kvark 175 GeV tömegű. A neutrínók tömege azonban még több mint milliószor kisebb az elektronénál. Kozmológiai megfigyelésekből a három neutrínófajtára a tömegösszeg 0,13–0,52 eV alatti a modellfeltételezésektől függően [28], illetve a béta-bomlás elektronenergia-spektrumának vizsgálatából az elektronneutrínó tömegére a KATRIN-kísélet  $m_\nu < 0,8$  eV értéket kapott (90% konfidenciaszinten) [29].

Dirac-fermionok esetén nincs igazán kézenfekvő magyarázat: a steril neutrínóra ható új erők okozhatják a tömeg kicsinységét. Ha viszont a neutrínó Majorana-részecske, azaz önmaga antirészecskéje, akkor a mérleghinta-mechanizmus a segítségünkre siet. Ebben az esetben egy nehéz jobbkezes steril neutrínó (vagy más új fizika nagy energián) elegendő: a mért könnyűneutrínó-tömeg fordítottan lesz arányos a még felfedezendő nehéz steril neutrínó tömegével. A ritka, neutrínó nélküli dupla béta-bomlás kimutatásával lenne bizonyítható a *neutrínó Majorana természete*, amely után több kísérlet is kutat [21, 30].

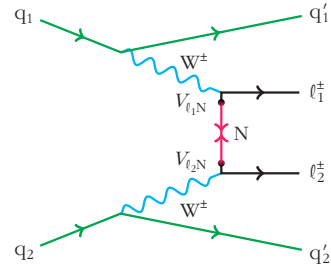
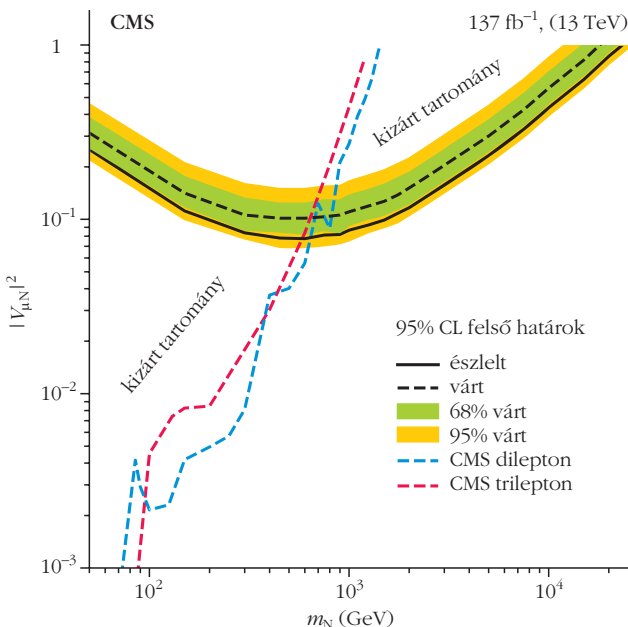
A *nehéz Majorana-neutrínókat* az LHC protonütöközéseiben is észlelhetjük, ha valóban léteznek és keletkezésükhöz elegendő az ütközési energia, például a 7. ábrán mutatott folyamaton keresztül. Mivel mindeddig az eredmények jó egyezést adnak a standard modellel, azaz nem mutatják nehéz neutrínó keletkezését,



7. *ábra.* Egy lehetséges folyamat egyszeres nehéz Majorana-neutrínó (N) keletkezésére és bomlására az LHC proton-proton ütközéseiben. A kezdeti állapotban ütköző protonokban lévő kvark (q) és antikvark ( $\bar{q}$ ) kölcsönhatásából születő, a gyenge kölcsönhatást közvetítő  $W^+$ -bozon bomlásából megjelenő Majorana-neutrínó egy  $W^-$ -bozonon keresztül egy leptonra és egy fermionpárra bomlik. Az azonos töltésű leptonok ( $\ell^+ \ell^+$ ) jellegzetes képet mutatnak a detektorban.

korlátok adhatók meg a nehéz neutrínó  $m_N$  tömegére, illetve keveredésére a standard modell neutrínóival (ahol  $V_{\ell N}$  a keveredés nagyságát leíró paraméter a  $\nu_\ell$  neutrínóval). Egy új mérés, amely vektorbozon-fúzióban (8. *ábra*) megjelenő (virtuális) nehéz neutrínókat céloz meg azonos töltésű müonpárok keletkezését vizsgálva, jelentősen javítja a korábbi eredményeket, amelyeket az egyszeres nehézneutrínó-keletkezés (például 7. *ábra*) vizsgálata adott. Maximális nehézneutrínó-keveredés esetén ( $V_{\mu N} = 1$ ) az érzékenységet egészen 23 TeV-ig kiterjesztette, de már közepes mértékű keveredés esetén ( $V_{\mu N} \gtrsim 0,1$ ) is jelentősen kitolja a tömegkorlátot, ahogy azt a 9. *ábra* mutatja [31].

9. *ábra.* Kizárt paramétertartomány a nehéz Majorana-neutrínó tömege ( $m_N$ ) és a müon-neutrínóval való keveredésének mértéke ( $V_{\mu N}$ ) által kifésztett síkon a CMS-kísélet Run 2 adatainak elemzéséből [31]. A 8. *ábra* szerinti vektorbozonszórási folyamat vizsgálatával kapott eredményt a fekete folytonos vonal jelzi. A fekete szaggatott vonal a nehéz neutrínó létezésének hiányában várt kizárási tartományt mutatja, ennek 68% és 95% konfidenciatartományát is jelezve. A bal alsó sarokban kezdődő szaggatott vonalak az egyszeres nehéz Majorana-neutrínó-keletkezés (például 7. *ábra*) keresésének korábbi eredményét szemléltetik. Ezek a mérések megadják a keresett Majorana-neutrínó tömegének minimumát: ez 90 GeV-ről 23 TeV-re nő a keveredés erősségének növekedésével.



8. *ábra.* Virtuális nehéz Majorana-neutrínó (N) keletkezése az LHC proton-proton ütközéseiben vektorbozon fúzióval. A kezdeti állapotban ütköző protonokban lévő kvarkok ( $q_1$  és  $q_2$ ) egy-egy azonos töltésű  $W$ -bozont bocsátanak ki, amelyek a Majorana-neutrínón keresztül lépnek kölcsönhatásba. Itt is azonos töltésű leptonok ( $\ell_1^+ \ell_2^+$ ) jelennek meg a Majorana-neutrínó keletkezésének jellegzetes nyomaként a detektorban.

## Hogyan tovább?

Bár az LHC egyelőre nem fedezte fel a rejtőzködő új fizikát a 2. futási szakasz (2015–2018) 13 TeV tömegközépponti energiájú proton-proton ütközési adatainak feldolgozásával, számos területen jelentősen megszorította a kiterjesztett elméleteket, ahogy a fentiekben, a sötét anyag és a nehéz neutrínók példáján láttuk. Rengeteg további új eredmény (és néhány izgalmas anomália is) van kiterjesztett Higgs-szektor, szuperszimmetriát, további térbeli dimenziókat és más egzotikus jelenségeket feltételező modellekben, amelyekre helyszűke miatt nem térünk ki. A leptonuniverzalitás ellenőrzéséről és az ehhez köthető feltételezett új nehéz részecskék kereséséről a következő cikkben írunk.

Az LHC még fiatal korában jár: a gyorsító által szolgáltatott teljes proton-proton kölcsönhatási eseményhozam tervezett mennyisége  $3000\text{--}4000 \text{ fb}^{-1}$  integrált luminozitásnak felel meg, ebből 13 TeV energián a 2. futási szakasz végéig alig több mint  $150 \text{ fb}^{-1}$  került rögzítésre, majd feldolgozásra. A 3. adatgyűjtési szakasz 2022-ben kezdődött el 13,6 TeV energián, és 2026-ig megduplázza majd az adatmennyiséget, ami nagyobb pontosságú mérésekre, az elérhető paramétertartomány kiterjesztésére ad lehetőséget.

Mindeközben nagy erővel halad a Nagy Luminozitású Nagy Hadronütköztető fejlesztése, amelyben a magyar csoportok fontos szerepet vállaltak. Várhatóan 2029-ben 14 TeV energián, megújult detektorokkal indul el az adatgyűjtés, amely a következő 10 évben kiteljesíti a gyorsító tudományos (felfedezési) potenciálját.

Míg az elméleti kutatók megálmodják és pontosan kidolgozzák a modelleket, amelyek megadhatják a választ a részecskefizika nyitott kérdéseire, addig reményeink szerint, a kísérleti csoportok munkája hozzásegít ahhoz, hogy megtaláljuk azon nyomokat az adatokban, amelyek a lehetséges kiterjesztések közül kijelölik a valójában megvalósulót. Az LHC-kísérletek új adatai a következő évtized(ek)ben megnyithatják a kaput egy új forradalmi változásnak – hasonlóan a Higgs-bozon 2012-es felfedezéséhez.

## Irodalom

1. Pásztor Gabriella: Higgs- vadászat @ CERN. *Fizikai Szemle* 62/10 (2012) 358.
2. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmei – 1. rész: a Higgs-bozon keresése. *Fizikai Szemle* 71/2 (2021) 37.
3. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmei – 2. rész: a Higgs-bozon megfigyelése. *Fizikai Szemle* 71/3 (2021) 84.
4. Veszprémi Viktor: A Higgs-bozon kutatása: befejezett vagy csak most kezdődik? *Fizikai Szemle* 70/4 (2020) 118.
5. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. *Fizikai Szemle* 58/7–8 (2008) 246.
6. Takács Gábor: Fizika a Standard Modelen innen és túl. *Természet Világa, Mikrovilág-2012, 2013/I. különszám* (2013) 3.
7. Horváth Dezső: A részecskefizika sérült szimmetriái vajon megoldják-e a problémáit? *Természet Világa* 2017/11 (2017) 495.
8. Trócsányi Zoltán: A részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után. *Fizikai Szemle* 73/9 (2023) 269.
9. Trócsányi Zoltán: A 2006. évi Fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* 56/11 (2006) 357.
10. Király Péter: A kozmikus háttérsugárzás kutatásának története és kilátásai. *Fizikai Szemle* 58/7–8 (2008) 254.
11. Németh Judit, Szabados László: A sötét anyag. *Fizikai Szemle* 56/11 (2006) 362.
12. Fényes Tibor: Az Univerzum uralkodó anyagfajtája, a „sötét anyag”. *Fizikai Szemle* 58/3 (2008) 81.
13. Németh Judit: Mi az a sötét energia? *Fizikai Szemle* 54/1 (2004) 1.
14. Szalai Tamás: Fizikai Nobel-díj 2011: szupernóvák és a gyorsulva táguló Univerzum. *Fizikai Szemle* 61/11 (2011) 377.
15. Joerg Jaeckel, Axel Lindner, Andreas Ringwald: Ultrakönnyű részecskék nyomában. *Fizikai Szemle* 65/7–8 (2015) 218.
16. CMS Collaboration: Search for new particles in events with energetic jets and large missing transverse momentum in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. *Journal of High Energy Physics* 11 (2021) 153.
17. Pásztor Gabriella: Rejtett dimenziók nyomában az ATLAS detektorral. *Természet Világa, Mikrovilág-2012, 2013/I. különszám* (2013) 53.
18. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Antirészecskék? *Fizikai Szemle* 72/11 (2022) 347.
19. LHCb collaboration: Measurement of the time-integrated CP asymmetry in  $D^0 \rightarrow K^+ K^-$  decays. CERN-EP-2022-163, LHCb-PAPER-2022-024, arXiv:2209.03179 [hep-ex].
20. Radics Bálint, Trócsányi Zoltán: A CP-sértés nagysága a lepton-szektorban. *Fizikai Szemle* 71/3 (2021) 81.
21. Németh Csaba: A Sudbury Neutrínó Observatórium – 2. rész – az SNOLAB, célkeresztben a neutrínók és a sötét anyag. *Fizikai Szemle* 66/7–8 (2016) 228.
22. Trócsányi Zoltán: Hogyan tegyük láthatóvá a láthatatlant? Nobel-díjas neutrínókísérletekről a 2015. évi fizikai Nobel-díj kapcsán. *Magyar Tudomány* 2016/4 (2016) 478.
23. Radics Bálint: A CP-szimmetriasértés kísérleti megfigyelése neutrínó-oszcillációkban. *Fizikai Szemle* 70/7–8 (2020) 245.
24. Patkós András: Mekkora a kvarkok tömege? *Fizikai Szemle* 63/11 (2013) 368.
25. Péli Zoltán, Trócsányi Zoltán: Metastabil Világegyetem. *Fizikai Szemle* 73/2 (2023) 39.
26. Horváth Dezső: Az elképesztő gyenge erő (kölsönhatási furcsaságok). *Fizikai Szemle* 71/9 (2021) 294.
27. Patkós András: Túl a részecskefizikai standard modellen. *Természet Világa* 2016/1 (2016) 2.
28. R. L. Workman et al. (Particle Data Group): The Review of Particle Physics (2022). *Prog. Theor. Exp. Phys.* 2022 (2022) 083C01.
29. KATRIN Collaboration: Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nature Physics* 18 (2022) 160.
30. Ettore Fiorini: A neutrínó tömege. *Fizikai Szemle* 58/10 (2008) 331.
31. CMS Collaboration: Probing heavy Majorana neutrinos and the Weinberg operator through vector boson fusion processes in proton-proton collisions at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. CERN-EP-2022-105, CMS-EXO-21-003, arXiv:2206.08956 [hep-ex].

# JELEK A STANDARD MODELLEN TÚLRÓL?

## Leptonuniverzalitás-anomáliák és leptokvarkkeresés a Nagy Hadronütköztetőn

Pásztor Gabriella  
ELTE TTK Fizikai Intézet

A Higgs-bozon felfedezésével [1–4] a standard modell [5] utolsó hiányzó láncszeme is a helyére került, azonban az elmélet nyitott kérdései [6–9] továbbra is fejlődést okoznak. Megválaszolásukra rengeteg javaslat született az elmúlt évtizedekben kiterjesztve a minimális elméletet új kölcsönhatásokkal, új szimmetriákkal, további térbeli dimenziókkal [10]. Fizikusok generációi kutattak és kutatnak az „új fizika” nyomai után egyre hatalmasabb méretű és nagyobb energiájú részecskegyorsítók adataiban bányászva két egymást kiegészítő stratégiát követve. Egyrészt ismert részecs-

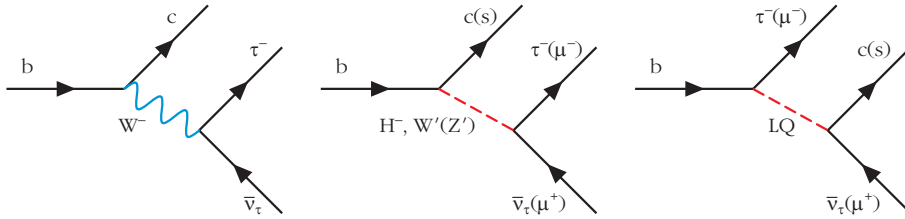
kék kölcsönhatási tulajdonságainak (például bomlási ágarányainak) pontos mérésével ellenőrizhetjük az esetleges eltéréseket („anomáliákat”) a standard modell jóslataitól, és ezekből következtethetünk új kölcsönhatások, új részecskék létre; másrészt közvetlenül is kereshetjük a részecskeütközésekben felszabaduló energiából születő egzotikus nehéz részecskék megjelenését, amelyek (ha valóban léteznek) az „új fizika” régen várt hírnökeiként egy újabb tudományos forradalmat hozhatnak el.

Az elmúlt évek egyik legérdekesebb kutatási területe a leptonuniverzalitás esetleges sérülésének tanulmányozása és a lehetséges okok (új skalár-, vektorbozon-, és leptokvarkállapotok) felkutatása volt. Az eddigi eredményekről és azok jelentőségéről ejtünk szót az alábbiakban.

---

Az írás a Higgs-bozon felfedezésének 10. évfordulója alkalmából a Magyar Tudományos Akadémián rendezett tudományos ülésen elhangzott előadás alapján készült.

A szerző hálás Horváth Dezsőnek és Trócsányi Zoltánnak a kézirat gondos átolvasásáért és hasznos megjegyzéseikért.



1. ábra. A  $b \rightarrow c\tau\bar{\nu}_\tau$  bomlás a standard modellben a gyenge kölcsönhatást közvetítő W-bozonon keresztül (bal oldal) és kiterjesztett elméletekben (közép és jobb oldal). Feltételezett skalár ( $H^-$ ), vektorbozon ( $W'$ ) és leptokvark (LQ) részecskék léte is hozzájárulhat ezekhez a folyamatokhoz.

## Leptonuniverzalitás

A részecskefizika standard modellje leírja, ám nem magyarázza a három fermionszalád létét, a megfigyelt ízmintázatot és ízkeveredést, a neutrínók kicsi, de nem nulla tömegét, valamint a fermiontömegek növekedését az egymást követő családokban. Ezek oka a standard modellen túlra vezet. A leptonszektor egy érdekes ellenőrzési lehetőséget rejt, ami rámutathat az „új fizika” természetére.

A standard modell szerint a gyenge kölcsönhatás közvetítői, a W- és Z-bozonok azonos erősséggel csatolódnak a különböző leptonokhoz (az e,  $\mu$ ,  $\tau$  ízekhez), azaz a  $W \rightarrow \ell\nu_\ell$  és  $Z \rightarrow \ell^+\ell^-$  bomlások gyakorisága alig függ<sup>1</sup> az  $\ell$  lepton ízétől. Az ettől mért eltérés új fizika (például a későbbiekben tárgyalt új leptokvark-állapotok) hozzájárulásának világos jele lenne.

A nehéz b-kvarkokat tartalmazó hadronok bomlásai kitűnő lehetőséget adnak a leptonuniverzalitás sérülésének vizsgálatára. Egyrészt e ritka gyenge bomlásoknál az eddig elért alacsonyabb kísérleti pontosság nyitva hagyja a lehetőséget szignifikáns anomáliák létre, másrészt a kiterjesztett modellek gyakran erősebb csatolást jósolnak a 3. családnak. Ez utóbbira példa egy kiterjesztett Higgs-szektor esetén a magasabb ágarány  $\tau$ -állapotokba a töltött Higgs-bozon hozzájárulása miatt, mivel a Higgs-részecskék csatolása az elemi részecskékhez azok tömegétől is függ. A ritka bomlásokban megjelenő anomáliákért feltételezhetően felelős új állapotok egy része közvetlenül is előállítható, felfedezhető lehet az LHC-n.

<sup>1</sup>A bomlási ágarányok különbözőségét a standard modellben csupán fázistér- és helicitás-elynyomás okozhatja, amelyek a lepton-tömegek különbözősége miatt lépnek fel. Ezek a hatások pontosan kiszámolhatók és figyelembe vehetők a mérési eredmények és az elmélet összehasonlításakor.



Pásztor Gabriella részecskefizikus, az MTA-ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport vezetője, a CERN LHC CMS együttműködést vezető testület tagja. Részt vett a Higgs-bozon felfedezésében. Fő kutatási területe a részecskefizika standard modelljén túlmúlító jelenségek kutatása. A CMS-kísérlet BRIL luminozitmérő rendszerének projektmenedzserként korszerű mérőberendezések működtetését, valamint tervezését és megépítését is irányítja az LHC új nagy intenzitású adatgyűjtési szakaszára.

A  $b \rightarrow c\ell\bar{\nu}_\ell$  és a  $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$  bomlások (1. és 2. ábra) vizsgálata izgalmas új eredményeket hozott az elmúlt években. A felfedezéshez még alacsony (általában  $3\sigma$ ) szignifikanciájú  $b \rightarrow c\ell\bar{\nu}_\ell$  mérésekben eltérést találtak a standard modelltől, ami a leptonuniverzalitás sérülésére

(és ezzel új fizika megjelenésére) utalhat. Természetesen, ahogy azt az új 2022. decemberi  $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$  eredmények szemléltetik a CERN LHCb-kísérletében [11, 12], az észlelt anomáliák mögött akár kísérleti torzítások is állhatnak.

Kísérletileg a különböző ( $i \neq j$ ) leptonízeket tartalmazó bomlási ágarányok hányadosát tanulmányozzák:

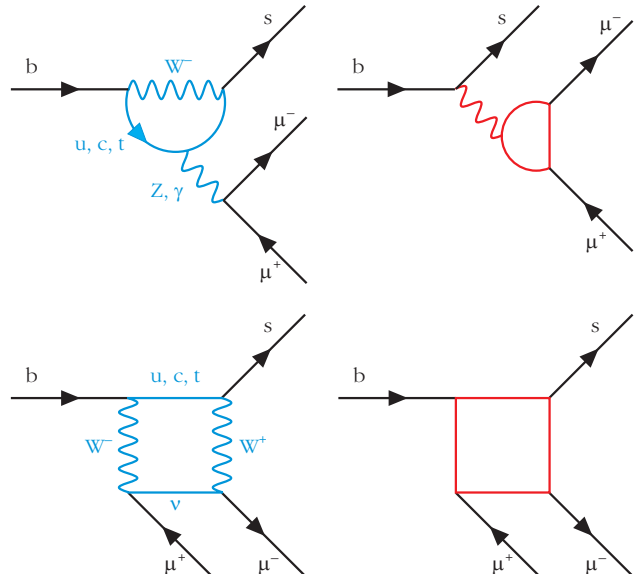
$$R_{X \rightarrow Y} = \frac{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_i^+\ell_i^-)}{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_j^+\ell_j^-)}$$

vagy

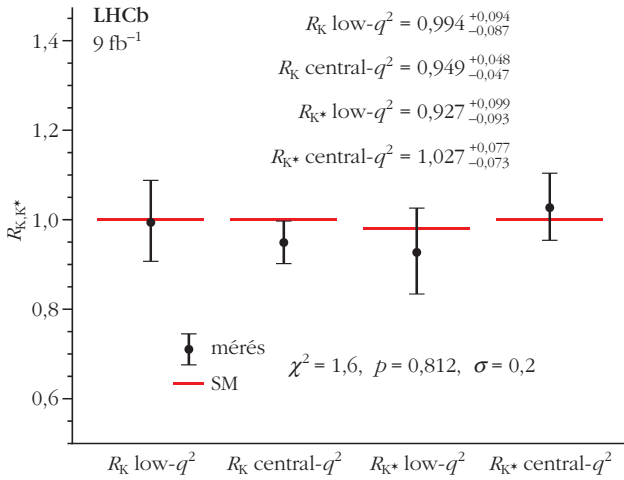
$$R_{X \rightarrow Y} = \frac{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_i^+\nu_i)}{\mathcal{B}(X \rightarrow Y\ell_j^+\nu_j)}$$

A végállapotban megjelenő elektronok, müonok és tau-leptonok különböző észlelési hatásfokából adódó szisztematikus torzítást úgynevezett kettős ágarányhányadosok mérésével jelentősen le lehet csökkenteni.

2. ábra. A  $b \rightarrow s\mu^+\mu^-$  bomlás úgynevezett pingvin- (fölül, 1. és 2. diagram) és dobozdiagramokon (alul, 3. és 4. diagram) keresztül a standard modellben (1. és 3. diagram) és további egzotikus nehéz részecskéket tartalmazó modellekben (2. és 4. diagram). A 1. ábrán látható alacsonyabb rendű folyamatok új Z'-bozon- vagy leptokvark-állapotok létezése esetén szintén erre a végállapotra vezethetnek.



$$R_{K,K^*} \equiv \frac{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,0)} \mu^+ \mu^-)}{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,0)} J/\psi (\rightarrow \mu^+ \mu^-))} \Big/ \frac{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,0)} e^+ e^-)}{\frac{N}{\epsilon}(B^{(+,0)} \rightarrow K^{(+,0)} J/\psi (\rightarrow e^+ e^-))}$$



3. ábra. A leptonuniverzalitást ellenőrző  $R_K$  és  $R_{K^*}$  kettős ágarányhányados mért értékei B-mezonok  $K\ell^+\ell^-$  végállapotot eredményező bomlásaira a leptonpár invariáns tömeg-négyzet függvényében az LHCb kísérlet 2. futási periódusának (Run 2) adataiban [12]. A hányadosok pontos definíciója az ábra tetején látható. Az  $N/\epsilon$  mennyiségek a mért eseményszámok észlelési hatásfokkal normált értékeit jelölik az adott folyamatra. Az eredmények jó egyezést mutatnak a standard modellel. Az invariáns tömeg-négyzet értékeit egy alacsony és egy központi tartományra osztották:  $0,1 < q^2 < 1,1 \text{ GeV}^2$  („low- $q^2$ ”) és  $1,1 < q^2 < 6,0 \text{ GeV}^2$  („central- $q^2$ ”). A négy mérés és a standard modell (SM) egyezése  $0,2\sigma$ -n belül van.

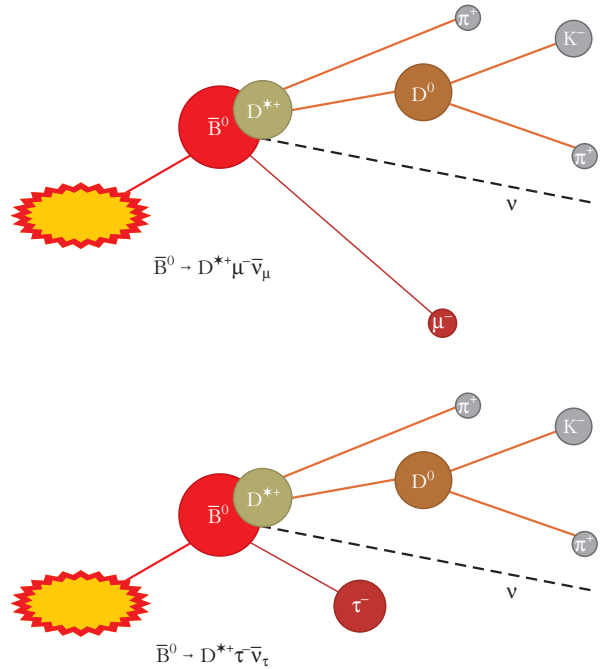
### A 3. ábrán a

$$B^+ \rightarrow K^+ \ell_i^+ \ell_i^- \text{ és } B^0 \rightarrow K^{*0} \ell_i^+ \ell_i^-$$

bomlások tanulmányozásával kapott  $R_K$  és  $R_{K^*}$  hányadosok mért értékeit láthatjuk a leptonpár invariáns tömeg-négyzetének függvényében. Itt a normálás az azonos végállapotra vezető, gyakori  $J/\psi$  mezon keresztüli rezonáns bomlás ágarányaival történik, feltételezve, hogy a  $J/\psi$  elektromágneses kölcsönhatáson keresztüli bomlásakor nem sérül a leptonuniverzalitás. A friss LHCb-mérés jó egyezést mutat a standard modell jóslatával [11, 12], míg a korábbi  $R_K$  eredmény  $3,1\sigma$  távolságra volt a standard modelltől [13]. A leglényegesebb különbség a félreazonosított hadronok hozzájárulásának pontosabb meghatározása az elektronpárt tartalmazó végállapotban. A javított mérési módszertan várhatóan a hasonló

$$R_X = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow X \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B \rightarrow X e^+ e^-)}$$

hányadosok esetén is megszünteti a korábban észlelt eltéréseket a standard modelltől.



4. ábra. A  $\bar{B} \rightarrow D^{*+} \mu^- \bar{\nu}_\mu$  és  $\bar{B} \rightarrow D^{*+} \tau^- \bar{\nu}_\tau$  bomlások szemléltetése. A kezdeti „tűzgömb” a proton-proton ütközés elsődleges kölcsönhatási csomópontját jelöli, amelyből a  $\bar{B}^0$  semleges anti-B mezon keletkezik. A kirepülő  $\bar{B}^0$  bomlásakor egy másodlagos csomópontban keletkezik egy  $D^{*+}$  mezon és egy  $\ell^- \bar{\nu}_\ell$  leptonpár. A  $D^{*+}$  mezon bomlása egy kaont és két piont ad, amelyek lendületének pontos mérésével a  $D^0$  és a  $D^{*+}$  ismert tömege visszakapható. A  $\bar{B}^0$ -ból születő müon bomlás nélkül hagyja el a detektort, jellegzetes nyomot hagyva benne. A tau-lepton felismerését nehezíti, hogy a detektorban elbomlik általában egyetlen, vagy három, egy irányba tartó kisebb lendületű töltött részecskére és neutrínóra.

Azonban a  $b \rightarrow c \ell^- \bar{\nu}_\ell$  bomlások vizsgálata az elektron-pozitron ütköztető b-gyárak (BaBar, Belle) és az LHCb adataiban is érdekes anomáliát mutat. A tau-lepton és müont adó bomlások (4. ábra) tanulmányozásával kapott

$$R_{D^{(*)}} = \frac{\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau)}{\mathcal{B}(\bar{B}^0 \rightarrow D^{(*)} \mu^- \bar{\nu}_\mu)}$$

hányadosok által kifeszített síkon látjuk a mérési eredményeket a kaliforniai BaBar, a japán Belle és az LHCb adataiból az 5. ábrán [14]. Bár az egyes mérések pontossága korlátozott, a mért eltérés a standard modelltől általánosnak tűnik. A mért értékek átlagát összehasonlítva a standard modell jóslatával  $3,2\sigma$  szignifikanciát kapunk az anomáliára. Az adatok analízise számos nehézséget rejt, amelyek közül kiemelendő a tau-lepton tartalmazó végállapotban a háttér folyamatok hozzájárulásának becslése. A különböző kísérletek méréseinek összhangját mérő  $\chi^2$ -valószínűség 32%, ami elfogadható egyezést mutat. A  $\mu$ - $\tau$  leptonuniverzalitás sérülésének bizonyítása (vagy elvetése) további pontos vizsgálatokat igényel, de az eddigi eredmények mindenképpen érdekesek. A Belle II és az LHCb új, nagyobb adatmennyiséget feldolgozó, és ezért várhatóan lényeg-

gesen kisebb mérési bizonytalanságú eredményeit éppen ezért nagy várakozás övezi.

## Leptokvarkkeresés

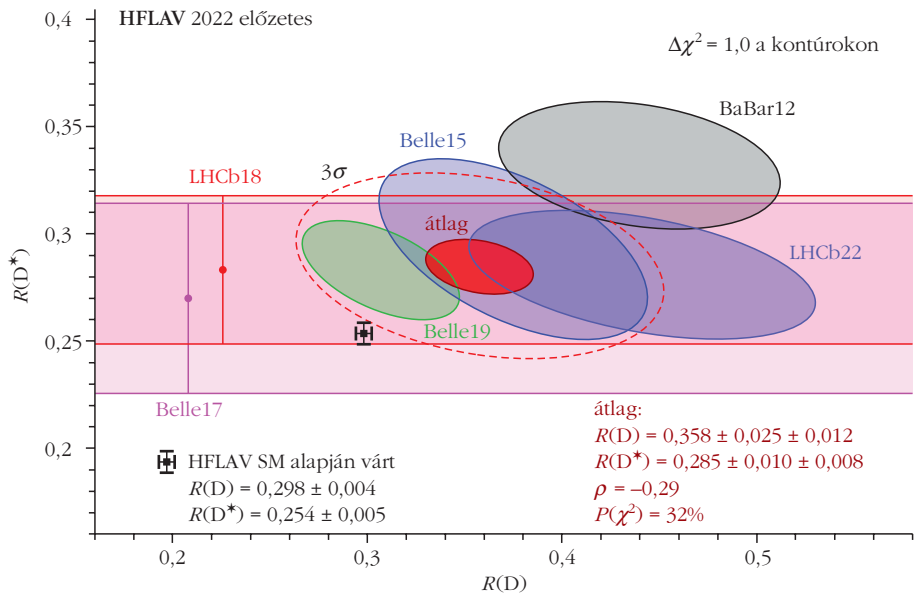
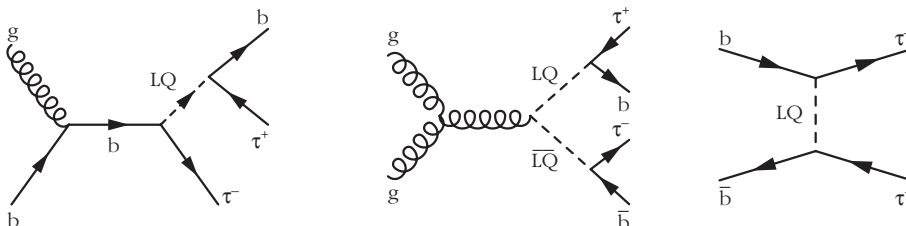
A leptonuniverzalitás anomáliáinak magyarázatául szolgálhat például egy eddig ismeretlen leptokvark (LQ) állapot léte. A leptokvarkok olyan feltételezett nehéz részecskék, amelyek lepton- és bariónszáma [15] is nullától különböző, így közvetlenül csatolódnak egy kvarkhoz és egy leptonhoz. Az erős és az elektromgyenge kölcsönhatást magas energiákon közös keretbe foglaló *nagy egyesített elméletekben* leptokvarkállapotok is megjelennek [16].

A fent említett  $\mu$ - $\tau$  anomália magyarázataként szolgálhat egy LQ-b- $\tau$  kölcsönhatás hozzájárulása. Ezért különösen érdekes a  $\tau\nu$  és  $\tau\tau$  végállapotok vizsgálata, ami még nem szignifikáns, de izgalmas eseménytöbbletet mutat a CMS-kísérlet leptokvark-keresési analíziseiben. A mérések érzékenysége már megközelelti az anomáliák által jósolt tartományt. Példaként az egyszeres, kettős és nemrezonáns leptokvark-keletkezés (6. ábra) keresésének eredményét mutatjuk be a  $\tau\tau$  végállapotban a 7. ábrán [17]. Az LHC Run 2 alatt gyűjtött adataiban enyhe eseménytöbblet figyelhető meg. A következő években rögzítésre kerülő további LHC-adatok segítségével ez az izgalmas feltételezés is ellenőrizhetővé válik, és (ha a természet is úgy akarja) akár egy új korszakalkotó felfedezést is tehetünk.

## Új fizika vagy mérési probléma?

Az ízfizika már a múltban is rámutatott az elmélet továbbfejlesztésének irányára. Gondolhatunk itt a Glashow–Iliopoulos–Maiani (GIM) mechanizmusra, amely a ritkaságsértő gyenge semleges áramok elnyomását

6. ábra. Feltételezett leptokvark (LQ) keletkezés az LHC-n: egyszeres (bal), kettős (közép) és nemrezonáns (jobb) keletkezés. A kezdeti állapotú protonok gluonjainak (g) és/vagy b-kvarkjainak (b) kölcsönhatásából születnek a leptokvarkok, amelyek azonnal b-kvarkra és tau-leptonra bomlanak el.



5. ábra. A leptonuniverzalitást ellenőrző  $R_D$  és  $R_{D^*}$  ágarányhányados megengedett értékei B-mezonok D/v végállapotot eredményező bomlásainak vizsgálatából a BaBar-, a Belle- és az LHCb-kísérlet adataiban. Minden eredmény, és így az összesítésük is, a standard modell jóslatánál (fekete pont szisztematikus bizonytalansági szakaszokkal) magasabb hányadosokat ad [14].

magyarázta meg a negyedik, úgynevezett c-kvark létének feltételezésével, és nyert kísérleti bizonyítékot a  $J/\psi$ -mezon ( $c\bar{c}$  kötött állapot) felfedezésével. Később a kaonrendszerben észlelt CP-sértés magyarázatául vették be a 3. család kvarkjait, amelynek közvetlen bizonyítékát az Y mezon ( $b\bar{b}$  kötött állapot) megfigyelése adta. A történelmi példák reményt adnak arra, hogy talán most is egy új korszak hajnalán vagyunk.

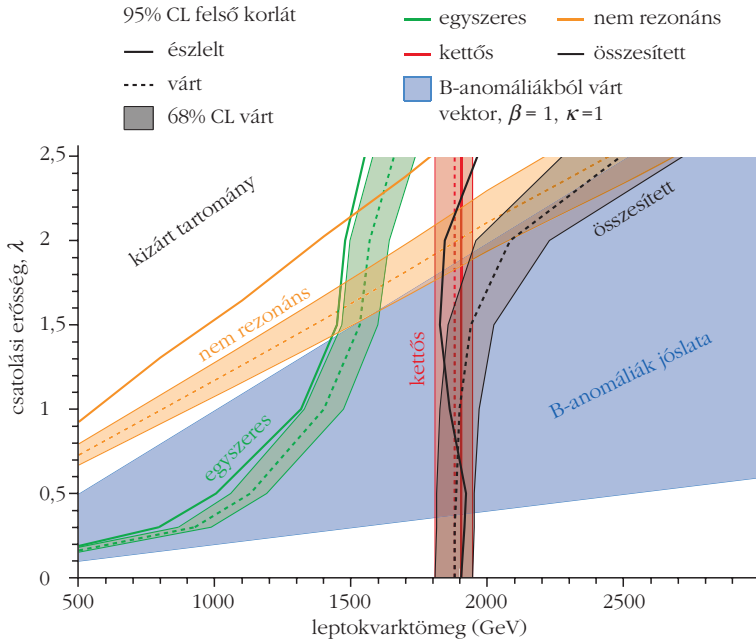
A nagy pontosságú mérések azonban számtalan buktatót rejthetnek, ahogy az  $R_K$ -szerű ágarányhányadosok méréseiben eltűnő anomália is rámutatott. A fizikai objektumok felismerése, a jelszerű végállapotra vezető háttéresemények számának becslése, a standard modell-jóslatok pontossága további gondos ellenőrzést igényel. Ahogy a mondás is tartja: rendkívüli állításokhoz rendkívüli bizonyíték szükséges.

Bár az LHC azon küldetése, hogy felfedezzük az új fizikát még várat magára, több izgalmas  $3\sigma$  szignifikanciát meghaladó anomália is megjelent az adatokban. Ezek közül a leptonuniverzalitás sértését és a leptokvarkok keresését emeltük ki, de érdekes eredmények láttak napvilágot a Higgs-szektor és a szuperszimmetrikus partnerrészecskék kutatásából is. Természetesen

ezek közül több vélhetően csak statisztikus fluktuáció, esetleg a mérés szisztematikus torzításából ered. Ahhoz, hogy egy új, forradalmi változás következzen be – hasonlóan a Higgs-bozon 2012-es felfedezéséhez – elegendő, ha ezek közül csupán egy nyer minden kételyt kizáró megerősítést az LHC-kísérletek új ada-

CMS előzetes

137 fb<sup>-1</sup> (13 TeV)



7. ábra. A leptonuniverzalitás-anomáliák által jósolt paramétertartomány és a közvetlen leptoquarkkeresések eredménye a leptoquark tömege és a leptoquark – b-kvark –  $\tau$ -lepton kölcsönhatás csatolási erőssége ( $\lambda$ ) által kifeszített síkon. A leptoquarkkeresés észlelt (folytonos vonalak) és a jel hiányában várt (szaggatott vonalak  $1\sigma$  szisztematikus bizonytalansági sávval) kizárási tartományának határait tüntettük fel az egyszeres, kettős és nemrezonáns folyamatok kereséséből, illetve az eredmények összesítéséből a CMS-kísérlet Run 2 adataiból. A vonalak fölötti, illetve a tőlük balra fekvő paramétertartomány van kizárva, tehát az izomáliák által preferált régiót a közvetlen keresés erősen megszorítja: a LQ tömege 1,8 TeV felett kell legyen. Az analízisben megfigyelt enyhe eseménytöbblet okozza a vártnál gyengébb korlátokat a nem rezonáns és egyszeres keletkezés vizsgálatánál, illetve az összesített eredménynél [17].

taiban a következő években, vagy talán diákjaink vezetésével a következő generációs detektorok és a Magas Luminozitású Nagy Hadronütköztető (HL-LHC) idején.

Irodalom

1. Pásztor Gabriella: Higgs-vadászat @ CERN. *Fizikai Szemle* 62/10 (2012) 358.
2. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmek – 1. rész: a Higgs-bozon keresése. *Fizikai Szemle* 71/2 (2021) 37.

3. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmek – 2. rész: a Higgs-bozon megfigyelése. *Fizikai Szemle* 71/3 (2021) 84.
4. Veszprémi Viktor: A Higgs-bozon kutatása: befejezett vagy csak most kezdődik? *Fizikai Szemle* 70/4 (2020) 118.
5. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. *Fizikai Szemle* 58/7–8 (2008) 246.
6. Takács Gábor: Fizika a Standard Modellen innen és túl. *Természet Világa, Mikrovilág–2012, 2013/I. különszám* (2013) 3.
7. Horváth Dezső: A részecskefizika sérült szimmetriái vajon megoldják-e a problémáit? *Természet Világa* 2017/11 (2017) 495.
8. Trócsányi Zoltán: A részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után. *Fizikai Szemle* 73/9 (2023) 269.
9. Pásztor Gabriella: Az Univerzum titkai és a Nagy Hadronütköztető: nyitott kérdések a részecskefizikában, *Fizikai Szemle* 73/2 (2023) y.
10. Pásztor Gabriella: Rejtett dimenziók nyomában az ATLAS detektorral. *Természet Világa, Mikrovilág–2012, 2013/I. különszám* (2013) 53.
11. LHCb collaboration: Test of lepton universality in  $b \rightarrow s\ell^+\ell^-$  decays. LHCb-PAPER-2022-046, CERN-EP-2022-277, arXiv:2212.09152 [hep-ex]
12. LHCb collaboration: Measurement of lepton universality parameters in  $B^+ \rightarrow K^+\ell^+\ell^-$  and  $B^0 \rightarrow K^{*0}\ell^+\ell^-$  decays. LHCb-PAPER-2022-045, CERN-EP-2022-278, arXiv:2212.09153 [hep-ex]
13. LHCb Collaboration: Test of lepton universality in beauty-quark decays. *Nature Physics* 18 (2022) 277.
14. LHCb collaboration: New test of lepton universality using the first simultaneous measurement of  $R(D)$  and  $R(D^*)$  observables at LHCb. LHCb-PAPER-2022-039 (in preparation), <https://lhcb-outreach.web.cern.ch/2022/10/18/new-test-of-lepton-universality-using-the-first-simultaneous-measurement-of-rd-and-rd-observables-at-lhcb/>
15. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Antirészecskék? *Fizikai Szemle* 72/11 (2022) 347.
16. Cynolter Gábor: A Standard Modellen túl. *Természet Világa* 2000/III különszám (2000) 15.
17. CMS Collaboration: The search for a third-generation leptoquark coupling to a  $\tau\tau$  lepton and a b quark through single, pair and nonresonant production at  $\sqrt{s} = 13$  TeV. CMS-PAS-EXO-19-016, <http://cds.cern.ch/record/2815309>



Az Eötvös Társulat  
főnt van a **facebook**-on!



<https://www.facebook.com/pages/Eötvös-Loránd-Fizikai-Társulat/434140519998696?fref=ts>

Szerkesztőség: 1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III., Eötvös Loránd Fizikai Társulat. Telefon/fax: (1) 201-8682  
A Társulat Internet honlapja <http://www.elft.hu>, e-postacím: [elft@elft.hu](mailto:elft@elft.hu)  
Kiadja az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, felelős kiadó Groma István főtítár, felelős szerkesztő Lendvai János főszerkesztő.  
Kéziratokat nem őrünk meg és nem küldünk vissza. A szerzőknek tiszteletpéldányt küldünk.  
Nyomdai előkészítés: Kármán Stúdió, nyomdai munkálatok: OOK-PRESS Kft., felelős vezető: Szathmáry Attila ügyvezető igazgató.  
Terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámán.  
Megjelenik havonta (évente egyszer duplaszámmal), egyes szám ára: 1200.- Ft (duplaszámé 2400.- Ft) + postaköltség.  
**HU ISSN 0015–3257** (nyomtatott) és **HU ISSN 1588–0540** (online)

# SZILÁRD LEÓ EMLÉKEZETE

Hargittai István – Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem  
Hargittai Balázs – Saint Francis University, Loretto, Pennsylvania, USA

*A 125 éve született Szilárd Leó, a huszadik század egyik legszínesebb tudósa. Monumentális felfedezéseket tett és sokakat inspirált. Felismerte a nukleáris fizikában rejlő lehetőséget az atombomba létrehozására, majd küzdött a bevetése ellen. Liberális demokrata volt, de szorgalmazta a totalitárius szovjetrendszerrel való békés együttélést. Tudományos karrierjét kockáztatta azért, hogy segítse a náciizmus elől menekülő tudósokat és megmentse az emberiséget a nukleáris megsemmisüléstől.*

Szilárd Leó (1898–1964) felmenői mindkét oldalról Galíciából, az akkori Habsburg Birodalom egyik tartományából érkeztek Magyarországra. A terület ma nagyrészt Lengyelországhoz tartozik. Kétéves volt, amikor a *Spitz* nevet viselő budapesti zsidó család Szilárdra változtatta a nevét. Édesapja, *Lajos* (1860–1955) az 1880-as évek közepén végzett a budapesti József Műegyetemen, és saját híd- és vasútépítéssel foglalkozó céget alapított. *Vidor Teklát* (1870–1939) – akinek apja szemészkorvos volt – 1896-ban vette feleségül. A Szilárd-család három gyermeke között Leó volt a legidősebb. Gyerekkorától kezdve fontosabb volt számára az igazmondás, mint a tapintat.

A VI. kerületi Főreál Gimnáziumba járt, amely a természettudományokra és a modern nyelvekre helyezte a hangsúlyt. A nem eléggé inspiráló iskolai oktatást két barátjával együtt saját matematika-szakkörrrel egészítette ki. 1916-ban beiratkozott a József Műegyetem mérnöki szakára, ahol az elavult képzés önálló gondolkodásra készítette. Tanulmányait félbeszakította, amikor behívták katonának. Az 1. világhá-

ború kimenetelére vonatkozóan bizarrnak tűnő jóslatot tett. Várakozása szerint a háború Németország és Ausztria–Magyarország, valamint Oroszország vereségével fog végződni. A német és osztrák–magyar hatalom és a cári Oroszország egymással ellentétes oldalon harcoltak, Szilárd jóslata 1918-ban mégis beigazolódott.

A háború után Szilárd folytatni akarta tanulmányait, de a forradalmakat követő antiszemita terror miatt Németországba emigrált. Egy rövid látogatást leszámitva, soha nem tért vissza Magyarországra. Tanulmányait a berlini Műszaki Egyetemen folytatta. Részt vett a tudományegyetem heti rendszerességű fizikai kollokviumán, amelynek segítségével lépést tartott a nemzetközi fizika irodalommal. Itt találkozott a tudomány olyan óriásaival, mint *Max Planck*, *Max von Laue*, *Walther Nernst*, *Fritz Haber*, *Gustav Hertz*, *James Franck* és *Albert Einstein*. A fiatalabb résztvevők között volt *Wolfgang Pauli*, *Werner Heisenberg*, *Wigner Jenő*, *Neumann János*, *Gábor Dénes* és mások.

Szilárd a termodinamikában és az információelméletben tett felfedezéseivel nyerte el a PhD és a habilitációs doktori címet. Inkább elméleti tudósként ismerjük, de az 1920-as években Albert Einstein-nel közösen egész sor szabadalmi bejelentést tett újszerű, a korábbiaknál biztonságosabb és mozgó alkatrészeket nem alkalmazó hűtőszekrényekre. Volt közöttük olyan, amelyet egy-egy nagy cég megvásárolt és amelyiknek a prototípusa elkészült. A korszerű fizikai kutatásokat forradalmasító új eszközök, például gyorsítók feltalálásában megelőzött későbbi sikeres feltalálókat. Inkább szabadalmaztatott, mint publi-



Szilárd Leó az 1950-es évek elején a Cold Spring Harbor Laboratórium kampuszán. Néhai Karl Maramosch felvétele és szíves-ségéből.



Hargittai István, PhD, DSc, a BME professor emeritusa (aktív), az MTA és az Academia Europaea tagja, a Norvég Tudományos Akadémia külföldi tagja, az Orosz Tudományos Akadémia tiszteletbeli doktora. A *Structural Chemistry* (Springer Nature) alapító főszerkesztője. Szerkezeti kémia, szimmetria és tudománytörténet témájú könyvei 9 nyelven jelentek meg. A Hargittai Balázs társszerzővel írt legújabb könyve a magyar tudós diaszpóráról szól (*Brilliance in Exile*, CEU Press). Honlap: <http://istvan.hargittai.com>



Hargittai Balázs, PhD (University of Minnesota), szerves kémikus, a Saint Francis Egyetem (Loretto, Pennsylvania) kémiaprofesszora. Kutatási területe a peptidkémia. Korábban a természettudományi kar dékán-helyettese és a kémiai tanszék vezetője volt. A kutatódiákok irodájának alapító igazgatója. Kutató és oktató tevékenysége mellett tudományos szerkesztő (*Culture and Art of Scientific Discoveries*, *Culture of Chemistry*). A *Great Minds* és a *Wisdom of the Martians of Science* könyvek társszerzője.

kált, egész sor esetben Albert Einsteinnel közösen, szem előtt tartva a prioritás elismerését és az esetleges anyagi előnyöket. A nukleáris láncreakcióra és alkalmazására vonatkozó szabadalmát 1934-ben a brit Admirálisnál helyezte letétbe. Ebben az esetben nem a prioritás és nem az esetleges anyagi előnyök vezették, hanem az a törekvés, hogy a minden korábbinál pusztítóbb fegyverek elképzelése ne kerülhessen rossz kezekbe.

Einstein értékelte Szilárd intellektusát, amellyel összefüggéseket látott meg látszólag egymástól eltérő jelenségek között. Közös érdeklődésükbe tartozott a kozmológia és a vallás. Meg akarták érteni a természetet, és meg akarták ismerni Isten gondolatait, amikor megteremtette a világot. Arra számítottak, hogy ha sikerül megismerni ezeket a gondolatokat, könnyebb lesz a többit is kitalálni.

Szilárd két bőrnoddal élt, mindig készen állt a menekülésre. Nem akart családot, kerülte a kööttségeket és még házassága után is folytatta magányos életét. 1930-ban privátdocens lett és német állampolgár. Felismerte a politikai helyzet instabilitását, már az 1920-as évek közepén megjósolta a Weimari Köztársaság bukását. Rövid budapesti látogatásán, 1933 elején megpróbálta rávenni testvérét és szüleit a kivándorlásra, de azok azt hitték, hogy eltulozza a veszélyeket. Németországban a zsidó professzorok elbocsátása már a faji törvények kihirdetése előtt megkezdődött. A nácik 1933. március 20-án példátlan hatékonyan megnyitották első koncentrációs táborukat. Egyik első intézkedésükkel korlátozták a zsidók felvételét az egyetemekre, valamint lehetőségeiket az ügyvédi és orvosi hivatásokban. Magyarország már 1920-ban, tizenhárom évvel a náci Németország előtt, hasonló intézkedéseket vezetett be, a hírhedt numerus clausust. Szilárd előre látta, hogy mi várható, de a néhány év múlva bekövetkező borzalom mértékét ő sem tudta elképzelni.

1933. március 31-én hagyta el Németországot és lépte át a csehszlovák határt. Egy nappal később, április 1-jén Németország lezárta határait a menekülni szándékozók előtt. Ez volt az a hajszálon múltott eset, amelyre Szilárd tanulságként tekintett: a sikerhez nem kell sokkal okosabbnak lenni másoknál, elég egy nappal korábban cselekedni. Bécsben azonnal segíteni kezdte a menekülő tudósokat a munkahelykeresésben. Ebben is megmutatkozott emberi nagysága, hiszen maga is állás nélküli menekülő volt.

Londonba költözött, ahol azonnal otthon érezte magát. Legendássá vált az a sztori, amelyben megszületett a nukleáris láncreakció ötlete. Egy napon a Southampton Row-n sétált, amikor a Russel Square-nél az utcai lámpák jelváltása megállásra készítette. Hirtelen az a gondolata támadt, hogy ha lenne egy olyan elem, amelyet neutronok felhasítanak, és amely egy neutron elnyelésekor két neutront bocsátana ki, akkor egy ilyen elem, kellően nagy tömegben, képes



Szilárd Leó Berlinben az 1920-as évek első felében két jövőbeli Nobel-díjas norvég tudóssal. Balról jobbra: Odd Hassel, Lars Onsager és Szilárd Leó (néhai Otto Bastiansen szívességéből).

lenne nukleáris láncreakciót fenntartani. Ebben a hipotézisben két új fogalom szerepelt. Az egyik a nukleáris láncreakció, a másik a kritikus tömeg. Az atomenergia lehetősége kezdett valóságossá válni.

A maghasadást *Hahn* és *Strassmann* 1938 végén Berlinben fedezte fel, ami megerősítette Szilárdnak az atombomba németországi előállítására vonatkozó félelmeit. Az 1930-as évek második felében Szilárd Nagy-Britannia és az Egyesült Államok között ingázott. A kiváló atomfizikus, *Enrico Fermi* Amerikába emigrált, és a Columbia Egyetemre került. Ott indított Szilárd, Fermi és Fermi asszisztense, *Herbert Anderson* közös atomfizikai kísérleteket. Az első nukleáris láncreakciót 1942. december 2-án, a Chicagói Egyetemen hozták létre. Szilárd mindent megtett azért, hogy a kísérleteket szigorú titoktartás mellett végezzék.

Szilárd a grafitban találta meg a nukleáris láncreakció ellenőrzés alatt tartására szolgáló úgynevezett moderátort. Arra is rájött, hogy a grafit tisztasága döntő jelentőségű és megtalálta a nagy tisztaságú grafit beszerzési forrását. A német fizikusok szennyezett grafitot használtak és amikor kudarcot vallottak, kénytelenek voltak a kevésbé előnyös nehézvizet alkalmazni. Ebben az esetben Szilárd a legapróbb részletekre is aprólékos figyelmet fordított. Amikor a németek lerohanták Belgiumot, a belga Kongóban található hatalmas uránérckészletek birtokába kerültek. Szilárdban fokozatosan kikristályosodott az az ötlet, hogy Einstein figyelmeztesse az amerikai elnö-



Szilárd Leó és Jonas Salk (1914–1995), a gyermekparalízis elleni első védőoltás kifejlesztője (néhai Karl Maramorosch felvétele és szívességéből).

köt egy esetleges német atombomba veszélyeire. Einstein aláírta a Szilárd által megfogalmazott levelet, amelyet Szilárd műszaki leírással egészített ki. A híres Einstein-levél végül elindította a Manhattan-tervet.

Az első atombombák elkészítésének kezdetétől Szilárdot foglalkoztatta a nukleáris fegyverek háború utáni szerepe és a győztes hatalmak közötti fegyverkezési verseny lehetősége. Egyelőre azonban, az elrettentés érdekében, szükségesnek tartotta a kifejlesztés alatt álló atombomba bevetését. Mire azonban már reálisan lehetett tervezni az atombomba ledobását, a németek már elvesztették a háborút. Szilárd ekkor már nem akarta, hogy használják a bombát és megkísérelte – bár sikertelenül – a bevetés megakadályozását. Különleges történelmi pillanat volt, mert az a személy, aki a kifejlesztést kezdeményezte, hivatalosan is ellenezte a használatot.

1945 őszén többször is tanúskodott az amerikai törvényhozás bizottságai előtt az atomenergia jövőjéről. Megjegyzései megjelentek a törvényhozás hivatalos jegyzőkönyvében, és a *New York Times* is beszámolt róluk. Nagy nyilvánosságot kapott, rádió- és újságinterjúkat adott, előadásokat tartott. Beszélt a hasadó anyagok előállításáról, az atomreaktorokról, és az atomprogram gazdasági, politikai, katonai és nemzetközi következményeiről. Beszélt a Szovjetunióval való fegyverkezési verseny veszélyeiről, és érvelt a verseny megakadályozása mellett. Az 1950-es évek McCarthy-korszakában

Szilárd felháborodott azon, hogy senki sem emelt szót a szenátor és a képviselőház Amerikaelenes Tevékenységek Bizottsága ellen. Ez arra emlékeztette, amikor az 1930-as években a német egyetemeken senki sem emelte fel szavát Hitler és a nácik ellen.

A háború után kinevezték professzornak a Chicagói Egyetemre. Már a háború előtt érdeklődött a biológia iránt, de az atombomba elterelte figyelmét. Most a biológia felé fordult. Tudományos kapcsolatokat alakított ki vezető biológusokkal. Kivételes integráló elméjével termékenyen közvetített különböző tudományterületek között. Véleményét azért is fogadták el könnyebben, mert nyilvánvaló volt, hogy tevékenységét nem egyéni érdekek mozgatják. Fontos kérdésekről fogalmazott

meg javaslatokat, amelyek közül néhány életének vége felé, vagy csak halála után valósult meg. Ezek közé tartozott a *Jonas Salkról* elnevezett Salk Institute for Biological Studies és a National Science Foundation. Kezdeményezte az Európai Molekuláris Biológiai Szervezetet (EMBO).

A hidegháború idején Szilárd legfontosabb tevékenysége a fegyverzetellenőrzésre irányult. Megpróbálta megfélemezni azokat a fegyvereket, amelyek létrehozásában annak idején közreműködött. Mindennel a legfelső szinten foglalkozott, akár politikáról, akár tudományról volt szó. Amikor szovjet kapcsolatot keresett, *Sztálinnak* írt, később *Hruscsov*nak. Sztálin soha nem válaszolt, viszont Hruscsov 1960-ban, amikor az ENSZ Közgyűlésre New Yorkba jött, meghívta Szilárdot egy találkozásra. Két teljes órán át beszélgettek. A jól felkészült Szilárd az atomfegyver-kísérletek

Az 1946-ban Washingtonban rendezett elméletifizika-konferencia néhány résztvevője. Balról jobbra: Szilárd Leó, az amerikai molekuláris biológus Sol Spiegelman (1914–1983), a német-amerikai fizikus Fritz London (1900–1954), Neumann János, Teller Ede és a dán fizikus Niels Bohr (1885–1962) (Marina von Neumann Whitman szívességéből).

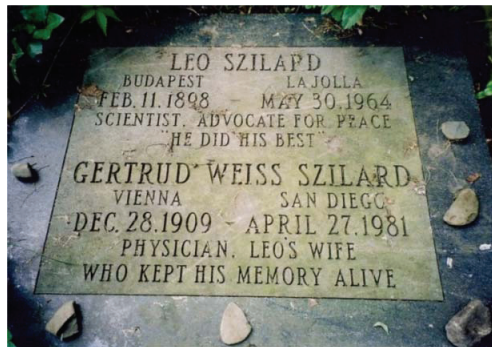


moratóriumát szorgalmazta. Ez tetszett Hruscsovnak, mert a Szovjetuniót az adott pillanatban nem érdekelte a további tesztelés. Szilárd javasolta forródrót létesítését a két szuperhatalom között. 1963 augusztusában üzembe helyezték a Moszkva–Washington forródrótot (a teleket választották). A találkozás sikeres volt. Kettejük között még fizikailag is voltak hasonlóságok. Fontosabb volt, hogy mindketten bizonyos szempontból kívülállóak voltak a saját országukban, és mindketten elkötelezettek voltak a fegyverzetcsökkentés mellett. Hruscsov elfogadta Szilárdot tárgyalópartnernek, még ha csak két órára is. Szilárd senkit sem képviselt saját magán kívül, de diplomáciailag Hruscsov is elszigetelt volt akkoriban. Szilárd Hruscsovot jó partnernek találta, de tisztában volt azzal, hogy nem tudna élni a szovjetrendszerben.

Szilárd békepárti állásfoglalásaiból sokan arra következtettek, hogy biztosan ellenezte a hidrogénbomba kifejlesztését. Azonban különbség van általában a hidrogénbomba kifejlesztése és a hidrogénbomba bizonyos világhelyzetben történő kifejlesztése között. Ha a kérdés az volt, hogy az Egyesült Államok rendelkezzen-e hidrogénbombával abban az esetben, ha a Szovjetunióknak van ilyen fegyvere, akkor Szilárd az amerikai hidrogénbomba mellett állt. Nem akarta, hogy az Egyesült Államok védtelen maradjon, ami akkor állt volna elő, ha csak a Szovjetunió rendelkezik hidrogénbombával. Amikor Truman elnök 1950 januárjában kiadta az utasítást a H-bomba megépítésére, Szilárd hangsúlyozta, hogy a hidrogénbomba amerikai fejlesztését csak egyetlen dolog indokolhatja, mégpedig a hidrogénbomba alkalmazásának megakadályozása. Ez a kölcsönösen garantált megsemmisítés (MAD: mutual assured destruction) politikájának ékesszóló megfogalmazása volt.

A Kennedy-adminisztráció alatt Szilárd Washingtonban élt, és fő feladatának a fegyverzetellenőrzésért való lobbizást tekintette. Több kapcsolata volt ezzel az adminisztrációval, mint bármely korábbival. Azonban egyetlen amerikai elnök sem nézte jó szemmel Szilárd akcióit, aki sokszor árnyék-külgyminiszteriumként viselkedett. Azt viszont a javára kellett írni, hogy nemcsak felismert, hanem még mások által fel nem ismert problémákat is figyelembe vett, például a demokrácia fejlődő országokba történő exportja elmentmondásait.

1961 szeptemberében a szovjetek megszüntették a nukleáris tesztelés moratóriumát és 1962 áprilisában az Egyesült Államok is újraindította a nukleáris tesz-



Szilárd Leó és felesége, Gertrud Weiss Szilard (1909–1981) sírja Ithaca (New York Állam) temetőjében. A sír Szilárd hamvainak felét tartalmazza (fölül).

Anders Bärány svéd fizikus, a fizikai Nobel Bizottság hosszú ideig titkára Szilárd Leó sírjánál a Fiumei úti Nemzeti Sírkert akadémikus pecellájánál 2015-ben (Hargittai István felvétele). A sír Szilárd hamvainak felét tartalmazza (jobbra).



teket. A mérsékeltek a légköri kísérletek betiltására szólítottak fel. Végül 1963 augusztusában a két szuperhatalom megegyezett a légkörben, az űrben és a tenger alatt végzett nukleáris kísérletek tilalmában. Még abban az évben Linus Pauling Nobel-békedíjat kapott a nukleáris kísérletek betiltásáért folytatott küzdelméért. Ebből a díjból Szilárd is részesülhetett volna. Talán az dönthetett Pauling egyedüli kitüntése mellett, hogy minden erejét erre a célra összpontosította, míg Szilárdnak sok szívügye volt. Kennedy elnök 1963-as meggyilkolásával megszakadt Szilárd közvetlen kapcsolata a washingtoni hatalommal és visszavonult a kaliforniai La Jollába. Lehet, hogy ezt csak átmenetinek szánta, de 1964. május 30-án álmában meghalt.

Szilárd a legmagasabb szinten művelte a tudományt és a politikát, viszont az ételek és az irodalom terén egyszerű ízlése volt. Amikor barátai dicsérték *A delfinek bangja* című könyvét, azt szerette volna, ha nagyszerű irodalomnak tartják. Kevésbé törődött azzal, hogy helyes kijelentéseket tegyen, mint azzal, hogy azok egyértelműek és tömörök legyenek. Soha nem hagyta, hogy egészségügyi problémái megzavarják életét. Hólyagrákja szélsőséges példa volt erre. A hólyagja már fél éve vérzett, mire 1959-ben beleegyezett a kivizsgálásba. A műtétet elutasította és orvos feleségével együtt a sugárkezelést választották, amit maguk irányítottak. A sugárzás elégette a hólyagját, ezért csövet kellett viselnie, amely a vizeletét egy lábára erősített műanyag zacskóba vezette. Ettől eltekintve meggyógyult és nem hagyta, hogy a kényelmetlenség megzavarja tevékenységében.

Szilárd megalkuvás nélkül küzdött az igazságért, de demokratiként elviselte az ellentétes nézeteket, ha volt mögöttük érvelés. Segítette a jogfosztottakat, az esélyteleneket és védelmezte mások jogait. Tudta, hogy számára nem elegendő a hétköznapi élet; mindenben a csúcsot célozta meg. Nem volt hajlandó szervezeti létrákat megmászni, szolgálati utakat bejárni, hogy eljusson a döntéshozókhoz. Soha nem kere-

sett rendes állást. A demokrácia híve volt, bár tisztában volt annak hiányosságaival. Igazságosnak tartotta, hogy az ő szavazata egyenlő egy „idióta” (az ő szava) szavazatával, de felháborította, hogy két „idióta” szavazata kétszer annyit érjen, mint az ő szavazata. Bőkezűen és önzetlenül osztogatta a bölcsességét, akár volt rá igény, akár nem. Ezzel nem állt egyedül. Amiben egyedülálló volt, hogy szinte mindig jó tanácsokat adott. Ezt nem mindenki ismerte fel. Szilárdot a legkiválóbb elmék értékelték leginkább.

## Appendix

Válogatás a szerzők Szilárd Leóval kapcsolatos publikációiból:

Hargittai István: *Az öt világformáló marslakó.* Vince Kiadó, Budapest, 2006.

Hargittai István: Szilárd és Fermi – Miben állt a marslakók különlegessége. *Természet Világa* 2006/1, 67–70.

Hargittai István: *Ambíció és kíváncsiság, avagy mi bajtja a tudományos felfedezőket?* Akadémiai Kiadó, Budapest, 2012.

Hargittai István: Tévedhetett-e Szilárd Leó? *Magyar Tudomány* 171 (2010/7) 799–802.

Hargittai Balázs, Hargittai István: *A marslakók bölcsessége.* Akadémiai Kiadó, Budapest, 2016.

Hargittai, I.: When Leo Szilard changed his mind. *Physics World* March 2023, 1–4.

Hargittai, I., Hargittai, B.: *Brilliance in Exile: The Diaspora of Hungarian Scientists from John von Neumann to Katalin Karikó.* CEU Press, 2023.



Az elmúlt közel hatvan évben a *Fizikai Szemle* hasábjain sok cikk jelent meg Szilárd Leóról. Közülük néhányat itt felsorolunk:

Szalay Sándor: Szilárd Leó (1898–1964). — 14 (1964) 331–332.

Marx György: Nyolcvan éves lenne Szilárd Leó. — 28 (1978) 253.

Marx György: 90 éve született Szilárd Leó: 1898 Budapest – 1964 La Jolla. — 38 (1988) 281–283.

Szentágothai János: Avatóbeszéd Szilárd Leó emléktáblájánál. — 39 (1989) 201–202.

Csikai Gyula: Szilárd Leó életműve és hatása. — 48 (1998) 38–40.

Radnai Gyula: Szilárd Leó iskolái. — 48 (1998) 61–63.

Klein György: Találkozások Szilárd Leóval. — 48 (1998) 134–137.

Marx György: Szilárd Leó gyökerei. — 48 (1998) 416–417.

## REFLEKTORFÉNYBEN

# A JAMES WEBB-ŰRTELESZKÓP

Szalai Tamás

SZTE TTK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék  
ELKH–SZTE Sztelláris Asztronómiai Kutatócsoport

2021. december 25-én – közép-európai idő szerint éppen a karácsonyi ünnepi ebédeket lezáró desszertezés alatt – a programban dolgozó több ezer szakember és az emberiség sok millió más képviselőjének izgatott figyelme által kísérve elindult az utóbbi évtizedek egyik legnagyobb szabású tudományos küldetése, a James Webb-űrtéleszkóp (JWST). A hosszas előkészületek és a már-már kezelhetetlen módon elszabaduló (végül bő 10 milliárd dollárra rúgó) költségvetés okán az indulás előtti utolsó években a híradásokba többször már inkább negatív felhangokkal került üreszköz szerencsére egyelőre beváltani (sőt, túlszárnyalni) látszik az elvárásokat, és az első tudományos mérési program 2022. júliusi kezdete óta folyamatosan közli a szenzációsabbnál szenzációsabb felvételeket. A küldetés való-

di értékét persze majd az évek során összeálló, mélyreható tudományos elemzések adják meg. Ugyanakkor nemcsak a nagyközönséget, hanem a kutatói közösség tagjait is ámulatba ejtik az űrtávcső képei – ezekből mutatunk be most egy kis válogatást.

## SMACS 0723

A JWST első, 2022. július 11-én nyilvánosságra hozott tudományos fényképe (lásd a hátsó belső borítón felül) az égbolt egy igazán kicsiny szeletét mutatja, akkora égrészt csupán, amekkorának egy, a kinyújtott kezünk távolságában tartott homokszem látszik. A felvétel a távoli Világegyetem eddigi legmélyebb és legélesebb képe. Az összesen 12,5 órányi expozíciós idő ráfordításával készült fotón a maroknyi előtér csillagtól eltekintve szinte csak rendkívül távoli galaxisokat láthatunk. A kép központjában a tőlünk 4,6 milliárd fényévre lévő SMACS 0723 jelű galaxishalmaz tagjai fehérnek látszanak a hamisszínes felvételen. A halmaztagok körül pedig az ennél is távolabbi háttérgalaxisok ezrei ragyognak, a kozmológiai vöröseltolódás miatt a narancsos-vörös különböző árnyalataiban – némelyikük



nagyobb képméret



Szalai Tamás, PhD csillagász, az SZTE TTK Fizikai Intézet, Kísérleti Fizikai Tanszék adjunktusa és az ELKH–SZTE Sztelláris Asztronómiai Kutatócsoport munkatársa. Fő kutatási témája a szupernóva-robbanások és azok környezetében zajló kölcsönhatási és porképződési folyamatok vizsgálata. Kutatómunkáját jelenleg az MTA Bolyai-ösztöndíjasaként, illetve az NKFIH FK 134432 program vezetőjeként végzi.

akár 13 milliárd fényév távolságból! Ezek legtöbbjét láthatóan eltorzította, gyakorta ívessé görbítette az előtérhalmaz gravitációs-lencse-hatása.

Szöveg: csillagaszat.hu, 2022.07.12. Credits: NASA, ESA, CSA, STScI

Különböző képméret: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52210366419/sizes/l/>

## A „Teremtés Oszlopai”

A korábban a Hubble-űrtávcső ikonikus felvételein is megörökített Teremtés Oszlopai a JWST NIRCam (Near Infrared Camera) és MIRI (Mid-Infrared Instrument) műszereinek felvételeiből összeállított kompozitképen (lásd a hátsó fedélen felül). A látható tartományban gyakorlatilag átlátszatlan poroszlopok egy nagyobb képződmény, a Földtől mintegy 6500 fényévre található csillagkeletkezési régió, a Sas-köd (hivatalos nevén Messier 16, illetve NGC 6611) részei. Az oszlopok kiterjedése mintegy 4-5 fényév: az egész Naprendszer elférne egy kisebb nyúlványukban, amelyet például a felső oszlop közepe táján lefelé látunk kitüremkedni.

Credit: Joseph DePasquale, Alyssa Pagan, Anton M. Koekemoer (STScI)

Különböző képméret: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52534406448/sizes/l/>



nagyobb képméret

tő. A Jupitert körülvevő, a bolygótestnél milliószor halványabb gyűrűk észleléséhez szükséges az űreszköz lenyűgöző érzékenysége. A kép bal oldalán két apró hold, az Amalthea és az Adrastea látszik, míg a legfelső nagy hold, az Io fényének egyik diffrakciós tüskéje épp csak belóg a látómezőbe.

Credit: NASA, ESA, CSA, Jupiter ERS Team; Ricardo Hueso (UPV/EHU), Judy Schmidt

Különböző képméret: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52302207952/sizes/l/>

## Az M74 galaxis

A JWST leghosszabb (5–30  $\mu\text{m}$  közötti) hullámhosszakra érzékeny MIRI műszerének felvétele az M74 spirálgalaxisról (lásd a címlapon). A grandiózus spirálkarokban lévő gáz- és porfilamentumok elképesztő részletességgel mutatkoznak meg a korábbi, rövidebb hullámhosszokon (és/vagy kisebb felbontással készült) készült képeken látottakhoz képest. A galaxis központi régiójában kevesebb gáz található, így jól megfigyelhetővé válik a centrumban lévő csillaghalmaz.

Image credit: ESA/Webb, NASA & CSA, J. Lee, PHANGS–JWST Team

Különböző képméret: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52324826014/sizes/l/>



nagyobb képméret

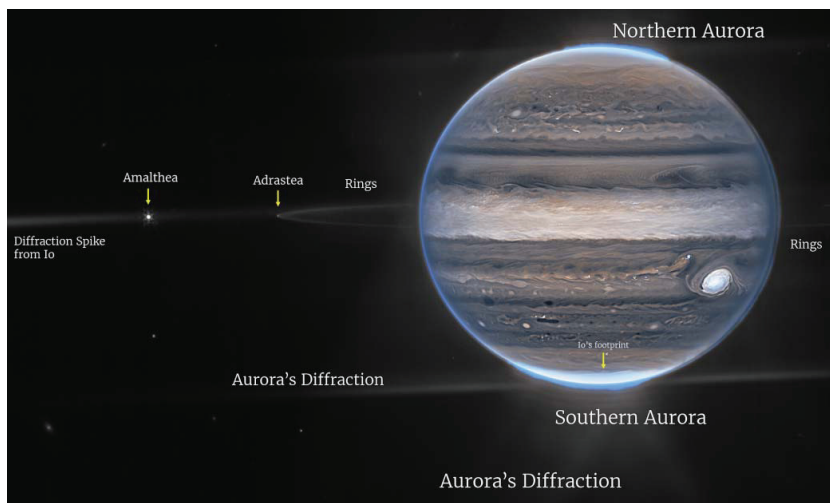
## Jupiter: légköri sávok, gyűrűk, holdak, sarki fény

A Jupiter és környezete a JWST NIRCam kameráján keresztül nézve. Az óriásbolygó örvénylő, horizontális légköri sávjain túl mindkét póluson aktív sarkifény-tevékenység is megfigyelhe-



nagyobb képméret

Jupiter: légköri sávok, gyűrűk, holdak, sarki fény



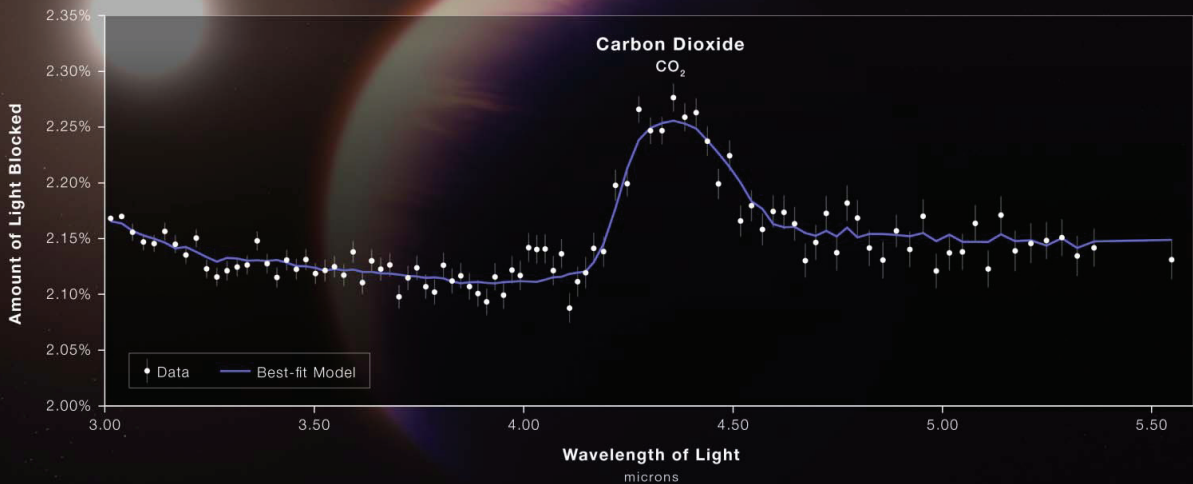
## A Déli Gyűrű-köd

A Webb-űrtávcső elsőként nyilvánosságra hozott képei egyikén szerepelt a Déli Gyűrű-köd nevű planetáris köd – a kutatók december elején újabb képeket hoztak nyilvánosságra az objektumról (lásd a hátsó belső borítón alul).



nagyobb képméret

Életük végéhez közeledve a csillagok többsége, így a leghétköznapibbak is vörös óriássá fúvódnak, majd végleg levetik tovább táguló külső burkukat. Ilyenkor a visszamaradó fehér törpecsillag körül – csillagászati léptéken mérve nagyon rövid ideig – látványos planetáris köd alakul ki. Az egyre csak táguló és ritkuló tümemény azonban néhány tízezer év alatt teljesen elenyészik. Ám amíg léteznek, addig a planetáris ködök látványukkal lenyűgözik az éppen arrafelé tekintő, esztétikai érzékkel bíró létformákat. Egy ilyen képződmény a tőlünk 2500 fényév távolságra található, Déli Gyűrű-köd néven ismert NGC


**WEBB**  
SPACE TELESCOPE

Szén-dioxid a WASP-39 b óriásbolygó légkörében

3132 is, amit a James Webb-űrtávcső két kamerájával is megörökített. Kiemelkedő felbontásának és fénygyűjtő képességének köszönhetően az új űrteleszkóp ezen jelenségek tanulmányozásában is komoly előrelépést hozhat.

Szöveg: csillagaszat.hu, 2022.07.12. Credits: NASA, ESA, CSA, O. De Marco (Macquarie University), J. DePasquale (STScI)

Különböző képméretek: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52551161139/sizes/l/>

A Wolf-Rayet 140 porgyűrűi



## CO<sub>2</sub> a WASP-39 b óriásbolygó légkörében

A WASP-39 b spektruma a Webb-űrteleszkóp NIRSpec spektrográfjának mérései alapján, rajta a szén-dioxid első egyértelmű felfedezésével egy exobolygó légkörében. Illusztráció: NASA, ESA, CSA, L. Hustak (STScI). Tudományos munka: The JWST Transiting Exoplanet (Community Early Release Science Team)



nagyobb képméret

Különböző képméretek: <https://esawebb.org/images/weic2213b/>

## A Wolf-Rayet 140 porgyűrűi

A Wolf-Rayet 140 nagy tömegű csillagok körül láthatók a csillagok által ledobott anyagban kialakult porgyűrűk. Amikor a csillagok közel érnek egymáshoz, a belőlük kiáramló csillagszél ütközése nyomán alakulnak ki a fák évgyűrűire hasonlító mintázatok.



nagyobb képméret

Forrás: NASA / ESA / CSA / STScI / JPL-Caltech.

Különböző képméretek: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52423252335/sizes/l/>

## Az L1527 protocsillag

Az L1527 jelű sötét felhőben eddig rejtőzködő protocsillag részleteit tárta fel a NASA/ESA/CSA James Webb-űrteleszkóp közeli infravörös tartományon érzékeny kamerája, a NIRCам (lásd a hátsó fedélen alul). A Taurus csillagkeletkezési régióiban belül található látványos felhők csak infravörösben látszanak, így ideális célpontok a Webb számára. Maga a protocsillag a homokóraforma legszűkebb részében rejtőzködik, a homokóra nyakánál még egy éléről látszó protoplanetáris korong is kivehető sötét csíkként. A protocsillagból származó sugár-



nagyobb képméret

zás a korong felett és alatt lép ki, világításra készítve a környező por- és gázyanyagot.

A régió legszembetűnőbb részei, a kék és narancs-sárga felhők határolják azt a térrészt, amin belül a protocsillagból származó anyag eltávolodva ütközik a környező anyaggal. Maguk a színek a Webb-űrteleszkóp és a felhők közötti porrétegeknek köszönhetőek: a kék részek a legvékonyabb a por. Minél vastagabb a porréteg, annál kevesebb kék fény tud kiszökni belőle, így alakulnak ki a narancssárgával jelölt területek.

Szöveg: csillagaszat.hu, 2022.11.23. Credits: NASA, ESA, CSA, STScI, J. DePasquale (STScI)

Különböző képméret: <https://www.flickr.com/photos/nasawebbtelescope/52504158265/sizes/l/>

## SCHMID REZSŐ-DÍJ, 2022: FÁBIÁN MARGIT

### Milyen munkáért kaptam a díjat

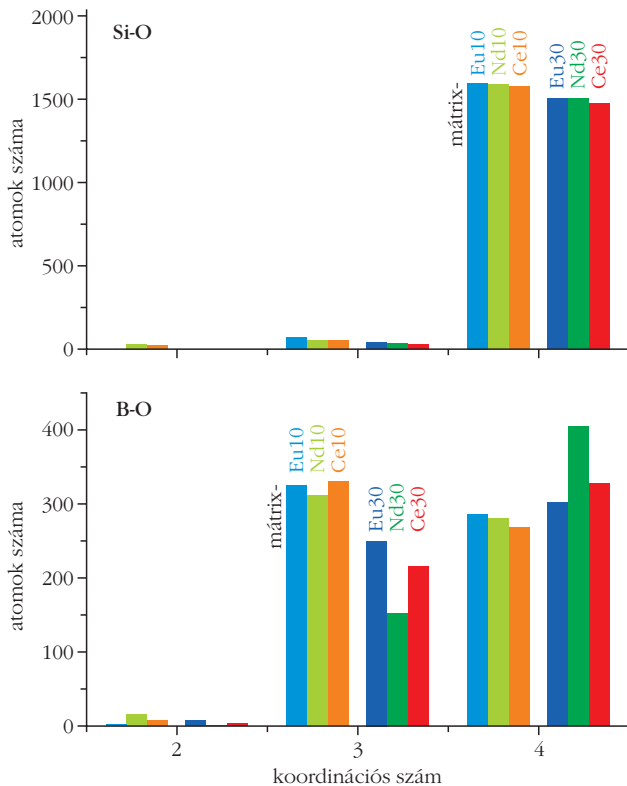
Definíció szerint a Schmid Rezső-díjat, az anyag szerkezetének kutatása területén elért kiemelkedő eredményekért adnak. Több mint egy évtizede foglalkozom a nagyaktivitású radioaktív hulladékok biztonságos kondicionálására lehetővé tevő optimális üvegmátrix fejlesztésén és vizsgálatán, ugyanis a radioaktív hulladékok végső elhelyezése a jelen és a jövő egyre sürgetőbb problémája. A hulladék elhelyezést, a többszörös mérnöki gátak és mélységi védelem elvét alkalmazva kell megoldanunk. A mérnöki gátrendszer első és legfontosabb eleme a hulladék stabilizálására alkalmas mátrixanyag. Munkám vezérfonala a gazdaságos előállítás mellett egy olyan stabil mátrixösszetétel kifejlesztése, amely minél nagyobb mennyiségben tud radioaktív hulladékot stabilizálni. A nagyaktivitású radioaktív hulladék stabilizálása (kondicionálása) céljából ezért kifejlesztettem egy olyan ötkomponensű, gazdaságosan előállítható boroszilikátüveg-összetételt ( $\text{SiO}_2\text{-Na}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-BaO-ZrO}_2$ , amit a rövidség kedvéért a továbbiakban mátrixnak fogok nevezni), amely többféle, különböző mennyiségű radionuklid befogadására alkalmas. Ezt a folyamatot vitrifikálásnak nevezzük.



Fábíán Margit vegyész-fizikus diplomáját 2003-ban a Babeş-Bolyai Tudományegyetemen, doktori fokozatát 2009-ben az ELTE-n szerezte. 2003-2011-ig az MTA SZFKI, 2012 óta az Energiatudományi Kutatóközpont főmunkatársa, a Radioaktív Hulladékok és Leszerelés Kutatócsoport vezetője. A nagyaktivitású radioaktív hulladékok biztonságos tárolását kutatva módszert fejlesztett ki stabil, de egyszerű kondicionáló összetételek előállítására. Több tudománypromótor és szervező tevékenységben vesz részt.

Ez az üvegmátrix a benne oldott radionuklidokkal, remekül ellenáll a külső termikus-kémiai behatásoknak, savas-bázikus közegben nem oldódnak. A kiégett fűtőelemekből visszamaradó radioaktív hulladék jó részét aktinoidákból áll. Jelenlegi körülményeink nem teszik lehetővé a transzurán elemekkel történő kísérleti munkát, ezért az  $\text{UO}_3$  mellett az aktinoidák modellezésére a kémiai analóg lantanoidákat használtam. A Pu, Am és Cm helyett rendre a Ce, Nd és Eu beépülését vizsgáltam – ez az analógia a szakirodalomban elfogadott. Munkám során bebizonyítottam, hogy az általam kifejlesztett mátrixösszetétel 40 súly%-ban képes  $\text{UO}_3$ -t és vegyes: 10 súly%  $\text{UO}_3$  + 10 súly%  $\text{CeO}_2$  + 10 súly%  $\text{Nd}_2\text{O}_3$  + 10 súly%  $\text{Eu}_2\text{O}_3$  stabilizálni, irodalmi adatokat tekintve ez a legnagyobb ismert koncentráció. Vizsgálataim alapján valamennyi összetétel stabil, amorf szerkezettel rendelkezik, kísérleti és modellezési eljárásokat alkalmazva pedig bebizonyítottam, hogy az U, Ce, Nd és Eu atomok beépülnek az üveg alapszerkezetébe és jól meghatározott atomi pozíciókban stabilizálódnak. Természetes gátként a mélygeológiai tároló befogadó közege szolgál, amely szempontból hazánkban a Bodai Agyagkő Formációt (BAF) vizsgáljuk az intézetemben. Az ehhez kapcsolódó munkám a mérnöki gátrendszer anyagai egymásra gyakorolt hatásának vizsgálatára vonatkozik, a feltételezett tárolási körülmények között (magas hőmérséklet, pórusvízzel telített közeg). Megmutattam, hogy az általam kifejlesztett boroszilikátüveg-mátrix kompatibilis a szénacélhordóval, amelybe betöltik, és ezt követően kerül lerakásra a pórusvízzel telített BAF agyagba.

A radioaktív hulladéktárolás témakörén túl számos más anyagcsaláddal is foglalkoztam és foglalkozok. Egyik legperspektivikusabb terület a csontpótláshoz alkalmazott biokompatibilis összetételek optimalizálá-



A Si-O és B-O koordinációs számeloszlások RMC-modellezéssel számolva a 90/70s%[Mátrix] + 10/30s%CeO<sub>2</sub>; Nd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>; Eu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> mintákra.

sa. Itt új SiO<sub>2</sub>-CaO-Na<sub>2</sub>O-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> bázisú összetételeket állítottam elő, a szerkezet meghatározás mellett pedig célirányosan vizsgáltam biokompatibilitásukat, a lehetséges beépülés mechanizmusát. Kutatómunkám jelentős állomása volt a memóriaegységekhez vagy a nagy adatsűrűségű újraírható optikai adathordozókhoz fejlesztett és alkalmazott amorf kalkogenid összetételek szerkezetvizsgálata, amely a kétkomponensű As-Se, majd a háromkomponensű As-Se-Te, Ge-Sb-Se, Ge-Sb-(S,Te) összetételeken át, a komplex négykomponensű Ge-As-Se-Te, As-Se-Sb-Te összetételekig terjedt. Az utóbbi években a jelen kihívásait követve fordultam az oxidalapú szilárd elektrolitok fejlesztése felé, amelyek a méltán célkeresztben lévő szilárdtest-akkumulátorok meghatározó komponense.

Tömbi üvegminták a különböző CeO<sub>2</sub> és UO<sub>3</sub>-tömegszázalékban adalékolt mátrixösszetételre.



Munkám során az anyagok előállításával, vizsgálatával, szerkezetük modellezésével foglalkozom, így elmondhatom, hogy kutatómunkámat az anyagszerkezet-kutatás ívén végzem. Úgy gondolom, hogy a díj ezen munkák eredményeinek elismerése.

## Milyen érzés volt díjat kapni

Díjat, elismerést kapni mindig felemelő, de ez a hihetetlen kategória volt. Már a díjra való fölterjesztés is izgalommal és büszkeséggel töltött el. A díj odaítéléséről szóló hivatalos értesítés végét már könnyek között olvastam, egy jól beosztott munkanap közepén. A boldogság mellett ott volt a visszaigazolás, a rendhagyó munkanapok, hétvégék, éjszakába nyúló kísérletek miatt, a büszkeség, hogy munkám „látható” és az öröm, hogy az alkotó én vagyok. Nagyon felemelő és megtisztelő, hogy a nagy múltú visszatekintő Eötvös Loránd Fizikai Társulat a díjazottjai sorába emel, olyan kiváló nevek mellé, mint például *Marx György* vagy *Zawadowski Alfréd*.

## Hogyan motivál ez a további munkában

A díj egyrésztől visszaigazolás, hogy ez az utam és a megfelelő szakmai közösségben dolgozom; másrésztől további motiváció, hogy kellő bátorsággal és merész elképzelésekkel lehet és kell a felmerülő problémák felé fordulni. Bizonyíték arra, hogy az anyagtudomány örök és egyre nagyobb kihívások elé állítja a kutatókat, fejlesztőket. Folyamatos az igény az egyre jobb, tartósabb, könnyen hasznosítható anyagok iránt, amelyeket környezetkímélő eljárásokkal állítunk elő és komplex vizsgálati módszereket alkalmazva teszünk optimálissá, hogy azután az élettartam lejártával a legkíméletesebb módon visszaforgassuk egy új anyagba. A ciklus valamennyi pontján az anyagtudósoknak dolgozni van, és ha itt, Magyarországon néha nem rendelkezünk ideálisnak mondható infrastruktúrával, de rengeteg kérdést meg tudunk válaszolni és azokat mi kell megválaszoljunk, ez komoly motiváló erővel bír.

## Egyéb

Munkámat a Szilárdtestfizikai és Optikai Kutatóintézetben kezdtem (ma Wigner Fizikai Kutatóközpont), majd az Energiatudományi Kutatóközpontban folytattam, ma is itt dolgozom. Köszönöm az intézmények mindenkor vezetőinek a támogatást és a lehetőséget. Szeretném megköszönni a szakmai utam különböző állomásain jelen lévő mentoraimnak, témavezetőimnek a töretlen segítséget, bizalmat. A díjat én kaptam, de a hozzá vezető úton csak néha jártam egyedül.

*Fábián Margit*

## ALACSONY HŐMÉRSÉKLETŰ $\gamma$ -STIRLING-MOTOR TESZTELÉSE

Csernovszky Zoltán – Berzsényi Dániel Gimnázium  
Horváth Ákos – ELTE TTK, Atomfizika Tanszék

Mi a Stirling-motor és miért érdekes ma is?

A Stirling-motorok külső hőbevezetésű, égéstermék kibocsátása nélkül működő hőerőgépek. A hőbevezetés megoldható megújuló energiaforrásokkal, környezetbarát módon, például napenergiával vagy melegvízzel.

Hosszú út vezet *Robert Stirling* 1816-os szabadalmától napjaink legismertebb Stirling-motorjáig, amely a beeső nap sugarakat parabolatükörrel irányítja a meleg hőtartályra. Egy ilyen Stirling-motor meleg hőtartálya akár 700 °C (973 K) hőmérsékletű is lehet. A 200 bar nyomáson hidrogénnel vagy héliummal működő motor 25 kW teljesítményre és 40% maximális hatásfokra képes [1, 2]. Ez a Stirling-motor elektromos hálózattól távoli helyen is használható elektromos energia generálására.

### Ismerkedés egy $\gamma$ -Stirling-motorral

Az alábbiakban egy másik típusú, úgynevezett alacsony hőmérsékletű Stirling-motort (LTD, Low Tem-

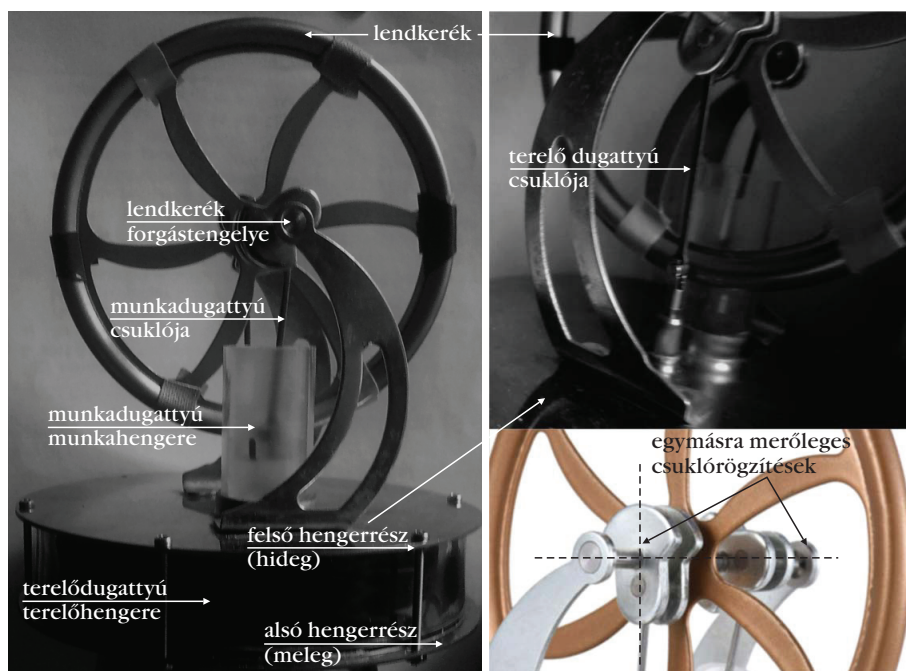
A kutatást a Magyar Tudományos Akadémia Közoktatás-fejlesztési Kutatási Programja (SZKF-7/2022) támogatta.



*Csernovszky Zoltán* 1990-ben szerzett matematika–fizika tanári diplomát az ELTE-n. 2017 óta a Berzsényi Dániel Gimnázium tanára. *Analógiák a fizikatanításban* című doktori értekezését 2018-ban védte meg. Részt vett az MTA–ELTE Fizika Tanítása Kutatócsoport munkájában. Jelenleg kutatótanárként a Fizikatanítás Digitális Támogatással Kutatócsoport tagja. 2022-ben az MTA Pedagógus Kutatói Pályadíj és az angol Institute of Physics Trusted Peer Reviewer elismerésekben részesült.



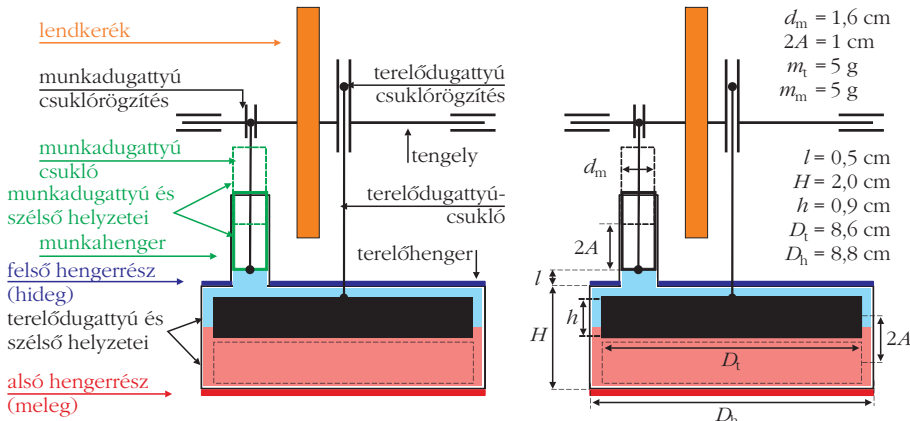
*Horváth Ákos* 1990-ben szerzett fizikusi diplomát az ELTE-n. Az ELTE Atomfizikai Tanszék egyetemi docense 2003 óta. Kísérleti magfizikával és nukleáris környezetfizikával foglalkozik. Egyetemi és országos szintű tudományos diákköri szervező tevékenységet végez 2003 óta. Az OTDT Fizika–Földtudományok–Matematika Szekció Szakmai Bizottságának elnöke. Többek között elnyerte az ELFT Jánossy Lajos Díját (2003), az OTDT Mestertanár Aranyérmét (2009) és a Prométheusz-érmet (2019).



1. ábra. A vizsgált alacsony hőmérsékletű LTD  $\gamma$ -Stirling-motor és főbb részei.

perature Differential) fogunk tesztelni, amely levegőt használ munkagázként. Az, hogy a motor alacsony hőmérsékletűt azt jelzi, hogy a terelőhenger két vége között kicsi a hőmérséklet-különbség (1. ábra). Ez a viszonylag olcsó, könnyű és halk hőerőgép már egy bögre forró vízre helyezve egy teljes órán át megforgat egy kisebb lendkereket, feldobja a fizikaórát, szó-rakoztatja az otthoniakat [3].

A *Physics Education* folyóirat Open Access ingyenes cikkében bemutatott, a kereskedelmi forgalomban kapható  $\gamma$ -Stirling-motor vizsgálatát végeztük el [4].



2. ábra. A vizsgált alacsony hőmérsékletű LTD  $\gamma$ -Stirling-motor főbb részei és méretei az előnézeti vázlaton.

Esetünkben a felső hengerrész hőmérséklete 13–29 °C, az alsóé 42–81 °C között változott a tesztelesek során, a hőmérséklet-különbség maximális értéke 68 °C, a minimálisé 12 °C volt.

A motor elnevezésében a  $\gamma$  arra a mérnöki konfiguráció utal, hogy mindkét dugattyúcsukló ugyanahhoz a tengelyhez csatlakozik, a csuklórögzítések egymással 90°-ot zárnak be és ugyanerre a vízszintes

tengelyre erősített a lendkerék is. Célunk egyrészt az LTD  $\gamma$ -Stirling-motor felépítésének és működésének megismerése, másrészt a lendkerék forgási frekvenciája és a hengerrészek hőmérsékletkülönbsége közötti kapcsolat feltárása és elemzése volt (1. és 2. ábra).

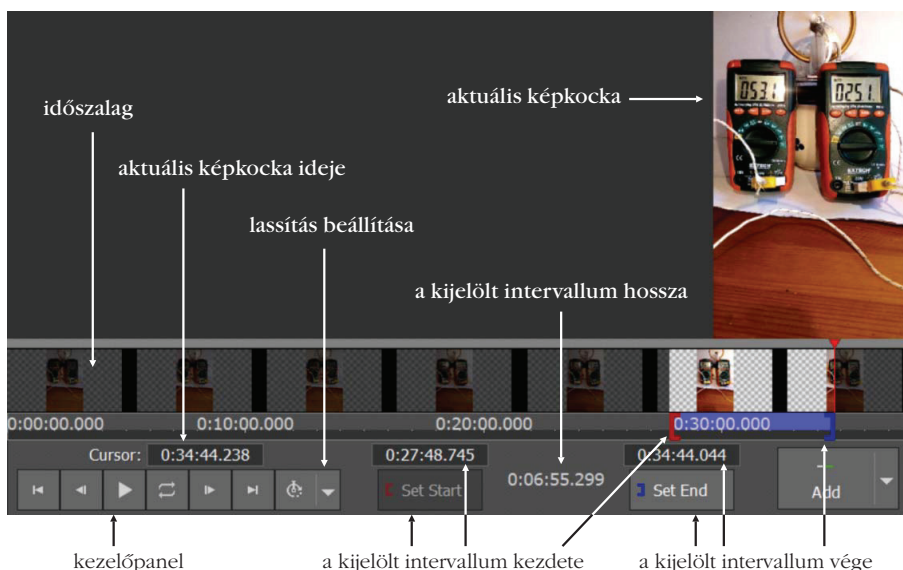
A 2. ábráról a bemutatott LTD  $\gamma$ -Stirling-motor több jellemzője is leolvasható. Szembeötlő, hogy a terelődugattyú átmérője lényegesen nagyobb a munkadugattyú átmérőjénél, annak 5,375-szorososa. Ez és a csuklók geometriai elrendezése eredményezi, hogy a terelődugattyú a munkadugattyúnál jóval nagyobb térfogatot jár be egy ciklus alatt.

A terelődugattyú szerepe a munkagáz „terelése” az alsó meleg és a felső hideg hengerrészek között, a dugattyúmozgásnak megfelelően. A levegővel érintkező mindkét felülete nagy, fekete színű, jó hőszigetelő anyagból készült. Méréseinkben a lendkerék maximális frekvenciája 5,5 s<sup>-1</sup> volt, ez a forgás a többi típusú Stirling-motor mozgásához képest lassú. A munkadugattyú légmentesen zárta a munkahengert, kvázi-sűrűlődsmentesen mozgott abban.

3. ábra. A vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor működés közben, szétszerelt állapotban és előkészítve.



4. ábra. A VideoPad Video Editor szoftver kezelőfelületének részlete és használt funkciói.



## Mérési elrendezés, mért és számított mennyiségek

A motor alsó hengerrészét egy forró vizet tartalmazó edényre helyeztük, a felső hengerrészt jéggel hűtöttük. A jeget – a stabil működés érdekében – egy lezárt zacskóban helyeztük a felső hengerrészre (3. ábra). A kísérlet során a hengerrészek hőmérsékletét  $\pm 1$  °C pontosságú Extech Min16A digitális multiméterekkel mértük. Az így üzemeltetett LTD  $\gamma$ -Stirling-motor 60-80 percig működött.

A lendkerék forgási frekvenciájának meghatározásához a 30 képkocka/másodperces videóra vett mozgást VideoPad Video Editor szoftverrel az ere-

deti érték tizedére lassítottuk. A szoftver demonstrációs verziója ingyen letölthető, leírása a Wikipédián elérhető [5]. A hengerrészek hőmérsékletei képkockánként visszanezhetők, a hőmérséklet-különbség meghatározható:  $\Delta T = T_{\text{meleg}} - T_{\text{hideg}}$ .

A frekvencia meghatározásához egy olyan időintervallumot jelölünk ki, amikor nem változik a hengerrészek hőmérséklete. Ezután törekedtünk – a kijelölt intervallumon belül – a lehető legtöbb,  $n$  egész számú vagy ahhoz közeli kerékfordulat-időtartam képkocka-pontosságú meghatározására. Ezen intervallum végpontjai  $t_1$ ,  $t_2$  és a fordulatok időtartama  $\Delta t = t_2 - t_1$  volt (4. ábra). A  $\Delta T$  hőmérséklet-különbséghez tartozó kerékfrekvencia így már (1) szerint meghatározható.

$$f = \frac{n}{\Delta t} = \frac{\text{fordulatok száma}}{\text{fordulatok időtartama}}. \quad (1)$$

Így egy összetartozó, elemzésre kész

$$\left( \Delta T; t_1; t_1 + \frac{\Delta t}{2}; f \right) \quad (2)$$

adatnégyeshez jutunk. Egy mérésorozatban a működés elemzéséhez 100-130 adatnégyest vettünk fel videofelvétel alapján. Ezek eloszlása időben nem egyenletes, az adatnégyesek felvételének sűrűsége a motor működéséhez igazodott.

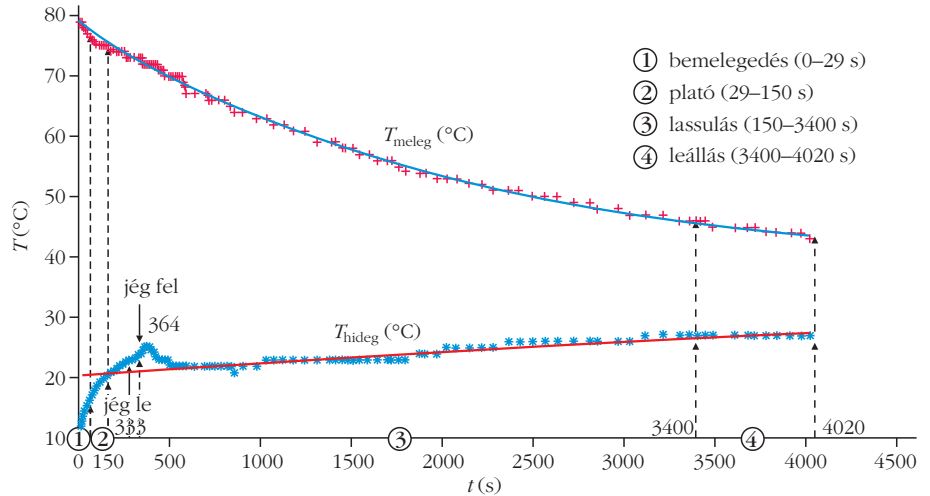
## Az LTD $\gamma$ -Stirling-motor hengerrészeinek hőmérséklete

Az elvégzett esetelemzések közül egy tipikusnak mondhatót mutatunk be az alábbiakban. A választott esetben a motor felső és alsó hengerrészeinek hőmérsékletét az idő függvényében az 5. ábra mutatja:  $T_{\text{hideg}}(t)$  és  $T_{\text{meleg}}(t)$ . A pontok koordinátái a diagramokon:

$$\left( t_1 + \frac{\Delta t}{2}; T \right).$$

Az 5. ábrán feltüntettük a működés négy szakaszát: a bemelegedést, a platót, a lassulást és a leállást. A szakaszolásról bővebben a működési frekvencia elemzésénél lesz szó.

Az ábrán megjelöltük azokat az időpontokat is amikor a felső hengerrészről levettük, majd visszatet-



5. ábra. A vizsgált  $\gamma$ -Stirling-motor működésének szakaszai, a hengerrészek hőmérséklete az idő függvényében és a mérési értékekre illesztett  $T_{\text{hideg}}(t)$ ,  $T_{\text{meleg}}(t)$  exponenciális függvények.

tük a jeget. Ezzel az  $f(\Delta T)$  frekvencia hőmérséklet-különbség függvény alaposabb vizsgálatára lesz majd lehetőség.

Az alsó, meleg hengerrész hőmérséklet-idő mérési adataira csökkenő exponenciális függvényt illesztettünk, amelynek egyenlete:

$$T_{\text{meleg}}(t) = 41,21 \cdot e^{-0,000456 \cdot t} + 37.$$

A jég levétele és visszarakása utáni szakaszon, körülbelül 700 másodperccel a motor indulása után a felső, hideg hengerrész hőmérséklet-idő mérési adataira a

$$T_{\text{hideg}}(t) = -16,56 \cdot e^{-0,000139 \cdot t} + 37$$

egyenletű exponenciális függvényt illesztettük. A hengerrész-hőmérsékletek csökkenésének, illetve emelkedésének a motor leállása vetett véget.

A termodinamika 2. főtétele értelmében a  $T_{\text{hideg}}(t)$ ,  $T_{\text{meleg}}(t)$  hőmérsékletek hosszú távon közös, az egyensúlyi hőmérséklet felé tartanak. A mérési eredményekre illesztett függvények határértéke

$$\lim_{t \rightarrow \infty} T_1(t) = \lim_{t \rightarrow \infty} T_2(t) = 37 \text{ } ^\circ\text{C},$$

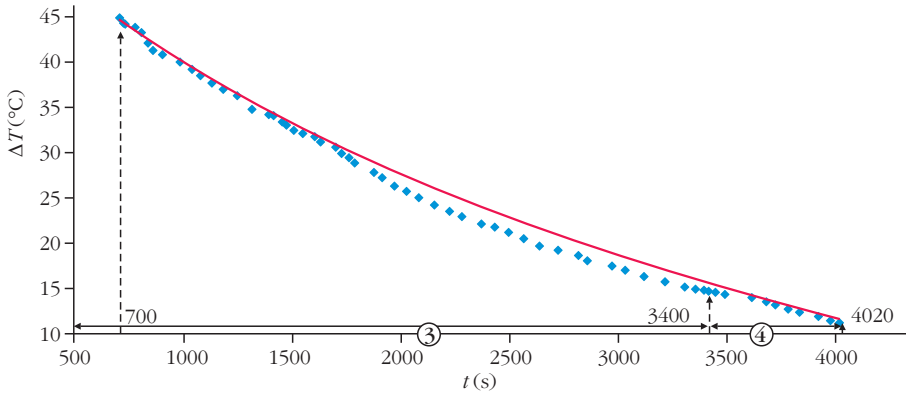
amivel a rendszer egyensúlyi hőmérséklete  $37 \text{ } ^\circ\text{C}$  (5. ábra).

A 6. ábra a jég visszatétele utáni működési szakasz hőmérséklet-különbség függvényét mutatja a működés megkezdése utáni 700 másodperctől. A pontok koordinátái:  $(t_1 + \Delta t/2; \Delta T)$ .

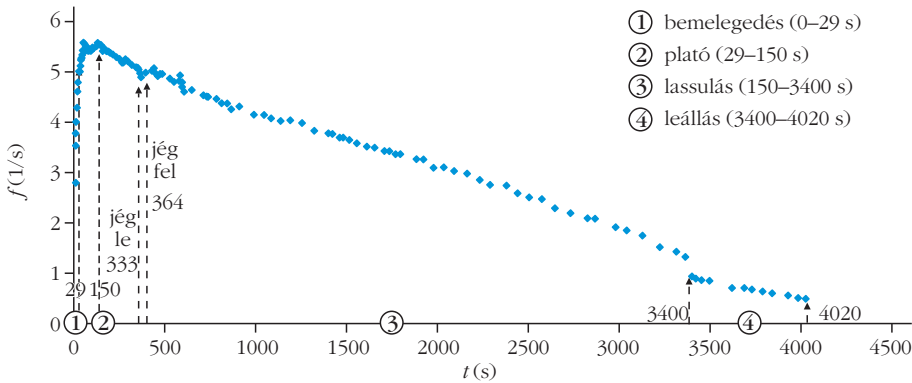
Eredményeink szerint a  $\Delta T(t)$  függvény is szigorúan monoton csökken, exponenciális függvényt illesztve a mérési eredményekre kapjuk, hogy

$$\Delta T(t) = 54,73 \cdot e^{-0,0004 \cdot t},$$

valamint  $\lim_{t \rightarrow \infty} \Delta T(t) = 0$ .



6. ábra. A vizsgált  $\gamma$ -Stirling motor hengerrészeinek hőmérséklet-különbsége az idő függvényében  $t \in [700 \text{ s}; 4000 \text{ s}]$ .



7. ábra. A vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor működésének szakaszai és forgási frekvenciája az idő függvényében.

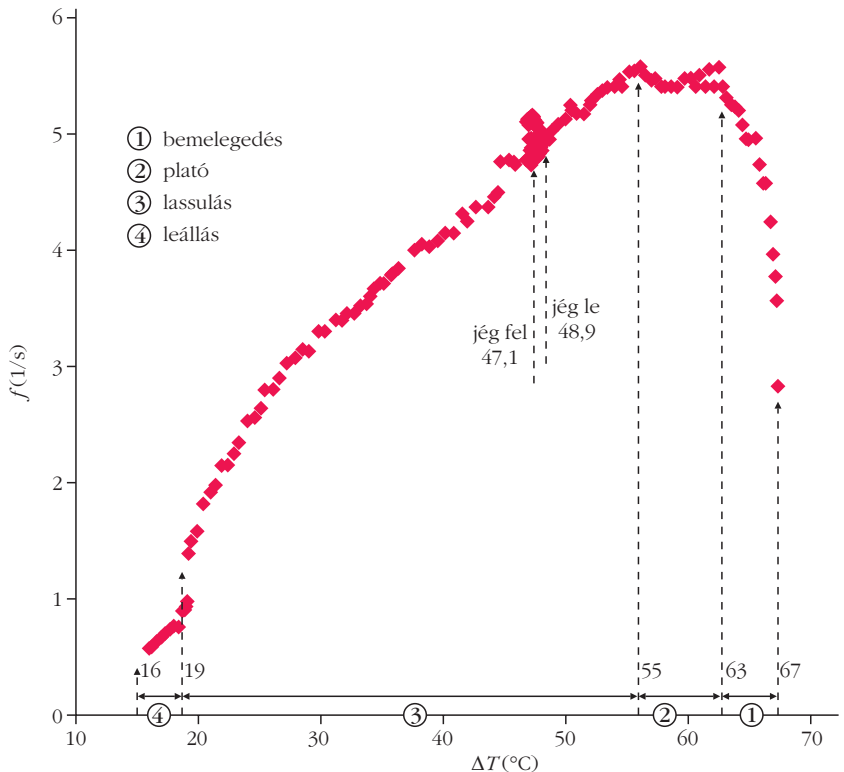
## Az LTD $\gamma$ -Stirling-motor működési frekvenciájának vizsgálata

Először a kerék frekvenciájának időbeli változását vizsgáltuk. A 7. ábra vízszintes tengelyén a motor indításától eltelt idő, a függőlegesen a kerék frekvenciája látható. A pontok koordinátái:  $(t_1 + \Delta t/2; f)$ .

A grafikonról leolvashatjuk, hogy a motor indulása után a kerék frekvenciája gyorsan (29 s) felszökik egy maximális működési frekvenciára, amelyen rövid ideig működik (29–150 s), majd egyenletesen csökken igen hosszú ideig (150–3400 s), végül a leállási szakaszban szintén egyenletesen, de lassabban csökken a kerék forgási frekvenciája (3400–4020 s).

A fentebb említett szakaszolás jogosságát a 8. ábra is alátámasztja, amelynek függőleges tengelyén a motor lendkerékének  $f$  frekvenciáját, a vízszintesen a felső és alsó

8. ábra. A vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor frekvenciája a hengerrészek hőmérséklet-különbségének függvényében.

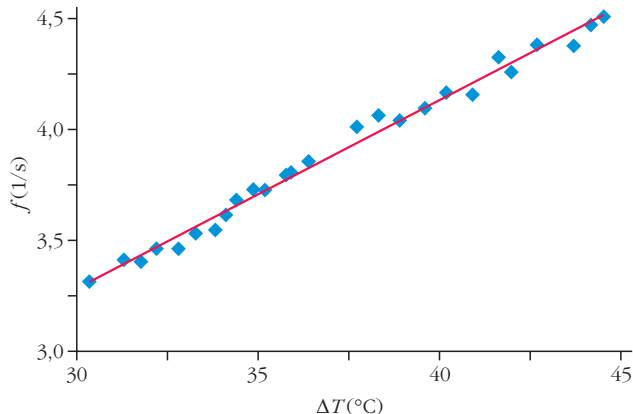
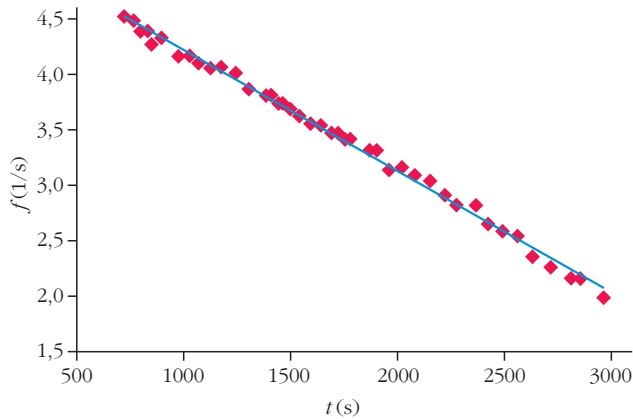


hengerrész  $\Delta T$  hőmérséklet-különbséget ábrázoltuk. A 8. ábrán az időrendi sorrend jobbról balra található.

Tanórai feldolgozásra a 3. szakasz egy részlete, például a 30–45 °C hőmérséklet-különbség, a motor indulása utáni 700–3000 másodpercig tartó intervallum javasolt (9. ábra). Ezen a szakaszon a függvénykapcsolatok lineárisan jól közelíthetők, az illesztett egyenesek egyenletei:  $f(t) = -0,0011 \cdot t + 5,2982$  és  $f(\Delta T) = 0,0085 \cdot \Delta T + 0,731$ .

Frontális feldolgozáshoz előzetes videofelvétel készítése és a vizsgálandó idő- és hőmérsékletkülönbség-intervallumok kitűzése ajánlható, ugyanis a mérési adatokra, például a  $\Delta T \in [19,3 \text{ °C}; 38,9 \text{ °C}]$  intervallumon, hatványfüggvény illesztése a lineárisnál jobb egyezést mutat (10. ábra).

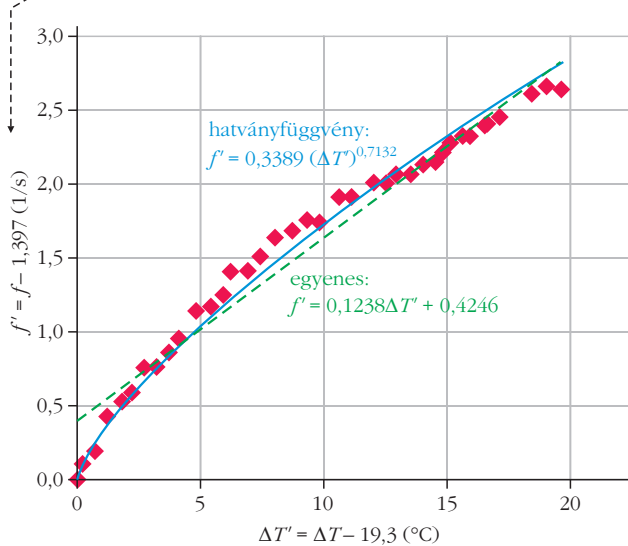
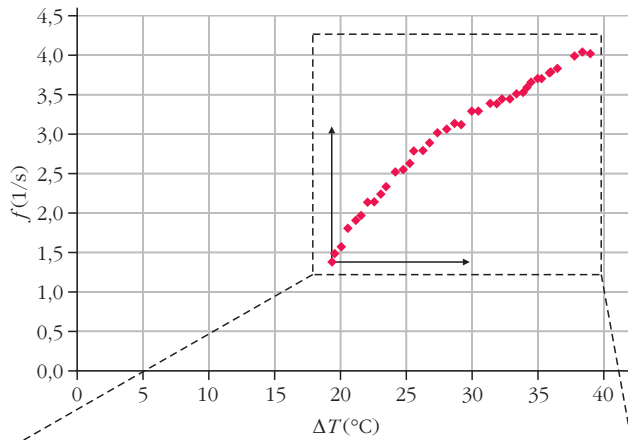
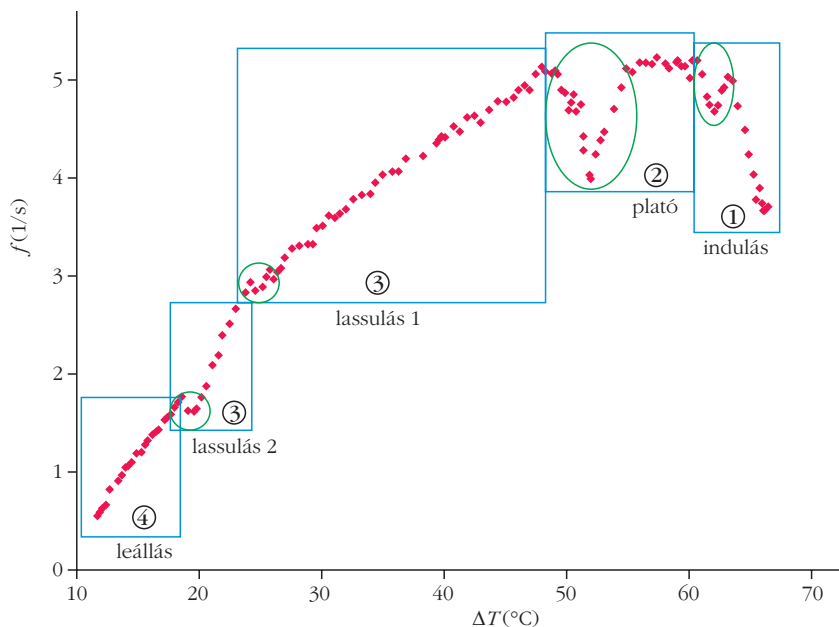
A motor forgási frekvenciájának ugrásszerű lassulását  $\Delta T = 19 \text{ °C}$ -nál a forgásten-



9. ábra. A vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor feldolgozásra ajánlott, lineárisan jól közelíthető intervalluma a 3. szakaszon.

gely megszorulása okozhatta. Minél többet használtuk a motort, a tengely megszorulását annál többször tapasztaltuk egy mérésorozatban belül. A 11. ábra egy ilyen, 2. sorozatnak nevezett mérés  $f(\Delta T)$  diagramját mutatja.

11. ábra. A frekvenciasökkenések a 2. sorozat  $f(\Delta T)$  diagramján (bekarikázott tartományok).

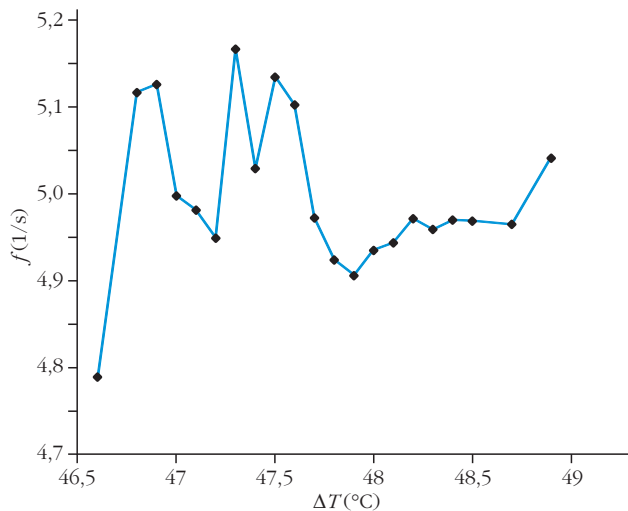
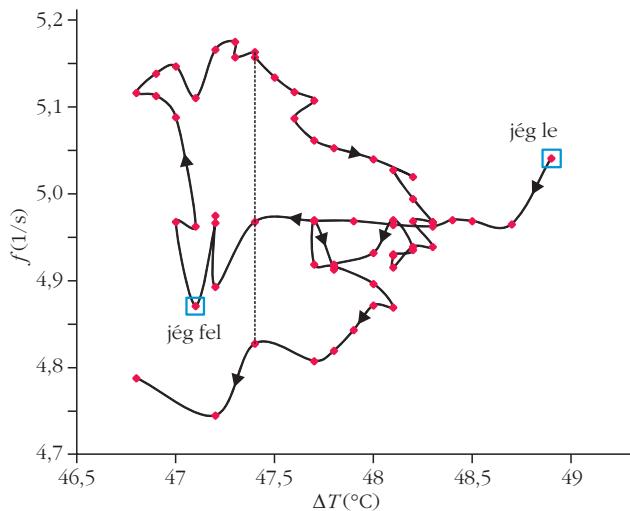


10. ábra. Egyenes és hatványfüggvény illesztése a mérési adatokra  $\Delta T \in [19,3 \text{ } ^\circ\text{C}; 38,9 \text{ } ^\circ\text{C}]$  esetén.

## A hengerrészek hőmérséklet-különbsége egyértelműen meghatározza-e a forgási frekvenciát?

Azzal, hogy a jeget levettük a felső hengerrészről, majd visszatettük rá ugyanazt a hőmérséklet-különbséget többször is előidézttük a mérésorozatban. A 12. ábra bal panelje az  $f(\Delta T)$  függvényrészletét mutatja, a mérési pontokat összekötő görbén az időbeliség irányát nyilakkal jelöltük. Például a  $\Delta T = 47,4 \text{ } ^\circ\text{C}$  hőmérséklet-különbséget a rendszer négy-szer is felveszi a kísérletben. Ezeket a frekvenciaértékeket függőleges szaggatott szakasz köti össze a 12. ábra bal paneljén.

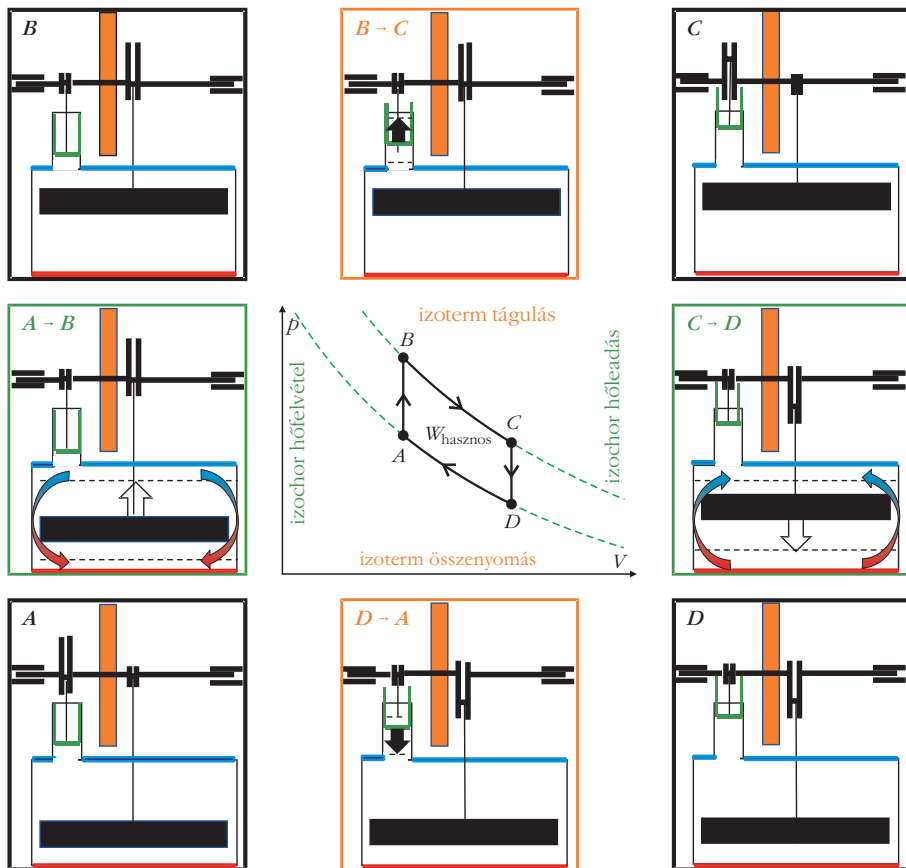
A 12. ábra jobb paneljén az azonos hőmérséklet-különbségtételekhez tartozó frekvenciák átlagait tün-



12. ábra. Bal panel: a vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor frekvenciája hengerrészek hőmérséklet-különbségének függvényében a jég levétele és visszatevése közötti és utáni időszakban. A nyilak az időbeliség irányát jelzik. Jobb panel: a bal panel értékeivel számolt átlagfrekvenciák a hőmérséklet-különbség függvényében.

tették fel. Ezeket az értékeket használtuk fel az 5., a 6., a 7., a 8. és a 9. ábrák készítésénél. Méréseink szerint a vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor „emlékezik” a működés előzményeire. A kerék forgási frekvenciája attól is függ, hogy a motor milyen előzetes állapotból érkezik a vizsgált hőmérséklet-különbségű állapotba. Ezt fejezi ki a 12. ábra bal paneljén látható hurok, a hiszterézis.

13. ábra. Stirling-ciklus a  $pV$  állapotsíkon és a vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor előnézeti rajzai az  $A$ ,  $B$ ,  $C$ ,  $D$  állapotokban és az  $A \rightarrow B$ ,  $B \rightarrow C$ ,  $C \rightarrow D$ ,  $D \rightarrow A$  folyamatok során. A nyilak a dugattyúk és a munkagáz mozgásirányait jelölik.



## A Stirling-ciklus

A Stirling-motor idealizált körfolyamata a Stirling-ciklus, amely a munkagáz két izoterm és két izochor állapotváltozásából áll. A vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor működése ennél összetettebb, mégis a  $pV$  állapotsíkon ábrázolt Stirling-ciklus sokat segíthet a motor működésének

követésében, energetikai vizsgálatában. A ciklus négy állapotában a vizsgált  $\gamma$ -Stirling-motor dugattyúhelyzeteit és a speciális állapotváltozásokat a 13. ábra mutatja.

A Stirling-ciklus  $A$  állapotában mindkét dugattyú az alsó szélső helyzetben van. Az  $A \rightarrow B$  izochor hőfelvétel során a terelődugattyú a felső szélső helyzetbe megy, a meleg és hideg levegő aránya megnő. A folyamat során munkavégzés nem történik, a gáz belső energiája megnő.

A  $B$  állapotban a terelődugattyú a felső, a munkadugattyú az alsó szélső helyzetben van. A  $B \rightarrow C$  izoterm tágulás során a munkadugattyú a felső szélső helyzetbe kerül, a kitáguló munkagáz a környezetben munkát végez. A folyamat során hőfelvétel történik, a gáz belső energiája nem változik.

A  $C$  állapotban mindkét dugattyú a felső szélső helyzetben van. A  $C \rightarrow D$  izochor hőleadás során a terelődugattyú

a felső szélső helyzetből az alsóba kerül, ezzel a meleg és a hideg levegő aránya lecsökken. Munkavégzés nem történik, a gáz belső energiája csökken a folyamat során.

A  $D$  állapotban a terelődugattyú az alsó, a munkadugattyú a felső szélsőhelyzetben van. A  $D \rightarrow A$  izoterm összenyomás során a környezet munkát végez a gázon, a munkadugattyút az alsó szélső helyzetbe juttatja. A folyamat során a gáz hőt ad le a környezetnek, belső energiája nem változik. A ciklus ismétlődik.

A Stirling-ciklus elemzését a (3) termodinamika 1. főtételével az 1. táblázat mutatja. Itt  $\Delta U$  a belsőenergia-változás,  $Q$  a hőmennyiség,  $W$  a munkavégzés,  $n$  a mólszám,  $R$  az egyetemes gázállandó,  $f$  a szabadsági fokok száma. Felhasználtuk az ideális gázok állapotegyenletét:

$$pV = nRT, \quad (4)$$

valamint

$$W_{BC} = - \int_{V_B}^{V_C} p dV = -nRT_{\text{meleg}} \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right) \text{ és} \quad (5)$$

$$W_{DA} = \int_{V_A}^{V_D} p dV = nRT_{\text{hideg}} \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right).$$

A vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor dugattyúmozgásainak követését adja meg a 14. ábra. Itt a függőleges

1. táblázat				
<b>A 13. ábra Stirling-ciklusának speciális állapotváltozásai a termodinamika 1. főtétele szerint</b>				
$\Delta U = Q + W$ (3)		$\Delta U$	$Q$	$W$
$A \rightarrow B$	izochor hőfelvétel	$+\frac{f}{2} n R \Delta T$	$+\frac{f}{2} n R \Delta T$	0
$B \rightarrow C$	izoterm tágulás	0	$+n R T_{\text{meleg}} \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$	$-n R T_{\text{meleg}} \ln\left(\frac{V_C}{V_B}\right)$
$C \rightarrow D$	izochor hőleadás	$-\frac{f}{2} n R \Delta T$	$-\frac{f}{2} n R \Delta T$	0
$D \rightarrow A$	izoterm összenyomás	0	$-n R T_{\text{hideg}} \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right)$	$+n R T_{\text{hideg}} \ln\left(\frac{V_D}{V_A}\right)$

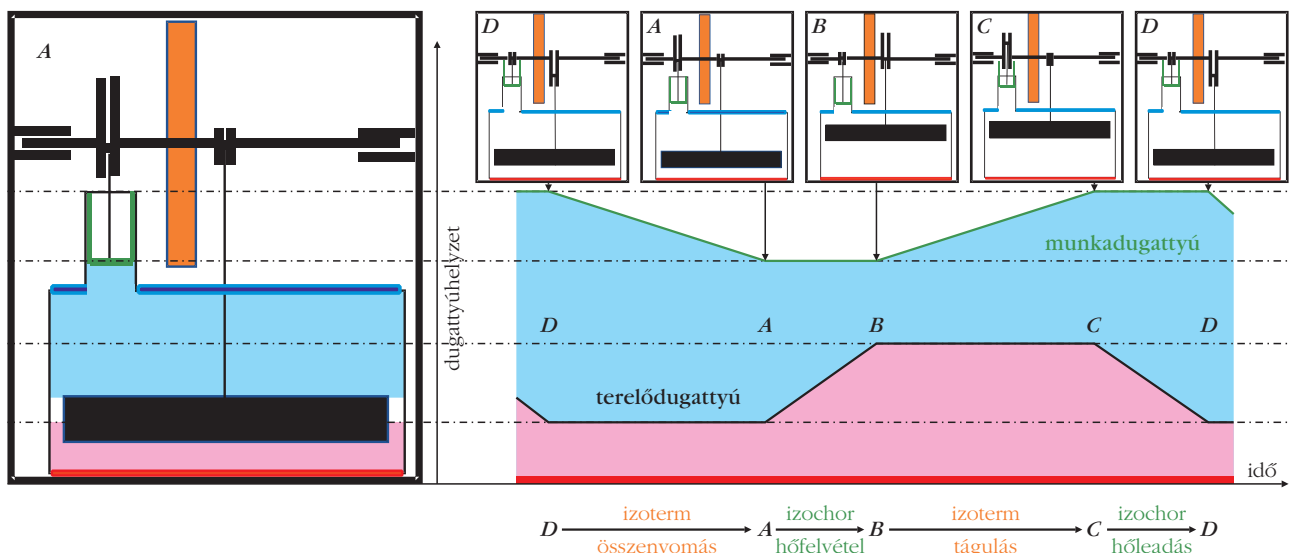
tengely a munkadugattyú és a terelődugattyú terelőhenger aljától mért távolságát, a vízszintes tengely az eltelt időt mutatja. Az ábrán érzékeltettük, hogy az izoterm folyamatok hosszabb ideig tartanak, mint az izochor folyamatok. A működés során a folyamatok hossza, azok időtartamának aránya is változni fog  $\Delta T$  értékétől függően. Feltüntettük az  $A, B, C$  és  $D$  állapotokban a vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor vázlatos rajzát és a speciális állapotváltozások elnevezését.

### A Stirling-ciklus hatásfoka

Egy hőerőgépet a termodinamikai hatásfoka jellemz, amely a felvett és a leadott hőmennyiséggel, illetve az egy ciklus során nyerhető hasznos munkával kifejezve:

$$\eta = \frac{Q_{\text{fel}} - Q_{\text{le}}}{Q_{\text{fel}}} = \frac{W_{\text{h}}}{Q_{\text{fel}}} \quad (6)$$

14. ábra. A vizsgált LTD  $\gamma$ -Stirling-motor dugattyúinak helyzete az idő függvényében. Lásd még a 13. ábrát.



A Stirling-ciklus termodinamikai hatásfokát is meghatározhatjuk, ha figyelembe vesszük, hogy:

$$W_h = \int_{V_B}^{V_C} p dV - \int_{V_A}^{V_D} p dV =$$

$$= nR(T_{\text{meleg}} - T_{\text{hideg}}) \ln\left(\frac{V_{\text{max}}}{V_{\text{min}}}\right) = nR\Delta T \ln v. \quad (7)$$

Itt  $V_{\text{max}}$ ,  $V_{\text{min}}$  a maximális és a minimális gáztérfogat a ciklus során,  $v = V_{\text{max}}/V_{\text{min}}$ . Ezzel:

$$\eta_{\text{Stirling}} = \frac{\Delta T \ln v}{\frac{f}{2} \Delta T + T_{\text{meleg}} \ln v}. \quad (8)$$

A Stirling-ciklusnak inkább didaktikai, mint gyakorlati jelentősége van a Stirling-motorok leírásában. A nehézséget a működés során változó mólszámú és különböző hőmérsékletű térrészek követése jelenti. A termodinamikai leírás történet egyszerűsítő modellek alkalmazásával, vagy a kinetikai gázmodellt használó molekuladinamikai szimulációval [6–8]. Ezekkel a későbbiekben foglalkozunk.

## Összegzés

A cikk a Berzsenyi Dániel Gimnázium fizikatáborára készült LTD  $\gamma$ -Stirling-motor-projekt alapján egy működő hőerőgéppel szemlélteti egyrészt a termodinamika 2. főtétele (hőmérsékletek kiegyenlítését), másrészt videoelemzéssel nyomon követi a motor kerékének forgási frekvenciáját az idő és a hengerrészek hőmérséklet-különbségének függvényében.

# HOZZÁSZÓLÁS

Keresztesi Miklós: *Big bang fizikakurzus elektronikus tanulástámogatással* című cikkének 2. részéhez (*Fizikai Szemle*, 2022. december)

Nagyon szimpatikusnak találok *Keresztesi Miklós* próbálkozását, hogy átfogó cikkben összefoglalja a mikrovilág fizikáját. Sajnos olyan dolgokat is tulajdonít benne a mikrofizika elméletének, amelyek annak tökéletesen ellentmondanak. Ilyen hiba, bár apróság, a cikk első részében, hogy az Einstein-egyenlet „egyaránt tartalmazza a gravitációs-antigravitációs tulaj-

A szerkesztő megjegyzése: a szerző elfogadta a hozzászólásban említett szakmai állításokat.

A mérési eredmények alapján tanórai feldolgozásra a frekvencia-idő függvény jól linearizálható lassulási szakasza ajánlott. Mérési feladatként, szakköri feldolgozásra a frekvencia hőmérséklet-különbség diagram felvétele és annak elemzése javasolt. A motor működésének elemzéséhez és a vizsgálati intervallum kijelöléséhez érdemes előzetesen rögzített videofelvételt használni.

A Stirling-ciklus  $pV$  állapotíkbeli ábrázolásával nemcsak a hasznos munka szemléltetésére és a termodinamikai hatásfok fogalmának bevezetésére nyílik lehetőség, hanem izochor és izoterm állapotváltozások részletes elemzésére is az 1. főtétel alkalmazásával. Ez az elemzés Stirling-motorok vizsgálatának, modellezésének, tervezésének, működésük szimulációjának lehet az alapja.

## Irodalom

1. Bancha Kongtragool, Somchai Wongwises: *A review of solar-powered Stirling engines and low temperature differential Stirling engines*. Volume 7/2, April 2003, 131–154, Elsevier. <https://www.sciencedirect.com/author/7003383482/somchai-wongwises>
2. Low Temperature Stirling Engine Motor Model Heat Steam Education Toy Diy Kit. [https://www.fruugo.hu/low-temperature-stirling-engine-motor-model-heat-steam-education-toy-diy-kit/p-93699197-196513372?language=en&ac=KelkooCSS&asc=pmax&gclid=CjwKCAjw6raYBhB7EiwABge5KmpF6iLYKXpKZW4Vmg6oMN2gUiDyq\\_OvugLp6tEK0zluyP2FYIYZxoCqpUQAvD\\_BwE](https://www.fruugo.hu/low-temperature-stirling-engine-motor-model-heat-steam-education-toy-diy-kit/p-93699197-196513372?language=en&ac=KelkooCSS&asc=pmax&gclid=CjwKCAjw6raYBhB7EiwABge5KmpF6iLYKXpKZW4Vmg6oMN2gUiDyq_OvugLp6tEK0zluyP2FYIYZxoCqpUQAvD_BwE)
3. M. H. Briggs: *Improving Free-Piston Stirling Engine Power Density*. 2016, NASA Glenn Research Center
4. W. Yeardon, M. Quinn: Thermodynamics education for energy transformation: a Stirling Engine experiment. *Phys. Educ.* 56 (2021) 055033.
5. Wikipedia: VideoPad Video Editor, [https://en.wikipedia.org/wiki/VideoPad\\_Video\\_Editor](https://en.wikipedia.org/wiki/VideoPad_Video_Editor)
6. Simon Dávid Szabolcs: *Stirling-motor modellezése*. ELTE TTK OTDK dolgozat (2014) <https://atomfizika.elte.hu/akos/tezisek/tdk/stirling.pdf>
7. Török Mátyás: *Alfa-Stirling-motor molekuladinamikai modellezése*. OTDK FIFöMa, Középiskolai Szekció, 2021.
8. Zheng Cheng Dávid: *Béta-Stirling-motor modellezése Unityvel*. OTDK FIFöMa, Középiskolai Szekció, 2021.

donságot”, hiszen az a gravitációt az energiához köti, amely nem lehet negatív. Tudománytörténeti tévedések is akadnak benne, mint például az a kijelentése a Higgs-bozonról, hogy „Létezését *Peter Higgs* az SM alapján jósolta meg”, az SM-nek rövidített standard modell ugyanis csaknem egy évtizeddel Higgs cikke után született meg.

A fentiek apróságok, zavaróan súlyos hiba viszont, ahogyan a kvarkok és gluonok színtöltését, az erős kölcsönhatás forrását kezeli. Eleve furcsa az antikvar-

kok szintöltésének a szivárvány kiegészítő színeinek nevét adni, hiszen az emberi színlátással való analógián kívül semmi közük egymáshoz. Végzetes félreértés azonban az, ahogyan a gluonok szintöltését tárgyalja, és borzasztó felelőtlenség volna azt fizikaszakción a gyerekeknek tanítani. Az erős kölcsönhatás elmélete, a kvantum-színdinamika, Keresztesi elképzeléseivel ellentétben a gluonok szintöltését viszonylag egyszerűen kezeli. A kölcsönhatást közvetítő 3 szín és 3 antiszín alkotta 9 színpárt nyolc gluon hordozza, egyenként 9/8 szín-antiszín pár jut rájuk egyenletesen összekombinálva (mondhatni, szétkenve). A gluonok tehát kevert színállapotban vannak, ez teszi lehetővé kölcsönhatásukat valamennyi különböző kvarkkal és antikvarkkal. A kísérletek pontosan igazolják, hogy a

gluon szintöltése (azaz csatolása az erős kölcsönhatáshoz) a kvarkokénál  $9/4$ -del erősebb. El kell felejtelnünk tehát Keresztesi Miklós tiszta színű és szintelen gluonjait, amelyek *A kvarkok, gluonok színesek* című fejezetében, valamint a 12., 19. és 20. ábrán szerepelnek. A cikkben nincsenek hivatkozások, nem tudom, mi lehetett e képtelen elképzelés forrása.

Jobban oda kell figyelnünk arra, mit publikálunk A FIZIKA TANÍTÁSA rovatban: tudományos cikkben elmegy valamilyen unortodox egyéni elképzelés vagy értelmezés, de tanításiban nem, ott ragaszkodnunk kell a tudományos közvélemény által elfogadott tételekhez.

*Horváth Dezső*

Wigner Fizikai Kutatóközpont  
és Babeş–Bolyai Tudományegyetem

## HÍREK – ESEMÉNYEK

# MAFIHE, AVAGY 35 ÉVE A FIZIKUSHALLGATÓK SZOLGÁLATÁBAN

Szigeti Balázs Endre, Rábóczy Bence, Dobos Csenge  
A Mafihe volt és jelenlegi elnökei

A közismert történet szerint a Mafihe-t (Magyar Fizikushallgatók Egyesületét) 1988-ban alapította 137 magánszemély. A közszájon forgó legendát persze tovább erősíti az a dokumentum, amely megtalálható a Mafihe általában zsúfolt irodájában. Ha végignézünk az aláírásokon, láthatjuk, hogy az akkor fiatal hallga-

tók és friss diplomás fizikusok ma már egyetemi tanárok, tanszékvezetők, akadémikusok lettek. Az Egyesület az elmúlt harmincöt év alatt – az alapítóinkhoz hasonlóan – fiatal lelkes társaságból egy sikeresen működő szervezetté vált. Ezen idő alatt, 28 különböző elnök irányítása mellett, az Egyesület sokat változott és fejlődött, de úgy gondoljuk, hogy eredeti céljainkat mindvégig megőriztük. De melyek is valójában ezen célok? Az Egyesület Alapszabálya szerint:

„Az Egyesület célja, hogy hozzájáruljon széles látókörű, modern szemléletű, már a pályájuk kezdetén értékes hazai és külföldi tapasztalatokkal rendelkező fizikusok képzéséhez a magyar tudomány színvonalának további emelése érdekében; lehetőséget biztosítson az elméleti, kísérleti, fejlesztési vagy oktatási



*Szigeti Balázs Endre*, fizikus, a Mafihe volt elnöke (2017–2018). Jelenleg a Wigner FK Elméleti Osztályának tudományos segédmunkatársa, az ELTE Fizika Doktori Iskola doktorandusz hallgatója. Az ELTE Egyetemi Doktorandusz Önkormányzatának elnöke.



*Rábóczy Bence*, fizikus, a Mafihe jelenlegi elnöke. A Wigner FK Nagyenergiás Fizikai Osztályának gyakornoka és az ELTE TTK Geofizikus MSc szakának hallgatója.



*Dobos Csenge*, fizikus, a Mafihe volt elnöke (2020–2022). Jelenleg az ELTE TTK Fizikus MSc szakának hallgatója.

munkával foglalkozó hallgatók tudományos tapasztalatcseréjére hazai és nemzetközi szinten egyaránt; támogassa és ösztönözze a tagság nyelvtanulását, és lehetőséget biztosítson a nyelv gyakorlására, hangsúlyozottan szakmai témákban, hazai és nemzetközi fórumokon; tevékenyen részt vegyen mind szélesebb körű nemzetközi együttműködés kialakításában; lehetőségeihez mérten támogassa tagjainak kulturális és sporttevékenységét; lehetőségeihez mérten tudománynépszerűsítő tevékenységet folytasson.”

Kezdetben – természetesen – az Egyesület céljai jóval egyszerűbbek voltak. A rendszerváltás környékén egy fizikushallgatónak sokkal kevesebb lehetősége volt részt venni a nemzetközi tudományos életben, a Mafihe viszont esélyt teremtett arra, hogy ez megtörténhessen, és a magyar hallgatók külföldi tapasztalatokra tehessenek szert. A hallgatók helyzete az eltelt idő alatt jelentősen változott, így az igényekkel együtt az Egyesület céljai is folyamatosan bővültek, ami ehhez a viszonylag bonyolult jogi megfogalmazáshoz vezetett. Mára például sokkal több lehetőség van a nemzetközi tudományos életbe való bekapcsolódáshoz, így bár az Egyesület tudományos kapcsolatszervezői feladata továbbra is jelentős maradt, a hangsúly fokozatosan áttolódott a közösségszervezés felé. Olyan programok szervezésére törekszünk, ahol a szakmai fejlődés mellett a közösségi élmények szerzése, ismerkedés is jelentős szempont. Ez különösen fontossá vált – illetve jelentős kihívást teremtett az elnökségnek – a koronavírus-járvány alatti és az azt követő időszakban. A fizikushallgatók számára szervezett programok mellett sok energiát fordítunk a fizika népszerűsítésére a laikusok, illetve a közoktatásban résztvevő diákok körében. A korábbi években folyamatosan részt vettünk a *Kutatók Éjszakája*, illetve a *Fizika Mindenkié* szervezésében, emellett többek között szerveztünk közös előadás-sorozatot a Csodák Palotájával is. Az Egyesület a jövő fizikatanárait is bevonja munkájába, számos tanári képzésben résztvevő hallgató vállalt már tisztséget nálunk és közülük sokan

érdeklődnek programjaink iránt is, ezzel kialakítva egy szinttől független kapcsolati hálót a következő generáció fizikával foglalkozó szakemberei között.

Hogy milyen programokat is szervezünk? Idén 16. alkalommal került megrendezésre a Mafihe Téli Iskola (TISK). A TISK célja, hogy áttekintést nyújtson egy adott résztudomány-területről, az ott zajló kutatásokról, egészen az alapoktól a legfrissebb eredményekig.

Az egyetemi tanulmányokon túlmutató ismeretek megszerzése mellett a hallgatóknak lehetőségük van megismerkedni a hazai tudományos élet szereplőivel és más hallgatótársaikkal. Emellett a TISK jó lehetőséget biztosít, hogy a hallgatók megtalálhassák leendő TDK, illetve szakdolgozati témavezetőjüket.

A TISK mellett rendkívül fontos programunk a rövidebb-hosszabb megszakításokkal, de rendszeresen megszervezett nyári iskolánk. Az első ilyen esemény 1993-ban került megrendezésre, amelyet azóta nemzetközi nyári iskolává fejlesztett az Egyesület, így jött létre a Balaton Summer School (BSS). A Téli Iskolához hasonlóan az egyhetes programot egy meghatározott témának szenteljük, de igyekszünk a hazai szakemberek mellett külföldi szaktekin-télyeket is Magyarországra hívni, mint például *Peter Saulsont*, aki a 2018-as gravitációs hullámokról szóló BSS-en adott elő. Az iskolán rendszeresen és nagy számban vesznek részt külföldi hallgatók is, akik mindig pozitívan számolnak be az eseményről.

Tudományos programok mellett nemzetközi kapcsolatok fenntartására is törekszünk: idén lesz egy évtizede, hogy megszervezzük csereprogramunkat a Német Fizikushallgatók Egyesületével (JDPG). A tavalyi év során Münsterbe utazhattunk, idén mi várjuk szeretettel német kollégáinkat. A jelenlegi elnökség törekszik arra, hogy más országok egyesületeivel is hasonlóan sikeres programot indíthassunk el. Részt vettünk és veszünk olyan hazai és nemzetközi versenyek lebonyolításában, mint a NYIFFF (avagy a Nyílt-helyi Fifiqs Fizikus Feladatok), vagy a PLANCKS. Az Egyesület többször szervezett már nyugat-európai tanulmányutat, ahol közösen ellátogattunk például a világ legnagyobb részecskefizikai kutatóintézetébe, a CERN-be. Itt mindenki megtapasztalhatja, mi az, hogy „nagyműszer”. A közeljövőben Saint-Paul-lès-Durance-ban a Nemzetközi Kísérleti Termonukleáris Reaktort (ITER) is szeretnénk megtekinteni. Ezen kívül a magyar fizikus hallgatóknak a Mafihe-n keresztül lehetőségük van eljutni a minden évben megrendezésre kerülő International Conference of Physics Students-re (ICPS). A konferencia célja, hogy lehetőséget teremtsen a világ minden tájáról érkező fizikushallgatók számára, hogy találkozzanak, beszélgessenek a tudományról és az életről, gyakorolják kutatásaik bemutatását és jól érezzék magukat. Büszkék vagyunk, hogy

# MAFIHE

A Magyar Fizikushallgatók Egyesületének logója

A 16. Téli Iskola résztvevői a Wigner FK-ban

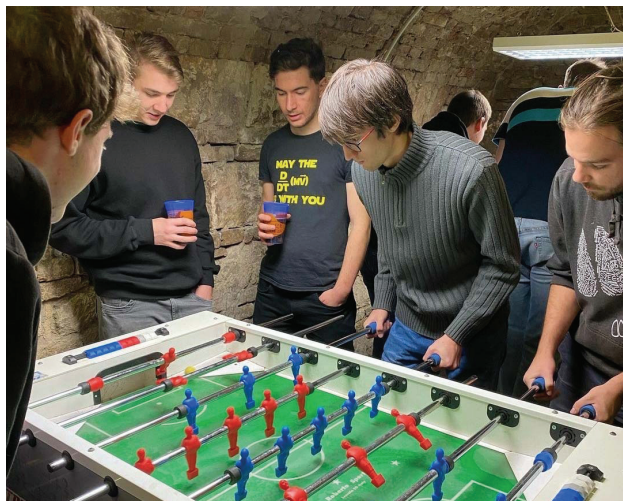


az első ilyen konferenciát 1986-ban Budapesten szervezték, amelyet még négy magyarországi konferencia követett (1987, 1996, 2001, 2011), amely mindmáig rekordtartó. Az első ICPS-nek kevesebb mint ötven résztvevője volt, de azóta a konferencia jelentősen megnőtt, napjainkra több mint négyszáz diák vesz részt a világ minden tájáról. Az idei konferenciát Manilában, a Fülöp-szigeteken rendezik meg.

Az országos és nemzetközi programok mellett fontos számunkra a helyi szinten végzett munka is. Helyi bizottságaink révén aktívan jelen vagyunk a nagyobb egyetemeken (ELTE, Szeged, Debrecen, Pécs) és igyekszünk a hallgatók számára szakmai (TDK Hétvége) mellett kulturális (Fizikus Színház, Teaház, Tea és Kex), sport (Fizikus Foci), és egyéb közösségépítő eseményeket (Társas est, Csocsó Bajnokság, Komplex Számháború, Mafihe Bogrács) szervezni. Az események szervezése mellett fontos számunkra, hogy közvetlen módon, illetve folyamatosan segítsük a hallgatók egyetemi előremenetelét, erre jött létre például a FÓKA (Fizika OKtatás az Alapoktól) az ELTE-n, ahol a hozzáértő felsőbb éves hallgatók rendszeres és ingyenes korrepetálást nyújtanak azoknak, akik ezt igénylik. A hazai hallgatói élet szervezésében különösen fontos szerepet játszanak a helyi bizottságok által szervezett hétvégék, amelyek során ellátogatunk az adott egyetemi városba, és szakmai, illetve kulturális programokon veszünk részt. Ezen események, sajnos – sok máshoz hasonlóan – megszakadtak a koronavírus-járvány következtében, de az utóbbi időben igyekszünk újraéleszteni ezt a nagyszerű hagyományt.

Összefoglalva az Egyesület igyekszik a hallgatók változó igényeihez alkalmazkodni, és olyan stabil szervezeti háttérrel biztosítani, amely elősegíti az ifjú fizikusjelöltek fejlődését. Természetesen ebben az évben is szeretnénk megszervezni ezeket a népszerű programokat, amelyekre szeretettel várunk minden múltbéli, jelenlegi és leendő Mafihe-tagot. Abban az esetben, ha szeretnéd tevőlegesen is segíteni az Egye-

Játékosok az ELTE Helyi Bizottság csocsóbjajnokságán



2019-re az ICPS hatalmas nemzetközi konferenciává nőtte ki magát.

sület munkáját, vedd fel gondolataidat, és legyél része a Mafihe aktív és jókedvű csapatának. Megtalálsz miniket személyesen a Mafihe irodában, az ELTE Lágymányosi Kampusz Északi tömbjének 3.98-as szobájában, ahol mindig pezseg az élet, vagy vedd fel velünk a kapcsolatot a mafihe@mafihe.hu e-mailen keresztül!

A programok szervezésében komoly segítséget nyújtanak az olyan hazai, illetve nemzetközi partnereink, mint a Wigner Fizikai Kutatóintézet, az Eötvös Loránd Fizikai Társulat, az ELTE Fizika Intézet, a Morgan Stanley Magyarország, a Hiflylabs Zrt., a Semilab Zrt. vagy az International Association of Physics Students (IAPS). Ezúton is köszönjük a támogatásukat. Munkánk során igyekszünk együttműködni és segíteni más hallgatói szervezetek munkáját, így folyamatos kapcsolatban vagyunk például az egyetemeken működő hallgatói önkormányzatokkal.

A Magyar Fizikushallgatók Egyesülete a maga 35 évével Magyarország egyik legidősebb civil szervezete. Ezalatt az idő alatt az Egyesületet mindvégig fiatal fizikushallgatókból álló elnökség igazgatta, amelynek összetétele ráadásul folyamatosan változott, ahogy a tisztségviselők végeztek egyetemi tanulmányaikkal. Továbbá az Egyesület nem folytat gazdasági tevékenységet, jogállása közhasznú, kizárólag az éves, csekély összegű tagdíjából, adományokból és az országos események részvételi díjaiból tartja fenn magát. A fentieket figyelembe véve ez a 35 év valóban figyelemreméltó. A dinamikusan változó vezetőségi gárda és a viszonylag alacsony bevételi források által okozott nehézségeket és esetleges hiányosságokat kompenzálja a tisztségviselők és a tagok lelkesedése, a fizika és ezen közösség iránti szeretet és elköteleződés. A Mafihe ma nem létezhetne, és nem dolgozhatna továbbra is a magyar fizikushallgatókért mindazon elnökségek, feladatvállalók, illetve tagok munkája nélkül, akik a múltban önkéntes alapon építették ezt az Egyesületet, illetve a jelenben aktívan dolgoznak annak további működéséért. Ezt a cikket mindazoknak ajánljuk, akik részt vettek az Egyesület munkájában. Reméljük, találkozhatunk mindenkivel az idei 35-ik születésnapon, amelyet a nyár folyamán rendezünk meg. Mindenkit szeretettel várunk, pontos részletekért figyeljétek honlapunkat: <http://mafihe.hu>.

