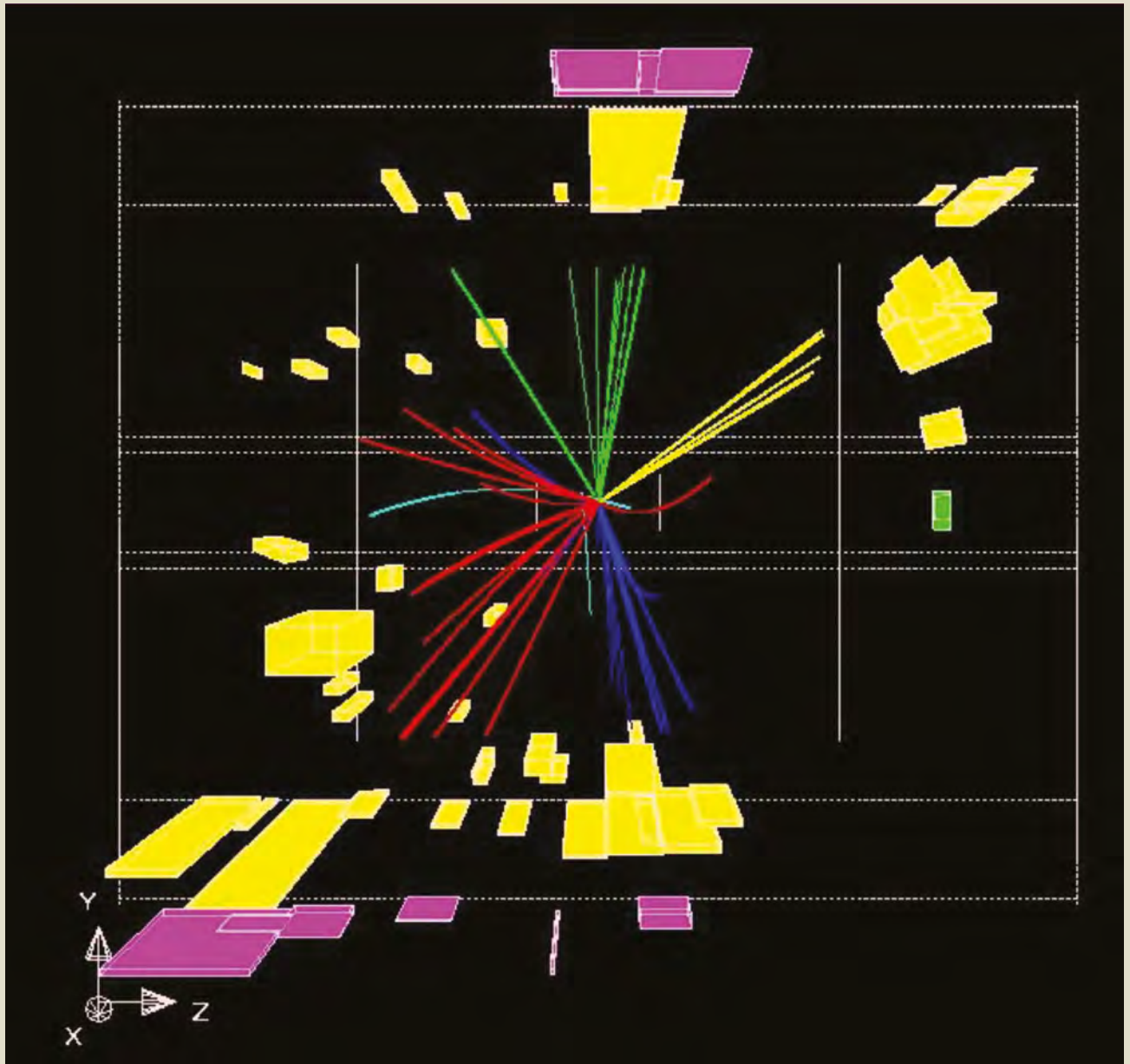


fizikai szemle



2025/6

nka

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

SZERKESZTŐSÉG:

Felélő szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő

Olvasószerkesztő: Bodrog Zoltán

Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG:

Asbóth János, Biró László Péter, Csengeri Kamilla, Czitrovsky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Járjai-Szabó Ferenc, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Pásztor Gabriella, Sándor Bulcsú, Simon Ferenc, Simon Péter, Sódor Ádám, Sükösd Csaba, Szabó Gábor, Takács Gábor, Trócsányi Zoltán, Ujvári Sándor

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

Kiadja és terjeszti az Eötvös Loránd Fizikai Társulat,
1092 Budapest, Ráday utca 18. földszint III.

Telefon/fax: (1) 201-8682

Felélő kiadó: Groma István főtítkár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

<http://fizikaiszemle.elft.hu>,

e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

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



Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felélő vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató. Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán. Az egyes számok ára: 1800,- Ft (a dupla számoké 3600,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

LEP-esemény az OPAL detektor észlelésében, amelynek során egy elektron-pozitron ütközésben W^+W^- bozonpár keletkezik, majd négy kvarkra bomlik

TARTALOM

Bérczi Szaniszló: Ősfizika: A gondolkodás megalapozása kimondható fogalmakkal 181
A cikk a nyelvi evolúció kutatásának néhány alapvető megállapítását kívánja bemutatni egy alapvetően természettudományos háttérű olvasókörzsönként számára. Az ismertett téma alapigondola az, hogy bár a nyelv maga folyamatosan változik, a legalsó, legősibb réteg mind a mai napig jelen van és felismerhető. Ennek struktúrája leképezi a nyelv kialakulásakor a nyelvi közlés szempontjából legfontosabb jelenségek körét – ez az „ősfizika”.

Földes István: Néhány szó a lézeres fúzióról 188
Az energiaválság és a klimatikus katasztrófa mindenhol ráirányította a figyelmet az új, a légkört kevésbé szennyező energiaforrásokra. A fúziós energia egy ilyen lehetőséget jelent, ahol az elmúlt években a kísérleti megvalósításban áttörést sikerült elérni. Az ezzel kapcsolatos kérdésekről szól az írás.

Horváth Dezső: Milyen nehezek a gyenge bozonok? 191
A gyenge kölcsönhatás közvetítő három részecskéről, a gyenge bozonoknak becézett W^+ , W^- és Z részecskékről tulajdonságairól szól a cikk. Ezek a részecskék egyáltalán nem gyengék, csak nagyon nehezek, azaz nagy a tömegük, és emiatt látszik gyengének kis energiánál az általuk közvetített erő.

Illy József: Michelson, Morley és Miller. A híres kísérlet utóélete 198
Michelson és Morley 1887-es híres kísérletét Lord Kelvin tanácsát követve Morley és Miller 1902-öt követően négyszeres érzékenységgel berendezést építve megismételte. Ugyancsak vizsgálták a kísérlet eredményét egy magaslaton épített, könnyű szerkezetű kunyhóban és a Mount Wilson Observatóriumban is. Az eredmények későbbi, gyakran egymásnak ellentmondó értelmezéséről szól az írás.

A FIZIKA TANÍTÁSA

Pesthy Sándor Gergely, Pesthy Dorottya, Hömöstrei Mihály: A természettudományos érdeklődés és a kreativitás összefüggései – hogyan segítheti egymást a fizika- és rajztanár? 203
Az írásban egy középiskola diákjai esetén vizsgálják, hogy a kreativitás Torrance-féle négy komponense valamint egy rajzi feladat kritériumainak teljesítése hogyan függ össze a diákok fizika iránti attitűdjével, valamint a fizikából nyújtott teljesítményükkel.

Härtlein Károly: Hordó alakítása vákuummal, túlnyomással és lökeshullámmal 208
A cikk témája a nyomás, a nyomáskülönbség és az általuk létrehozott erők szerepeltetése a fizikaoktatásban. Ez az írás bemutatja, hogy mekkora erők hatnak a nyomással terhelt hordókra.

KÖNYVESPOLC

Radnóti Katalin: A zseni, aki megváltoztatta a történelmet 214
A Helikon Kiadó 2024-ben ismét kiadta William Lanouette Szilárd Leó életét feldolgozó könyvét.

HÍREK, ESEMÉNYEK

Beszámoló az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2025. május 10-ei küldöttgyűléséről 216

Sz. Bérczi: Primordial physics: The foundation of thinking in terms that can be spoken

I. Földes: A few words about laser fusion

D. Horváth: How heavy are the weak bosons?

J. Illy: Michelson, Morley and Miller. The afterlife of the famous experiment

TEACHING PHYSICS

S. G. Pesthy, D. Pesthy, M. Hömöstrei: The connections between scientific interest and creativity – how can physics and art teachers help each other?

K. Härtlein: Barrel shaping with vacuum, overpressure and shock wave

BOOKSHELF

K. Radnóti: The genius who changed history

NEWS, EVENTS

Delegate assembly of Roland Eötvös Physical Society

Fizikai Szemle
MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap



ŐSFIZIKA: A GONDOLKODÁS MEGALAPOZÁSA KIMONDHATÓ FOGALMAKKAL

Bérczi Szaniszló
ELTE TTK, Fizikai Intézet, Budapest
E-mail: bercziszani@staff.elte.hu

Bevezetés

A fizika tárgya a mai felfogásban az egész természetben érvényes legalapvetőbb elemi jelenségek tanulmányozása és a legáltalánosabb törvények felderítése (Berényi, 1997). Sok más meghatározása is van a fizikának (Woy-

narovich, 2012), de ez a legnyitottabb a korábbi idők felé. Miért? Mert a természet ismerete létkérdés volt az ember számára ősidők óta. A legfontosabb ismereteket, figyelni-valókat mindig közölni akarta az ember a társaival.

A fizikát bemutató gondolatmenetek megállnak a jelenben használt fogalmak és törvények fölismerésénél



1. ábra. A korai közlésmód, a mozgással utánzott képi gondolkodásvilág volt. Ez a használati helyzetek szerint csoportosította a képi fogalmakat. Ez a gondolatvilág alakult át a későbbi, már hangokkal jellemző közléssé. A két korszak határán játszódott le a gondolkodás első nagy forradalma. A kétféle látásmód közötti átmenet idején született meg a beszéd. A beszéd születése az ősfizika kora



Bérczi Szaniszló fizikus, csillagász, planetológus. Az ELTE TTK-n szerzett fizikus-csillagász oklevelet (1975), doktorát matematikából (1987), majd a földtudomány (planetológia) kandidátusa (1995) címet szerezte meg. 50 éve tanít az ELTE TTK-n. 2000-tól pedig a Fizikai Intézet docense az Anyagfizikai Tanszéken (2013-tól nyugállományban dolgozik). A planetológiában, kozmikus és földi anyagvizsgálatokban, a szimmetria témakörben, valamint az eurázsiai műveltségek fejlődésének témakörében végzett kutatásokat. Egyik fő munkája a „Kristályoktól bolygótestekig” c. monográfia, amely a Föld típusú bolygókat és a Naprendszer ásványi anyagain (meteoritok, holdközetek) tárgyalja (Akadémiai Kiadó, 1991).

(Simonyi, 1978), és nem vizsgálják az ősből fogalmi viszonyokat. Pedig a beszédünk, maga a nyelv hatalmas emlékkincset őriz a korai fogalomvilágról. S mivel ezek a hangzó fogalmi elemek is „az egész természetben érvényes legalapvetőbb elemi jelenségek” megragadását célozták, ez a vizsgálat magához az ősfizikához nyúlik vissza.

Ősfizikai vizsgálódásainkkal a beszéd, a gondolkodás és az ismeretek születésének korát is keressük. Gondolko-

dásunk fejlődéstörténetét két nagy korszakra bonthatjuk. A korábbi a látott képek és mozgások útján végzett ismeretregisztráció és ismeretátadás a közlésben. A későbbi a beszéd fejlesztő hatására létrejövő elvontabb gondolkodási forma, mely a hangképletek útján adja át az ismereteket.

Mindkét gondolkodási rendszer a közlés céljából szervezett ismeretek elrendezését jelenti. Közülük a beszéd közlési rendszere az, amelyik részletesebb, kifejthetőbb, s fejlődése töretlenül nyúlik a mai beszédhasználatig. Fő vonásaiban azonban megőriztük a mozgásokkal végzett képi közlési formát is. Képzeljünk el egy mozgásbeszéddel bemutatott eseményjátékot (például egy tábornótúznél). A közlés fejlesztésén dolgozó emberi képzelet és hangformálás nagy munkát végzett el, amíg az esemény-sort mozgásokkal történő bemutatással elkezdve, a hangok segítségével „vegyes” közlésűvé téve, majd fokozatosan egyre több hangképletet beiktatva a közlési sorba, eljutott odáig, hogy már szinte végig csak a hangokból összeépített hangképletsorozattal fejezze ki azt, amit közölni akart egy eseményről.

Hogyan válik szét a képek nyomán rendezett látás (és gondolkodás) és a hangokkal megszervezett beszéd utáni látás (gondolkodás)? Mielőtt a mai nyelvünk szerkezeti elemzésével ennek részletes bemutatásához kezdenénk, fontos hogy rámutassunk az alapvető különbségre a képi közlés (és emlékezés), valamint a hangzó közlésben megjelenő közlés között. Ehhez egy rajzsorozatpárt (1. ábra) illesztünk a képi szerveződésű ismeretek gondolati rokonságáról (*bal oldali ábra*) és a beszéd nyomán szerveződött ismeretek gondolati rokonságáról (*jobb oldali ábra*).

A korai közlések idején a vízzel kapcsolatos emlékek képek a víz használatáról, a vízhez kapcsolódó tapasztalatok, cselekvések világáról társítanak össze élethelyzeteket a gondolkodásban. Ezek közül ragadjunk ki egyet, amit a hangzó világban megnevezünk: a víznek tükröz a felszíne. Ez a „tükrösség” a tó hangcsoporttal kifejezett fogalomban benne van. De mi a hangzó tó fogalomnak a hangalakja szerinti fogalmi rokonsága? A hangképletekben megfigyelhető az, hogy a tó „rokona” a tő, a tű, az út, az át, az ét(el) (ital), az üt hangképlet. Ezekben a t hang a közös – formailag. De a tárgyat (az élethelyzetet), – a tájban lévő tó képét – a hangképlet jelentésértékén idézzük fel gondolatainkban. Annak az okát kell megkeresnünk, hogy mi az a közös tulajdonság, ami a hangképletek jelentésértéke szerint is megmutatkozik a tó, tő, tű, te, üt, út, át, ét élethelyzetekben. Egy ilyen megfigyelhető tulajdonságot találunk, s ez a „megkettőzöttség”. Végigkövetve a tó, tő, tű, te, üt, út, át, ét élethelyzeteket, mindegyikben megtaláljuk azt, hogy két rész, két (szinte) azonos (hasonló) rész van jelen bennük egyszerre és elválaszthatatlanul. Hangjuk eredete minden bizonnyal ez lehet. Ez a képesség még az angol megfelelő szavakban is részben jelen van: te – thou, üt – hit, út – path, át – through, ét – eat. De jelen van a kettőzöttség az at – nál (-nál, -nél), a to – nál (-hoz, -hez, -höz) alapszavakban is, hiszen mindkét esetben két szereplő van jelen.

Fogalmi rokonság a képi és a hangzó közlések világában (Egy gondolkodási forradalom szerkezete)

A tó képi fogalmi rokona a napi életben a hullámmás, a sok víz, ami tükröz, tükrözi a körülötte lévő tájat, s magával hozza a víz ihatóságát, a víz hidegségét, a vízbe csapó ember számára a víz szétfröccsenését, a vízen úszó fát, a vízben úszó embert vagy halat, és még sorolhatnánk. Mennyire mások ezeknek a képi gondolatvilágban rokon élethelyzeteknek a hangzó alakjai, mint a tóhoz tartozó (a tóhoz hasonlító) hangzó megnevezésekhez tartozó képi megjelenések? Mert a tónak, a tó hangzó alakjának a fogalmi rokona a tő, a tű, a te, az ét, az át, az út, az üt. Jogosan merül fel e megfigyelés nyomán az, hogy a hangzó beszéd születése egy hatalmas fogalomrendszer-váltást jelentett a képi gondolkodást követő időkben.

Ma a gondolkodásunk a beszéd nyomán a hangzó világot transzformálja a képi világba. A hangzó kép földézi agyunkban az élethelyzetek képi látását. Egykor még, a beszéd születése előtt nem volt szükség erre a hang-kép átalakításra a közlés során, mert a mozgásokat utánzó beszéd közvetlenül a jelenségsor képét tette láthatóvá. Milyen lehetett a mozgásos közlés korában az élethelyzeteket emlékezetben megtartó és összekapcsoló fogalmak „rokonsága”? A mozgással utánzó közlés egészen hosszú tevékenységi szakaszokat tudott átadni a közösségnek. Ez kapcsolhatta össze a helyzeteket. Például az esti tábornótúznél. A mozgással kísért jelenetek a nézők értésére adták, hogy most vonul a csapat, most átkel egy patakon, nádason, most riasztja a vadakat, madarakat stb. Ezt a jelenetsort hangzó hatásokkal még élethűbbé tudták tenni. De a hanghatások, – ugyanúgy élethelyzet-utánzások – csak kiegészítő színfoltok voltak, színezték a közlést, és pontosabbá tették. Mert az előadásban bemutatott fogalmak kapcsolata ebben a közlésben a képi egységekre épült. A lábunk járt, a kezünk kapaszkodott, markoltuk a botot stb., amikor patakhöz értünk, akár ihattunk belőle. Éreztük szinte a víz fröccsenését, a sáros mocsárba süllyedő lábunkat, a víz hidegségét. A sorolt élethelyzetek voltak az elsődleges képek, amiket a vadászati „előadás” földézett. Ezeket kapcsolta össze a vadászat eseménysora. Más esetben egy-egy élethelyzet jelenségvilágának a „vonzáskörzete” tartotta össze őket.

Egy biztosan megállapítható: a mozgásbeszéddel földézett élethelyzetek képe más kapcsoltságok formájában (más gondolkodási szerkezettel) volt jelen hangzó beszéd előtti gondolatvilágunkban, mint a beszéd utániban. Ez sokféle módon is megvalósult. Agyunkban a vízhez az ivás, a loccsanás, a lassú megszáradás, az úszás, a vízben úszó hal és még sok száz életkép „jelenség-rokona” állt egymás mellett a képzeletünkben. Ha megérezzük azt, hogy ez a képi jelenségeken alapuló világ mennyire más volt a képi fogalmak formájában, akkor kezd fölsejleni bennünk, milyen hatalmas gondolkodási átalakulást hozott a hangzó beszéd megjelenése.

Ezek után önként adódik egy feladat. Készítsük el a képi világ gondolatársítási térképének egy vázlatát! Ebben a jelenségtérképben a vízhez tartozó képeknél a víz ömlése, ihatása, fröccsenése, locsogása, a sáros mocsárba süllyedő lábunk, mely érzi a víz hidegségét, majd a sárban cuppogásunk, vagy a vadászat végén a fürdés a patakban, kis tóban: ezek az életképek sorakoznak a képzeletünkben egymás környezetében. (Ide idézhetjük a sima vízfelszín költői megfogalmazását Petőfi János víztézének esti képével: „Mikorra a patak vize tükörré lett, melybe ezer csillag ragyogása nézett”).

Gyermekkorunkban – de sokszor a mai pihentetőbb óráinkban is – a mi képzeletünk is a képi világ fogalmainak rokonságára, összetartozására épült. Így volt ez velünk addig, amíg iskolában nem kezdtük el tanulni a szavak leírását, hangokra való szétszedését. Megtanultunk olvasni. Később, a hangzó egységekből fölépülő beszéd szinte idegen világ lett számunkra egy darabig, amíg végül a nyelvtan egyfajta rendbe nem szedte a nyelv szerkezetét. Ma gyakran átéljük a nagy gondolkodási átalakulást a képzeletünkben, amikor az anyanyelv a képi világgal együtt gondolkodtat el valamin. Ennek a korai nagy átalakulásnak a megismerése akkor teszi izgalmas időutazássá a beszéd fejlődéstörténetét, ha a beszéd születéséig kell elhatolnunk. Ezekben az időkben zajlik le a képi közlés világának az átalakulása a hangzó közlés világává. A hangzó világnak ezeket a kezdeti lépéseit csak a beszéd elemző szétszedésével tudjuk feltárni. Igen előnyös az, hogy ehhez a feltáráshoz képeket és Venn-diagramokat is használtunk. Segítségükkel tudjuk kibogozni az ismeretek elrendezésének, a gondolkodásnak ezt az egykori forradalmi időszakát. Ez az ismeretvilág átrendezésének ideje volt a képi gondolatok kapcsolatrendszerétől a hangzó fogalmak gondolatainak kapcsolatrendszeréig. Ez lehetett – Thomas Kuhn kifejezésével – az első „tudományos forradalom” időszaka.

Első ábránk egyik fele (bal) egy gondolatársítási csoportosítást vázol föl abból a fejlődési szakaszból, amikor még a képi közlés (a használat, a természeti előfordulás, a mindennapi élet) kapcsolja össze a gondolatok körében a vizes életképeket, élethelyzeteket. A tábor-tűznél a közösségnek mutogatással „elmondott”, azaz mozgásokkal előadott események során a víz használati módjai kerülnek gondolatban egymás mellé, különféle élethelyzetekben. Az előadás során a víz tulajdonságait kell hanggal is utánozni a különféle helyzetekben. A víz nélkülözhetetlen szerepe az, ami a víz használatán alapuló gondolati képeket és a hozzájuk tartozó hanghatásokat egymás gondolati közelségében tartja. Ilyen jellegű korai gondolatársításra utalt már Bunak (1974) orosz kutató is.

Egy későbbi beszédfejlődési fokozatnál már fokozatosan kialakul, hogy a hangzó képletek összetartozása uralja a képzeletet. A hangzó képletek összetartozása úgy jön létre, hogy a hangképlet egy hasonló, közös tulajdonságot jelöl meg az élethelyzetek között. Aki ebben a fejlődési korban közölni akar valamit a közösséggel, az mozgással is, hanggal is előre végiggondolja mindkét

előadási szakaszt. Ennek során kerül előtérbe az a képesség, miszerint az előadó tudja, hogy egyrészt milyen képi gondolati körből válogassa a jelenetsoportokhoz a mozgási képeket, és milyen hangzás szerinti emlékcsoportból válogassa mellé a hangzó képleteket. Példának említem a mocsáron történő átkelést. A képek a vizes mozgásjelneti csoport szerint következnek az ősbib beszédmód szerint, de a kísérő hangzó képletek már nem csak a víz életképeihez tartozó hangokat igénylik. A hangzás szerinti emlékcsoporton jobban el kell gondolkodnia, mert a kísérő hangok nemcsak a vizes közegben lépegetve hallatszó cuppanásokból, tocsogásokból állnak, hanem a madarak és más állatok hangjaiból is. Egykor az előadónak (a „mozgásbeszélőnek”) sokszori végiggondolást jelentett a két gondolati szál összekapcsolása. Ugyanezt az erőfeszítést a figyelő hallgatóságnak is el kellett végeznie gondolatban. Egy-egy „beszélgetés” során az előadói és a hallgatói szerepek állandóan cserélődnek a közlési folyamatokban. Ábránk egyik fele a víz használatához tartozó képek gondolati képkapcsolódását, a másik fele már egy igen fejlett, a hangzó képlet szerinti jelenetsor gondolati kapcsolódását mutatja be. Ez utóbbit, a kép jobb oldalán álló és a hangzó képlet szerinti összekapcsolódást nevezhetjük már fogalmi összekapcsolódásnak.

Hogyan jöhetett létre ez a későbbi, a hangképlet-fogalmak szerinti képfelidéző rendszer, melyben a gondolatok „rokonsági viszonyai” a hangképlet erejéből táplálkozhatnak?

A fogalmi gondolkodás születése

Az ide vezető út elején az állt, hogy észrevették: az élethelyzetek összetettek. De az összetettséget akkor lehet megfogalmazni, ha szét lehet szedni a jelenséget összetevőkre. Gondolatban ezt a „szétszedést” (tagolást) először, beszéd nélkül, akkor lehet megvalósítani, ha például a tárgy maga szétszedhető. Például a fa törzse, ágai, levelei, virágai, gyümölcsei elválaszthatók a maguk tárgyi mivoltában is. De hogyan választható le egy „jelenségről” egy olyan tulajdonság, ami mozgással jár? Például az a dolog, hogy valamiből mindig kettő van, e kettő összetartozik, egyszerre születik, s egyszerre tűnik is el, vagy szűnik meg. Egy dolognak a megkettőzöttsége lényeges „összetevője” a tó tükreán keletkező képnek, a földből kihúzott bokor két lombos végének, az út és az át (-lépés) elejének és végének, a bot (és a tű) két végének, a toll két oldalának és az ütésnek (pl. kézzel a combunkra). Ezt a hasonló tulajdonságot őseink egy közös hanggal megjelölték. Az ütéshez legjobban hasonlító t hang lett ez a „közösségjel”. Azáltal, hogy ezt a hasonlóságot a felsorolt jelenségek között észrevették, és a megjelölését egy hanggal közkinccsé tették, forradalmi újítást vezettek be. Leemelték ezt a „kettőzöttség” tulajdonságot a jelenségekről. Ezek után már a „kettőzöttség” tényét egyetlen hanggal ki tudták fejezni. Ez a mássalhangzó – egy magánhangzó kíséretében – ma is őrzi ezt a fogalmat. Hogyan? Ahogy felsoroltuk: a Tó tükreán keletkező

képben, a földből kihúzott bokor két lombos vége közötti Tőben, az út és az át (lépés) elejének és végének a párosában, a boT két végében (Tű), az üTésben (pl. kézzel a combunkra). (Még több ilyen szavunk is van.) A „megkettőzöttség” ezáltal az élet új szereplője lett, amelyet a t hanggal elő lehetett hívni. (Jól fejleszti képzeletünket, ha az f beszédhangunk forrását keressük meg jelenségekben.)

Írásunk második részében, amikor Venn-diagramokon is tanulmányozzuk a beszédhangok közös képi forrását, a visszaegyszerűsödési úton járunk. Egyszerűen kimondva: a beszédhangok „szétszedése” (születési hátterének feltárása) van napirenden. Mire szedjük szét őket? Élethelyzetekre. A cél az, hogy megtaláljuk a hasonló tulajdonságú élethelyzetekben a beszédhanghoz vivő fejlesztéseket. Megjelenik számunkra az, hogy – a tartalom (élethelyzet) és a forma (beszédhang) korai egybeesése miatt – a mai beszéd legkisebb hangzó képleteivel is az egykori képi állapotot állítjuk vissza. Mert azt találjuk, hogy a hangzó képletek legősibb rétegében – a mássalhangzók világában – a beszédhang a hasonló élethelyzetek közös jellemzője. A beszédhang ősfogalom. Ezt az ősi beszédhangot (a hangzó ősfogalmat) alakítjuk vissza olyan ősi élethelyzetek képévé, amelyeket e közös tulajdonság segítségével ragadtunk meg egykor. Mielőtt részleteznénk a Venn-diagramok szerepét, tekintsünk át néhány rendezőelvet, amelyekkel a beszéd rendszerét áttekinthetjük!

Rendezőelvek

Az őskori ismeretközlő állapotok keresésénél a mai beszédet élő adatforrásnak tekintjük. Először is az élet folyamatosságából következtetéseket kell levonnunk a kezdetekre vonatkozóan. A közösség tagjai közötti korai közlésmódokból fejlődött ki a beszéd, amely kialakulásától fogva folyamatosan jelen van a közösségek életében. Az élet folyamatossága szükségszerűvé teszi azt, hogy „élet csak életből születhet”. Ugyanez igaz a mai élet részét képező beszédre is. „A beszéd is csak beszédből születhet” (a szülőkről a fiatal nemzedékre öröklődik).

Beszédünk sokoldalúan őrzi azokat a körülményeket, amelyek között megszületett. Az élethelyzetekről fölsimert összefüggések valóságosságát könnyen ellenőrizhetjük azáltal, hogy az élet természeti, testközei állandóságai ma is azok, mint amik egykor voltak. A környezet és az élet mint egy eleven öntőforma biztosítja a fölsimert dolgok azonosságát egykor és ma. A legbiztosabb élethelyzeti állandóságokat az emberi test, annak életfolyamatai, a természet folyamatai és az emberi cselekvések nyújtják.

A tapasztalás útján gyűjtött ismeretkincs egyik része az, amely a hangalakokban lett rögzítve. A másik része a beszéd szerkezetében van elrejtve. A közlésmódokban közös volt az, hogy a korai közlések tartalma az élet legfontosabb állapotjellemzőiről szólt. Az élet legősibb

állapotjellemzői az életnek az állandóságai, ismétlődő tárgyai és folyamatai. Az élet állandóságai szükségszerűen eredményezték azt, hogy ezek a beszéd állandóságai is lettek. Az egészen korai beszédfejlődési szakasz feltárásához el kell végezni a mai beszédnek mint összetett rendszernek a szerkezetvizsgálatát. Ezt az elemzést a természettudományok már régóta alkalmazott rendező elvei segítségével végezhetjük el. Ezt a rendszervizsgálatot korábban a „szétszedem-összerakom elv” elemzésével mutattuk be a *Fizikai Szemlében* (Bérczi, 2017). A szétszedem-összerakom módszerrel számos más tudományág jutott már új ismeretekhez a vizsgálata tárgyában. A kémia rendszerelemzésének vívmánya például az elemek periódusos rendszere.

A közösség élete fejlődött, összetettebb lett, s vele a beszéd is egyre összetettebb lett. Összetettsége révén a beszéd ma egy olyan hatalmas egész (egy olyan rendszer), amely részekre bontható. Mivel a részek is „kisebb egészek”, a beszéd olyan rendszer, amely részrendszerekből áll. A beszéd rendszerét a tagolása segítségével bonthatjuk fel kisebb elemekre. A beszéd és a gondolkodás – az emberi élet keretei között – hosszú időn át fejlődött, evolúciós rendszert alkot. Az evolúciós fejlődés sajátos szerkezetet kölcsönöz a keretei között formálódó rendszernek. Ez a belső szerkezet a szerkezeti hierarchia, amelyet legegyszerűbben egy beágyazásos szerkezet jeleníthet meg.

A beszéd összetettségének rendszerszintű megmutatkozása: az alkotó jelentéselemek beágyazott sorozata

A beágyazottsági sort összefoglaljuk az egyes beszédalkotó jelentéselem-típusokra (lásd ezt húsz mássalhangzóra, Bérczi 2017). Ezekben az összetettebb hangalakú jelentéselemi egység mindig tartalmazza az összes kisebbet. Ez a beágyazottsági (bennfoglaltsági) sor a következő:

egyes mondatokban a szavak,
 egyes szavakban a gyökök,
 egyes gyökökben mássalhangzók,
 egyes mássalhangzóknak az élethelyzetek (közös csoportja).
 az egyes élethelyzetekben a jellemző,
 közös vonás, hasonlóság.

A beszédben felbontással nyert, egymásra épülő jelentéselemek tehát beágyazottak. Röviden: a mondat-szó-gyök-hang beágyazási sorozatot alkot. A kisebb jelentéselemek felől (a lépcső aljáról) a mába tekintve egymásra épülésnek is nevezhetjük ugyanezt a sorozatot. Érdemes lesz különválasztani a kétféle szerkezet-sor-megkülönböztetési utat: a felbontásit (szétszedésit) és a fölépítésit (összeépítésit). A beszéd szerkezetében

rejlő rész-egész viszony lehetővé teszi a beszédben rejtőzködő felépüléstörténet megsejtését is. A kisebb egységek szükségszerűen korábbiak az összetettebb későbbiekénél, a kisebbekből összetett nagyobbaknál. A szerkezeti hierarchia föltérképezése céljából állandósult alkotóelemeket kellett felismernünk a beszéd rendszerében. Ezekre az alkotóelemekre irányult a beszéd szerkezetilemző vizsgálata. A megtalált alkotóelemek szükségszerűen kellett, hogy állandóan jelen lévő, rögzült beszédformák legyenek. De a megtalált beszéd-alkotóelemek szükségszerűen kell, hogy az életnek is állandóságai legyenek. Az életnek és a beszédnek az állandóságai szükségszerűen képeznek párhuzamot. Az élet (élethelyzetek) és a beszéd párhuzamos vizsgálata ezért egymást segítő módon történt.

A beszéd tagolása

Ha a mai beszédet élő adatforrásnak tekinthetjük, akkor a máig élő nyelvből kiindulva, a mondattól lefelé haladva s az összetettség visszabontását a kezdetekig követve megfigyelhetjük, hogy a tagolhatóság fölismerhetősége a ragasztónak (agglutinálónak) mondott nyelvünk előnye. Bennünk nem homályosult el az, miért áll egy-egy hang azon a helyén a hangképletnek – a mondatnak, szónak, ragnak, gyöknek –, ahol áll.

A beszéd legfontosabb tulajdonsága, hogy a hangképletek sora jelentéssel bír. Jelentéssel (tartalommal) bírnak a beszéd kisebb tagolási egységei is a magyar nyelvben. A beszéd tagolásával létrejövő beszédegységeket ezért nevezzük jelentéselemeknek (Czakó Gábor gondolata). A jelentéselemek olyan tagolási egységek a magyar nyelvben, amelyeknek a hangképlete jelentéssel bíró hangzó egységet jelent. Ez a jelentésérték a beszéd minden egységének tulajdonsága, ezért amikor azt állítjuk, hogy a beszédet formai szempontból tagoljuk, akkor a beszédet jelentésértékek (tartalom) szerint is tagoljuk. Mindig jelentéselemek jönnek létre, amikor a beszéd nagyobb egységeit felbontjuk jelentéssel bíró kisebb egységekre. E kisebb egységek a nyelv ragasztó természetének szellemében megőrizték azoknak a még kisebb egységeknek a csoportjait is, amelyekből kiforraltak. A jelentéselemek sorával eljutva a legkisebb oszthatatlanig, megmutatkozik a ragasztó nyelv egy másik pótolhatatlan előnye. A legkisebb jelentéselemekig hatolva olyan egységeket találunk, amelyek a gondolkodás építőköveiként tekinthetők.

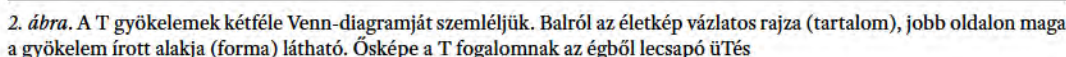
A legkisebb jelentéselemek a beszédhangok, amelyek jelentésértékkel bírnak (Czuczor-Fogarasi, 1842). Az agglutináló nyelvünk előnye annak a felismerhetősége, hogyan születtek a mássalhangzók, s velük együtt hogyan formálódott ki a gondolkodás. Ezekhez nyújt segítséget a mássalhangzóknál nagyobb beszédtagolási egységek köre: a gyökelemeké (amelyek egy mássalhangzóból és egy magánhangzóból álló hangképletek: ilyenek voltak a tő „rokonai” is.) A beszédhangok a beszéd ter-

mészetes tagolásával nyert jelentéselemek (Czuczor-Fogarasi, 1842). Igen lényeges az az elemzési eredményünk, hogy a felbontás során az egyre kisebb beszédegységek felé közeledve egyre inkább előtérbe kerül a hangképletben megfigyelhető összhang (egybeesés) tartalom és forma között. Az utolsó lépésnél, a közös mássalhangzót tartalmazó gyökelemeknél azt is felismerhetjük majd, hogy milyen szerteágazó képi, mozgási és más jelenségekre alapozott ismeretek körében születtek meg a korai hangképletek. A tartalom és a forma egybeesése mutatja, hogy őseink a valóságban ma is létező élethelyzetek „rokonságát” foglalták hangzó képletekbe.

Az élethelyzetek megfigyeléséből gyűjtött szerteágazó ismeretrendszert a gondolkodó, szerszámkészítő, vadászó ember először a mutogatásos utánzó közlésmódjával adta át a közösségnek. Tapasztalatait ezúton hasznosította a túlélésben, a közösség szervezésében. De a beszéd a maga fejlesztéseivel átrendezte a korábbi közlésrendszert (1. ábra). Ennek révén nemcsak a környező világ hangzó közölhetőségét tette lehetővé, hanem a hangzó képletek fogalmaival új szereplőket is létrehozott az életbeli helyzetek megnevezhető csoportjai körében. Az új szereplők létrehozásával utolérhetetlen előnyhöz jutott a fejlesztő emberközösség a többi létezővel szemben. Egyre összetettebb világot láthatott meg maga körül. Az egyre összetettebb világ egyre gazdagabb alkalmazkodási, túlélési, életviteli lehetőségeket teremtett. Őseink létrehoztak egy, a képi világon túlmutató gondolati tartományt, amelyben azután ugyanúgy lehetett mozogni, műveleteket végezni, tehát gondolkodni, mint addig csak a látható dolgok világában lehetett. Ezt az elvontabb világot a beszéd és a vele járó gondolkodás teremtette meg.

A beszéd jelentőségének a kutatásakor az ember gondolatvilágát erősen foglalkoztatja az, hogy ősünk miként jutott annak felismerésére, hogy valamilyen közös dolog hanggal közölhető. Az első lépés kétségtelenül a mozgással együtt születő hangokra való emlékezés volt. Erre a gondolkodást is jelentő emlékezetre akkor lehetett szükség, amikor hasonló hangok különféle más és más mozgási vagy élethelyzetekben is keletkeztek. Ha az emlékezés megtörtént, azt követhette a tudatosabb keresés, hogy ha már csámcsogó-cuppogó hang evésnél, vagy vizes réten, nádasban járásnál is megjelent, milyen más csapkodó, szürcsölő, csiripelő élethelyzetekben kerülhetett sor még rá. Az a fogalom, amit ma hasonlóságnak nevezünk, fokozatosan bontakoztatta ki a hatását az emlékezetre az ilyen hangképlet-jelenségtípusok párba állítása, csoportosítása révén.

A beszéd közösségi hasznosságát akkor tudjuk igazán felmérni, ha fölvezetjük a korai kibontakozás első lépéseit. Hogyan épülhetett fel a fogalmak világa, (az ősfizika), az ősfogalmak világa? Ehhez az ősi állapotoktól elindulva kell végiglépdelnünk a beszédépülési lépcsőfokokon (a szerkezeti hierarchián). Ekkor az tudatosul bennünk, hogy az egyre összetettebb hangképletek születésének feltétele az volt, hogy a kisebb jelentéselemek már korábban megszülessenek. A korai fogalmak szüle-



láltuk, hogy a legnagyobb természeti ütés, a villámcsapás volt ez a fogalomrendező jelenség. (Az emberré válás régészete jelzi, hogy a villámcsapás nyomán keletkezett tűz milyen fontos szerepet játszott az ember fejlődéstörténetében.)

A mássalhangzós ősfogalmak születése: a testünk jelenségeiben gyökerező hangképletek rögzítése

Mire utal modellünk a korai „mássalhangzó-ABC” kialakulásáról? Gyűjtsünk össze néhány, a testünkön képződő hangot! Kiindulásul az eddig feltárt hangzóképleti forrást használjuk. Abc-sorrendben haladunk: B – Bőf (a bőfögés hangja), Cs – Csám (a csámcsogás, csócsálás hangja): F – Fú (a felső fogsor és az alsó ajak közötti kifúvás hangja). H – Hú (erőteljes kilehelés a szájüregből), vagy éH (az éhes ember üres szájára utal). K – höK (a visszariadás, a visszahőkölés hangja). eM – (a csecsemő „emésének” – ma a szopásának – a hangja). NY – Nye (a nyelv kinyújtását kísérő hang). P – léP, taP (a lépés puha nesze, hangja). R – hoR (a horkolás hangja, erősen ismétlődik). S – eS (a leesés, a suhanó test, a pataokban sustorgó vízmozgás hangja), Sz – Szí (a sziszegő szívás, és a szuszogás hangja). T – üt (az ütés hangja). V – V (a benntartott fújás hangja), Z – moZ (a zümmögéssel a mozgásra kiterjesztett hang). (Részletesebb bemutatás a függelékben.)

Összegzés

Az „ősfizika” tárgya az egész természetben érvényes legalapvetőbb elemi jelenségek tanulmányozása és a legáltalánosabb „törvényszerűség-megragadások” felderítése. Simonyi Károlyt olvasva, könyve elején (A fizika kultúrtörténete) látjuk, hogy szinte megáll a gondolatmenetében, amikor a fizikai törvény kifejeződését elemzi: szinte megdöbben, hogy hiszen azoknak, akik törvényszerűségeket fogalmaztak meg „már kész, jól megformált” fogalmaik voltak. Ezeket a fogalmakat a közlésben már használták. Gondolkodásunk alapozása egy ősi közösségi műveletre (élettevékenységre) megy vissza. Ez a közlés.

A világról alkotott kép és a közlésmód is nagymértékben átalakult a közlés fejlődéstörténete során. A korai közlésmód a mozgással utánozott képi gondolkodásvilág volt. Ez alakult át a későbbi, már hangokkal, beszédhangokkal jellemző gondolkodásvilággá. A két korszak határán játszódott le a gondolkodás első nagy forradalma. A kétféle látásmód közötti átmenet idején született meg a beszéd. A beszéd születése az ősfizika kora.

Irodalom

Berényi D. (1997): A fizika helye és szerepe a tudományban és a társadalomban. *Fizikai Szemle* 1997/4, 139.

Bérczi Sz. (2016): A gondolkodás és a beszéd művészetének felvirágzása a korai időkben a Kárpát-medencében és Euráziában. *Eurázsiai művészetek* 31. TKTE, 52. old. Pirehab, Debrecen

Bérczi Sz. (2017): A szerkezeti hierarchia és a fölépítés-lebontás (szétszedem-összerakom) elv. *Fizikai Szemle*, 67/1, 32–36.

Bérczi Sz. (2020): *A beszéd eredete*. Püski. Budapest

Bérczi Sz. (2023): Ősfogalmak hangalakban: együtt és szétrendeződve. Eurázsiai körkép. In: *Körösi Csoma Sándor Tények és érvek a magyarságkutatásban*. Ferenczné Szöcs Éva (szerk). 169–197. Körösi Csoma Sándor Közművelődési Egyesület, Kovászna

Bunak V. V. (1974): A gondolkodás és a nyelvi képesség fejlődési szakaszai és kutatásuk útjai. In: *A nyelv keletkezése*. Papp Mária (szerk.) 259–283. Kossuth, Budapest

Czakó G. (2011): *Eredeti magyar nyelvtan*. CzSimon Könyvek, Budapest

Czuczor G., Fogarasi J. (1862–1874): A magyar nyelv szótára. Akadémiai Kiadó, Budapest, (2003) Arcanum. CD ROM

Simonyi K. (1978): *A fizika kultúrtörténete*. Gondolat, Budapest

Woynarovich F. (2012): Milyen tantárgy a fizika? *Fizikai Szemle*, 2012/6, 205.

Függelék

Érdemes megvizsgálnunk, hogy milyen jelenségtípusnak lettek jelölő hangjai testen keltett hangok. Ennek az első lépéseként válaszoljunk arra kérdésre, hogy a közeli és a távoli jelenségnek a hasonlóságát fölismerve milyen hangzó képlet útján kapott korai megjelölést az adott hangzó képlettel a testhangról a távoli jelenség! Ha például látótávolságban a villámcsapás ütest mért egy földi testre (pl. fára), miként kapta a hangalak általi összekapcsolást a testre mért ütéssel? Ezt követő kérdésünk pedig, hogy a – vélhetően – első gondolati összekapcsolást hogyan követte ugyanennek a hangképletnek a többi hasonló jelenségre való kiterjesztése.

B – Bőf (a bőfögés hangja). – A szarvasbögés hangosabb, de hasonló eredetű jelenség. Belülről omlik ki valami. (Búval Bélelt, Búsul, Baj, Búz, Bél)

CS – CSám (CSámCSogás, CSóCSálás, a szájban a nyállal forgatott étel evésének a hangja). – A vízben „CSörömpölve mozgó testdarab hangja révén is keletkezik. (Például: CSap, toCSog)

F – Fú (a felső fogsor és az alsó ajak közötti kifúvás hangja). – A szél fújása jól utánozható vele (ami átmehet a Füttylésbe).

H – Hú (erőteljes kilehelés a szájüregből), vagy – éH (az éhes ember üres szájára utal). – A hiányzó valami közös bennük: pl. (1) Hó – nincsen szín a tájban; (2) Hő – nem látszik a meleg forrása; (3) Hely, Hol – üresség van ott; (4) Hí(v) – hívja, mert nincs ott, azaz üres a helye. (5) Ha – még üres a „megvalósulás”, de lehet, hogy megtörténik; (6) óHaj, óH (bárcsak lenne ...), (7) Hajó (= Háj) – a körbevett üres tér miatt lebeg a Hajó a vízen (8) a Hőköl, – a meglepetéstől visszariadó ember Hőkölésének a hangja, a nyitott szájjal visszkapott levegő miatt.

K – höK (most a K-ra összpontosítunk: a visszariadás, a visszahőkölés hangja, a levegőbeszívás megakasztásával). – A visszahőkölés a megakadást jelenti és ez a tulajdonság megy át a Kő-re, ami megakaszt a haladásban, abban az irányban, s keménysége is olyan, mint az éKé. De ezt a tulajdonságot jelöli a testnek határt képező, de egyúttal Kemény testrészek első hangja is: Köröm, Kéz, Kar, Könyök, öKöl. (A K zöngés párja, a G szintén határt is jelöl, pl. -iG, (határrag), áG – a fa határa, (angol eGG, „tojáshatár”), vagy határon történő megállást pl. uG(rik).

M – eM (a csecsemő „emésének” – ma a szopásának – a hangja). – A jelenség egyik oka a kinyíló és rácsukódó folyamatsza-

kasz váltakozása (a kisbaba szája kinyílik, majd rácsukódik). Így történik ez a szemmel is, pillantáskor. A nyit-csuk jelenségek köre kapta ezt a hangot. A kézzel, vagy a vadállat szájával történő maráskor is ez a folyamat játszódik le. De a két lépés átmegy a vízből merítésre is.

NY – NYe (a NYelv kiNYújtását kísérő hang). – A megnyúlást mutató jelenségek kezdőhangja lett az NY. A NYelv, a NYál, a NYelés, a NYúlás (már kézzel), majd a NYél, mint a kéz „hosszabbítása”, s végül a NYíl, ami már a röptével hosszabbítja meg a céltárgy elérését.

P – léP, taP (a lépés puha nesze, hangja). – Két felület lassú (lágú) összeérésekor hangzik a tompa puffanás. Különbözőségi fokozat van a p és a t között. A t az erőteljes ütés hangja.

R – hoR (a horkolás hangja, erősen ismétlődik: testrészünk az oRR). – Az ismétlődő rezgés hangja. Az orrban a váladékok, hártályák vékony felületdarabjai rezegnek, madárnál a repdesésnél jelenik meg a szárnynak felületcsapkodó rezgési hangja. A folyamatosan ismétlődő jelenségek hangja lett: eRó, íR, Ró, éR, áR.

S – eS (a leesés, a suhanó test, a pataokban történő vízmozgás sustorgó hangja). – A Suttogás, SuSmogás és a Sístergő hang is a suhanó tárgyaknak a levegővel való súrlódásából származik; ez az egyik mozgáscsoport, ami ezt a hangzó képletet jelöli. A leesés ezek közül a legjellemzőbb. (A Sülyedés is lassú „leesése”, a Sülynak a mocsárba például.) (Kövecses, 2015)

SZ – SZí (a sziszegő szívás, és a szuszogás hangja). – A SZiSZiszező levegő átmegy egy résen, átmegy a felületen. Olyan jelenségcsoport kapta a SZ hanggal való megnevezést, ahol valami átmegy a felületen (ki-be). Ilyen az őSZi SZínek változása, ilyen az aSZott (aSZalt) gyümölcs bőre, ilyenek a SZár, SZór,

SZúr, SZúr típusú gyökök jelenségei, a SZövőipar az alá-és-fölé bűjtatott SZálakkal, de ilyen az úSZás is a vízfelület alá és fölé emelt-süllyesztett kezekkel, lábakkal.

T – üt (az ütés hangja). – A t hang kiterjesztése külön igény a korai fogalomfejlődés idejéből. A kezdeti égi-tűzhöz való viszonya az ütésnek egy hatalmas gondolkodási bokrot fejlesztett ki, mert az égi ütésnek számos jelenségre utaló kapcsolata van. Egyik az, ami a Tő gyökben maradt fenn: az égi és földi rész párt alkot. Ezt ma a Tükör szavunk hordozza. A másik az, amikor a fent (földfeletti) és a lenti (földalatti) hasonló: Ezt a Tő szavunk őrzi. Az hogy a Tű két vége is párt alkot, egy sereg jelenségben megfigyelhető: boT, széT, TéP stb. és pl. úT, áT. Állkapcsunk, az alsó és a felső is párt alkot, két elválaszthatatlan párt: éT és iT gyökünk ezt őrzi. Őrzi még ezt az elválaszthatatlanságot a beszélő társra mondott Te is. Ma azt mondhatjuk, hogy a T hangképletei a páros jelenségeket jelzik: s ez jelen van ma is sok nép nyelvében. Pl. az angolban: Two (2), Thou (Te Shakespeare-nél is még), To (hozzá, oda), aT (nál-nél), eaT (enni), stb. Számos nyelv a Tűz megnevezésére őrzi a t-t: Ti – tamil, oT – török stb.

V – V (a benntartott „kifújás” – F – hangja, az F zöngés párja). – Az óVás és az öV ugyanannak a gondolatkörnek a kiterjesztése. A „Vele Van” gondolatkör kapta a V „benntartott” hang jelölését: Van, Volt, Vala, Vagy, aVul, éVül, úgy Vél, s maga a -Val, -Vel ragunk is ezt mutatja. (Másodlagos kiterjesztés az öV-ből az éV, az íV.)

Z – moZ (a zizegéssel, zümmögéssel a mozgásra kiterjesztett hang). – A benntartott SZ hangja, az SZ zöngés párja, ami az életben lassan előbukkanó szereplőkre kiterjesztett hang: íZ, (iZZad, iZZgul, iZZik), űZ, éSZ iZé(?)

NÉHÁNY SZÓ A LÉZERES FÚZIÓRÓL

Földes István^{1,2}

¹Hun-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Rézecske- és Magfizikai Intézet, Budapest; ²SZTE Fizikai Intézet, Szeged
E-mail: foldes.istvan@wigner.hun-ren.hu

Az energiaválság és a klimatikus katasztrófa mindenhol ráirányította a figyelmet arra, hogy szükség van új, a légkört kevésbé szennyező energiaforrásokra. A fúziós energia egy ilyen lehet, hiszen nem termel szén-dioxidot, és csak kevés, gyorsan lebomló nukleáris szennyeződést hoz létre működés közben. A *Fizikai Szemle* mindig is nagy figyelmet fordított ezekre a kutatásokra. Már 1990-ben részletes cikk jelent meg arról, mi is szükséges a lézeres fúzióhoz [1]. Az elmúlt években épp a lézeres fúzióban sikerült áttörést elérni [2] úgy, hogy a beeső lézerenergiánál több fúziós energia keletkezett. A legújabb fejlemények szerint a Lawrence Livermore Nem-

zeti Laboratóriumban (USA) a NIF lézer 2,1 MJ nyaláb-energiájából 8,6 MJ fúziós energia keletkezett, azaz a bemenő energia mintegy négyszerese.

Mivel az utóbbi időben több félreérthető információ, sőt, néhány téves megállapítás is felmerült, a szerző, aki húsz éven át, 2024. márciusáig vezette az EURATOM-, majd EUROfusion-, valamint több NAÜ-pályázat keretében a magyarországi kutatásokat, felelősségének érzi, hogy tisztázza a félreértéseket. Ehhez először néhány alapvető fogalom tisztázására van szükség.

Fúziós energia keletkezik könnyű atommagok egyesülésekor, mivel kötési energia szabadul fel. Szemben a hasadással, fissions reakcióval, spontán fúziós reakció nincsen. A könnyű atommagok elektromosan taszítják egymást, és a Coulomb-gát leküzdéséhez energiabefektetésre van szükség, fel kell fűteni, illetve gyorsítani a részt vevő atommagokat. Mai tudásunk szerint a leg-
alacsonyabb hőmérsékleten végbemenő fúziós reakció a hidrogén két izotópja, a deutérium és trícium között mehet végbe, amelynek során egy alfa-részecske és egy neutron keletkezik (DT reakció). A gyorsítók nem alkalmasak fúziós energiatermelésre, mert a Coulomb-üt-



Földes István 1977-ben szerzett fizikus diplomát az ELTE-n, 2003 óta az MTA doktora, az SZTE címzetes egyetemi tanára. A HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontnak volt tudományos tanácsadója 2024-ig, jelenleg önkéntes munkatárs. Kutatási területe a lézer-anyag kölcsönhatások, lézeres termonukleáris fúzió és ultrarövid lézerimpulzusok. Hosszabb időt töltött Németországban, főleg a garchingi Max Planck Kvantumoptikai Intézetben, és vendégkutató volt a Johns Hopkins Egyetemen is.

közések valószínűsége nagyságrendekkel nagyobb a magfúzióénál. A sok Coulomb-ütközésben pedig a felgyorsított atommagok lelassulnak, és végül nem lesz elég energiájuk a magreakcióhoz. Ha egymással szemben haladó nyalábokat ütköztetünk, akkor a rugalmas Coulomb-szórás következtében kiszóródnak a részecskék a kölcsönhatási tartományból. Ezért a fúziós reaktor csak termikus közegben valósulhat meg. Az említett DT reakciót azért preferálják, mert az egyéb reakciókhoz többnyire nagyságrenddel magasabb fűtési hőmérséklet kell, és ilyenkor a felfűtött anyag erősen sugároz, a fűtési energia nagy része elvész sugárzás formájában, a fúzió ezért nem lesz hatékony.

Megvizsgáljuk a DT reakció energetikai mérlegét. A $DT \rightarrow n + \alpha$ reakcióhoz 5–10 keV energiára van szükség, amiből egy 14,4 MeV energiájú neutron és egy 3,5 MeV energiájú α -részecske keletkezik. A termikus egyensúlyban való fűtéshez legalább két atommagot és a róluk elszabaduló két elektront kell a megfelelő hőmérsékletre fűteni. Ezért a maximális hozam csupán mintegy 400-szoros lesz. A fűtés történhet egy hagyományos gázkisülésben mágnesestér-összetartással, ilyen berendezés épül a franciaországi Cadarache-ban. A világméretű összefogásban épülő ITER tokamakban a sűrűség viszonylag alacsony, de a kisülés hosszú ideig tart a hatékony felhasználás kedvéért. Mi itt a lézeres fúzióval foglalkozunk, ahol viszonylag kis mennyiségű anyagot nagy sűrűsége viszonylag rövid ideig tartanak össze egy mikrorobbanással. Mivel az egész közeget fel kell fűteni, ez csak akkor lehet elegendő energiatermeléshez, ha a felfűtött fűtőanyag jelentős része valóban fúzióra lép.

Amint ezt korai cikkünkben [1] részletesen megtárgyaltuk, az égési hatásfok a sűrűség és a fűtőanyag méretének szorzatától, ρR -tól függ. R itt még csak a karakterisztikus méret, de a nagyobb hatékonyság érdekében célszerű gömb alakot választani, amelynek a sugara R . A gömb össztömege ρR^3 -bel arányos, ami azt jelenti, hogy adott ρR eléréséhez a sűrűség négyzetével fordítottan arányos tömegre van szükség, ami konkrétan azt jelenti, hogy a fűtőanyag 30%-os felhasználásához a gömböt a folyadéksűrűség ezerszeresére kell összenyomni. Ha nem nyomnánk össze a folyadéksűrűségű DT keveréket, akkor 0,21 g/cm³ sűrűség mellett több mint 2,5 kg össztömeg kellene, ennyi DT-re lenne szükség. Ha 2,5 kg DT keveréket ilyen hatásfokkal felrobbantunk, az $3 \cdot 10^{14}$ J, azaz 300 billió joule felszabaduló energiát adna, ami megfelel egy Teller és Ulam által kifejlesztett hidrogénbombának. Ezzel szemben, ha sikerül a keveréket mintegy 400 g/cm³ sűrűsége összenyomni, akkor mindössze 5 mg keverékkel elérhető a megfelelő hatásfok.

A nagy sűrűségű, magas hőmérsékletű ionizált gáz, a plazma a fémekhez hasonlóan nem engedi be a fényt, a lézerfény csak a szkinmélységig tud behatolni. Még a nagyon nagy intenzitású rövid lézerimpulzusok is a mikrométer tört részéig képesek befűrni magukat. Emiatt a lézeres fúziót úgy kell végrehajtani, hogy egy fúziós fűtőanyaggal megtöltött gömböcskét (valójában gömb-

héjat) világítanak meg gömbszimmetrikusan sok lézernyalábbal, azok lerobbantják a gömböcske külső héját, és a fűtőanyagot a leváló anyag visszarugása, a tehetetlenség nyomja össze. Ezért hívják a lézeres fúziót inerciális vagy tehetetlenségi összetartású fúzióknak. A szerző korai cikkében megkísérelte ennek a magyarul jobban hangzó mikrorobbanásos fúzió elnevezést adni, de ez nem terjedt el.

Itt érkezünk el két alapvető definíció tisztázásához. A fúziós reakciót, ebben az esetben az inerciális fúziót (az angol irodalomban ICF, inertial confinement fusion) meg kell különböztetni a fúziós energiatermeléstől, azaz az IFE, inerciális fúziós energia kifejezéstől. Fúziós reakciót viszonylag könnyű létrehozni alacsony hatásfokkal, sőt, a minap elért, a lézer energiájánál nagyobb hozamot lehet az ICF megvalósulásának nevezni. A fúziós energiatermeléshez viszont ennél több, sokkal több kell; az IFE akkor valósul meg, ha a hálózatba visszajuttatott energia nagyobb, mint a konnektorból a működéshez felhasznált elektromos energia.

Alapvető kérdés, hogy miképp lehet ezt a fent említett 400-szoros hozamot (30% hatásfok esetén már csak 133) elérni, illetve lehet-e túlszárnyalni. A válasz az utóbbira: igen, van egy trükk. A fúziós energiatermeléshez a keletkező neutronok energiáját kell felhasználni: amint azok a reakciót körbevevő lítium köpenyen elvesztik energiájukat, felmelegítik azt. Ez az a hő, amelyet energiaként fel lehet használni. Egyidejűleg trícium is keletkezik a lítium bomlásakor. Az α -részecskék energiája viszont felhasználható a DT fűtőanyag fűtéséhez, és ekkor a külső fűtéshez nem kell annyi energiát felhasználni. Elegendő a fúziós fűtőanyag kis részét felfűteni viszonylag alacsony hatásfokkal, a többit, a sűrű fűtőanyagot már az α -részecskék fűtik fel. A NIF lézerek végzett sikeres kísérletek is annak tulajdoníthatók, hogy beindult az α -részecskékkel való fűtés. Megmutatták, hogy az α -részecskés fűtés több energiát tesz a sűrű fűtőanyagba, mint amennyit az a magas hőmérséklete miatt kisugároz hőmérsékleti sugárzásként. Ezt hívják begyűjtásnak, ez volt az az áttörés, amelyről korábban beszámoltunk [2]. Mágneses fúzió esetén is alapvető fontosságú az α -részecskékkel való fűtés; ezért lesz az ITER olyan nagy méretű, hogy a ritkább plazmából az α -részecskék ne tudjanak kiszökni.

Belátható [1], hogy a fúziós kapszula tipikus mérete milliméter nagyságrendű. Az összenyomáshoz szükséges időt az anyag hidrodinamikai mozgása határozza meg, hiszen nemcsak a gyorsan mozgó elektronokat, hanem főként a lassabb ionokat kell összenyomni. A hidrodinamikai összenyomás 10 nanoszekundum nagyságrendű időtartam alatt valósulhat meg, ezért használnak a NIF lézernél ilyen hosszúságú impulzusokat. A 192 nyalábra pedig a tökéletes gömbszimmetria eléréséhez van szükség. A sikeres kísérletben a 350 nm hullámhosszú lézerfényt először egy üregben konvertálják lágy röntgensugárzássá, a fúziós kapszulát a röntgensugárzás nyomja össze. Egyetértés van abban, hogy a jövőben, az

energiatermeléshez direkt összenyomásra lesz szükség, mivel a röntgensugárzás nem hatékony, ugyanis hiába effektív a lézerfény konverziója röntgensugárzássá, a sugárzás nagy része megszökik, csak a kisebbik része fűti a kapszulát. Szögezzük le, hogy a hidrodinamikai instabilitások valójában azért lépnek fel, mert nagyon nagy kompresszióra van szükség a lézerfúzió magas hatásfokához, aminek szükséges feltétele a viszonylag lassú összenyomás. Az 1970-es, 1980-as években folytatnak kísérleteket nagyobb intenzitású, rövidebb (akkor: pikoszekundumos) impulzushosszú lézerekkel. Ezekben az esetekben a plazmában végbemenő nemlineáris folyamatokban felgyorsulnak elektronok, és azok a kinetikus energiájukat a sűrű közegben adják le, előfűtik azt. Az előfűtött, forró anyagot viszont már nem lehet összenyomni, az összenyomás és a fúziós hatásfok alacsony marad [3]. Ez az egyik oka annak is, hogy a *Fizikai Szemlé*ben nemrég megjelent kétnyalábos ultrarövid lézerimpulzusos séma [4] nem működik. Egyfelől, ha két síkot lövünk egymásba, akkor az osszsűrűség nem növekszik olyan mértékben, mint a gömbszimmetrikus esetben, tehát a fűtőanyag elégeése nem lesz nagy hatásfokú, másfelől az összenyomást a keletkező forró elektronok is megakadályozzák. Tehát fúziós reakció lehetne végbe, de fúziós energiatermelés ebből nem lesz. Az elrendezés részletes bírálata megtalálható a *Physics Letters A* folyóirat kommentjeként [5].

A lézeres fúzióban végbement áttörést méltató cikkünkben [2] röviden kitértünk az energiatermeléshez vezető különböző utakra. Itt ezeket a megfontolásokat próbáljuk tovább bővíteni, mivel a siker hatására immár nemcsak az egyes államok szűkös költségvetéséből csurran-cseppen valami fúziós kutatásokra, hanem már magánvállalatok is belátják a környezetbarát energia szükségességét, és több magáncég is beszállt a fúziós kutatásokba. Először megvizsgáljuk, milyen lehetőségek vannak az itt is tárgyalt DT fúzióban, aztán alternatívát keresünk arra is. Az rögtön látható, hogy a jelenlegi MJ nagyságú lézerteljesítmény esetén a százszoros hozam 100 MJ nagyságrendet jelent, tehát egy GW-os erőműhöz körülbelül 10 Hz-es működésre van szükség. Egyes elgondolások szerint érdemes nagyobb lézert építeni, ami gazdaságosabb lehet kisebb ismétlődési frekvencia mellett, viszont akkor a prompt kilépő intenzív neutronforrás kezelése lesz még a jelenleginél is nehezebb. Megjegyezném, hogy már a jelenlegi hozam is több kilónyi TNT robbanásával egyenértékű.

Az ilyen energiájú, nagy ismétlődési frekvenciájú lézerek ugyan még nem állnak rendelkezésre, drágák, de megvalósíthatók, és mintegy 10% konnector-lézer hatásfok elérhető a jelenlegi 1%-kal szemben. A lézerrel kapcsolatos kutatások egy része a spektrális sáv szélesség növelésére irányul a parametrikus lézerplazma-instabilitások elkerülése érdekében.

Nagyobb problémát jelent a target kérdése. A jelenlegi röntgensugárzással való összenyomás, az indirekt összenyomás olyan targettel történik, ami a követke-

zőkből áll: egy néhány centiméter hosszúságú, vékony fóliaablakkal ellátott arany henger van megtöltve héliumgázzal. Az üreg belsejében van a fúziós kapszula, ami egy olyan gömbhéj, ami külső gyémánt ablatorból és belül egy mindössze 2 mikrométer átmérőjű csövön bepréselt kriogén DT keverékből áll. A kapszulát vékony átlátszó fólia rögzíti a henger falához. Egy ilyen target költséges, hosszú előállítási időt igényel, és nem képzelhető el vele nagy ismétlődési frekvenciájú üzemmód. Emellett az elpárolgó arany belepi a kamra falát és a fókuszáló optikákat. Emiatt és az alacsony hatékonyság miatt egy fúziós reaktor direkt összenyomással kell működjön, amihez viszonylag olcsón, nagy mennyiségben előállítható targetekre van szükség. Bár direkt összenyomással még nem demonstrálták a pozitív hozamot (a jelenlegi nagyberendezések geometriai okok miatt erre nem is alkalmasak), várhatóan a megajoule nagyságrendű lézerenergia elegendő lesz ebben az esetben is.

A direkt összenyomáson belül is vannak alternatívák. Az egyik a lökeshullámos begyűjtés, amikor az összenyomás viszonylag alacsony intenzitással történik (s így a hidrodinamikai instabilitások elkerülhetők), majd egy rövidebb, nagy intenzitású impulzussal egy szférikusan befelé haladó lökeshullámot keltene, ami felfűti a kapszulát, és elindítja a fúziós reakciót. Érdekes alternatíva a habszerű kapszula alkalmazása oly módon, hogy egy előzetes összenyomás után a középről kifelé táguló plazma hozza létre a gömbhéjat, amit aztán az impulzus későbbi része gyűjt be [6]. Bár kicsiben a mechanizmust demonstrálták, ez a lézerfejlesztéssel kapcsolatos igényeket is támaszt, a jelenlegi ~10 ns impulzushossz tízszeresére van szükség. Akármelyik módszert alkalmazzák, az egyszerű energetikai és termodinamikai megfontolásokból látható, hogy a DT fúzióval való energiatermeléshez minden esetben szükség van a nagy sűrűség alkalmazására, azaz a fűtőanyag összenyomására.

A DT fúzió esetén a természetben nem található trícium előállítása megoldható a neutronok energiájának kinyerésére szolgáló lítium köpenyben, viszont a trícium tárolása és a neutronok kezelése sugárvédelmi problémákat jelent. Ezért is keresnek alternatív magreakciókat. Sajnos, amint ezt korábban is említettük, a magreakciók a DT-vel összemérhető nagy hatáskeresztmetszettel csak nagyságrenddel magasabb hőmérsékleteken valósulhatnak meg, ahol a sugárzási veszteségek nagyobbak lesznek, mint a fúziós energianyereség. Mindazonáltal továbbra is keresnek alternatív reakciókat, ehhez a legcélszerűbb a hagyományos részecskegyorsítók használata. Az utóbbi időben jelentős érdeklődés övezi a $p^{11}\text{B}$ magreakciót, amelynek során 3 darab α -részecske keletkezik, neutron nélkül. Ez valójában egy fúziós-fissziós reakció, hiszen a proton először fúzióra lép a bórral, aztán a termék széthasad alfa-részecskékre. Bár ehhez a reakcióhoz is magasabb, mintegy 600 keV hőmérsékletre van szükség, ahol óriási sugárzási veszteségek lépnek fel, elképzelhető egy olyan konfiguráció, ahol a kezdeti

reakciók után a fűtőanyag még hideg részét lavinaszerűen felfűtik az α -részecskék. Így a fúzió tranziensen, nem egyensúlyi környezetben mehetne végbe, ami DT fúzió esetében nem lehetséges. Az még egy nagy kérdés, hogy megvalósítható-e a lavinaszerű folyamat, viszont a reakciókban keletkező α -részecskék nemcsak fűzióra, hanem egyéb, például orvosi alkalmazásokra is felhasználhatók, ezért a pB kutatásokat az európai COST ügynökség PROBONO projektje is támogatja.

A magáncégek megjelenésével számtalan új ötlet vár kipróbálásra, megvalósításra. Fontos lenne, hogy a különböző módszereken dolgozók a lehetőségeket egymással is megvitassák, és közös erővel hozzák létre az emberiség boldogulását segítő energiaforrást, ne csak a saját projektjük védelmével foglalkozzanak.

Irodalom

1. Földes István (1990): Termonukleáris fúzió mikrorobbanással. *Fizikai Szemle*, 40, 203–210.
2. Földes István, Tóth Zsolt (2023): Áttörés a lézeres termonukleáris fúzióban. *Fizikai Szemle*, 2023/1, 26–28.
3. Atzeni S., Meyer-ter-Vehn J. (2004): The Physics of Inertial Fusion – Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Dense Plasma Physics. Clarendon Press – Oxford University Press, Oxford, ISBN: 978-0-19-856264-1
4. Dombi Péter, Kroó Norbert, Szipőcs Róbert, Veres Miklós (2024): Femtoszekundumos lézeralkalmazások a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban. *Fizikai Szemle*, 2024/9, 302–306.
5. Földes I. B., Tikhonchuk V. T. (2022): Comment to the paper Papp I., et al.: Laser wake field collider [*Phys. Lett. A*, 396 (2021) 127245]; *Phys. Lett. A*, 424, 127845.
6. Igumenshchev I. V., et al. (2023): Proof-of-principle experiment on the dynamic shell formation for inertial confinement fusion. *Phys. Rev. Lett.*, 131, 015102.

MILYEN NEHEZEK A GYENGE BOZONOK?

Horváth Dezső^{1,2}

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest; ²Babeş–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár
E-mail: horvath.dezso@wigner.hu

1. Bevezetés

Néhány éve a gyenge kölcsönhatás furcsaságairól írtam cikket [1]; ezúttal a kölcsönhatást közvetítő három részecskéről, a gyenge bozonoknak becézett W^+ , W^- és Z részecskék tulajdonságairól írok. Rövid válasz a cím kérdésre: egyáltalán nem gyengék, csak nagyon nehezek, azaz nagy a tömegük, és emiatt látszik gyengének kis energiánál az általuk közvetített erő.

A fizikában öt alapvető erőt ismerünk: a gravitációs, elektromágneses, erős és gyenge kölcsönhatást, valamint az elemi részecskéknek tömeget adó kölcsönhatást a Brout–Englert–Higgs- (BEH-) mezővel. A részecskefizika elmélete [2] a középső hármat szimmetriákból [3] származtatja, amelyeket a gyenge erő és a BEH-mező alapállapota sért [4]. Einstein elmélete a gravitációt a tér torzulásával magyarázza, amit eddig nem sikerült két részecske kölcsönhatásaként értelmezni, így ez nem is része a részecskefizika elméletének, amelyet történeti okból standard modellnek hívunk. Ezen az ötön kívül még legalább egynek léteznie kell, amely a neutrínók ízrezgéséért felelős, de az már nem része a jelenleg ismert elméletnek.

¹ A külföldi neveket angol átírással közlöm, hogy könnyen rájuk lehessen keresni.



Horváth Dezső Széchenyi-díjas kísérleti részecskefizikus. 1970-ben végzett az ELTE-n, kutatásait Dubnában és Leningrádban kezdte, a kanadai TRIUMF, az amerikai BNL, a svájci Paul-Scherer Intézet, az olasz INFN, majd a CERN következett. Budapest–Debrecen kutatócsoportokat szervezett CERN-kísérletekre. 2006 óta koordinálja a magyar fizikatanárok részecskefizikai oktatását a CERN-ben. Emeritus professzor, magántanárként részecskefizikát oktat a Debreceni és a kolozsvári Babeş–Bolyai Egyetemen.

A múlt század elején közismert volt, hogy az elektromágneses erő hatótávolsága végtelen, az atommagot összetartó magerőké ellenben véges. Hideki Yukawa¹ 1935-ben ezt a véges hatótávolságot azzal magyarázta, hogy a kölcsönhatást egy nagy tömegű bozon közvetíti, amely csak a Heisenberg-féle bizonytalansági reláció miatt megengedett, igen rövid ideig létezhet. A Yukawa-potenciál az r távolság függvényében:

$$U(R) \sim \frac{1}{r} \exp\left(-\frac{r}{R_0}\right),$$

ahol $R_0 \sim \hbar/Mc$ a hatótávolság, $\hbar$ a (redukált) Planck-állandó, c a fénysebesség, és M a közvetítő bozon tömege. Kétféle részecskét ismerünk, a perdületük és szimmetriatulajdonságaik szerint különböző fermionokat és bozonokat. Fermion csak az antirészecskéjével [5] párban keletkezhet, de bozonra nincs ilyen megkötés, tehát a kölcsönhatást közvetítő részecske csak bozon lehet.

Yukawa elnevezte a feltételezett bozont közepes (a protonénál kisebb, de az elektronénál nagyobb) várható tömege miatt *mezon*nak, és később azt a kozmikus sugárakban megfigyelt pionnal (π -mezonnal) azonosították. Bár a klasszikus magfizikában a pion által közvetített magerő ma is használható közelítés kis energián, az erős kölcsönhatást valójában nulla tömegű bozonok, gluonok közvetítik a *színtöltéssel* bíró kvarkok között. A proton méretéhez közeli véges hatótávolság a *színbezárás*nak tulajdonítható, azaz annak, hogy a kvarkok és gluonok szabadon nem létezhetnek.

A részecskék tömege alatt a nyugalmi (*invariáns*) tömegüket értjük, amely a fotonra természetesen nulla. A tömegeket a nyugvó testre vonatkozó $E = Mc^2$ Einstein-összefüggés értelmében, a c fénysebességet egységnyinek ($c = 1$) tekintve, energiában mérjük. 1 eV energiát

nyer egy proton vagy elektron 1 V feszültség átszelésekor; a részecskefizikában használatos magasabb egységei: 1 MeV = 10^6 eV, 1 GeV = 10^9 eV és 1 TeV = 10^{12} eV. A proton tömege 938 MeV, csaknem 1 GeV, az elektroné sokkal kisebb, 0,511 MeV.

2. A gyenge kölcsönhatás

Az erőssel ellentétben a gyenge kölcsönhatásra tényleg érvényes a Yukawa-potenciál, véges hatótávolsága valóban a közvetítő bozonok nagy tömegének köszönhető. Gondoljunk bele, hogy a neutron béta-bomlása protonra, elektronra és antineutrínóra,

$$n \rightarrow p W^- \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$$

(a felülvonás antirészecskét jelöl) mindössze 1,3 MeV energia felszabadulásával jár, és azt egy csaknem négy nagyságrenddel nagyobb, 80 GeV tömegű (és emiatt mélyen *virtuális*) W^- -bozonnak kell közvetítenie. Nem csoda, hogy a neutron élettartama rendkívül hosszú, csaknem negyed óra. Látjuk tehát, hogy a gyenge kölcsönhatás nem is gyenge, csak kis energiánál a nehéz bozonok nagyon kis valószínűséggel tudják közvetíteni.

Amint már említettük, a részecskefizika három alapvető kölcsönhatását szimmetriákból származtatjuk, csakhogy azok nem túrik a közvetítő bozonok tömegét. Az elektromos töltés szimmetriájából levezethető egy nulla tömegű foton, és az erős kölcsönhatás háromféle színtöltéséből nyolc nulla tömegű gluon, ami rendben is van, de a gyenge kölcsönhatás kétfokú szimmetriájából keletkező három tömeg nélküli bozon már nem jó. A standard modell a kísérleti eredményekkel teljes összhangban ezt a spontán szimmetriasértés BEH-mechanizmusával oldja meg [1–4, 6]. Először egyesíti a elektromágneses és a gyenge kölcsönhatást, amely négy bozonmezőt eredményez. Közülük kettő töltött, abból lesz a béta-bomlás W^+ - és W^- -bozonja. A másik kettő semleges, a W^0 gyenge bozonmező és az elektromágnesesség B^0 mezője. A vákuumot egyfajta színpadnak képzelve [7] feltételezzük, hogy az nem üres, hanem kitölti a szimmetriasértő BEH-mező, amely létrehozza a Higgs-bozont, és tömeget ad a három gyenge bozonnak.

Tudjuk, hogy az elektromágnesesség közvetítője, a foton nulla tömegű, ezért a szimmetriasértésnek kitett két semleges mezőből ki kell *kevernünk* egy tömeg nélküli A fotonmezőt és a nagy tömegű Z részecskéét. Ezt közösleges koordinátatranszformációval oldjuk meg: az eredeti $[B^0 - W^0]$ rendszert a nulla pontja körül elforgatjuk a Θ_W *gyenge² keveredési szög*gel,

$$[B^0, W^0] \rightarrow [A, Z],$$

azaz a spontán szimmetriasértésnél kapott két semleges bozont a koordináta-rendszer forgatásával a nulla tömegű fotonba és a Z -bozonba transzformáljuk. Mivel a fotonra jutó tömeget a semleges Z -bozon örökli, annak tömege valamivel nagyobb a W -bozonokénál.

² A W index az angol *weak* szóhoz és Steven Weinberg nevéhez kapcsolódik.

A béta-bomlás ismert tulajdonságaiból le lehetett vezetni a gyenge bozonok tömegét, és azokat meg is figyelték a CERN proton-antiproton ütköztetőjénél. A szimmetriasértés bevezetésével lett teljes a standard modell, és arra a végső bizonyíték a Higgs-bozon felfedezése volt a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél.

3. A Z -bozon tömege

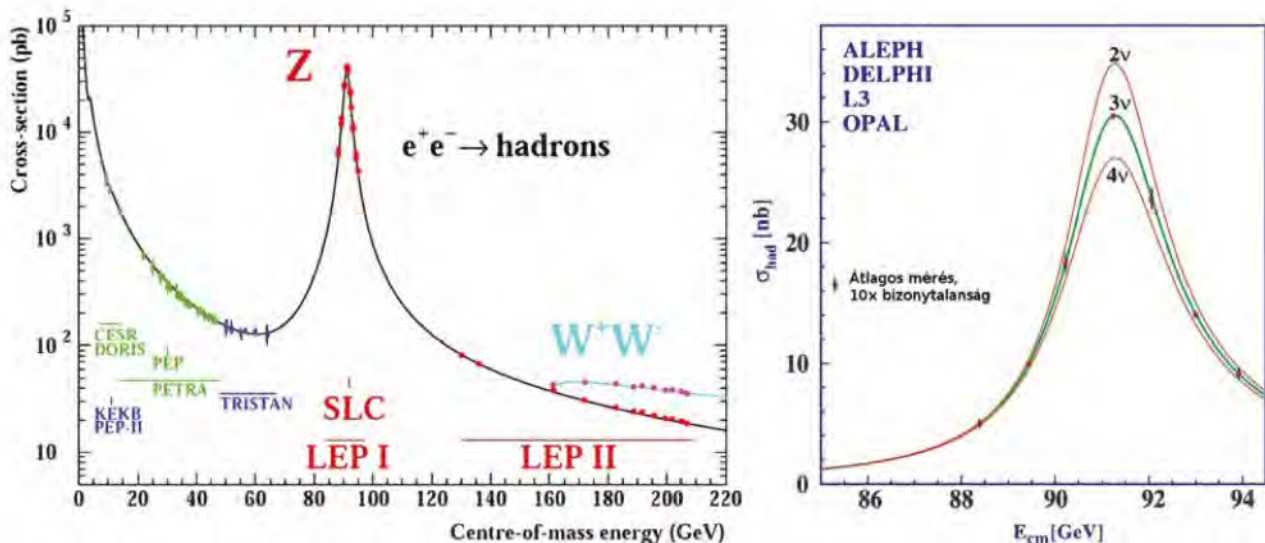
A gyenge bozonok tömege a részecskefizika igen fontos paramétere, megadja ugyanis a gyenge kölcsönhatás jellegzetes energiaskáláját. Ma már tudjuk, hogy a kölcsönhatások erősségét, azaz a részecskék és a külső terek egymáshoz kapcsolódását jellemző *csatolási állandók*, mint például az elektromos töltés, nem igazi természeti állandók, függnek a kölcsönhatási energiától. Ez a függés az elektromágnességre gyenge: az atomfizikában *finom-szerkezeti állandónak* hívott elektromágneses csatolás értéke nulla energián $\alpha(E=0) \approx 1/137$, de a Z -bozon tömegének megfelelő energián már valamivel nagyobb, $\alpha(E=M_Z) \approx 1/128$. Az erős kölcsönhatás energiafüggése viszont nagyon erős és éppen ellenkező irányú, hiszen egészen nagy energián nullához közelít (ezt hívjuk *aszimptotikus szabadságnak*), egészen kis energián meg sokkal erősebb, mint az elektromágnesség (ez a *szín-bezárás*).

A gyenge kölcsönhatás bozonjainak megfigyelése után tanulmányozni kellett azok tulajdonságait. Új jelenségek megfigyeléséhez célszerű összetett részecskéket ütköztetni, a legegyszerűbb protonokat protonnal vagy antiprotonnal, a sokféle alkatrész ugyanis sokféle energiájú részecskék ütköztetését jelenti széles energiaskálán. Így figyelték meg a CERN-ben a gyenge bozonok keletkezését, az amerikai Tevatronnál a legnehezebb top kvarkét, és 12 éve a LHC-nál a Higgs-bozont. Pontos vizsgálathoz viszont pontosan hangolt energiájú ütközés kell, amelyhez legalább az egyik félnek pontszerűnek kell lennie: ez általában elektron vagy pozitron, de foton is lehet.

A Z -bozon tanulmányozására két elektron-pozitron ütköztetőt is építettek a nyolcvanas évek végén: a kaliforniai SLAC (Stanford Linear Accelerator) laboratóriumban egy 3,2 km hosszú lineáris ütköztetőt, és a CERN 27 km kerületű LEP (Large Electron-Positron) ütköztetőjét. A LEP kör alakú elrendezése lehetővé tette az ütközési energia változtatását széles energiaskálán, és azzal a Z -bozon, majd később a W -bozon tulajdonságainak részletes vizsgálatát. A LEP-et 2000 után leszerelték, és a föld alatti koralagútjában építették meg az LHC Nagy Hadronütköztetőt. A LEP- és SLC-kísérletek összegzett eredménye a Z -bozon tömegére $M_Z = 91,1876 \pm 0,0021$ GeV lett.

4. A Z -bozon tömegeloszlásának szélessége

A fizikában az energia és az idő összetartozó mennyiségek, ami kiválóan tükröződik Heisenberg bizonytalansági összefüggésében, $\Delta E \cdot \Delta t \approx \hbar/2$. Eszerint minél



1. ábra. A Z-bozon bomlása hadronokra. Baloldalt az észlelt bomlások gyakoriságának (hatáskeresztmetszetének) logaritmusa az energia függvényében, ahogyan azt az egymást követő elektron-pozitron ütköztetők mérték. A csúcs maximuma a Z-bozon 91 GeV-es tömegének, félértékszélessége pedig a hadronos bomlási csatorna valószínűségének felel meg GeV energiaegységben. Jobboldalt a négy LEP-kísérlet együttesen mért hadronos Z-szélessége szimulációkkal összehasonlítva két-, három- és négyféle neutrínót feltételezve

tovább él egy részecske, annál pontosabban meghatározott az energiája, amely nyugvó állapotban a tömege. Egy instabil részecske bomlásakor kibocsátott másodlagos részecskék energiájának és lendületének pontos mérésével megkapjuk az elbomlott részecske tömegét, annak értéke azonban szóródni fog az igazi (*invariáns*) tömegérték körül. Ez a szóródás, a tömegeloszlás *bomlási szélessége* felel meg az energiameghatározás bizonytalanságának, és időskálán a részecske τ élettartamának, illetve a $\Gamma = 1/\tau$ bomlási valószínűségének. Ez azt jelenti, hogy a bomlékony részecskéhez rögzített koordináta-rendszerben a bomlástermékek teljes energiája az anyarészecske tömegénél ad csúcst, a csúcs Γ szélessége pedig a bomlási valószínűség lesz energiaegységben mérve (1. ábra). A reakciók észlelési gyakoriságát a részecskefizika az effektív *hatáskeresztmetszettel* fejezi ki, amely a geometriai méreteken kívül a vizsgált folyamat kölcsönhatási viszonyait is tükrözi.

A Z-bozon tömegének értékénél a tömegeloszlás szélessége sokkal érdekesebb volt. A Z-bozon ugyanis többféle módon el tud bomlani, általában részecske + anti-részecske pár, amelyek lehetnek töltött leptonok, azaz elektron + pozitron, müon vagy tau-lepton pár, vagy kvark + antikvark pár, amely *hadronzárókat* eredményez, és végül neutrínók is, amelyek nyom nélkül kirepülnek az észlelőrendszerből, tehát láthatatlan lesz a járuléka. A Γ_Z teljes bomlási valószínűség a fenti reakciók valószínűségeinek összege lesz:

$$\Gamma_Z = \Gamma_{e^+e^-} + \Gamma_{\mu^+\mu^-} + \Gamma_{\tau^+\tau^-} + \Gamma_{\text{had}} + \Gamma_{\nu\nu},$$

azaz a háromféle töltött leptonpárén és a hadronoson kívül a neutrínóké. A standard modell segítségével kiszámíthatók az egyes járulékok, és a számított energiafüggéseket a négy LEP-kísérlet adataihoz illesztve megkapjuk a teljes Γ_Z szélességet is.

A LEP-kísérletek egyik nagy korai eredménye a *leptonuniverzalitás* megfigyelése volt: a Z-bozon egyforma

$$\Gamma_{e^+e^-}/\Gamma_Z = 3,36\%$$

valószínűséggel³ bomlik a háromféle töltött leptonpárra. A hadronos bomlás adja a teljes szélesség 70%-át, a töltött leptonok együtt mintegy 10%-ot, a neutrínókra történő Z-bomlás láthatatlan maradéka tehát 20%. A standard modell szerint a Z-bozon bomlási szélessége egy adott ℓ leptonhoz tartozó neutrínópárra

$$\Gamma_{\nu\nu} = \frac{2\Gamma_{e^+e^-}}{1 + (1 - 4\sin^2\Theta_W)^2} = 1,979 \Gamma_{e^+e^-}.$$

A fenti összefüggésből a könnyű (azaz a Z-bozon tömegének felénél könnyebb) neutrínók számára a $N_\nu = \Gamma_{\text{inv}}/\Gamma_{\nu\nu} = 2,994(12)$ értéket kaptuk, magyarul hármat (1. ábra).

Mivel a gyenge kölcsönhatás párokba rendezi a kvarkokat és a leptonokat (1. táblázat), a három neutrínó háromféle töltött leptont is jelent. Az a megfigyelés, hogy a Z-bozon nem tud fotonpárra bomlani, azt sugallja, hogy a lehetséges elektromágneses bomlási folyamatok kompenzálják egymást, tehát az összes lepton és kvark együttes elektromos töltése nulla kell legyen, és ez csak azonos számú lepton- és kvarkpárra teljesül. A legkönnyebb fermioncsaládra például az elektron töltése -1 , az u kvarké $+2/3$, a d kvarké $-1/3$, és a kvarkok hármas színszorzója az összeget éppen nullára hozza ki. A három neutrínó tehát három kvarkpárt is jelent, nincs negyedik fermioncsalád. Ezt az LHC-kísérletek egészen nagy energiáig megerősítették. Több kollégám szerint ez volt a LEP legnagyobb eredménye.

³ A felsorolt mérések eredménye általában nagyon sok számjegyre pontos, itt csak kerekített értékeket adunk meg a kísérleti bizonytalanság nélkül.

1. táblázat. Leptonok és kvarkok, az alapvető fermionok három családja. T_3 a gyenge izospin harmadik komponense, amely a párok alsó és felső fermionjait jelöli meg. A párok L indexe a gyenge kölcsönhatás által előnyben részesített *balkézes* részecskéket jelzi, a megvevőzött kvarkok pedig azt, hogy a kvarkok hatféle *kvarkizét* csak az erős kölcsönhatás őrzi meg, a gyenge keveri, ezért tudnak gyengén egymásba bomlani

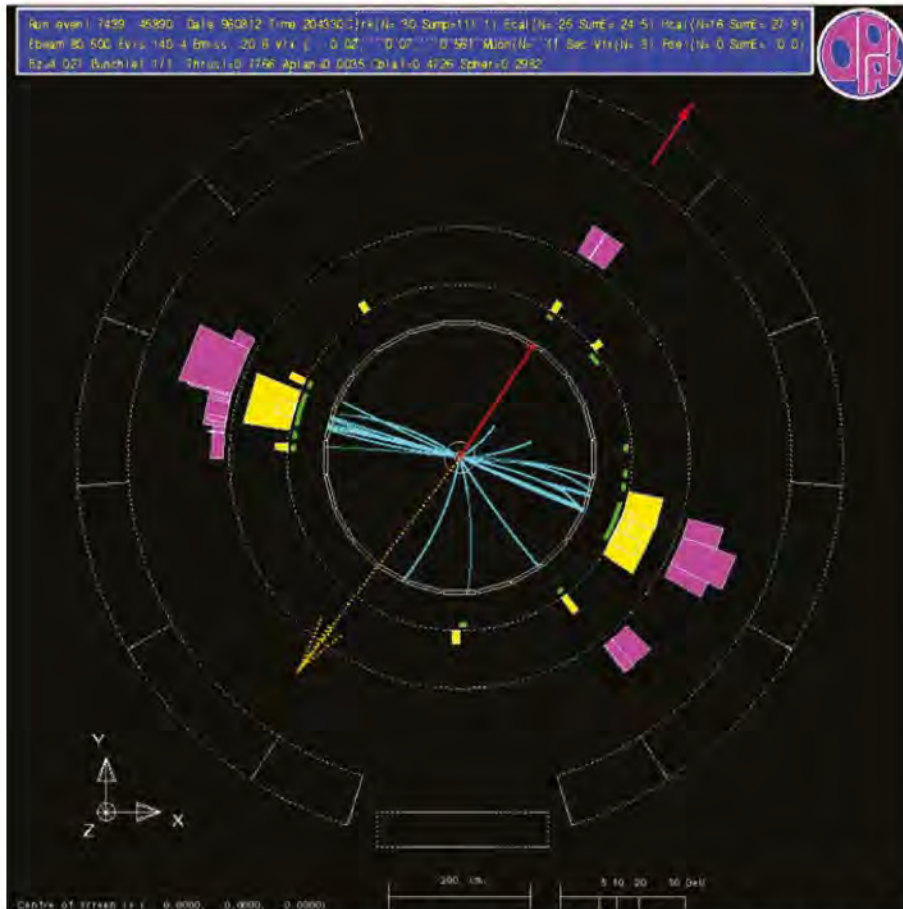
	1. család	2. család	3. család	Töltés	T_3
Leptonok	$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}_L$	0	$+\frac{1}{2}$
				-1	$-\frac{1}{2}$
Kvarkok	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$	$+\frac{1}{2}$
				$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{2}$

5. A W-bozon tömege: LEP

Korábban láttuk, hogy az atommagok átalakulását kísérő béta-bomlás valószínűségét a W-bozon tömege határozza meg, az tehát a standard modell egyik kulcsparamétere. A standard modell nagyon pontos előjelzést ad a két gyenge bozon tömegének arányára. Mivel a LEP-nél a Z-bozon tömegét rendkívül pontosan meghatározták, a

W-bozon tömegének mérése hasonló pontossággal érzékeny ellenőrzése lehet magának a modellnek.

A Z-bozon tömegét viszonylag egyszerű volt mérni, 45,5 GeV-nél nagyobb energiájú elektront és pozitront kellett ütköztetni és összeadni a kirepülő részecskék energiáját. Az egyforma energiára felgyorsított elektronok és pozitronok ütközési energiája rendkívül pontosan megállapítható, és a W-bozon tömegének kétszerese fe-



2. ábra. A W-bozon keletkezése és bomlása elektron-pozitron ütközésben, ahogyan azt a LEP OPAL kísérlete észlelte. Az egyik W két kvarkra bomlik ($W^+ \rightarrow c\bar{s}$), azok pedig két hadronzáport indítanak, a másik W müontra és neutrínóra bomlik ($W^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$). A müon, miután nyomot hagy minden detektorrészben, felfelé kirepül, az elsőkö neutrínót a lefelé mutató nyíl jelzi

lett a párban keletkezés nagyon valószínű. A W-bozon töltött, a töltés megmaradása miatt csak párban keltethető: $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$, tehát egy helyett két bozonnal lesz dolgunk. Ugyancsak a töltöttség miatt a W nem tud részecske-antirészecske párba bomlani, csak leptonra és antineutrínóra vagy antileptonra és neutrínóra, illetve felső és alsó típusú kvarkra. A továbbiakban általában nem fogjuk feltüntetni a bomló W-bozon és a kibocsátott leptonok töltését, csak a fajtáját, tehát $W \rightarrow e\nu$ kétféle reakciót jelent: a $W^+ \rightarrow e^+\nu_e$ és a $W^- \rightarrow e^-\bar{\nu}_e$ bomlást, és M_W a W^+ és W^- azonos tömegét.

A neutrínók általában kiszöknek a detektorokból, azokat nem látjuk, csak a töltött leptonokat és a kvarkok által keltett hadronzárporokat. A hadronzárpor előnye, hogy felösszegezve a kirepülő részecskék lendületét pontosan megkapjuk az elbomló részecske tömegét, de két W-bozon hadronos bomlásánál nehéz azonosítani, melyik két hadronzárpor tartozik ugyanahhoz a bozonhoz. Ráadásul a különböző bozonhoz tartozó hadronzárporok is tudnak egymással energiát cserélni, ami csökkenti a mérés pontosságát. Az ideális eset a 2. ábrán látható *vegyes bomlás*, amikor az egyik bozon leptonokra, a másik pedig kvarkpárba bomlik, ilyenkor ugyanis egyik fenti hibaforrás sem áll fenn, és a teljes egyensúlyhoz hiányzó energiából és lendületből még a neutrínó adatai is meghatározhatók. A LEP-kísérletek természetesen az összes bomlási csatornát elemezték, és a háromféle bomlásra (leptonos, hadronos és vegyes), valamint a négy LEP-kísérletre való összegzés és átlagolás a következő eredményt adta: $M_W = 80376 \pm 33$ MeV. A mérés bizonytalansága a véges adatmennyiségen kívül elsősorban a LEP nyalábenergiájának meghatározásából (± 9 MeV) és a különböző W-bozonokból származó kvarkok energiacseréjéből (± 8 MeV) származik [6].

Jogos a kérdés, miért kell törekednünk egyre pontosabb mérésekre. Mindent érdemes pontosan mérni, hiszen igen gyakran így születnek fontos felfedezések. Ráadásul tudjuk, hogy a standard modell hiányos, nem ad számot jó pár megfigyelésről, habár a gyorsítás mérések eredményeit szépen visszaadja. A W-bozon tömegét mintegy 6 MeV pontossággal lehet jelenleg számítani. Ha tehát sikerülne méréseink pontosságával ez alá menni, reménykedhetünk olyan új fizikai jelenségek megfigyelésében, mint a sötét anyag részecskéi vagy a neutrínó izregését elősegítő, standard modellen kívüli esetleges kölcsönhatás.

6. A W-bozon tömege: Tevatron

Az amerikai Fermilab Tevatronja protont antiprotonnal ütköztetett 1660 GeV energiával. Ebben a folyamatban rengeteg W-bozon keletkezik, de sok más részecskével együtt, hiszen a proton és antiproton összetevői különböző módon és energiával ütközhetnek, és abban a nukleonban hemzseggő gluonok dominálnak. Ott tehát a W-bomlást csak a keletkező leptonok tanulmányozásával lehet azonosítani. A tau lepton tömege már elegendően

nagy ahhoz, hogy hadronosan is tudjon bomlani, tehát az adatelemzés műonokra és elektronokra korlátozódik. A detektorok valamennyi ütköztetőnél az ütköző részecsenyalábok csatornája körül, hengeresen épülnek fel, ezért a mérés kénytelen a nyalábra merőleges p_T *transzverzális lendületre* hagyatkozni, hiszen a hosszanti komponens nem tudjuk megmérni.

További nehézség, hogy a hadronok összetevői a teljes hadronlendület különböző részeit hordozzák, tehát nem lehet tudni, milyen lendülettel ütköznek a W-bozon keltő részecskék, arra csak elméleti becslések, a *partoneloszlási függvények* állnak rendelkezésre. A mért összefüggéseket szimulációkkal összevetve határozható meg a keresett W-tömeg, a szimulációkhoz viszont a fenti függvényeket kell felhasználni. Ez adja a mérés elméleti bizonytalanságának legnagyobb járulékát.

A mozgó részecske E energiájából és p lendületéből meghatározható a tömege: $m^2 = E^2 - p^2$, a p_T transzverzális lendülethez tehát a különösen hangzó *transzverzális tömeg*, $m_T^2 = E^2 - p_T^2$ rendelhető. A módszer tehát az, hogy a leptonokra bomló W-bozonok elektronokhoz és müonokhoz köthető m_T eloszlását hasonlítjuk össze a mért és különböző M_W -t feltételező szimulált eseményekkel, természetesen gondos válogatás után, megfelelő feltételek mellett. Mindehhez, a leptonok nyomon követése mellett a neutrínók által elvitt *hiányzó* energiát és impulzust is meg kellett határozni. Ez viszonylag könnyű volt az elektron-pozitron ütköztetőknél, de annál nehezebb a hadronütközésekben.

Fontos körülmény a kísérleti adatok elemzésénél az összegyűjtött események száma. Az ütközési gyakoriságot *luminositásnak* hívjuk, és a hatáskeresztmetszet inverzében mérjük. A hatáskeresztmetszet egysége a *barn*, $1\text{ b} = 10^{-28}\text{ m}^2$, és a részecskefizika meglehetősen ritka reakcióinak jellemzésére kapott hatáskeresztmetszeteiket jellemzően pikobarn ($1\text{ pb} = 10^{-12}\text{ b}$), illetve femtobarn ($1\text{ fb} = 10^{-15}\text{ b}$) egységben érdemes kifejezni. A fizikai elemzéshez felhasznált adatmennyiséget, azaz teljes luminositást ennek megfelelően fb^{-1} egységben tüntetjük fel, ami közvetlenül mutatja a mérés elérhető pontosságát.

A két nagy Fermilab-detektor, a CDF és a D0 különböző adattömegek és bomlási módok elemzésével egymáshoz eléggé hasonló eredményt kapott a Tevatron leállása, 2011 után. A proton-antiproton ütközési energia 1660 GeV volt. A W-tömeget három változó, a lepton p_T és az elszökött neutrínó p_T transzverzális lendülete, valamint az m_T transzverzális tömeg elemzésével mérték. A CDF-kísérlet 2013-ban $2,2\text{ fb}^{-1}$ ütközési adat felhasználásával, a $W \rightarrow e\nu, \mu\nu$ események elemzésével az $M_W = 80387 \pm 12$ (stat) ± 15 (sziszt) MeV eredményt kapta, ahol az első bizonytalanság az feldolgozott események számából adódó statisztikus, a másik a mérés és elemzés módszeréből eredő szisztematikus bizonytalanság. A kétféle bizonytalanság statisztikus összegéből, a korrelációk figyelembevételével kapott teljes eredmény $M_W = 80387 \pm 19$ MeV lett. 2012-ben a D0 detektor, érdekes módon kétszer annyi, $4,3\text{ fb}^{-1}$ -nyi ütközést használt fel,

de csak a $W \rightarrow e\nu$ elektronos bomlásokat elemezte, és a CDF-éhez hasonló eredményre jutott, habár nagyobb kísérleti bizonytalanság mellett: $M_W = 80367 \pm 13$ (stat) ± 22 (sziszt) = 80367 ± 26 MeV. Senkit sem lepett meg, hogy a két Tevatron-kísérlet eredménye nagyon jól egyezett egymással, a négy LEP-kísérletével és természetesen az elméleti számításokkal is.

2013-ban a két Tevatron-kísérlet összesítette a W-tömeg fenti két mérését korábbi (jóval kisebb adattömegben alapuló) eredményeikkel [8], és a következő közös eredményt kapták: $M_W = 80387 \pm 16$ MeV. Bevéve az összesítésbe a négy LEP-kísérlet eredményét csak a bizonytalanság csökkent egy kicsit, tehát a 2013-as világátlag $M_W = 80387 \pm 15$ MeV lett.

7. CDF-mérés, 2022

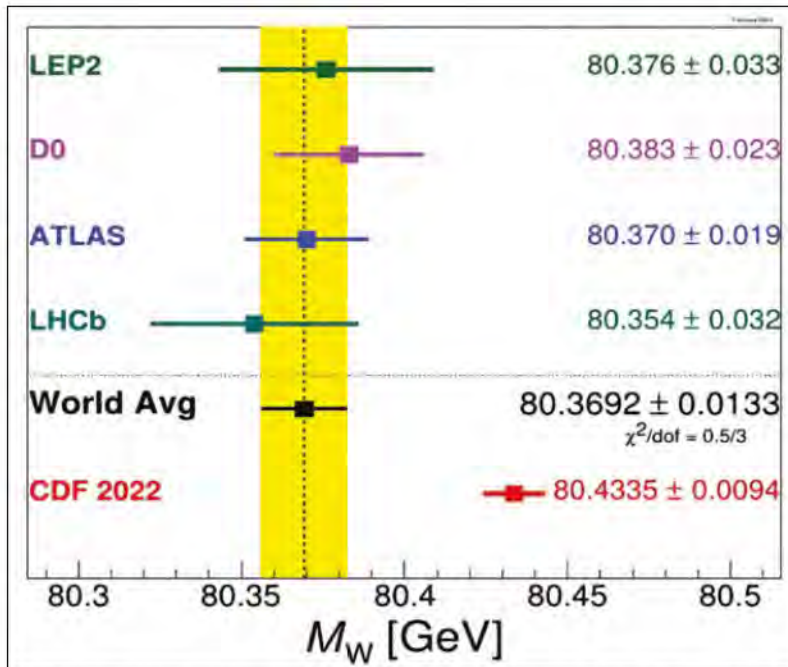
A Tevatron leállása után 10 évvel a CDF-kísérlet elemezte valamennyi összegyűjtött (8,8 fb⁻¹-nyi) adatát, felhasználva mind az elektronos, mind pedig a müonos bomlásokat, tehát a korábbi adattömeg négyszeresét, és elképesztő módon, az összes korábbtól élesen eltérő eredményt kapott (3. ábra): $M_W = 80433,5 \pm 6,4$ (stat) $\pm 6,9$ (sziszt) = $80433,5 \pm 9,4$ MeV. A CDF 2022-es eredménye sokkal pontosabb valamennyi korábbinál, de hétszeres bizonytalansággal különbözik az összes többitől, beleértve a saját korábbi értékét is. A feleakkora statisztikus bizonytalanság nem meglepő a négyszeres adatmennyiség alapján, hiszen 4,2 millió W-bozont regisztráltak, a sokkal kisebb szisztematikus viszont igen. A [9] CDF-közlemény azzal magyarázza a radikálisan csökkentett szisztematikus bizonytalanságot, hogy az elmúlt tíz év alatt jelentősen javultak a módszerek: fej-

lődött mind a statisztikus adatelemzés, mind pedig az elméleti számítások megbízhatósága, valamint a detektorrendszert is sokkal jobban sikerült utólag szimulálni és kalibrálni. Az egyik legfontosabb elméleti fejlemény a partoneloszlási függvények pontosabb számítása volt; ezek járuléka az előző W-tömeg meghatározási bizonytalanságához 10 MeV volt, és az 2022-ig csaknem harmadára, 3,9 MeV-re csökkent.

A megváltozott W-tömeg közlése feldúlta a tudományos közvéleményt, és az új CDF-eredményt általános kétség fogadta. A nagyenergiás fizika óriási előnye, hogy a kísérletek egyenkénti ütközésekben lezajló eseményeket regisztrálnak, és azokat tárolják, így bármikor újra elemezhetők újabb szempontok vagy módszerek felhasználásával. Ez tette lehetővé a CDF-nek és a két LHC-kísérletnek, hogy egy évtizeddel az adatok rögzítése után azokat újra elemezze. Az LHC-ban a gyorsítótechnika fejlődésével nagyon gyorsan nőtt az ütközések gyakorisága, és amikor egyidejűleg rengeteg (2022-től már 50–60) proton-proton ütközés történik, igen nehéz azonosítani a neutrínók által elvitt hiányzó lendületet, ezért nyúlt vissza két LHC-kísérlet, az LHCb [10] és az ATLAS [11] a korai, 7 TeV-es protonütközésekhez. Meghatározták belőlük a W-bozon tömegét, és a korábbiakkal egyező, a CDF-nek azonban ellentmondó eredményt kaptak.

A 3. ábrán látható a LEP2 (azaz a két gyenge bozon előállításához elegendő energiájú LEP), a Tevatron és az LHC két kísérletének mérése a W-bozon tömegére. A régi CDF-érték itt külön nem szerepel, mivel azt figyelembe vették az új CDF-eredményben.

8. A CMS új mérése



3. ábra. A W-bozon tömegének mérése a LEP-nél, a Tevatronnál és az LHC-nál. A 2022-ben publikált CDF-eredményt nem vették figyelembe a sárga intervallummal jelölt világátlag számításánál [6]

A CMS együttműködés úgy döntött, hogy az új, 13 TeV-es LHC-adatokat elemzi a W-tömeg méréséhez. Amint már említettük, az LHC nagy energiájú és intenzitású működésében az egymástól független események egyidejűleg megjelenő 50–60 protonütközése teljesen elbizonytalanítja a hiányzó energia és lendület meghatározását. Ugyanakkor az addig elképzelhetetlenül nagy adatmennyiség lehetővé tett egy igencsak korlátozott válogatást, ezért a CMS úgy döntött, hogy kizárólag a kibocsátott müonok p_T -eloszlására hagyatkozva próbálja meg a W-tömeg meghatározását.

A CMS detektor óriási (6 m belső átmérőjű) szolenoidmágnesét körülvevő vaslemezek között müondetektorok vannak, de a müonok lendületét a mágnes belsejében elhelyezett sokrétegű félvezető detektorok szolgáltatták, a müonok pályagörbülete alapján [12]. A müonészlelésekhez három paramétert rendeltek: a transzverzális p_T lendületet,

a nyalábirányhoz képesti kilépési szö-
get és természetesen a müon és anti-
müon – és + töltését, az első kettőhöz
igen finom beosztást alkalmazva. Az
 M_W értéket a három eloszlás illeszté-
séből határozták meg, összevetésben
az elméleti számításokkal, figyelembe
véve természetesen a mérés háttére-
seményeit. A lendület mérését a J/ψ
 $= [c\bar{c}]$ mezon nagyon pontosan mért,
 $\mu^+\mu^-$ párra történő bomlásával ka-
librálták, és két másik hasonló bom-
lással, a Z-bozonéval és az $\Upsilon = [b\bar{b}]$
mezonéval ellenőrizték. Az elemzést
megismételték a müonok kilépési szö-
gének mérésével olyan módon, amely
ugyan kevésbé volt érzékeny M_W -re,
viszont lehetőséget nyújtott az elmé-
leti modell, a felhasznált partonelosz-
lási függvények ellenőrzésére.

Ezt az újszerű megközelítést a
Z-bozon tömegének ellenőrzésével igazolták. Megke-
resték az észlelt $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ bomlásokat, és meghatározták
velük a Z-tömeget, és az eredményt egybevetették az el-
fogadott PDG-átlaggal [6] (azaz lényegében a LEP-ered-
ménytel). A különbség

$$M_Z^{\mu\mu} - M_Z^{\text{PDG}} = -2,2 \pm 4,8 \text{ MeV}$$

lett, tehát rendkívül pontos. Ezek után végrehajtottak az
eseményeken egy W-szerű analízist, azaz meghatározták
a Z-tömeget az egyedi müonok alapján, és az

$$M_Z^W - M_Z^{\text{PDG}} = -6 \pm 14 \text{ MeV}$$

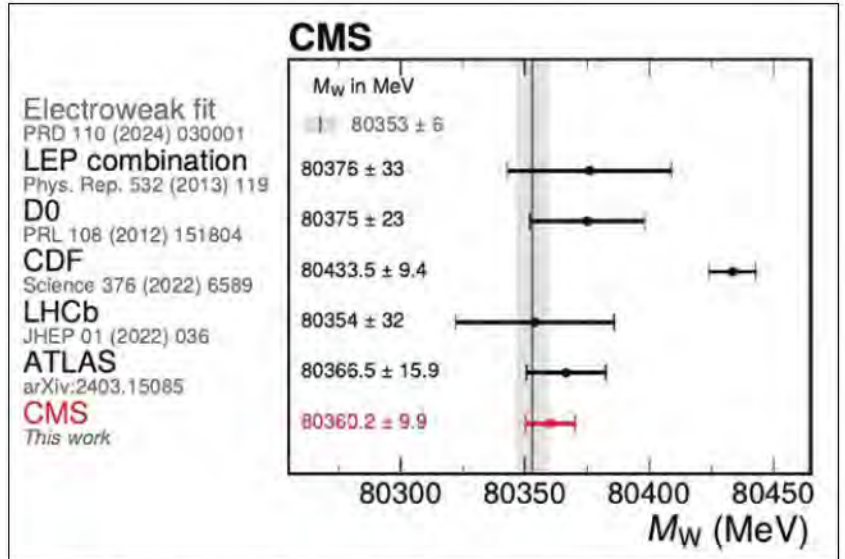
eltérést adott, tehát szintén egyezett a bizonytalansá-
gon belül. Az adatok elemzését megismételték külön-
böző modellszámítások segítségével, a bizonytalanság
becslésében az is szerepel. A lehetséges elméleti eredetű
bizonytalanságot még egy módszerrel ellenőrizték: ele-
mezték az azonosított $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$ bomlások müonjait is
az egyenkénti müonos módszerrel, különböző parton-
eloszlási függvények felhasználásával, és hasonló stabil
eredményeket kaptak.

A CMS-cikk [12] hangsúlyozza, hogy az adatelemzés
során kapott M_Z értékek, pontosságuk ellenére, nem te-
kinthetők új mérésnek, mert nem függetlenek a koráb-
biaktól, tehát nem szabad figyelembe venni azokat újabb
átlagértékek számításánál.

Végül az így ellenőrzött módszerrel elvégezték a
W-tömeg meghatározását is:

$$\begin{aligned} M_W &= 80\,360,2 \pm 2,4 \text{ (stat)} \pm 9,6 \text{ (szisz)} \\ &= 80\,360,2 \pm 9,9 \text{ MeV.} \end{aligned}$$

Amint azt a 4. ábra mutatja, a legújabb CMS-mérés
eredménye pontosságban csaknem eléri a CDF új érté-
két, de azzal ellentétben jól egyezik a CDF-en kívül va-
lamennyi korábbi méréssel és a modellszámításokkal is.



4. ábra. A W-bozon tömegének mérése a CMS-kísérletnél [11] (legalul, pirossal), összehasonlít-
va a korábbi mérésekkel és a legújabb modellszámítással (függőleges vonal, körülötte az elméleti
bizonytalanság sávjával)

A W-tömeg elméleti bizonytalansága ± 6 MeV; a számí-
tásokban természetesen figyelmen kívül hagyták az M_W
kísérleti értékeit. A CMS-cikk [12] nem von le semmiféle
következtetést a vitatott CDF-eredményre vonatkozólag.
Annak eltérése az elmélettől és a többi méréstől nyitott
kérdés marad. Ami fontos, hogy az elméleti alapok válto-
zatlanul biztosnak látszanak.

Irodalom

Valamennyi idézett cikk megtalálható teljes egészében a világhálón,
a [2] tankönyv kivételével. Az érdeklődő olvasó az idézett nevek ke-
resve (Yukawa, Heisenberg, Higgs stb.) minden kérdésére választ talál
a Wikipédián. Köszönettel tartozom Trócsányi Zoltánnak a cikk gon-
dos átolvasásáért és jobbítására vonatkozó tanácsaiért.

- Horváth Dezső (2021): Az elképesztő gyenge erő (kölsönhatási
furcsaságok). *Fizikai Szemle*, 2021/9, 294.
- Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán (2021): Bevezetés az elemi ré-
szek fizikájába. Typotex Kiadó, Budapest.
- Trócsányi Zoltán (2008): Az eltűnt szimmetria nyomában – a
2008.évi fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle*, 2008/12, 417.
- Pásztor Gabriella (vendégszerk., 2023): A Higgs-bozon 10 éve.
Fizikai Szemle, 2023/2.
- Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán (2022): Antirészecskék? *Fizikai
Szemle* 2022/11, 347.
- Navas S., et al. (Particle Data Group) (2024): The review of parti-
cle physics. *Phys. Rev. D* 110, 030001.
- Horváth Dezső (2015): Higgs-bozon és a világ vége vagy kezdete.
Fizikai Szemle, 2015/4, 115.
- Aaltonen T., et al. [CDF and D0] (2013): Combination of CDF and
D0 W boson mass measurements. *Phys. Rev. D*, 88, 2013/5, 052018.
- Aaltonen T., et al. [CDF] (2022): High-precision measurement of
the W boson mass with the CDF II detector. *Science*, 376/6589,
170–176.
- Aaij R., et al. [LHCb] (2022): Measurement of the W boson mass.
JHEP, 01, 036.
- Aad G., et al. [ATLAS] (2024): Measurement of the W-boson mass
and width with the ATLAS detector using proton–proton colli-
sions at $\sqrt{s} = 7$ TeV. *Eur. Phys. J. C* 84/12, 1309.
- Chekhovsky V., [CMS] (2024): High-precision measurement of
the W boson mass with the CMS experiment at the LHC. Submis-
sion to *Nature*, arXiv:2412.13872 [hep-ex].

MICHELSON, MORLEY ÉS MILLER

A HÍRES KÍSÉRLET UTÓÉLETE

Illy József

Einstein Papers Project, California Institute of Technology, Pasadena, California
E-mail: illyjozsefdg@gmail.com

Az új évszázad beköszöntének alkalmából 1900-ban (és nem 1901-ben!) Párizsban Nemzetközi Fizikai Kongresszust rendeztek. Két amerikai vett részt rajta: *Edward W. Morley* és *Dayton C. Miller*.

Miller, a clevelandi Case School of Applied Sciences fizikusprofesszora volt [1–5], Morley pedig kémikusprofesszor ugyanott. Ő volt az a Morley, aki 1887-ben, az akkor ugyanott dolgozó *Albert Michelsonnal*, a híres kísérletet végrehajtotta.

A párizsi kongresszuson *Lord Kelvin* az éter addigi elméleteinek tárgyalása során megjegyezte, hogy „az éter elméleteinek tiszta égboltján” felhő a Michelson–Morley-kísérlet negatív eredménye, és biztatta a két amerikait, hogy ismételje meg a kísérletet érzékenyebb berendezéssel [6].

Hogyan is szólt ez a „negatív” eredmény? 1881-ben Michelson így írt: „nem tolódnak el az interferenciasávok. A stacionárius éter ... föltevése hibás” [7]. Azaz a Föld teljesen magával tudja ragadni. 1887-ben pedig Michelson és Morley így összegezte mérésük eredményét: „Ha lenne is relatív mozgás a Föld és a fényhordozó éter között, kicsinek kell lennie. Hiba lenne ebből arra következtetni, hogy az éter nyugalomban van a Föld felszínéhez képest. ... A kísérletet tehát meg fogjuk ismételni háromhavonként, s így kiküszöbölünk minden bizonytalanságot” [8]. (Ezt az ígéretüket nem tartották be.)

Egyik állítás sem tagadja az éter létezését, csupán azt latolgatja, hogy a Föld magával sodorja-e.

Miller úgy látta, hogy a kísérlet célja annak a föltevésnek a vizsgálata volt, hogy az éter abszolút nyugalomban van, és benne a Föld úgy mozog, hogy ezt a nyugalmat egyáltalán nem zavarja meg. Ez az a föltevés, amelyet a kísérlet cáfolt.

George FitzGerald saját számításai alapján 1889-ben azt a megoldást javasolta, hogy a kísérleti berendezés a mozgása irányában összehúzódik, így ez ellensúlyozza az éterszél egyébként fellépő hatását. Ugyanerre a következtetésre jutott *H. A. Lorentz* is 1892-ben.

(Az „éterszél” anyiban szél, amennyiben egy mozgó nyitott autóban is „fúj a szél” még akkor is, ha a levegő nyugalomban van.)



Illy József 1956-ban szerzett fizika-matematika tanári oklevelet a József Attila Tudományegyetemen (JATE) Szegeden. 1982-től a fizikai (tudománytörténet) tudományok kandidátusa, 1983-tól egyetemi doktor (JATE). 1991 óta az Einstein Papers Project egyik szerkesztője a Boston Universityn, majd a California Institute of Technology.

Kelvin tanácsát követve Morley és Miller az eredeti Michelson-féle interferométerhez képest négyszeres érzékenységgű berendezést épített. A két fénynyaláb interferenciasávjainak másfél sávnyi eltolódása akkora sebességet tudott volna kimutatni, amekkora a Föld pályamenti sebessége [9].

1902-ben, 1903-ban és 1904-ben megvizsgálták a Lorentz–FitzGerald-féle összehúzódást. Mivel ennek értéke függött az éterben mozgó anyag minőségétől, összehasonlították egy homokkő alapra, egy fenyődeszkára szerelt és egy acélvázaz interferométer adatait. Bejelentették, hogy ha van is összehúzódás, annak kisebbnek kell lennie, mint a FitzGerald és Lorentz szerint számított érték századrésze.

Mivel ezeket a méréseket pincében végezték, feltételezhették, hogy a pince fala már nem engedi át az étert, azaz a pincében áll az éter. 1905-ben és 1906-ban tehát megismételték a „klasszikus” Michelson–Morley-kísérletet egy magaslaton épített, könnyűszerkezetű kunyhóban, hátha a nagyobb magasságban kevésbé sodorja magával a Föld az étert. A számított érték tizedét kapták.

Közben elérkezett az 1905-ös év egy fiatal svájci fizikus, Albert Einstein cikkével.

Ebben a cikkben Michelson és Morley neve nem szerepel, a kísérletükről pedig annyi, hogy „a Föld »fényközeghez« viszonyított mozgásának tanulmányozására irányuló sikertelen kísérletek”. A „fényéter” felesleges, „mivel nincs szükség különleges tulajdonságokkal rendelkező »abszolút nyugalomban levő térre«, sem arra, hogy az üres tér azon pontjához sebességvektort rendeljünk, amelyben elektromágneses folyamat zajlik”¹ [10].

A következő években a relativitáselméletet szakmabelieknek, filozófusoknak, kívülállóknak magyarázó írások egyre növekvő számában a Michelson–Morley-kísérlet kezdte a döntő kísérlet („experimentum crucis”) szerepét játszani. Ezt az a didaktikus megfontolás is segítette, hogy egy elméletet induktíve, a tapasztalatból kiindulva könnyebb kifejteni. A mi esetünkben ez azt is jelenti, hogy ha van elmélet, kell hogy legyen tapasztalat is, amire épül. Hogy a speciális relativitáselmélet ezen az induktív úton jött-e létre, később tárgyalom.

1906-ban Morley elhagyta a Case Schoolt, Miller érdeklődése pedig az akusztika felé fordult. Emellett fuvolázott, gyűjtötte ezt a hangszert és a róla szóló irodalmat, képeket, kottákat. Gyűjteménye az amerikai Kongressz-

¹ Az éterről tekintélyes tudósok által vallott nézetekkel szemben az éter elvetése szinte istenkáromlásként hatott. Milyen bántó lehetett ezt Millernek olvasnia (mert tudott németül), aki résztvevője volt az éter után nyomozó kísérletnek! A Michelson–Morley-kísérletnek azt a magyarázatát ugyanis, hogy nincs éter, sohasem fogadta el.

szusi Könyvtárban őrzött hagyatékának része. Számunkra értékes darabja *Széchenyi István* fuvolája.

Újabb próbálkozás

1919 ismét felcsigázta Miller érdeklődését a Michelson–Morley-kísérlet iránt. Ennek pedig az volt az oka, hogy két brit expedíció is észlelte a fény elhajlását a Nap mellett, s ezzel nemcsak igazolta az általános relativitáselmélet egyik következtetését, hanem világhíressé is tette az elmélet megalkotóját, Albert Einstein, ezzel pedig elindította azt a szakmai és szakmán kívüli vitát, amely még évtizedekig kísérte az elmélet és szerzője fogadtatását.



1. ábra. Dayton C. Miller

1921 tavaszán Miller azt javasolta *George Hale*-nek, a Mount Wilson Observatórium igazgatójának, hogy megismételné a Michelson–Morley-kísérletet a Mount Wilsonon, 1740 méter magasan. Hale már beszélt a kísérlet megismétléséről Michelsonnal és Morleyvel, és bár mindketten kételkedtek Miller 6–10 km/s-os elvárásában, úgy vélték, a próbálkozás megéri a fáradságot.

Lloyd Swenson szerint [11] Millert az is sarkallta, hogy 1920 októberében Einstein kijelentette: „Mondhatjuk, hogy a térnek vannak fizikai tulajdonságai, ebben az értelemben létezik éter” [12]. Lorentz kérte meg, hogy foglaljon állást az éter ügyében. Einstein leydeni speciális professzori székfoglalóját használta fel arra, hogy eleget tegyen Lorentz kérésének.

Miller úgy látta, hogy ez az éter más, mint a „hagyományos”, így hát 1921 tavaszán felszállította interferométerét a Mount Wilsonra. Kátránypapírból és ponyvából sátrat épített, hogy az éter szabad mozgását ne gátolja semmi. A hegyi szél és a hőmérséklet-ingadozás miatt azonban nem bízott az első, pozitív eredményt adó mérésekben, hanem bordáslemezről és ponyvából újabb kunyhót épített a nyári mérések előtt, a berendezés egyes részeit átépítette, sárgarezet és alumíniumot használva a mágneses zavarok kiküszöbölésére, és még parafával is beburkolta őket, hogy javítsa a hőszigetelést. Az eredmények változatlanok maradtak.

Ezután 1922–1923-ban Clevelandben, majd 1924-ben ismét a Mount Wilsonon folytatta a méréseket és a berendezés tökéletesítését. A nagyszámú mérés kiértékelésében két matematikus kollegája is segítette.

Az 1921–1925-ös mérésekből arra következtetett, hogy a Föld és az éter közti relatív sebesség kb. 9 kilométer másodpercenként, egyharmada a Föld pályamenti sebességének. (Ebből az is következik, hogy a Föld az étert részlegesen magával sodorja). További számításokat és méréseket tervezett, hogy a Naprendszer abszolút mozgását is kimutassa.

Miller a Mount Wilsonon kb. 5000 mérést végzett éjjel-nappal, a berendezés forgását folyamatosan követve, csillagászati távcsővel figyelve meg a sáveltolódást, nappal is elsötétítve, mert nem tudott elég erős fényforrást találni.

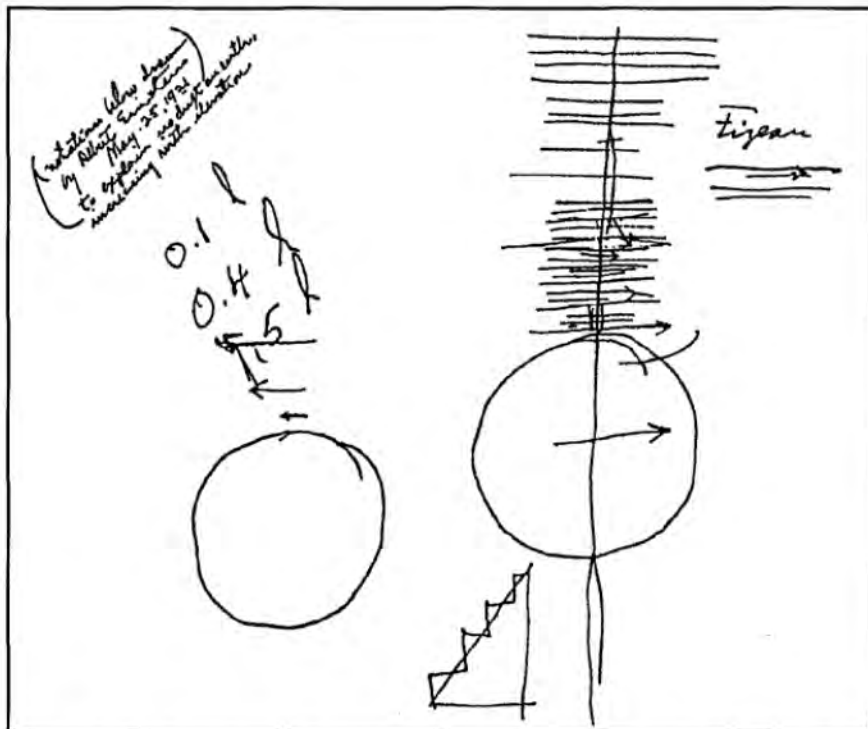
Miért kellett nagyon sok mérést végeznie? Az interferométer egyik karjának a Föld mozgási irányába kell mutatnia, a másiknak erre merőlegesen, hogy a lehető legnagyobb különbség jöjjön létre a két fénysugár sebessége között, amennyiben van ilyen különbség. Mivel a Föld forgása miatt folytonosan változott a két kar helyzete, és ezt még bonyolította a keringésből és a Naprendszer mozgásából adódó változás, az interferenciasávoknak is folyamatosan mozogniuk kellett. Miller szét akarta választani ezeket a mozgásokat, hogy ne csak a sebesség nagyságát, hanem irányát is meghatározza, ezért kellett neki hihetetlenül fárasztó leolvasási sorozatokat végrehajtania, és az interferométer két karjára merőleges irányt, az azimutot is följegyeznie.

Einstein találkozik Millerrel

Einstein először 1921-ben látogatott el Amerikába. A Princetoni Egyetemen tudta meg, hogy Miller a Mount Wilsonon pozitív eredményt kapott, azaz meg tudta mérni a Föld éterhez viszonyított sebességét. Mivel nem volt kellőképpen tájékozott az esetről, ekkor még csupán annyit mondott: „az Úristen ugyan agyafúrt, de nem rosszindulatú” [13]. Amikor megkérdezték, mit ért ezen, ezt válaszolta: „a természet a magasztossága miatt rejt el titkait, nem ravaszságból”. *Abraham Pais* magyarázata szerint pedig ezzel azt akarta kifejezni, hogy azért nem hiszi, hogy Miller kísérletei helyeseknek bizonyulnak, mert túl bonyolult lenne megmagyarázni a helyzetet.

Einstein 1921. május 25-én látogatott el Clevelandbe a Weizmann vezette cionista küldöttség tagjaként, és a Case Schoolban találkozott Millerrel [14]. Hogy miről beszélgettek, részben egy szelet papír árulja el (2. ábra), részben maga Einstein.

A 2. ábrán találjuk Fizeau nevét Einstein kézírásával, és a vázlatát annak a kísérletnek, amelyben Fizeau a fény sebességét mérte meg mozgó vízben. Az eredmény Fresnel korábbi feltevését látszott igazolni, hogy az anyag (esetünkben a víz) részlegesen sodorja magával az étert. Amint Einstein Shanklandnak elmondta, ő arról beszélt Millerrel, hogy a Fresnel-féle sodrás már önmagában nagyon csökkentené a várt sáveltolódást [15]. (Valószínű, hogy az is szóba került, hogy amit Fizeau a víz és a fény sebességének összegére kapott, a relativisztikus sebesség-összeadással magyarázható meg.)

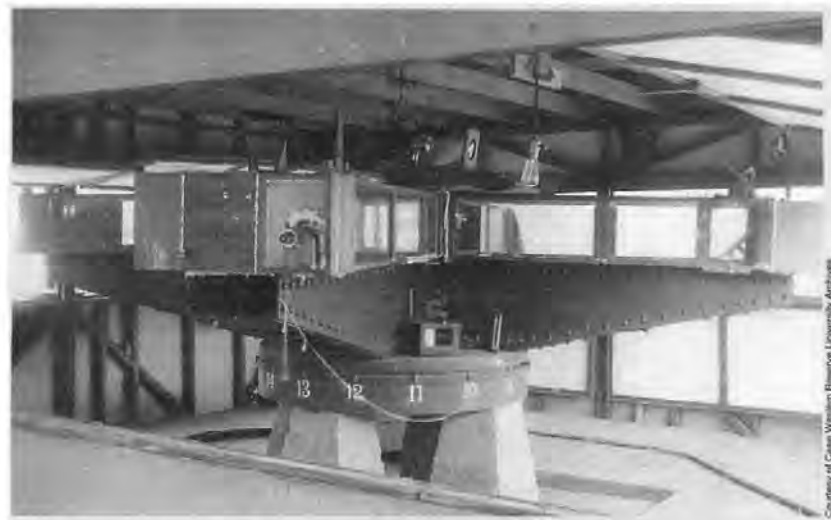


2. ábra. A bal felső sarokban Miller megjegyezte: „Az alábbi jegyzetet Albert Einstein rajzolta 1921. május 25-én hogy elmagyarázza [miért] nincs sodrás a Földön, [a sodrás] növekedve a magassággal”

Miller 1922-ben publikálta eredményeit a *Physical Review*-ben [16]. Erről az éppen Pasadenában, a California Institute of Technology (a Caltech) vendégkutató Max Born pletykaként értesült. „A Michelson-kísérlet azon dolgok közé tartozik, amelyek gyakorlatilag a priori. – írta Einsteinnek – A szóbeszéd egyetlen szavát sem hiszem el.”

Természetesen egy kísérlet nem lehet a priori, de a rá épült relativitáselmélet óriási tekintélye visszahatott a jelentőségére.

Később Bornnak alkalma nyílt meglátogatni Miller kunyhóját a Mount Wilsonon. Meg volt rökönyödve Miller rendetlenségétől [17].



3. ábra. Az interferométer

Miller, már az Amerikai Fizikai Társaság elnökeként, az Amerikai Akadémia 1925. április 28-i ülésén bejelentette, hogy a Michelson–Morley-kísérlet megismétlése során kicsiny pozitív értéket kapott a Föld és az éter relatív mozgására [18]. Ahogy Swenson fogalmaz, Miller, „parancsnokló fellépésével, amelyet csak erősített kísérleti módszerébe vetett határozott bizalma, biztosította hallgatóságát, hogy a megfigyelt értékeknél nem használt semmiféle korrekciót ... megközelítőleg kilenc kilométer másodpercenkénti relatív mozgás van a Föld és az éter között a Mount Wilsonon ... említette azon elvárását, hogy ha a többi Michelson–Morley-kísérletet újraértékelik, ki fogják mutatni, hogy azok sem adtak igazán zéró eredményt”.

Edwin Slosson, a *Science Service* újságírója és igazgatója megküldte Einsteinnek mindazon cikkek különlenyomatát, amelyeket

Miller a *Science*-ben és az Amerikai Akadémia Proceedingsében jelentetett meg. Hozzátette: Miller bejelentése mély benyomást tett az Akadémia hallgatóságára, és még azok sem tudtak magyarázatot adni erre az eredményre, akik egyébként szilárdan hittek a relativitáselméletben. Kifejezték azon véleményüket, hogy ha mindez tényleg igaznak bizonyul, ez cáfolja az elméletet, vagy legalábbis egyes részeit.

Einstein is visszafogottan nyilatkozott. „Mivel nincs más elmélet, csak a relativitáselmélet és Lorentz hasonló elmélete, amely minden ismert jelenséget megmagyarázna, kivéve Miller eredményét, nincs mit tenni, csak tovább várni, míg Miller részletesebben nem publikálja eredményeit.”

Magánleveleiben már nyíltabban írt. „Magunk között szólva nem hiszek Miller kísérletei helyességében, de nincs jogom, hogy ezt nyilvánosan kimondjam. – írta Robert Millikannek – ... Szinte lehetetlennek tűnik, hogy a Cleveland és a Mount Wilson közti kis magasságbeli különbség ilyen nagy különbséget okozna az »éterszélben«.” Később Hans Reichenbach számszerűsítette ezt az állítást: a Mount Wilson magassága 0,03%-a a Föld sugarának. Lehetetlen, hogy ezen a kis távolságon az „éterszél” sebessége a clevelandi 0-ról 10 km/s-ra növekedjék [19].

Paul Ehrenfestnek, pertu barátjának, már játékosabban fogalmazott Einstein. „Ennek a kis magasságkülönségnek nem lehet jelentős a hatása – írta – ahhoz a nagyvonalúsághoz képest, ahogyan az Öreg megteremtette ezt a világot.”

Az „Öreg”, Spinoza és Einstein Istene, maga a világ-egyetem, az emberi elmét meghaladó szerkezetével. „Úgy vélem – írta korábban Millikannek –, hogy tényleg sikerült megtalálnom a kapcsolatot a gravitáció és az elektromosság között, feltéve, hogy Miller kísérletei hibásak. Máskülönb a relativitás egész elmélete kártyavárként omlik össze”.

A Caltechen dolgozó Paul Epstein szerint „Miller némileg merész állításaira a mi köreink nagyon visszafogottan reagáltak; reméljük, hogy méréseit más kutatók másféle műszerekkel hamarosan ellenőrzik”. Ez célzás volt arra, hogy a Caltechen *Roy Kennedy* már készül erre egy modernebb berendezéssel.

Epstein meg is látogatta Millert a Mount Wilsonon. „Mennél tovább fontolgatom, miről is beszélt – írta Einsteinnek –, annál erősebbé válik az a benyomásom, hogy az egész dolog humbug, mivel Miller egyáltalán nem érti a saját eredményeit. ... Kéthetente változtatja adatait. ... Michelson nagyon visszafogott.”

Az európai visszhang

Miller akadémiai előadása hullámokat vetett Európában is. A svájci *Georg Joos* az Alpokban, a német *Rudolf Tomaschek* szintén a svájci Alpokban, a belga *Auguste Piccard* léggömbben, 4500 méter magasan készült megismételni a méréseket, *Karl Meissner* pedig egyenesen meghívta Millert Svájcba, hogy ott kedvére válogasson a 400 és 3800 méteres magasságok között.

Einstein nyomon követte az európai javaslatokat. Fontosaknak tartotta ugyan őket, de feleslegeseknek. „Mit tehetünk, hogy valami módszerességet vigyünk ebbe az örülségbe? – írta *Max von Laue*-nak – Rettentetes szégyen lenne, ha túl sok pénzt ölnének bele ebbe a teljesen kétséges dologba.” Meg volt győződve, hogy a hiba a hőmérséklet-eloszlásban van. Szintén a hőmérsékletet tette felelőssé Piccardnak írt levelében. „Miller méréseit egyetlen pillanatig sem vettem komolyan” – írta barátjának, *Michele Besson*nak.

Az éter nagy hívének, Lorentznek technikai kifogásai voltak. Erre válaszolva Einstein megjegyezte, hogy 0,1 fokos hőmérséklet-különség az interferométer két ága között egy tízezrednyi különbséget hozna létre a két fényút között, és ez elég volna, hogy megmagyarázza Miller pozitív eredményét.

1926 elején Einstein elérkezettnek látta az időt, hogy véleményével a nagyközönség elé lépjen. „Prof. D. C. Millernek a relativitáselmélet ellen indított támadása, amelyből világszenzáció lett, teljesen hibás, és az elmélet sértetlen – nyilatkozta egy amerikai riporternek. ... Ha Millernek igaza lenne, nemcsak a relativitáselmélet omlana össze, hanem a világ tudományossága bizonyulna a történelem legnagyobb fiasójának.” Miller adatai

„inkább egy még föl nem ismert hibaforrásra utalnak, semmint egy rendszeres hatásra. ... Ha Ön, kedves olvasó, fogadásra akarná felhasználni ezt az érdekes tudományos helyzetet, javasolom, hogy arra fogadjon, hogy Miller kísérletei hibásaknak bizonyulnak, vagy hogy eredményeinek semmi közük sincs az »éterszélhez«. Jómagam nagyon boldogan erre tenném a pénzemet” [20].

A nyilatkozat elsőnek a *San Francisco Examiner*ben jelent meg, majd a berlini *Vossische Zeitung*ban.

A hőmérséklet-különség hatására fel is hívta Miller figyelmét, és javasolta, hogy például ventilátorokkal lehetne segíteni a bajon [21].

Miller elfogadta a hőmérséklet-különség Einstein által említett hatását, de biztosította Einsteint, hogy azért végzett tízezernyi leolvasást, hogy a Föld forgásából származó hőmérsékleti ingadozás (főleg a nappal és az éjszaka váltakozása miatt) statisztikusan kiegyenlítse egymást. 1921-ben és 1924-ben az interferométer 1200 fordulátát olvasta le, 1925 áprilisában 800-at. Mindegyik fordulat két adatot ad az étersodrásra. Július, augusztus és szeptember során 3600 fordulatot elemzett. A leghosszabb mérési sorozatra 2000 fordulattal 1926 februárjában került sor.

Hogy valójában megsértődött Einstein megjegyzésén, azt a *Cleveland Plain Dealer* 1926. január 27-ei számában árulta el. „Einstein professzorral az a baj, hogy nem ismeri az eredményeimet. ... azt hajtogatja, hogy a clevelandi interferométeres kísérletek negatív eredményt adtak. Sosem mondtuk, hogy negatív eredményt adtak, és valójában sosem adtak negatív eredményt. Igazán becsülhetne annyira, hogy tudom: a hőmérséklet-különség befolyásolja az eredményt. Novemberi levelében utal erre. Nem vagyok olyan együgyű, hogy ne venném számításba a hőmérsékletet.”

Minden kifogása ellenére Einstein nem tagadta, hogy Miller kísérletei érdekesek, és „ha az eredmény nem a Föld mozgását bizonyítja is – írta Lorentznek –, úgy tűnik, hogy a földi okokon kívül egy állandó irányt mutat ki az állócsillagokhoz képest. Ha ez továbbra is így marad, valami alapvetőnek kell rejtőznie a dolog mögött”. Hozzátette, hogy *Max Planck* és *Laue* nagyon kételkedik ebben.

Einstein így fogalmazta meg az 1927-es helyzetet. „A Michelson–Morley-kísérlet negatív eredménye arra a meggyőződésre vezetett, hogy a fény üres térben, inerciarendszerhez viszonyítva állandó sebességgel terjed, amely független az inerciarendszer sebességétől. Pontosabban, az eredmény valamivel kevesebbet mutat, mégpedig azt, hogy az az idő, amire a fénynek szüksége van, hogy a Földön nyugvó szilárd rúd mentén oda-vissza haladjon, független a rúd térbeli irányától. (Mennyire örült volna ennek a pozitivistá megfogalmazásnak Ernst Mach! IJ) A relativitáselmélet ezen az eredményen áll vagy bukik, ezért volt olyan izgalmas az elméleti szakembereknek, amikor a clevelandi Dayton Miller professzor úr ettől eltérő eredményre jutott, aprólékosan pontos, évekig tartó kísérletei során, amelyeknek legfontosabb részét a Mount Wilsonon hajtotta végre. ... Kétségtelen,

hogy dicséretes Prof. Millertől, hogy kísérleteivel gondosan újra megvizsgálta Michelson fontos kísérletét. Eredményét azonban megcáfolta Kennedy és Piccard” [21].

1927 februárjában konferenciát rendeztek a Mount Wilsonon. Részt vett rajta többek között Michelson, Miller, Kennedy és a Caltechen látogató Lorentz [22]. Bizony, Miller kisebbségben maradt. Azt hihetnénk, hogy ezek után „megadta magát”. Hát, nem!

Az éterfizika híveihez és a relativitás bírálóihoz csatlakozva részt vett az Optikai Társaság 1929 októberi szimpoziumán. Ezen C. L. Poor az 1919-es fényelhajlás eredményeit, K. Burns a napsugárzás vöröseltolódásának, H. P. Morgan a Merkúr perihéliuma eltolódásának számítását bírálta, Miller az étert védte [23]. 1930-ban pedig az Akadémián a Lick Obszervatórium 1922-es eredményeit vonta kétségbe, mert azok megerősítették az 1919-es fényelhajlást. A Lick-expedíció egyik résztvevőjének C. L. St Johnnak ezzel betelt a pohár. „Miller a régi nótát fújja – mondta – ... Azt hiszem, ... most már abbahagyhatná.”

Miller 1934-ben írta utolsó cikkét az éterről; összefoglalta addigi munkáját. „Először az 1925-ben és 1926-ban a Mount Wilsonon végzett megfigyeléseim voltak olyan széleskörűek és átfogóak, hogy elegendők voltak a Föld abszolút mozgásának kimutatására” [24].

Röviddel 1941-ben bekövetkezett halála előtt mérési jegyzeteit S. Shanklandre hagyta, aki tanítványa, tanársegéde volt, és később utóda lett. Shankland ugyan nem tudta elfogadni, hogy Miller nem ért egyet a relativitáselmélettel, de meg volt győződve, hogy Miller mindent becsületesen tett. Így éveken át rejtély volt számára, mi lehetett az a periodikus hatás, amit Miller észlelt. Végül, kollégái segítségével és Einstein biztatására, átvizsgálta Miller jegyzeteit, modernebb kiértékelő módszereket használva. A végeredmény: a Miller által megfigyelt sáveltolódásnak sem kozmikus (étersodrás), sem magnetostriktíós, sem mechanikai behatás nem volt az oka, hanem az interferométer részei közti hőmérsékleti különbség [25]. Az eredményt megküldte Einsteinnek, aki teljesen egyetértett vele, és hozzáfűzte, hogy a mérőberendezés méretével a rendszeres hibák száma növekszik.

Mennyire építette erre a kísérletre Einstein az elméletét? Amikor 1950-ben Shankland föltette neki azt a kérdést, mikor szerzett tudomást a Michelson–Morley-kísérletről, azt válaszolta, hogy 1905 után, Lorentz cikkeiből, „máskülönben említettem volna a cikkemben” – tette hozzá. A legfontosabb kísérleti eredmény, ami befolyásolta, a csillagászati aberráció és Fizeau fénysebességmérése volt [26]. Két évvel később ugyanerre a kérdésre azt felelte: nem hiszi, hogy az alatt a hét év alatt, amíg az elméleten dolgozott, tudatában lett volna, hogy közvetlenül befolyásolta. Egyszerűen feltételezte, hogy a kísérlet zérus eredménye igaz.

Így ugyan Einstein nem említette a kísérlet végrehajtóit *név szerint*, de számára az elmélet nagyszerűsége követelte meg a negatív eredményt. Ebben az értelemben a kísérlet igenis döntő szerepet játszott a speciális relativitáselmélet kialakulásában.

Irodalom

A cikkben hivatkozás nélkül említett levelezés a CPAE 15. kötetében található. Ez a Digital Einstein Papers Home webhelyen (<https://einsteinpapers.press.princeton.edu/>) érhető el. A német nyelvű dokumentumok angol fordítása a címre kattintva jelenik meg.

1. Fletcher H. (1943): Biographical Memoir of Dayton Clarence Miller 1866–1941. National Academy of Sciences of the USA, *Biographical Memoirs*, 23, 3rd Memoir.
2. Pickinger W. (2011): *Miller's Waves: An Informal Scientific Biography*. Xlibris Corporation.
3. Swenson L. S. (1972): *The Ethereal Aether A History of the Michelson–Morley–Miller Aether-Drift Experiments, 1880–1930*. Austin, London: University of Texas Press, 140. o.
4. Navarro J. (szerk., 2018): *Ether and Modernity: The Recalcitrance of an Epistemic Object in the Early Twentieth Century*. Oxford University Press.
5. Lalli R. (2018): Hunting for the luminiferous ether: The American revival of the Michelson–Morley experiment in the 1920s. In: J. Navarro (ed.), *Ether and Modernity: The Recalcitrance of an Antagonizing Object in the Early Twentieth Century*. Oxford: Oxford University Press, 155–178.
6. Conference on the Michelson–Morley experiment held at the Mount Wilson Observatory. *The Astrophysical Journal* (1928) 68, 341–402; 352.
7. Michelson A. A. (1881): The relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 22, 120–129; 128. o.
8. Michelson A. A., Morley E. W. (1887): On the relative motion of the Earth and the luminiferous ether. *American Journal of Science*, 34, 333–345; 341. o.
9. Miller D. C. (1925): Ether-drift experiments at Mount Wilson. *National Academy of Sciences, Proceedings*, 11, 306–314; 307. o.
10. Einstein A. (1905): Zur Elektrodynamik bewegter Körper. *Annalen der Physik*, 17, 891–921; 892. o. CPAE (Collected Papers of Albert Einstein, Princeton, University Press) 2. k. (kötet) 23. dok. (dokumentum).
11. Swenson L. S. (1970): The Michelson–Morley–Miller experiments before and after 1905. *Journal for the History of Astronomy*, 1, 56–78; 64. o.
12. Einstein A.: Äther und Relativitätstheorie, CPAE, 7. k. 38. dok.
13. Pais A. (1982): *Subtle Is the Lord ... The Science and the Life of Albert Einstein*. Oxford etc., Oxford University Press, 113. o.
14. Illy J. (szerk., 2006): *Albert Meets America. How Journalists Treated Genius during Einstein's 1921 Travels*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 303–305. o.
15. Shankland R. S. (1973): Conversations with Albert Einstein II. *American Journal of Physics*, 41, 895–901; 897.
16. Miller D. C. (1922): Ether-drift experiments at Mount Wilson Observatory. *Physical Review*, 10, 407–408.
17. Hedwig Born AE-nek, CPAE 15. k. 408. kivonat.
18. Lásd [3], 209–210. o.
19. Reichenbach H. (2006): „Has the Theory of Relativity Been Refuted?“, (1926). In: Gumbel, S., Walz, A. *Defending Einstein. Hans Reichenbach's Writings on Space, Time, and Motion*. Cambridge University Press, 195–204; 198. o.
20. „Einstein, Is Ready to Bet on His Theory”, CPAE 15. k. 160. dok; „Meine Theorie und Millers Versuche,” uo., 161. dok.
21. Einstein A. (1927): Neue Experimente über den Einfluss der Erdbewegung auf die Lichtgeschwindigkeit relativ zur Erde. *Forschungen und Fortschritte*, 3, CPAE 15. k. 478. dok.
22. Lásd [6].
23. Crellin J. (2006): *Einstein's Jury: The Race to Test Relativity*. Princeton University Press. Princeton, 307–310.
24. Miller D. C. (1934): Ether drift experiment and the determination of the absolute motion of the Earth. *Nature*, 164, 162–164.
25. Shankland R. S., McCuskey S. W., Leone F. C., Kuerti G. (1955): New analysis of the interferometer observations of Dayton C. Miller. *Reviews of Modern Physics*, 27, 167–178.
26. Shankland R. S. (1963): Conversations with Albert Einstein I. *American Journal of Physics*, 31, 47–57; 48. o.

A TERMÉSZETTUDOMÁNYOS ÉRDEKLŐDÉS ÉS A KREATIVITÁS ÖSSZEFÜGGÉSEI – HOGYAN SEGÍTHETI EGYMÁST A FIZIKA- ÉS RAJZTANÁR?

Pesthy Sándor Gergely^{1,4,*}, Pesthy Dorottya³, Hömöstrei Mihály^{1,2}

¹ELTE TTK Fizikai Intézet, Budapest; ²Deutsche Schule, Budapest

³Ilyés Gyula Gimnázium, Szakgimnázium és Technikum, Budaörs;

⁴ELTE Radnóti Miklós Gyakorlógimnázium, Budapest

*E-mail: pesthy.sanyi@gmail.com

Bevezetés

A kreativitás szükséges eleme a természettudományos kutatásnak [1], hiszen a természet törvényeinek keresése során általában már meglévő ismeretek új, esetenként szokatlan kombinációjának alkalmazására van szükség [2].

A sikeres tudományos kutatás feltételei egy egyetemen végzett kutatás szerint: a kutatási képességek (mint a kutatási kérdések feltétele, finomítása, hipotézisalkotás, kutatás megtervezése, irányítása, kísérleti eredmények elemzése stb. [3]), az önszabályozás a kutatásban, valamint a kreatív gondolkodás [4].

Kutatásunkban egy középiskola diákjai esetén vizsgáltuk, hogy a kreativitás *Torrance*-féle négy komponense [5], valamint egy rajzi feladat kritériumainak teljesítése hogyan függ össze a diákok fizika iránti attitűdjével, valamint a fizikából nyújtott teljesítményükkel.

Kutatási kérdéseink

KK1. *A kreativitás mely komponenseiben erősebbek a fizikában jól teljesítő, motivált gyerekek?*



Pesthy Sándor Gergely 2019 óta tanít fizikát és kémiát az ELTE Radnóti Miklós Gyakorlógimnáziumban (egy Szegeden töltött év kivételével). 2021-ben végezte el a fizika-kémia tanári osztatlan képzést az ELTE TTK-n, majd ugyanebben az évben kezdte meg PhD-képzését az ELTE TTK Fizika Doktori Iskolájának Fizika Tanítása Doktori Programjában.



Pesthy Dorottya Szegeden végzett, nemzetiségi német-rajz tanári szakon. A képzés befejeztével a Budaörsi Ilyés Gyula Gimnáziumban kezdett tanítani. Itt jelenleg gimnáziumi tanórák mellett az iskolában működő felnőttképzésen térbrázolást oktat.

KK2. *Hogyan segítheti egymás munkáját a rajz- és a fizikatanár? Milyen csíráit lehet felfedezni a természettudományos érdeklődésnek, tehetségnek a rajzórán?*

KK3. *Milyen képességekre fókuszáló rajzóriai feladat érdekelheti a természettudományos irányultságú tanulókat?*

A kérdések megválaszolásával egyszerre motiválhatjuk a diákokat a fizika és a képzőművészet felé is.

A STEAM (mozaikszó: science, technology, engineering, art, mathematics) projektek növekvő száma mutatja, hogy a két terület képes erősíteni egymást – ami nem meglepő, mert a kreativitás összeköti a tudományos kutatást és a művészeteket. Örömtelienek tartjuk, hogy már 2012-ben külön konferenciát kapott a fizika és a művészetek kapcsolata az oktatásban [6], így a terület már nem újdonság. Sok ötlet, gondolat látott a magyar szakirodalomban is napvilágot, mely a fizika és a művészetek kapcsolatát igyekszik felhasználni mindkét tárgy erősítésére. Mi ezeket a törekvéseket szeretnénk erősíteni a kapcsolatrendszer hátterének mélyebb feltárásával.

Emellett szintén magyar kutatók vizsgálták a matematikai teljesítmény és a divergens gondolkodás, valamint ez utóbbi és a kreativitás három komponensének (fluencia, flexibilitás és originalitás) kapcsolatrendszerét. E kutatásban szignifikáns korrelációt találtak az említett kreativitáskomponensek és a divergens gondolkodás, valamint a divergens gondolkodás és a matematikai teljesítmény komponensei között [7].



Dr. Hömöstrei Mihály 2006-ban végzett az ELTE matematika- és fizikatanári szakán. 2014 óta a magyar IYPT (Ifjú Fizikusok Nemzetközi Versenye) csapat felkészítő csapatának tagja, 2016 óta az ELTE Anyagfizikai Tanszékén tanít szakdidaktikai tantárgyakat, 2018 óta a budapesti Német Iskola fizikatanára. MOL-Mester-M (2010) és Ericsson-díj (2020) birtokosa.

Minta

A kutatásban 39 9. évfolyamos diák vett részt, egy vidéki nagyváros középiskolájában. A tanulók az iskola két párhuzamos osztályából érkeztek, mindkét osztály heti egy órában tanulta a rajzot, a fizikát pedig heti két órában.

A mérés rajz és vizuális kultúrával kapcsolatos oldala

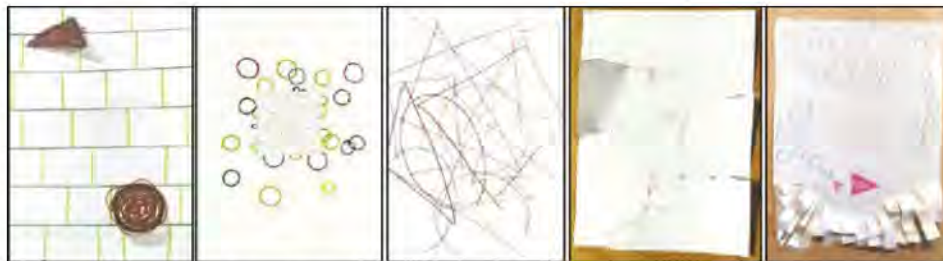
A tanulók rajzórán egy rajzi képesség- és kreativitásmérő feladatot végeztek el, melyben egy elvont fogalmat („lázáadás”) kellett megadott síkidomok segítségével minél egyedibben és minél többféle módon megjeleníteniük. Az alkotások kiértékelésekor nemcsak a kreativitás egyes komponenseit értékeltük, hanem azt is, mennyire teljesítették a tanulók az instrukciókat, azaz mennyire értették meg a feladatot, így ezt is összevethettük a fizikamérés eredményeivel.

A feladat: Lázáadás

A tanulók feladata a kreativitásmérésen az alábbi volt:

Hogyan lázad a kör, a háromszög, a négyszög?

- Próbáld meg minél kifejezőbben megjeleníteni a lázáadás fogalmát kizárólag kör, háromszög, négyszögformák és egyenes vonalak felhasználásával!
- Próbáld *átvitt*én ábrázolni: használd ki a síkidomok tulajdonságait!
- Készíts *minél több* alkotást!
- Minél *egyéni*bb a megoldásod, annál jobb!



1. ábra. Példák az elkészült tanulói munkákra



2. ábra. A rajzos felmérés tesztjének részei és ezek szakirodalmi előképei

A felmérés rajzi részében két külön teszt szempontrendszer alapján értékeltük a tanulók alkotásait (2. ábra). Minden tanulóhoz hozzárendeltünk egy rajziszint- és egy kreativitáspontszámot. A rajzi szint tesztjének összeállításához a rajzi képességek Clark-féle tesztje (CDT), illetve annak Kárpáti Andrea-féle magyar adaptációja szolgált alapként számunkra [8]. Ezek rajzelemzéseken alapuló kvantitatív tesztek: minél magasabb szintű egy adott szempont alapján az alkotás, annál magasabb pontszámot kap. Egy adott pontszám eléréséhez a rajz meg kell feleljen a pontszámhoz rendelt vizuális kritériumoknak. Kutatásunkhoz készített tesztünkben a rajzi szintet a 3. ábrán látható szempontok mentén értékeltük.

A kreativitás tesztjének előképe a klasszikus Torrance-féle kreatív gondolkodást mérő teszt (Test of Creative Thinking), azon belül a rajzi feladatként is értelmezhető „körök tesztje”. Torrance tesztjeinek szempontjait, azaz a négy kreativitáskomponenst vizsgáltuk a saját feladatunkon végzett kreativitásfelmérésben: ezek a *fluencia* (azaz, hogy a megadott idő alatt hány alkotást készített a tanuló), a *flexibilitás* (azaz, hogy hányféle alkotást készített a tanuló), az *originalitás* (azaz, hogy mekkora a mintán belül az adott ötlet, ötletcsoport fordított statisztikai gyakorisága) és az *elaboráció* (azaz, hogy mennyire dolgozta ki alkotásait a tanuló) [9].

A mérési módszer egy korábbi változatának részletes, példákkal ellátott leírását egy korábbi konferenciakötetben közzétettük [10].

Az értékelés végeztével összevetettük a két rajzi tesztet a fizikatesztek eredményeivel, és összefüggéseket kerestünk az egyes szempontoknál nyújtott teljesítmények közt a rajzban és fizikában.

A mérés fizikával kapcsolatos oldala

A projekt során tárgyalt témakör a tömegpont dinamikája volt. A diákok fizikaórán egy fizikával kapcsolatos, Likert-skálás kérdéseket tartalmazó attitűdfelmérő kérdőívet töltöttek ki annak felmérésére, hogy hogyan vélekednek a fizikáról, illetve terveznek-e ezirányban továbbtanulni. Emellett a témakör előtt és után kitöltöttek egy a klasszikus dinamikában gyakori tévképzeteket [11] felmérő tesztet, hogy felmérhessük az előzetes tudásukat, illetve a fejlődésüket a témakör terén.

4. Ha egy testre nem hat semmilyen erő, akkor

- a) biztos, hogy nyugalomban van
- b) lehet, hogy mozog, de akkor is egyre lassul, és végül megáll
- c) nem létezik ilyen állapot
- d) egyenes vonalban egyenletesen mozog
- e) egyenes vonalban egyenletesen mozog, vagy nyugalomban van.
- f) Nem tudom.

5. Képzeld el, hogy egy nagy teherautó és egy személyautó összeütközik! Melyik állítás igaz? Az ütközés során...

- a) a tehergépkocsi nagyobb erőt fejt ki a személyautóra, mint a személyautó a teherautóra.
- b) a személyautó nagyobb erőt fejt ki a teherautóra, mint a teherautó a személyautóra.
- c) egyik sem hat erővel a másikra, a személyautó pusztán azért törik össze, mert a teherautó útjában van.
- d) a teherautó erőt fejt ki a személyautóra, de a személyautó nem hat erővel a teherautóra.
- e) a teherautó pontosan akkora erőt fejt ki a személyautóra, mint a személyautó a teherautóra.
- f) nem tudom a választ.

11. Egy test kelet felé mozog, de nyugat felé gyorsul. Lehetséges ez?

- a) Nem lehetséges, hiszen a test kelet felé mozog.
- b) Lehetséges, de csak keleti irányú erő hatására.
- c) Lehetséges, de csak nyugati irányú erő hatására.
- d) Lehetséges, de csak ha azonos nagyságú keleti és nyugati irányú erő hat rá.
- e) Nem tudom

5. ábra. Példakérdések a fizika tudásfelmérő kérdéssorából

Ezt úgy értelmezzük, hogy akinek van fizikával kapcsolatos jövőképe, az inkább kevesebb dologban szeret nagyon elmélyedni, mint hogy sok témát felületesen vizsgáljon. Amíg azok a tanulók, akik nem rendelkeztek fizikás jövőképpel, többnyire egyszerűbb koncepciójú, akár elnagyoltabb hatású, de több alkotást készítettek, mint például a feladatban megengedett síkidomok szabálynak ellentmondó ábrázolása, a papír szimpla roncsolása, vagy egy nagy, „NEM” felirat használata, addig a fizikás jövőképpel rendelkezők többnyire átgondolt, részletesen kidolgozott koncepciót készítettek, és erre az egy megoldásra fordították az összes rendelkezésre álló időt.

KK2. Hogyan segítheti egymás munkáját a rajz- és a fizikatanár? Milyen csíráit lehet felfedezni a természettudományos érdeklődésnek, tehetségnek a rajzórán?

Láthattuk, hogy az elaboráció pozitívan, a fluencia negatívan korrelált a fizikás jövőkép értékeivel. Ezek mellett szignifikáns korrelációt mutattunk ki a fizikában a tanegység alatti fizika tárgybéli teljesítmény fejlődése és a rajzi feladat instrukcióinak pontos követése, megértése között.

A formahasználat és a kifejezőerő pozitívan korrelál mind a fizikatudás eredményváltozásával, mind a diákok projekt utáni fizikai tudástesztjével (ez utóbbi nem meglepő, hiszen az eredményváltozás korrelál a post teszt eredményével).

Ez azzal lehet összefüggésben, hogy a fizikában a legtöbbször sok szempont párhuzamos figyelembevételére van szükség, így akik erre képesek és hajlandóak, többet fejlődhetnek fizikából, és a rajzi feladat több kritériumát is jobban szem előtt fogják tartani.

2. táblázat. A fizikával kapcsolatos és rajzzal kapcsolatos változók összefüggései (csak a kimutatott szignifikáns interakciókat tüntettük fel. Az utolsó oszlopban látható a Pearson-féle korreláció p értéke. Szignifikáns a korreláció, ha 0,05-nél kisebb ez az érték

Fizikával kapcsolatos	Rajzzal kapcsolatos	Pearson- r	p érték
PRE F5: Sikertelenség a fizikában	Kivitelezési átlag	-0,347	0,030
	Elaboráció	-0,377	0,018
PRE F2: Fizikás jövőkép		+0,320	0,047
PRE F2: Fizikás jövőkép	Fluencia	-0,331	0,040
POST F1: Észlelt óraminőség	Ábrázolásmód-átlag	-0,318	0,048
A fizikatudás eredményváltozása és POST eredménye	Formahasználat	+0,322	0,046
	Kifejezőerő	+0,475	0,002

Ez segíthet a rajztanárnak a természettudományos tehetségek felismerésében, bár önmagában az, hogy egy tanulónak magas az elaboráció- és alacsony a fluencia-értéke, valamint jól követi a rajzi feladat instrukcióit, nem jelenti biztosan azt, hogy egy természettudományok iránt érdeklődő vagy tehetséges diákot találtunk, de jó jelzés lehet arra egy ilyen együttállás, hogy érdemes más eszközökkel is megvizsgálni az adott diák affinitását a természettudományok iránt.

A rajzi tesztben az ábrázolásmód átlagértéke negatív korrelációt mutatott a fizikai attitűdteszt észlelt óraminőség-faktorával, azaz azok a diákok, akik esetén az észlelt óraminőség-faktor értéke magas volt, kisebb teljesítményt nyújtottak az ábrázolásmódban, kisebb figyelmet fordítottak a rajzi absztrakcióra. Értelmezésünk szerint ennek oka vagy az, hogy a mi diákjaink közül a fizika felé orientáltak kevésbé tartják fontosnak, hogy rajzórán jól teljesítsenek, vagy az, hogy a rajz iránt érdeklődő tanulók kevésbé érzik jól magukat a fizikaórán. Azért nem valószínűsítjük, hogy ennek a korrelációnak az értelmezése az lenne, hogy az észlelt óraminőségre nagyobb értéket adó tanulók fejletlenebbek az absztrakcióban, mert a fizikai modellalkotáshoz és ezen modellek alkalmazásához sok absztrakcióra van szükség.

KK3. Milyen képességekre fókuszáló rajzóriai feladat érdekelheti a természettudományos irányultságú tanulókat?

A fentiek alapján látható, hogy a fizikás jövőképfaktor nagyobb értéke együtt járt a magas elaboráció- és alacsony fluenciaértékkel (azaz a kevés, de jobban kidolgozott alkotással). Ezt úgy értelmezzük, hogy a természettudományos irányultságú tanulók inkább egy feladatban mélyülnek el nagyon, így az ő motivációjukat a rajztanár olyan típusú feladatokkal erősítheti, melyek során egy, nagyobb feladatra kell jól kidolgozott alkotást beadni.

Korlátok és további kutatások

Kutatásunk eredményeinek általánosíthatóságát csökkentti, hogy a vizsgált minta relatíve kicsinek mondható, valamint az is, hogy egy adott iskola két tanárának diákjairól van szó. Ennek megfelelően az eredmények első sorban nagyvárosok gimnáziumaira alkalmazhatók.

Az eredmények szélesebb körű, nagyobb és sokszínűbb mintán történő vizsgálatára tehát szükség van a biztosabb és szélesebb körben alkalmazható állítások megfogalmazásához.

Emellett szeretnénk kiemelni, hogy a jelen kutatásunkban korrelációkat vizsgáltunk, a levont következtetések ezeken alapszanak, de ahhoz, hogy biztosat állíthassunk az ok-okozati viszonyokkal kapcsolatban, további kutatások szükségesek.

Konklúzió

Kutatásunkkal a jelenlegi kis minta esetén kimutattuk, hogy a természettudományos érdeklődés és tehetség együtt járhat azzal, hogy a diák a rajzórán kiadott fel-

adatok kritériumait jobban teljesíti, valamint azzal, hogy feltehetőleg egy feladatban mélyed el jobban szívesen. Tekintetbe véve a mérés korlátait, természetesen nem szabad a felfedezett korrelációkat szigorú szabályként alkalmazni, sokkal inkább vezérfonalként, segédletként, mely segíthet a rajztanárnak, hogy óráin felismerje a természettudományos érdeklődésű diákokat, és olyan feladatokat adjon nekik, amelyek a gondolkodásmódjukhoz illeszkedve jobban fejlesztik őket.

Kutatásunk eredményei feltártak egy lehetséges kapcsolódási területet, melyen a fizikatanár és a rajztanár kölcsönösen segítheti egymást – a fizikatanár azzal, ha hangsúlyt fektet arra, hogy olyan feladatokat adjon, melyekben több megoldási út lehetséges, és ténylegesen meg is kell többet találnia a diákoknak – ezzel fejlesztve a diákok fluenciáját és flexibilitását.

A rajztanár abban segíthet a fizikatanárnak, ha olyan feladatokat ad, melyek során egy alkotásban kell hosszabbban elmélyedni, így fejlesztve az elaborációt. Ez azért lehet segítség a fizika oktatásában, mert így a diákok a fizikafeladatokban való elmélyedést is könnyebben megúgorhatják.

Irodalom

1. Ceglédi E. (2009): A kreativitás és az intelligencia szerepe az iskolai teljesítményben. *Új Pedagógiai Szemle*, 42–52.
2. Hadzigeorgiou Y., Fokialis P., Kabouropoulou M. (2012): Thinking about Creativity in Science Education. *Creative Education*, 3/5, 603–611.
3. Nagy L., Nagy M. T. (2016): Kutatásalapú tanítás-tanulás a biológiaoktatásban és a biológiatanár-képzésben. *Iskolakultúra*, 26/3.
4. Magno C. (2011): Assessing the relationship of scientific thinking, self-regulation in research, and creativity in a measurement model. *The International Journal of Research and Review*, 6/1, 17–47.
5. Kim K. H. (2010): Can we trust creativity tests? A review of the Torrance Tests of Creative Thinking (TTCT). *Creativity Research Journal*, 18/1, 3–14.
6. Juhász A., Tél T. (2012): A fizika, matematika és művészet találkozása az oktatásban, kutatásban. In: ELTE Természettudományi Kar, Marosvásárhely.
7. Pásztor A., Molnár G., Csapó B. (2015): Technology-based assessment of creativity in educational context: The case of divergent thinking and its relation to mathematical achievement. *Thinking Skills and Creativity*, 18, 32–42.
8. Kárpáti A. (2005): A kamaszok vizuális nyelve. Budapest: Akadémiai Kiadó.
9. Mező K., Mező F. (2022): A hazai kreativitáskutatás trendjei, főbb vizsgálati kérdései. *Alkalmazott Pszichológia*, 22/2, 21–34.
10. Kempf K., Polyák Z., Vincze B. (2022): A művészetpedagógia múltja és jelene – reformpedagógia, életreform, gyermekkultúra. In: Magyarországi Reformpedagógiai Egyesület, Budapest.
11. Gang L., Ning F. (2016): Student misconceptions about force and acceleration in physics and engineering mechanics education. *International Journal of Engineering Education*, 32/1, 19–29.
12. Pesthy S. G., Miltner T., Hömöstre M. (2022): Tudatos módszer-választás fizikaórán tanulói hozzáállások alapján. *Fizikai Szemle*, 72/12, 405–412.
13. Michelene T. C., James D., Slotta N. D. L. (1994): From things to processes: A theory of conceptual change for learning science concepts. *Learning and Instruction*, 4/1, 27–43.
14. Radnóti K. (szerk., 2014): A természettudomány tanítása. Szeged: Mozaik, p. 40.
15. American Institute of Physics (1998): Children's misconceptions about science. Letölthető: <http://www.eskimo.com/~billb/miscon/opphys.html>.

HORDÓ ALAKÍTÁSA VÁKUUMMAL, TÚLNYOMÁSSAL ÉS LÖKÉSHULLÁMMAL

Härtlein Károly

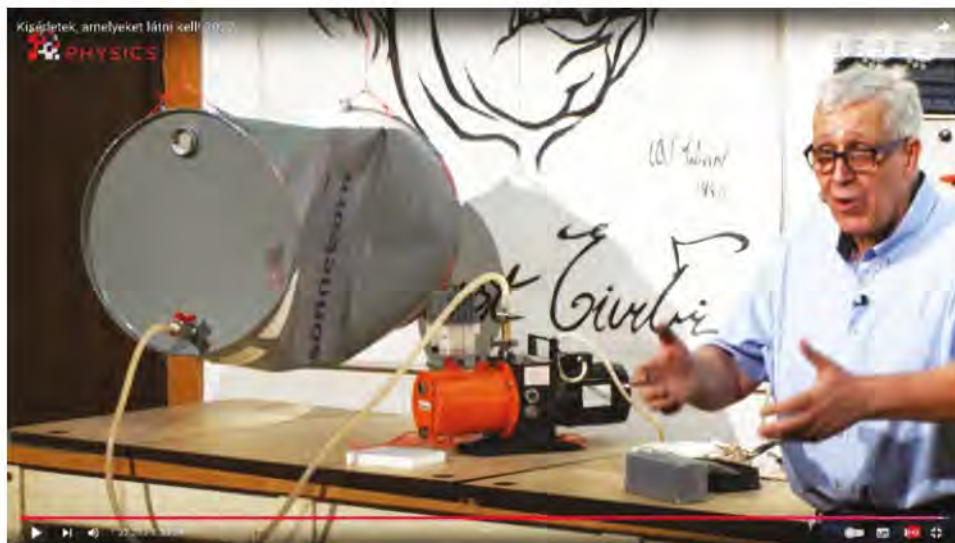
BME Fizikai Intézetének Demonstrációs Laboratóriuma, Budapest

E-mail: hartlein@eik.bme.hu

A cikkem témája a nyomás, a nyomáskülönbség és az általuk létrehozott erők szerepeltetése a fizikaoktatásban. Ez az írás bemutatja, hogy mekkora terhelő erők hatnak a nyomással terhelt hordókra. Úgy érzem, hogy a fizikakönyvekben ez nem kap megfelelő hangsúlyt, illetve egyáltalán nem tárgyalják ezt a jelenségekört. A fizika mint tantárgy feladata a környezetünk leírása, működésének megértetése. Ha ez a feladat teljesül, akkor a diák nemcsak szeretni fogja a fizikát, de a körülötte zajló folyamatokat érteni is fogja. Kialakul benne egy megalapozott természettudományos világkép, amely a XXI. században fontos összetevője egy állampolgárnak. Szüksége van erre például akkor, amikor kérdésekre kell válaszolnia, döntenie kell. Például milyen energiaforrást használjunk, milyen megoldásokat használjunk egy energiatudatos épületben, vagy csak a mennyi ideig lehet napozni, az UV sugarak mennyire veszélyesek. Ezekre a kérdésekre ne a celebeknél, az influenzaszerek-nél és egyéb kétes tudású helyeken keressen választ, hanem legyen egy biztos tudása, amely alapján tud jól dönteni.

A hordó implóziója*

Igazi motivációs kísérlet a légnyomással összeroppantani egy acélhordót. A szabványos 200 literes hordó csekély átalakítással hozzákapszolható egy vákuumszivattyú-



1. ábra. Egy összehorpadt hordó az F29-ben

hoz. Függően attól, hogy mekkora teljesítményű a szivattyú, egy-két perc alatt akkora nyomáskülönbség alakulhat ki, hogy a hordó összehorpad, a jelenséget hangos dörrenés kíséri [1].

Ha nincs vákuumszivattyú, akkor is bemutatható a jelenség. Ez esetben a tanterem nem lesz alkalmas helyszín. Ebben az esetben a szükséges nyomáskülönbséget vízfórralással és -hűtéssel is el lehet érni. A módszer:

- a hordóba tenni kell pár liter vizet, majd addig forralni, ameddig a fejlődő gőz ki nem szorítja a levegőt a hordóból,
- ekkor be kell zárni és utána hagyni kell kihűlni a hordót.
- Lehet gyorsítani a folyamatot hideg vízzel történő locsolással, de ez kizárja a tanteremi bemutatást.

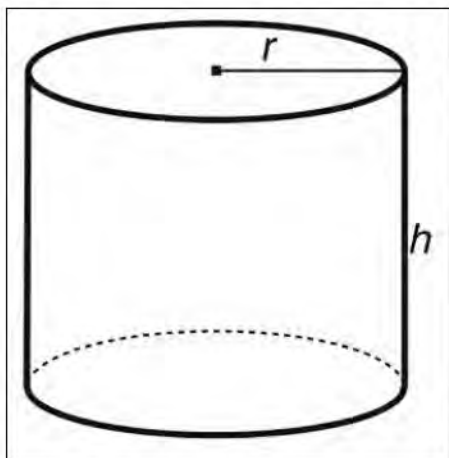
A hordóban lévő gőz, ha lecsapódik, folyadékká válik, a térfogata 1/900 részére csökken. A lecsapódó gőz hatására csökken a nyomás is. Ha tökéletesen kiforraltuk a levegőt, és lehűlt a hordó, akkor a hordóban csak a gőz nyomása marad, amely 20 °C-on 2338,54 Pa. Az így elért nyomás alig tér el egy iskolai vákuumszivattyú által szolgáltatott vákuumtól [2].

A bemutatót érdemes számolással követni és ez alapján megmagyarázni a látottakat. Jöjjenek az adatok és a képletek, amelyektől sokan irtóznak! A hordó külső felületére a légnyomás hat. A vákuumszivattyúval vagy a forralással elért kisebb belső nyomás hat a hordó belső felületére. Az erőt, amely összeroppantja a hordót, a nyomáskülönbség és a hordó felületének szorzata adja.

* Az implózió fizikai jelentése: üreges test beomlása külső nyomás hatására.



Härtlein Károly 1980-ban a Bánki Donát Gépipari Műszaki Főiskolán szerzett előbb gyártástechnológus-üzemtechnológus, majd gépész műszaki-tanári diplomát, 1990-ben az ELTE-n fizika szakos tanári oklevelet, azóta vezeti a Műgyetem Fizikai Intézetének Demonstrációs Laboratóriumát. Több száz kísérletező fizikaórát tartott diákoknak és tanároknak, még a határainkon túl is. A szkeptikus mozgalom egyik élharcosa. 2005-ben az ő javaslatára a Műgyetem Fizikai Intézetében tartották az első Kutatók Éjszakáját. Sok, fizikát népszerűsítő tévéműsorban szerepelt, ezek közül a „Brutális fizika” című sorozat volt a legsikeresebb.



2. ábra. A hordó felületének számítása



3. ábra. 2000 méter magasan (balra) és a vásárlás helyszínén (Budapest), 105 méter magasan (jobbra)

Ki kell számolni a hordó felületét [7]. A 200 literes hordó méretei: átmérője 0,58 méter, a sugara $r = 0,29$ méter, magasság $h = 0,88$ méter. Egy henger felületét kell meghatározni; a palástja, az alaplappja és a fedelének területének összege adja a keresett értéket. $2,13 \text{ m}^2$ a teljes felület, ebből a palástja $1,6 \text{ m}^2$.

Szükség van még a légnyomás értékére. A légnyomás fizikaórán már az általános iskolában tananyag. Értéke a Földön 1013 hPa. Ez egy változó érték, függ a tengerszinthez viszonyított magasságtól. Állandó magasság esetén sem állandó az értéke, ugyanis a meteorológiai körülmények, a hőmérséklet, a szélesebség és a levegő páratartalma is hatással vannak az adott helyen mérhető légnyomás értékére.

A légnyomás magasságfüggése jól láthatóvá válik, ha egy légmentesen csomagolt finomságot viszünk magunkkal egy magas hegyre, és megfigyeljük a csomagolás alakját. A bal oldali fényképen egy chipses zacskó látható 2000 méter magasan, épp hogy ki nem durran. Ez Budapesten, a vásárláskor a jobb oldalon látható módon nézett ki (3. ábra).

1013 hPa – ez azt jelenti, hogy egy négyzetméteren 101,3 kN erő oszlik el. Ha a lemezt, amiből a hordó készült síkba kiterítenénk, és a levegő helyett vízzel szeretnénk ekkora nyomást biztosítani, akkor 10,13 m magasan kellene vízzel borítani. Ehhez 21 580 liter vízre lenne szükség, aminek a súlya 21,58 tonna! A hordó tetejére és aljára

is 26,8 kN erő hat, amely két erő iránya ellentétes, így ez az erő a magasságot igyekszik csökkenteni. Hasonlóan elemezve a palástra ható erőt, ez is a szimmetriai okok miatt csak deformálni tudja a hordót, nagysága 189 kN. A hordóra összesen 215,8 kN hat. Ez mintegy húszszorosa egy átlagos autó súlyának! Ugye, hogy érdemes számolni?

Bármilyen érdekes és meglepő a hordó implóziója, felvetődhet a kérdés, mi köze van ennek a kísérletnek a mindennapi élethez. Gyakran éri a fizikatanárokat az a vád, hogy az élettől elszakadt dolgokat tanítanak, felmerülhet ez a kérdés jelen kísérletre is! Nyitott szemmel járva meglepő dolgokat vehetünk észre. Győrről, a Fehérvári úton egy vasúti sínek felett átvezető hídról a 4. ábrán mutatott látvány tárul a szemünk elé.

Amint az jól látszik itt is, a nyomáskülönbség hozott létre maradó deformációt. A vasúti tartálykocsi is ösz-



4. ábra. Összeroppanó vasúti tartálykocsi



5. ábra. Bemutatásokból visszamaradt hordók

szerozpanhat, ha a benne lévő folyadék lefejtésekor nem biztosítjuk a lefejtett folyadék helyére a levegő szabad beáramlását.

A bemutatóim során a munkahelyemen a kísérletet „elszenvedett” hordók egyre szaporodtak, mert ebben az állapotban már nem kelendő portéka az acélhordó, inkább költség a tőlük való megszabadulás.

Az első bemutatóm alkalmával egy iskola udvarán (Puskás Tivadar Távközlési Technikum) mutattam be forralással a hordó horpasztását, a sikeres bemutató után az iskola igazgatója (Horváth László) javasolta, hogy most sűrített levegővel fújjuk fel [3]. A válaszom az volt, hogy ezt el lehet végezni, de azt én már nem várom meg (aki megnézi az erről szóló videót, az hallhatja is a párbeszédet...)! Hogy miért, az a cikk második feléből derül ki.

A hordó „fordított implóziója”

A Műegyetemen 2015 óta minden nyáron megrendezik a Gyerekegyetemet [4]. Idén három szeminárium tartására kértek fel 7. és 8. osztályos diákok számára. Úgy



6. ábra. Egy összehorpasztott hordó részlete

döntöttem, hogy az udvaron fogok bemutatni valami emlékezetes kísérletet. Ehhez éppen kapóra jöttek a fent említett összeroppantott hordók. A fordított nyomáskülönbség képes visszaalakítani az összeroppantott hordót. Egyedül az volt kérdéses, hogy a hordók összehorpadása következtében létre

rejött deformációk a visszalakítást mennyire fogják elviselni. Ugyanis az implózió hatására az elképesztő erők elképesztő deformációkat hoztak létre.



7. ábra. A horpadt hordó feltöltése vízzel

Volt olyan hordó, amelyben az előadás után még egy napig a vákuumot megtartottam. Vagyis még egy napig alakíthatta a nyomáskülönbség a lemez hordót.



Nem sokan látták rajtam kívül, nagyon tanulságos volt. Gépészhallgatók számára lenne fontos; az időben hosszú terhelés hatásának jobb megértését szolgálhatná. De ez a hosszú idő miatt nehezen mutatható be.

Kilyukad, vagy nem, ha igen, mekkora lyuk lesz rajta? Ennek a kérdésnek a megválaszolására, mivel a számítás gyakorlatilag lehetetlen, inkább egy kísérlet végeztem el [5]. A kísérlet során keletkezett lyuk a hordó oldalán, de nem akkora, hogy értékelhetetlenné tette volna a kísérletet. A tanulságokat figyelembe véve arra jutottam, hogy egy hordó bemutatása kockázatos, mert megítélésem szerint könnyen előfordulhat, hogy akkora lyuk keletkezik a bemutató során, ami a jelenség bemutatását lehetetlenné teszi. Így jutottam el ahhoz a döntéshez, hogy végezzük el a nyomáspróbát egy még deformálatlan hordóval is. Azon ugyanis nem fog az előző alakítás során elszenvedett deformáció miatt lyuk keletkezni, biztosan sikerülni fog a bemutató. Tehát beszereztem ép hordókat is. Így a szemináriumokon két-két hordó szerepelt: egy horpasztott és egy ép. A hordók visszaalakításához – a lemezeket képlékenyen kell alakítani, amihez sok munkát kell végezni – az udvaron található kerti csapból vettem a „munkavégző közeget”, a vizet, amelynek nyomása 3–6 bar közötti volt.

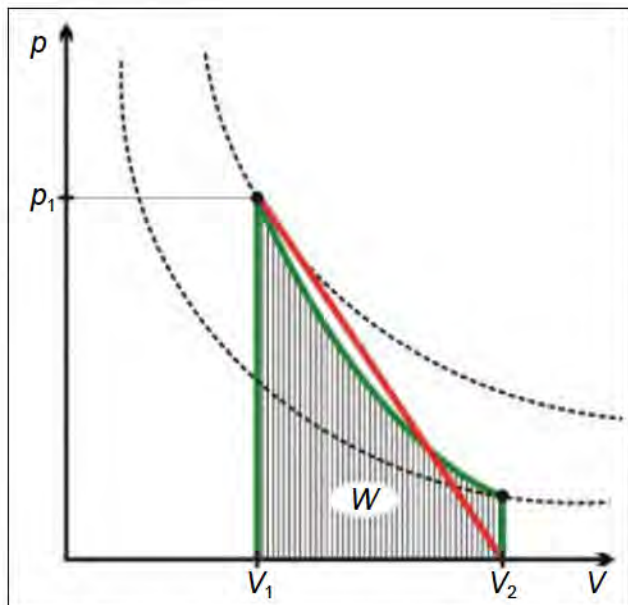
A csatlakozás nagy, 1 colos keresztmetszetű volt. Ez szerencsés körülmény, mert a bőséges vízhozam a szétrepedt hordók esetén még viszonylag nagy lyukak esetén is tudta az alakításhoz szükséges nyomást biztosítani.

A horpasztott hordókat a bemutató előtt igyekeztem a lehetőségekhez mérten vízzel feltölteni, hogy a lehető legkevesebb levegő maradjon a hordóban. A hordó lezárása és a víz csatlakoztatása után indult a bemutató. A beáramló víz a hordót először az eredeti térfogatára, utána még nagyobbra alakította. Így a kísérlethez annyi időre volt szükség, ameddig a kellő mennyiségű víz a csövön keresztül a hordóba áramlott. A repedések megjelenése ezt az időt jelentősen meghosszabbította. A hordóba beáramló víz először a palástot egyenesítette ki, majd a fedő és az alaplap kigömbölyödése volt megfigyelhető. Figyelemre méltó volt még a hordó peremének

kiegyenesedése is, de ezt csak az értékelte, értékelheti, aki dolgozott már acéllemezzel. A jelenség nemcsak a szemnek, a fülnek is szolgált információval. A hatalmas erő erős hanghatás kísérte. Itt is érdemes felhívni a figyelmet az erők nagyságára. Az implózió, a hordó horpadása során a nyomáskülönbség mintegy 100 000 Pa volt. Kívül volt a nagyobb a nyomás. Itt pedig a hordóban volt nagyobb a nyomás, ami 3–6-szor nagyobb erő kifejtésére lett volna képes. Vagyis a fenti, vákuum esetben számolt erő 3–6 szorosa állt rendelkezésre! $2,13 \text{ m}^2$ a teljes felület, ebből a palást $1,6 \text{ m}^2$. A képletek azt jósolták, hogy a palást fog először kiegyenesedni, így is történt. Ismét beigazolódott számomra, hogy mennyire fontos a képletek ismerete és helyes értelmezése. Beszédeselek, de csak azok számára, akik értik a mondanivalójukat. A jelenség leírására a gépészek által gyakran használt képlet, a kazánformula szolgálhat [4].

A deformálatlan alakú hordók vízzel való „alakítását” is tervezés előzte meg. Az alja és a teteje domborodik, ezért ha álló helyzetű hordóval végezzük a kísérletet, akkor várható a hordó eldőlése. Ennek elkerülésére a palástján fekvő helyzetű hordó mellett döntöttem.

Van egy másik körülmény, amit jól meg kell fontolni, ez a hordó feltöltése vízzel, a légtelenítése a kísérlet előtt. Gondoljuk végig, hogy mit eredményezne, ha megvalósítanánk a korábban már említett „tanácsot”, és az összenyomhatatlan víz helyett a hordót sűrített levegővel próbálnánk alakítani! Ekkor az alakváltoztatáshoz szükséges nyomást a hordóban a sűrített levegő adja; no, de mit fog tenni a levegő, ha szabadon tágulhat a hordó felszakadása, kinyílása után? A hirtelen táguló gáz lehűl, de munkát is fog végezni! Mozgási energiát adhat az útjában álló tárgyaknak. Számoljuk ki a sűrített gáz munkavégző képességét! A pontos számoláshoz az adiabatikus görbe alatti területet kellene meghatározni. Ez még az emelt szintű érettségire készülők számára is túlzás. A 8. ábra



8. ábra. Az adiabatikus görbe alatti terület meghatározása

szerinti közelítés azonban nagyságrendileg helyes értéket adhat. Egyenessel helyettesítettük a $pV^{\kappa} = \text{const.}$ adiabatikus görbét. Látszik, hogy az így kapott érték kisebb lesz annál az értéknél, amit szeretnénk meghatározni. Amikor az eredményt értékeljük, ott érdemes erre emlékezni. Egy derékszögű háromszög területét kell meghatározunk, melynek egyik befogója a nyomás, a másik a térfogat. A hordó térfogata $0,2 \text{ m}^3$, s így $0,5 \cdot 10^5 \text{ Pa}$ -al számolva nem kis érték, 5000 joule adódik. Számoljunk csak egy kicsit! Potenciális energiaként, $mgh = 5000 \text{ J} = 5 \text{ kg} \cdot 100 \text{ m} \cdot 10 \text{ m/s}^2$ lehetne, azaz egy 5 kg tömegű testet lehetne ezzel 100 méter magasba felemelni! Ezt csak fedezékből biztonságos szemlélni!

A kísérleteimben a hordók alakításához ezért használtam vizet, kihasználva, hogy a folyadékok gyakorlatilag összenyomhatatlanok. Így a hordó elszakadásakor nem kell számolni a benne lévő gáz térfogati munkájával. Az összenyomhatatlan folyadékkal elvégezni a kísérletet azt is eredményezi, hogy már kis mennyiségű víz beáramlása nagy nyomást, deformációt fog okozni.

Hasonlóan a horpasztott hordóhoz, a deformálatlan hordóval is végeztem előzetes kísérletet, Pakson, a Múzeumok éjszakáján. Tűzoltók biztosították a vizet és a nyomást. A bemutató tanulságos volt, de fiaskóval végződött. A hordót buborékmentesre töltöttük fel, így már csekély mennyiségű víz is jelentős nyomást és deformációt okozott a hordóban. A tűzoltók által biztosított vízhozam és a nyomás tekintetében a kísérlet egy szemvillanásig tartott, vagyis egy pillanat alatt szétszakadt a hordó. A kísérlet sikerült, de a nézőknek esélye sem volt érdemben megérteni, hiszen fel sem foghatták a látottakat. A tűzoltók a szivattyút, ami a nagy nyomást biztosította volna, be sem tudták kapcsolni, nem volt rá idejük! Így a műegyetemi bemutató napján arra kellett figyelmem, hogy a vízmennyiség szabályozható legyen, így közben tartható legyen a folyamat sebessége.

A háromszori bemutató lehetővé tette, hogy kipróbáljak valamit. A deformálatlan hordókat eltérő mértékben töltöttem fel vízzel. Az első foglalkozáson mintegy $20\text{--}30$ literes buborék maradt a hordó vízzel való feltöltése után, ami szándékos volt. A tapasztalatok alapján a második napon ezt a mennyiséget megdupláztam, míg a harmadik hordót már csak félig töltöttem meg. Így 100 liternyi levegőt kellett összenyomni, hogy kialakulhasson az a nyomás, ami a hordót alakította. Cserébe a víz által összenyomott gáz munkavégző képességével kellett számolni. A bemutatók során a biztonság szem előtt tartásával a kis értékről a nagyobb mennyiség felé fokozatosan haladtam. A munkavégző képesség a hordóban lévő levegő mennyiségével egyenesen arányos. Számoljunk, most is érdekes adatokhoz juthatunk! Ha buborékmentesre töltjük a hordót, akkor akár 10 liter víz beáramlása után már akkora nyomás lesz, hogy a hordó elszakadhat. Ha a hordó félig van vízzel, vagyis van benne 100 liter levegő, akkor a vízcsap megnyitásakor beáramló víz ezt a levegőt kezdi összenyomni, ez a levegő fogja a nyomást adni. Az előbbi 10 liter víz beáramlása 90 literre nyomja össze a levegőt, amely nyomása könnyen számítható a gáztörvények ismeretében. $p_1 \cdot V_1 = p_2 \cdot V_2$ – a nyomás csak 11% -kal növekedik meg. Így a beáramló víz sebességével jól lehet szabályozni a folyamat sebességét. A víz által összenyomott levegő a hordó elszakadásakor azt tette, amit a számítások alapján vártam tőle. Durrant is jó nagyot a harmadik, a félig töltött hordó [5]. A videó nem adja vissza a durranás hangerejét. Először a teteje és az alja dudorodott ki, ezután kiegyenesedett a peremezés, végül a hegesztés mentén szakadt el a hordó. Ha a peremezést ki akarnánk egyenesíttetni, ahogy a nyomás teszi, nem hiszem, hogy találnánk lakatost, aki elvállalná! A nyomás hatására az alakváltoztatás meglepően egyszerű művelet.

Így a szakadáskor az összenyomott gáz energiája jól kézben tartható, talán a továbbiakban érdemes lenne egy nyomásmérővel kiegészíteni a kísérletet, ekkor az érdeklődőknek szolgálhatunk további érdekes adattal.

Beszéljünk a hordókról is! A vegyszeres hordók méretét, kialakítását, anyagát nemzetközi hatályú szabványok írják elő. Olyan hordót kell készíteni, ami nagyjából „bolondálló”, nem szabad kilyukadnia akkor sem, ha pl. egy teherautó platójáról rakodás közben leesik. A horpadás befelé, a lyukadás nem (pl. veszélyes és gyúlékony anyagok esetén). Nyomással nem kell számolni, mert a folyadékoknak, amelyeket szállítani lehet benne, a gőznyomása nem számottevő.

Hordó alakítása lökeshullámmal

Több mint 10 éve a „Brutális fizika” című filmben lökeshullámmal alakítottam hordókat. Ez az alakváltozás egy teljesen más jelenséggel magyarázható. Ebben az esetben egy 200 literes nyitott tetejű hordót használtunk, amit színültig töltöttünk vízzel. A hordó aljának közepére egy csigaszerkezet segítségével húztunk le egy 5 literes, vastag falú alumínium hordót, amiben 1 kg cseppfolyós



9. ábra. Hordó alakítása lökeshullámmal

nitrogén volt légmentesen lezárva. Az alumínium hordó nyomásálló edény volt, eredetileg 2,5 kg propán-bután gáz tárolására tervezték. Ezeknek a tartályoknak a nyomáspróba során 25 bar nyomást kell kiállniuk; a nyomásálló edények méretezéskor azonban akkora biztonsággal számolnak, hogy ennek akár a kétszeresét is elviselhetik felrobbanás nélkül. Egy kilogramm nitrogén normál állapotban közel 1000 liter térfogatú, és cseppfolyós állapotban mindösszesen 5 liternyi térfogat áll rendelkezésére. A nitrogén a környezettől kapott hő hatására forr, ennek eredményeként kialakuló nyomás messze meghaladja az alumíniumpalack nyomástűrését. Vagyis felrobban a 200 liternyi víz alján. Az elszabaduló energia egy lökeshullámot indít, amely a hordót akkora terhelésnek veti alá, hogy az képlékenyen fog alakulni. A lökeshullám terjedési sebessége a hang vízben mért terjedési sebességével egyenlő.

Ahhoz, hogy a nyitott tetejű hordóban – amelyből felfelé szabadon távozhat a víz – ekkora deformáció alakuljon ki, kell a víz nagy tehetetlensége és az, hogy az összenyomott gáz energiája gyorsan, robbanásszerűen szabaduljon fel és jusson el a hordó falához. A kísérlet során az alumíniumhordó robbanását követően a ki-

alakuló nyomás értéke miatt már nem is tekinthetjük a vizet – középiskolás módon – összenyomhatatlannak. Így egy nagy tehetetlenségű, összenyomható folyadékban terjedő lökeshullámmal már magyarázható, hogy a nyitott tetejű hordó miért deformálódik. Szokatlan körülmények között zajlott a felvétel, mert ekkor végeztük el először. Főpróbára nem volt lehetőség, így csak a számításaim alapján várhatókra készültünk. A gépészmérnöki tanulmányaimra támaszkodtam, próbáltam kiszámolni, megjósolni, hogy mi várható. Mi fog történni az alumíniumhordóval, és mi a 200 literes acélhordóval? Az alumíniumhordóról tudtam, hogy fel fog robbanni. Az anyaga és az anyagának állapota alapján arra jutottam, hogy egyben fog maradni. Az acélhordóról tudtam, hogy nagyon meg fog nyúlni a palástja, a várható megnyúlás értéke akkorára adódott, hogy várható volt a palástjának elszakadása. Aki megnézi a felvételt, az láthatja, hogy jól sikerült megbecsülni a kísérlet kimenetelét. Az acélhordó kerülete 400 mm-rel lett hosszabb, de nem hasadt fel a palástja. Az alumíniumhordó felrobbant, de egy darabban maradt. A hordóban lévő víz jelentős hányadát mintegy húsz méter magasra repítette a lökeshullám.

Tanulságok

Zárt hordó alakítása kétféle lehet, függően a nyomáskülönbségtől. Ha a légnyomásnál kisebb nyomást hozunk létre benne, akkor összehorpad, ha nagyobb, akkor először növekszik a térfogata, majd amikor már nem tudja elviselni a további nyúlást, akkor elszakad. Mindkét folyamat elvégzéséhez nagy erőkre van szükség. Az erő létrehozása lehet lassú folyamat, az alakváltozás szemmel jól követhető. A lökeshullámmal történő alakítás nagyon gyors folyamat. A felvétel során 800 frame/sec sebességű kamerát használtunk. Egy frame, egy képkocka 0,00125 másodperc alatt készült el. A hordó deformálatlan állapotától ennyi idő telt el, amíg a hordó a végleges alakját elnyerte. A kísérlet elvégzése után hordó palástjának a legnagyobb átmérőjénél a lemez 400 mm-nyi megnyúlását mértem.

Hivatkozások

1. Hordóhorpasztás az F29-ben: https://youtu.be/S03UyLWy_wc?t=5367
2. Hordóhorpasztás forralással udvaron, a Puskás Tivadar Távközlési Technikumban: <https://youtu.be/S8kCQubYSSE>
3. A víz gőznyomása: [https://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADz_\(adatlap\)](https://hu.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADz_(adatlap))
4. Fordított implózió nál mennyire sérül? <https://youtu.be/W34Ql-8wD8rw>
5. Kazánformula: <https://hu.wikipedia.org/wiki/Tart%C3%A1ly>
6. A szürke hordó alakul: https://youtu.be/Ulggtvm8u8M?list=PLHSoRpWbbL_231wNv0gUDAE-hWS5Kyt21
7. A hordó felszínének számítása, magyarul: https://nat2012.nkp.hu/tankonyv/matematika_7/lecke_06_011; A hordó felszínének számolása, angolul: <https://www.omnicalculator.com/math/surface-area>

A ZSENI, AKI MEGVÁLTOZTATTA A TÖRTÉNELMET

Radnóti Katalin

nyug. főiskolai tanár, kandidátus

E-mail: rad8012@helka.iif.hu

A Helikon Kiadó 2024-ben ismét kiadta William Lanouette Szilárd Leó életét feldolgozó könyvét [1]. A szerző némileg módosított eredeti könyvén például a tartalomjegyzéken, amelyet a korábbi műben harminc számozott fejezetre osztott, míg a fordítás alapját képező 2013-as kiadásban három fő részre tagolt Szilárd életének eseményei alapján. Továbbá társszerzőként feltüntetve Szilárd Leó testvérét, Szilárd Bélát is, akitől a szerző rendkívül sok információt kapott a könyv megírásához végzett kutatómunkája során. Jelentős különbség az 1997-es magyar nyelvű kiadáshoz [5] képest a több mint száz oldalt kitevő jegyzetek megjelenítése, amelyek nemcsak egyszerűen az információk forrását jelölik, hanem sok esetben még további plusz információkat is tartalmaznak a fő szövegben írtakhoz képest.

Azonban az új kiadás öröme sajnos beárnyékolja egy szomorú tény. Ténylegesen nem világos, hogy miért, de hiányzik az új magyar fordításból a szerző 2013-as kiadáshoz írt előszava, amelyben többek közt olvasható néhány azóta hazánkban történt esemény is, mint például Szilárd Leó hamvai egy részének hazahozatala és az 1998 óta megrendezett Szilárd Leó Fizikaverseny megemlékezése [2]. Továbbá hiányzik a könyv végén közölt irodalomjegyzék, amelyben Marx György Szilárd Leóról írt könyve is szerepel [4]. Ezek az angol eredetiben olvashatók, amely a neten elérhető [3].

Csak zárójelesen jegyzem meg, hogy az angol nyelvű kiadás borítója szebb. Az élenkvörös háttér egy könyvesbolt kirakatában is sokkal inkább figyelemfelkeltő, mint a szürke fekete háttérrel.

Az életrajzi regény szövege az új kiadásban három részre lett osztva. Bár szerintem a második rész utolsó fejezete inkább már a harmadik részhez tartozik, mivel a bomba ledobása utáni történeteket ír le. Az első két nagy rész gyakorlatilag időrendben íródott, ellenben a harmadik rész Szilárd Leó széles körű tevékenységét téma-

körönként tárja az olvasók elé. Így egy-egy életidőszak többször is előkerül más-más aspektusból. Ez is egyfajta csoportosítása az életeseményeknek, bár kicsit megnehezíti Szilárd Leó tényleges napi életének elképzelését.

Az első rész kilenc fejezete Szilárd Leó születésétől 1933-ig tartó életszakaszát mutatja be. Ahogy az 1997-es kiadás esetében, most is csodálattal olvastam ezt a részt, különösen a gyerekkort bemutató fejezeteket. Minden elismerésem az amerikai szerző iránt, aki képes volt részletekbe menőig utána járni a Szilárd család történetének egészen a nagyszülőkhöz. Kiváló leírást ad a szerző a millennium utáni évek Budapestjéről, a Bajza utcáról és környékéről, a Szilárd család Vidor villában folyó életéről, Leó tanulmányairól, testvéreivel és unokatestvéreivel való játékaikról, majd az egyetemi és a katonaidőszakról. Roppant érzékletesen írja le az író a Berlinbe való költözés okait, majd a két testvér, Béla és Leó ottani életét. A helyszínleírások, a séták nyomvonalai annyira pontosak, hogy egyrészt tökéletesen beazonosíthatóak végig az egész könyvben, továbbá annyira magával ragadóak, hogy az olvasó úgy érezheti, maga is ott jár.

Ebben az első részben tudjuk meg azokat a dolgokat Leóról, melyek majd egész életében végigkísérik. Például, hogy nem volt jó kézügyessége, viszont a tervezésben nagyon jó volt. A műszaki rajzok elkészítésében Béla öccse segített neki. Majd később a különféle laboratóriumi munkákra minden esetben segítséget szerzett. Doktori értekezését végül nem a kiadott témában készítette el. Megismerkedése Einsteinnel, akivel több közös szabadalmat jegyeztek, és később az atomkorszak nyitányát jelentő levelet írták. Megmutatkozik embersége, ahogy a nácik hatalomra jutást követően megpróbált segíteni az elbocsátott zsidó származású tudósoknak. A fejezet végén már Londonban találjuk a láncreakción gondolkodva „a fürdőkádban”.

A második rész tíz fejezete röviden úgy foglalható össze, hogy a láncreakció felismerésétől az atombomba létrehozásáig és ledobásáig tartó időszak Szilárd Leó szemüvegén keresztül szemlélve. Ahogy küzdött azért, hogy vizsgálják meg, az urán hasadása során valóban több szabad neutron keletkezik-e és azok kiváltanak-e több hasadást, a levél elkészítése, a tiszta grafit megszerzéséért folytatott küzdelme, mely döntő jelentőségű volt, a máglya felépítése, a titkosítások, végül a bomba élesben való bevetése elleni harca, Groves tábornokkal való „csatái” és mindez az FBI állandó „felügyelete” mellett.



Radnóti Katalin egyetemi diplomáját az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar (ELTE TTK) kémia-fizika tanári szakán szerezte 1981-ben. „Lézer a középiskolában” címmel írta meg egyetemi doktori értekezését 1985-ben. 1990-ig a Kölcsény Ferenc Gimnázium tanára volt. 1990-től az ELTE TFK Fizika Tanszékén kezdett dolgozni. Az oktatási feladatok mellett kandidátusi fokozatot szerzett 1994-ben. 1995-től a Magyar Tudományos Akadémia Köztestületének tagja. Évente 4-5 hallgató szakdolgozati munkáját irányította. Több mint 200 szakmai publikációja jelent meg, közöttük tanári segédletek, fakultatív tankönyv-kiegészítők, példatárak és tanulmányok. 2023-tól nyugdíjas.

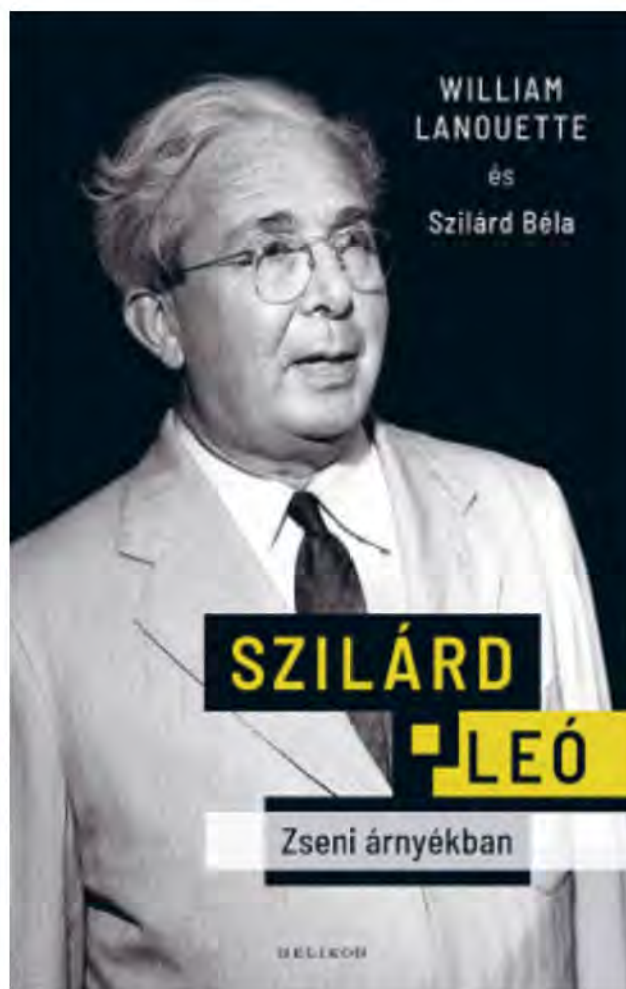
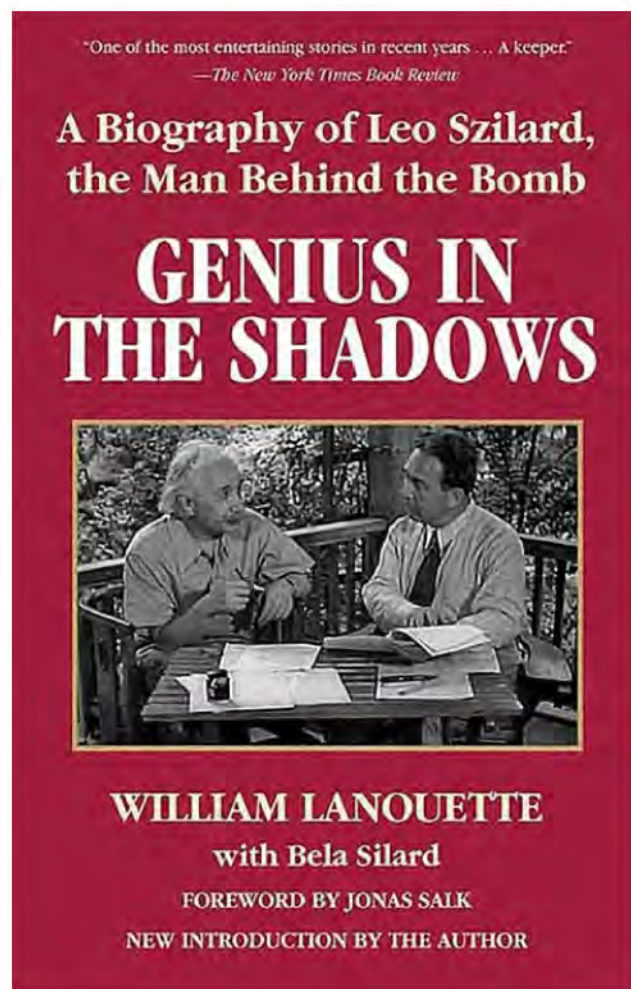
A harmadik rész tizenegy fejezete Szilárd Leónak a második világháború utáni küzdelmeit mutatja be a békéért és a nukleáris leszerelésért, miközben tudományos érdeklődése a biológia felé fordult. Nyugtalan természete nem engedett megálljt számára. Tanulmányokat, szatírákat, sci-fi történeteket írt mind társadalmi, mind tudományos, főként biológiai témákról, szervezeteket hozott létre, mint a Pugwash-konferenciákat, és ragaszkodott, hogy azokon szovjet tudósok is részt vegyenek. Szinte minden társadalmi témájú kérdéshez is hozzászólt, véleményt nyilvánított. Tudományos területen több Nobel-díjas ötlete is volt. Mióta elhagyta Magyarországot, nem volt állandó lakhelye. A sors fintorra, hogy mire épp megtalálni vélte álmai otthonát La Jollában, akkor érte a halál.

Szilárd Leó igazi humanista volt. Nemcsak az egyes emberek, hanem az egész emberiség sorsa izgatta, és

próbált is tenni azért, hogy jobb legyen a világ. Tette ezt sziporkázó lángeszével, intelligenciájával, mely ugyanakkor többeket zavarba hozott. E rendkívül izgalmas és tanulságos életről szóló, kiválóan megírt könyvet ajánlom mindenkinek, aki szeret elmélyedni a tudomány történetében és érdeklik a rendkívüli emberek sorsa, a gondolataik.

Irodalom

1. William Lanouette – Szilárd Béla (2024): Szilárd Leó – Zseni árnyékban. Helikon Kiadó
2. William Lanouette with Béla Silard (2013): Genius is the Shadows. New York
3. Zseni az árnyékban – Google Könyvek
4. Marx György (1997): Szilárd Leó; Akadémiai Kiadó. (A múlt magyar tudósai)
5. William Lanouette (1997): Szilárd Leó – Zseni árnyékban. Magyar Világ Kiadó



BESZÁMOLÓ AZ EÖTVÖS LORÁND FIZIKAI TÁRSULAT 2025. MÁJUS 10-EI KÜLDÖTTGYŰLÉSÉRŐL

Az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2025. évi küldöttgyűlését az ELTE TTK látványos kampuszán, a 083-as Eötvös-teremben tartotta.

A napirend előtti előadást *dr. Csabai István Ervin* (ELTE Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék) tartotta, előadásának címe: „Fizika és mesterséges intelligencia”.

A bevezetőben *Ormos Pál* elnök köszöntötte a jelenlévőket, megnyitotta az ülést, bejelentette a határozatképességet, és rövid beszédet tartott. Ezután a főtitkári beszámolóban *Groma István* a 2024. évi közhasznúsági jelentésről, majd a 2025. évi költségtervről beszélt.

Ezt követően *Vida Ádám* elnök a Felügyelőbizottság jelentését ismertette. A Felügyelőbizottság 2024-ben nem tapasztalt működési rendellenességet, a társulat tevékenységét kiegyensúlyozottnak értékelte. A Felügyelőbizottság különösen fontosnak tartja a tagság informálását és az észrevételek nyílt kezelését. A gazdasági és működési jelentéseket a Felügyelőbizottság megvitatta, egyhangúlag elfogadta; azokat a küldöttgyűlésnek is elfogadásra ajánlotta.

Rövid vita után a küldöttgyűlés egyhangúlag elfogadta a 2024. évi közhasznúsági jelentést, a főtitkári beszámolót, a 2025. évi költségtervet és a Felügyelőbizottság jelentését.

Ezután *Ormos Pál* a Társulat tudományos díjainak rendszerét tekintette át. Ezek a díjak nagy magyar fizikusokról vannak elnevezve, és a hozzájuk kapcsolódó kutatási eredményeket értékelik. Az elnökség úgy értékelte, hogy az idők előrehaladtával újabb tudományterületek is a kutatások középpontjába kerültek, és időszerűvé vált kiemelkedő és már nem élő fizikusokról újabb díjakat alapítani. A javaslat a következő négy tudományos díjról szól, melyek

ket jelentős nemzetközi visszhangot kiváltó, kiemelkedő eredményért ítélünk oda az adott szakterületeken:

– *Keszthelyi Lajos-díj* (a Kondenzáltanyag-fizikai Szakosztályhoz tartozó tudományterület – különösen a magfizikai módszerek szilárdtest-fizikai alkalmazása és a kísérleti biofizikai kutatás),

– *Pócza Jenő-díj* (a Kondenzáltanyag-fizikai Szakosztályhoz tartozó tudományterület – különösen a kísérleti szilárdtest-fizika, az anyagtudomány, a felületfizika és vékonyrétegfizika),

– *Szépfaussy Péter-díj* (a Statisztikus és Nemlineáris Fizikai Szakosztályhoz tartozó tudományterület – különösen a fázisátalakulások, a kaotikus dinamikai rendszerek és a kvantumfolyadékok elméleti kutatása),

– *Zawadowski Alfréd-díj* (a Kondenzáltanyag-fizikai Szakosztályhoz tartozó tudományterület – különösen az elméleti szilárdtest-fizika, a térelméleti módszerek szilárdtest-fizikai alkalmazása és az erősen korrelált rendszerek kutatása).

A négy új díj alapítását a küldöttgyűlés egyhangúlag elfogadta.

Ormos Pál arról is beszámolt, hogy az elnökség új szakcsoportként megalapította a Biofizikai Szakcsoportot.

Ezután az alapszabálynak megfelelően az elnökség visszaadta megbízatását, és a küldöttgyűlés levezetését *Rácz Zoltán*, a Jelölőbizottság elnöke vette át. Ő először megköszönte az adott ciklusban végzett munkáját *Groma Istvánnak*, *Ormos Pálnak*, az egész elnökségnek és a felügyelőbizottsági tagoknak, majd ismertette a bizottság jelöltjeit. A helyszínen nem volt jelölés, majd a küldöttgyűlés a bizottság jelöltjeit egyhangúlag elfogadta. A titkos szavazás után az eredményt *Rácz Zoltán* ismertette.

Elnök

Ormos Pál

Aelnök

Kirsch Éva

Főtitkár

Újfalussy Balázs

Elnökségi tagok:

Asbóth János Károly, Groma István, Komáromi Annamária, Nagy Anett, Oláh Éva Mária, Szeidemann Ákos, Varga István

Felügyelőbizottsági tagok:

Katona Gábor, Mergancz Katalin, Merkel Dániel, Vida Ádám, Zubonyainé Pelka Zsuzsanna

Ezután *Rácz Zoltán* átadta a szót az régi-új elnöknek, aki megköszönte a maga és a többi megválasztott vezetői tag nevében is a bizalmat. Továbbá megköszönte a Titkárság kiváló munkáját is. Még egyszer felhívta a

figyelmet a közelgő *Magyar Fizikus Vándorgyűlésre*, mely idén *augusztus 21. és 24. között* lesz *Pécsen*, a Pécsi Tudományegyetem Természettudományi Karának kampuszán.

A küldöttgyűlésről szóló emlékeztető a szokott módon megtalálható a társulat honlapján:

<http://elft.hu/tarsulatrol/kuldottkozgyulesek/>

Képek az Eötvös Loránd Fizikai Társulat 2025. május 10-i küldöttgyűléséről



Magyar Fizikus Vándorgyűlés 2025



2025. augusztus 21-24.



Pécsi Tudományegyetem



Jelentkezési határidő: 2025. június 30.

Részletek:

<http://elft.hu/magyar-fizikus-vandorgyules-2025/>

