

fizikai szemle



CERN70

**Felfedező
részecskefizika
A kvarkanyagtól
a sötét anyagig**

2024/11

n/a

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

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

SZERKESZTŐSÉG:

Felélő szerkesztő: Iglói Ferenc főszerkesztő
Olvasószerkesztő: Bodrog Zoltán
Technikai szerkesztő: Hock Gábor

SZERKESZTŐBIZOTTSÁG:

Asbóth János, Bíró László Péter, Czitrovszky Aladár, Gyürky György, Horváth Dezső, Horváth Gábor, Kiss Ádám, Kopasz Katalin, Neda Zoltán, Ormos Pál, Pálfalvi László, Rábóczi Bence, 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 főtktár

A Társulat és a folyóirat honlapja:

<http://fizikaiszemle.elft.hu>,
e-postacíme: elft@elft.hu

A folyóirat szerkesztőségi e-mail címe:

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

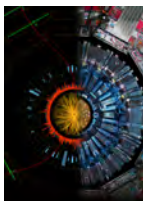


Nyomdai előkészítés: Hock Gábor. *Nyomdai munkálatok:* OOK-PRESS Kft., *felelős vezető:* Szathmáry Attila ügyvezető igazgató. Előfizethető a Társulatnál vagy postautalványon a 10200830-32310274-00000000 számú egyszámlán. Az egyes számok ára: 1500,- Ft (a dupla számoké 3000,- Ft) + postaköltség.

HU ISSN 0015-3257 (nyomtatott)

HU ISSN 1588-0540 (online)

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



A címlapon:

CMS-kísérlet a Nagy Hadronütköztetőn
(Surányi Olivér kompozíciója)

TARTALOM

CERN70 – TEMATIKUS SZÁM

Vendégszerkesztő: Pásztor Gabriella

<i>Pásztor Gabriella:</i> Boldog 70. születésnapot, CERN!	365
<i>Kincses Dániel:</i> Az erős kölcsönhatás vizsgálata mini ősrobbanásokon keresztül a CERN-ben	366
<i>Válogatott nehézion-fizikai felfedezések:</i> ritkaságnövekedés, jetelnyomás, elliptikus folyás, kezdeti és kifagyási hőmérséklet mérése	
<i>Horváth Dezső:</i> Mi az antianyag és hova tűnt?	369
<i>A CPT-invariancia és az antihidrogén vizsgálata a CERN-ben: a spektroszkópiától az antigravitációig</i>	
<i>Pei Wenna:</i> A neutrínók fizikája	375
<i>A neutrínófizika nyitott kérdéseinek vizsgálata a CERN-ben: a múlt nagy mérföldkövei, a jelen és a jövő kísérletei</i>	
<i>Pásztor Gabriella:</i> Felfedező részecskefizika a CERN-ben: az elektromgyenge bozonoktól a titokzatos sötét anyagig	381
<i>Az elektromgyenge kölcsönhatás anatómiájának felderítésétől a W-, Z- és Higgs-bozonok felfedezésével a mai kísérleti erőfeszítésekig az univerzum sötét szektorának megismerésére</i>	
<i>Trócsányi Zoltán:</i> Részecskefizikai kutatási lehetőségek a CERN tervezett gyorsítógyűrűjén	388
<i>Precíziós és felfedező fizika a Jövő Ütköztetőgyűrűjén, az FCC-n, különös tekintettel a Higgs-szektor feltérképezésére</i>	
A FIZIKA TANÍTÁSA	
<i>A CERN Magyar Tanári Program múltja és jelene</i>	
<i>Vígh-Kiss Erika Rozália:</i> Látogatás a CERN-ben	392
<i>Horváth Dezső, Jarosievtz Beáta, Oláh Éva Mária, Sükösd Csaba:</i> Hogyan váljunk szuperhősökké a CERN-ben?	395



ELTE TTK Fizikai és Csillagászati Intézet
Lágymányosi Campus, Északi épület
2024. november 16.

SZÜLETÉSNAPI TUDOMÁNYÜNNEP

70 ÉVES A CERN!

- * Ismeretterjesztő előadások
- * Virtuális látogatás a CERN-ben
- * Tudományos szabadulószo
- * Beszélgetés a kutatókkal
- * Kísérleti bemutatók
- * Laborlátogatások
- * Kiállítás
- * Játékok



Részecskefizikai kutatások
Nobel-díjas felfedezések
Csúcstechnológia és innováció
Nemzetközi együttműködés
Oktatás és tudásmegosztás

CERN70 – THEMATIC ISSUE

G. Pásztor: Happy 70th birthday, CERN!
D. Kincses: Investigation of the strong interaction via mini big bangs at CERN
D. Horváth: What is antimatter and what happened to it?
W. Pei: Neutrino physics
G. Pásztor: Discovery particle physics at CERN: From the electroweak bosons to the mysterious dark matter
Z. Trócsányi: Particle physics research opportunities at the proposed Future Circular Collider at CERN
TEACHING PHYSICS
E. R. Vígh-Kiss: Visiting CERN
D. Horváth, B. Jarosievtz, É. M. Oláh, Cs. Sükösd: How to become superheroes at CERN?

Fizikai Szemle

MAGYAR FIZIKAI FOLYÓIRAT

megjelenését támogatják:



KULTURÁLIS ÉS
INNOVÁCIÓS
MINISZTERIUM

nka
Nemzeti Kulturális Alap



BOLDOG 70. SZÜLETÉSNAPOT, CERN!

Pásztor Gabriella

ELTE Atomfizikai Tanszék, Budapest



Az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (CERN) egyedülálló infrastruktúra és tudásközpont, ahol a legnagyobb és legösszetettebb berendezések segítségével tanulmányozzuk az elemi részecskék viselkedését, hogy feltárjuk az univerzum legmélyebb törvényeit. Idén ünnepeljük a CERN 70. születésnapját és

az eddig bejárt utat.

A tudományos kutatás fellendítésére 1949-ben javasolták egy európai laboratórium felállítását, amely 1954. szeptember 29-én hivatalosan is megszületett. A CERN tizenkét tagállammal a békés célú tudományos haladást és a nemzetek közötti együttműködést tűzte zászlajára.

Magyar kutatók eleinte egyéni meghívással vagy a dubnai Egyesített Atommagkutató Intézetben keresztül vehettek részt. Az első magyar csoport francia segítséggel 1977-ben kapcsolódott be a nukleonok szerkezetét tanulmányozó Európai Müion Együttműködésbe (EMC). Az első független csapat 1982-től a standard modell ellenőrzésében kiemelkedő szerepet játszó Nagy Elektron-Pozitron (LEP) Ütköztető L3-kísérletében tevékenykedett.

Hazánk 1992-ben lett teljes jogú tagállam, ami megnyitotta a széles körű együttműködés lehetőségét. Csatlakoztunk a kvark-gluon plazma kimutatását megcélzó NA49 kísérlethez a Szuper Protonszinkrotron (SPS) mellett, az Alacsonyenergiás Antiprotongyűrű (LEAR) kisebb Crystal Barrel és Helium Trap csapataihoz, valamint a LEP OPAL együttműködéshez, amelyben elsősorban Higgs-bozonokra és egzotikus részecskékre vadásztunk. A Nagy Hadronütköztető (LHC) akkor formálódó ALICE- és CMS-kollaborációiban elindult a következő generációs detektorok tervezése. Néhány év alatt kialakultak a magyar tevékenység alapvető irányai, amelyeket az elmúlt 30 évben kutatók újabb generációi formáltak tovább.

Ma 24 tagállam vezeti a szervezetet, amelyet tíz társult, négy megfigyelő és 50 együttműködő állam intézményei tesznek globálissá. A CERN a nemzetközi összefogás fényes példája, amely nemcsak pezsgő tudományos életnek, de kultúrákon átívelő barátságoknak is helyet ad. Ehhez a sokszínű tudományos családhoz tartozni meghatározó élmény, amely eddig mintegy százezer embernek adatott meg. Napjainkban több mint 17 500-an, diákok, kutatók, mérnökök dolgoznak itt a mikrovilág felderítéséért.

Tematikus számunk a CERN-ben folyó úttörő munkából ad ízelítőt, a május 15-én az MTA Fizikai Tudományok Osztálya rendezvényén elhangzott előadások alapján. A kiemelkedő eredmények mellett a jövő kilátásait is számba vettük a részecskefizika nyitott kérdéseinek megválaszolására.

Az *univerzum születése és fejlődése* régóta foglalkoztatja az emberiséget. A technológia fejlődésével ma már visszaléphetünk az időben, hogy az ősrobbanás utáni pillanatok forró és sűrű *kvarkanyagát* kísérletileg vizsgáljuk. *Kincses Dániel* bemutatja a gyorsítók szerepét ebben az izgalmas utazásban. Az SPS NA49, valamint az LHC ALICE- és CMS-kísérleteiben jelentős magyar sikereknek is örülhettünk.

Az *antianyag* tanulmányozása kiemelt jelentőségű. A CERN-ben hoztak létre először antiatomot (közel fénysebességű antihidrogént), amelyet itt sikerült később lelassítani és csapdába ejteni. *Horváth Dezső* cikkéből az is kiderül, hogy a magyar részvétellel épített, a *CPT-szimmetria* vizsgálatát célzó ASACUSA-kísérlet állította elő az első antihidrogén-nyalábot.

A rengeteg körülöttünk száguldó *neutrínó* megismerése betekintést adhat a részecskefizika standard modelljének kiterjesztésébe, ám tanulmányozásuk igen nehéz. *Pei Wenna* végigvezet e titokzatos, alig kölcsönható részecskék megismerésére tett erőfeszítéseken. Örömteli, hogy magyar kutatók is ott vannak olyan fontos kollaborációkban, mint az NA61 vagy az építés alatt álló DUNE.

A CERN-ben fedezték fel mind a három nehéz *elektrogyenge bozont*, amelyekhez több Nobel-díj is kötődik. *Pásztor Gabriella* az új felfedezések lehetőségét emeli ki a rejtélyes *sötét anyag* kutatásában. Ezt számos működő és tervezett projekt célozza meg: a hazai kutatók az LHC CMS és LHCb/CODEX-b erőfeszítéseiből veszik ki részüket.

A Jövő Ütköztetőgyűrűje (FCC) által ígért haladást – különösen a 2012-ben felfedezett *Higgs-bozon* tulajdonságainak feltérképezésével – *Trócsányi Zoltán* foglalja össze. Ez visszavezet a korai univerzumot övező kérdésekhez, mint az elektromgyengeszimmetria-sértés mechanizmusa, amely az anyag-antianyag aszimmetria forrása is lehet.

A világ élvonalát meghatározó laboratóriumban a *technológiai fejlesztés* szerepe óriási. Az itt született újítások egy része ma már életünket formálja – mint a világháló, az érintőképernyő vagy a gyógyításban használt detektor- és gyorsítótechnológiák.

A K+F tevékenységek magasán képzett szakembereket igényelnek, ezért a laboratórium hangsúlyt fektet az oktatásra, a szakemberképzésre. A CERN *Magyar Tanári Programja* 2006 óta sok száz tanárt (és így rengeteg diákot) ért el. A szervezők, *Horváth Dezső*, *Jarosievič Beáta*, *Oláh Éva Mária* és *Sükösd Csaba* a kezdetekre emlékeznek, míg az egyik résztvevő, *Vígh-Kiss Erika Rozália* az idei eseményről számol be.

Az utánpótlás-nevelés kulcsfontosságú ahhoz, hogy a jövőben is ott legyünk a világ élvonalában, és még sok születésnapot ünnepeljünk együtt a CERN közösségével!

AZ ERŐS KÖLCSÖNHATÁS VIZSGÁLATA MINI ŐSROBBANÁSOKON KERESZTÜL A CERN-BEN*

Kincses Dániel

ELTE Atomfizikai Tanszék, Budapest

E-mail: kincses@ttk.elte.hu

Bevezetés

Az erős kölcsönhatás elméletének kidolgozásához és részletes megértéséhez a CERN az elmúlt 70 év során jelentős hozzájárulásokat tett. Az alábbi írásban a rengeteg fontos felfedezésből szemezgetek, amelyek valamilyen módon kapcsolódnak a természet ezen alapvető kölcsönhatásának feltérképezéséhez, illetve a CERN különböző kísérleteihez.

A részecskefizikai kutatásokat egy alapvető kérdés vezérli, a minket körülvevő anyag építőköveinek vizsgálata. A cél mindig is az volt (és továbbra is az), hogy megtaláljuk azokat az építőelemeket, amelyeket nem lehet további részekre bontani, tehát alapvetőnek, oszthatatlannak tekinthetők. Volt egy olyan pont a történelem során, amikor úgy tűnt, hogy három ilyen részecske elegendő lehet; protonokból és neutronokból felépíthetők az atommagok, elektronokkal együtt az atomok, atomokból a molekulák, bonyolultabb szerkezetek. Ez természetesen nem tartott sokáig – a detektortechnológia fejlődésével először a kozmikus sugárzás vizsgálata, majd a részecskegyorsítókban előállított egyre nagyobb energiájú ütközések hirtelen rengeteg új részecske felfedezéséhez vezettek. Ezek bomlásainak, illetve egymással való kölcsönhatásainak vizsgálata és az ezekben felfedezhető szimmetriák megfigyelése vezetett el a kvarkmodellhez, majd a részecskefizika standard modelljéhez.

A standard modell erős kölcsönhatást leíró részét kvantum-színdinamikának (QCD-nek) nevezik. A QCD a kvarkok és gluonok kapcsolatát írja le, amelyeket ma az összetett részecskék (hadronok, például a proton vagy neutron) alapvető építőelemeinek gondolunk. Hétköznapi körülmények között nem tudunk szabad kvarkokat és gluonokat megfigyelni, ezek csak hadronokba zártan vannak jelen. A kvarkmodell kidolgozása során azonban felmerült, hogy kellően nagy energián létrejöhet az aszimptotikus szabadság jelensége, a „megolvadt” hadronok valamiféle különleges kvarkanyag-állapotot alkot-

hatnak [1–3]. Ennek a kérdésnek a tanulmányozására létrejött egy új tudományterület, a nehézion-fizika.

Az 1980-as évek elején felmerült, hogy egy esetleges átmenet a hadronfázisból egy kvark–gluon-dominált fázisba tanulmányozható lehet nagyenergiás atommag-ütközésekben. Világszerte elindultak a nehézion-fizikai programok, először a Lawrence Berkeley Nemzeti Laboratórium Bevatron gyorsítójánál az 1970-es évek végén, majd a Brookhaveni Nemzeti Laboratórium AGS (1986) és RHIC (2000) gyorsítóinál, illetve a CERN SPS (1986) és LHC (2010) gyorsítóinál.

Bár az SPS (Super Proton Synchrotron) szolgált elsőként bizonyítékokkal a keresett új anyagállapot, a kvark–gluon-plazma (QGP) keletkezésére nehézion-ütközésekben a 1990-es évek közepén, csupán a 2000-es évek elején történt meg annak konkluzív felfedezése [4–9].

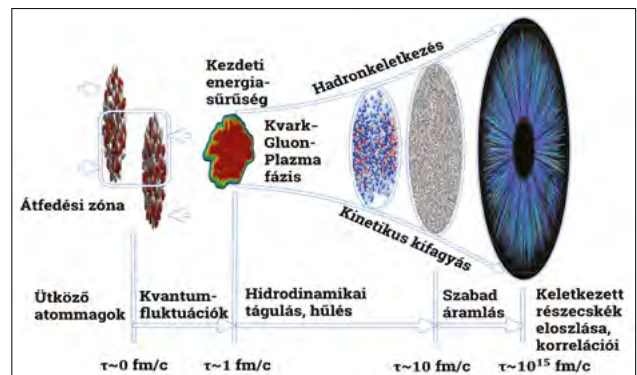
A mai ismereteink szerint egy nagyenergiás nehézion-ütközés időfejlődése során (lásd 1. ábra) nagyon hasonló folyamatok játszódnak le, mint ami az ősrobbanás után, az univerzum első néhány mikromásodpercében történhetett. Az extrém körülmények (hatalmas hőmérséklet, nyomás) hatására az atommagok anyaga megolvad, a kvarkok és gluonok kiszabadulnak hadronbörtöneikből, és a pillanat tört részéig létrejön a kvark–gluon-plazma állapot. Ahogy ez elkezd tágulni és hűlni, a kvarkok újra összeállnak összetett részecskékké, amelyek robbanásszerűen szétrepülnek a tér minden irányába. Ezek a részecskék rövid ideig még egymással kölcsönhathatnak, szóródhatnak, majd az úgynevezett „kinetikus kifagyás” után az impulzusuk már nem változik tovább, szabadon repülnek a detektorok felé. A keletkezett részecskék tulajdonságait detektorainkkal megmérve végül információt szerezhetünk a kezdeti állapotról, és a kvark-hadron átmenet mikéntjéről.

Mielőtt rátérnénk a különböző felfedezések bemutatására, a könnyebb olvashatóság érdekében bevezetünk

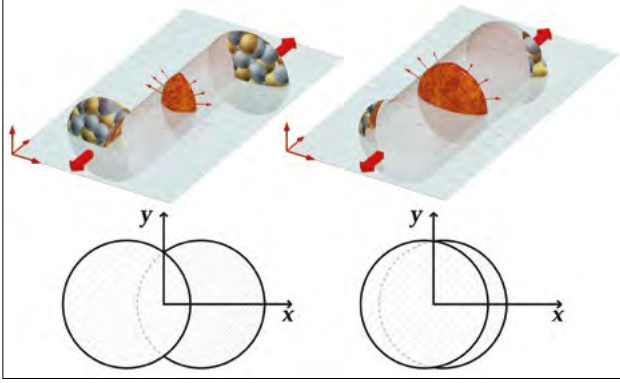
* Az MTA 197. közgyűlésén, a CERN 70. születésnapja alkalmából tartott rendezvényen elhangzott előadás szerkesztett változata.



Kincses Dániel 2023-ban szerezte doktori fokozatát az Eötvös Loránd Tudományegyetemen, jelenleg az OTKA posztdoktori kiválósági programja keretein belül folytatja kutatásait. Kutatási területe a nagyenergiás nehézion-fizika, a kvantumstatistikai korrelációk vizsgálata. Tagja a Relativisztikus Nehézion Ütköztető PHENIX és STAR kísérleteinek.



1. ábra. Egy nagyenergiás nehézion-ütközés időfejlődésének illusztrációja



2. ábra. Egy nagyenergiás nehézion-ütközés centralitásának illusztrációja. Bal oldalon egy periferikus, jobb oldalon egy centrális ütközés látható

egy gyakran előkerülő fogalmat. Az ütközések egyik fontos tulajdonsága a *centralitás*, ami az atommagok átfedésének mértékével van összefüggésben, ezt illusztrálja a 2. ábra. Ez egy százalékban kifejezett mennyiség, ahol nulla százalék jelenti a legcentrálisabb ütközést, azaz az ütköző atommagok teljes átfedését, a száz százalék pedig a legperiferikusabb ütközésnek felel meg, ahol az atommagok éppen elkerülték egymást. Minél centrálisabb az ütközés, annál nagyobb a létrejövő közeg mérete és a keletkező részecskék száma.

Válogatott nehézion-fizikai felfedezések a CERN kísérleteinél

Az alábbi fejezetben áttekintjük a kvarkanyag vizsgálata során előkerülő fontosabb mérhető mennyiségeket és azok értelmezését. A CERN kísérleteinek eredményein keresztül bemutatjuk, hogy mit tudunk ma az erősen kölcsönható kvark–gluon-plazmáról, és merre tartanak a nagyenergiás nehézion-fizikai kutatások.

Hadronspektrumok mérése

Az egyik legalapvetőbb mérhető mennyiség nehézion-ütközésekben a keletkezett részecskék száma (multiplicitás). Ezt általában részecsketípusra bontva szokás vizsgálni, a transzverz (nyalábirányra merőleges) impulzus, p_T függvényében, különböző centralitási osztályok esetén [10].

Fontos megfigyelés, hogy ezek a hadronspektrumok alacsony p_T esetén Boltzmann-eloszlás-szerűek, azaz $\exp(-p_T/T)$ jellegűek. Ez arra utal, hogy az ütközés időfejlődése során létrejöhetett valamiféle lokális termodinamikai egyensúly. A legegyszerűbb hidrodinamikai számítások a táguló rendszer hőmérsékletére egy $T = T_{\text{kin}} + u^2 m$ jellegű összefüggést mutatnak, ahol T az effektív hőmérséklet, T_{kin} a kinetikus kifagyás hőmérséklete, m a részecsketömeg, u pedig a tágulási sebesség. Az összetettebb modellek, amelyek a hidrodinamikai számítások mellett figyelembe veszik a kinetikus kifagyás előtti hadronsórás fázist is, sikeresen reprodukálni tudják a mért spektrumokat. A modellek és a mért adatok össze-

vetéséből pedig mérhető a kinetikus kifagyás hőmérséklete, ami 100 és 150 MeV közé tehető.

Egy másik hasonlóan fontos mennyiség a kémiai kifagyás hőmérséklete. Kémiai kifagyásnak az időfejlődés azon szakaszát nevezzük, amikor a részecsketípusok már nem változnak (de hadronsórás még lehetséges). Ezt integrált hadronspektrumok segítségével lehet meghatározni, statisztikus hadronizációs modellek illesztésével. Az ALICE kísérlet mérései alapján centrális ólom–ólom ütközésekben a kémiai kifagyás hőmérséklete 155 MeV körüli értéknek adódott [11].

Ritkaságnövekedés

Az ütköző atommagok protonokból és neutronokból állnak, ezek legfontosabb építőkövei pedig a könnyű u és d kvarkok. Az ütközés során keletkeznek azonban nehezebb kvarkokat tartalmazó részecskék is, ezek arányának vizsgálata a kvarkanyag létrejöttéről árulkodhat.

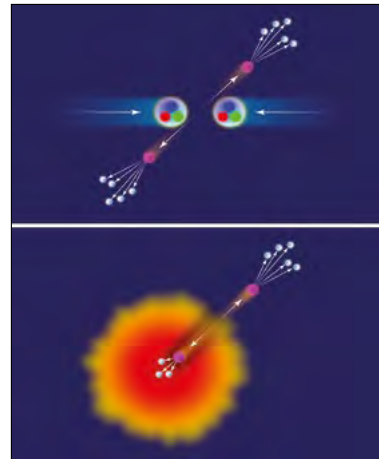
Az SPS gyorsító NA49 kísérlete közölt az elsők között ezzel kapcsolatos méréseket, ahol megmutatták, hogy a kaon/pion keltési arány megnő centrális ütközések esetén [12]. Ezt a mérést azóta az NA61/SHINE kísérlet sokkal pontosabban is elvégezte a tömegközépponti ütközési energia függvényében, különböző típusú atommagok ütközése esetén [13].

Magmódosulási tényező, jet-elnyomás

A kvarkanyag létrejöttének egy fontos jele az úgynevezett *magmódosulási tényező*. Ez a mennyiség az alábbi módon definiálható:

$$R_{AA} = \frac{N_{AA}}{(\text{bináris ütközések száma}) \times (N_{pp})}, \quad (1)$$

ahol N_{AA} a nehézion-ütközés végállapotának részecske-multiplicitása, N_{pp} pedig a proton-proton ütközés multiplicitása. Ha egy nehézion-ütközés megfeleltethető lenne bináris nukleon-nukleon ütközések összegének, akkor ez az arány 1-hez tartana. A mérések alapján centrális



3. ábra. A jet quenching jelenségének illusztrációja. Az ábra a <https://physics.aps.org/articles/v7/97> cikkből lett átemelve

ütközésekben ez a mennyiség erősen eltér 1-től, azaz az ütközésben létrejövő közegben lecsökken az erősen kölcsönható hadronok energiája [14, 15].

Centrális ütközésekben azt is megfigyelték továbbá, hogy magas a féloldalas (aszimmetrikus) jetek aránya, azaz a közeg elnyeli a nagyenergiás részecskenyaláb energiáját [8]. Ezt illusztrálja a 3. ábra.

A direkt fotonok spektruma

Egy további fontos vizsgálandó mennyiség a kezdeti hőmérséklet, amely direkt fotonok segítségével mérhető. Direkt fotonnak azokat a fotonokat nevezzük, amelyek nem más részecskék bomlásaiból keletkeztek, hanem közvetlenül a nagyenergiájú részecskeütközésből. Ezek az ütközés minden szakaszában keletkeznek a teljes időfejlődés során. A megfigyelések szerint nagy impulzusnál a direkt fotonok spektruma jó egyezést mutat nehézion- és proton-proton ütközések esetén, azaz nem nyelődnek el az erősen kölcsönható közegben (mivel nincs színtöltésük). A kis impulzusú tartományon a termikus fotonok exponenciális illesztéséből megbecsülhető a kezdeti hőmérséklet, amely az ALICE mérései alapján 300 MeV körüli értéknek adódott [16]; ez jó egyezést mutat a QGP létrejöttét feltételező modellekkel.

Elliptikus folyás

Ha a részecskekeltés egy robbanásszerű kollektív tágulás során történik, akkor periferikus ütközések esetén a kezdeti térbeli ellipszoidális aszimmetria megjelenhet a részecskék impulzuseloszlásában. Az $N(p_T, \varphi)$ impulzuseloszlás φ azimutiszög szerinti sorfejtése az alábbi alakban írható fel:

$$N(p_T, \varphi) = N(p_T) \left[1 + 2 \sum_n v_n \cos(n(\varphi - \Psi_{RP})) \right], \quad (2)$$

ahol Ψ_{RP} a reakciósík, amelyhez az azimutiszöget viszonyítjuk. Az első páros együtthatót, v_2 -t elliptikus folyásnak nevezik. Hidrodinamikai modellek alapján ez egy nem elhanyagolható mennyiség. Ezt a mérések is megerősítették, azaz a kvarkanyag időfejlődése valóban jól leírható egy kollektív hidrodinamikai tágulás segítségével. A magasabb rendű együtthatók a viszkozitásról is árulkodhatnak továbbá, amely rendkívül alacsonynak adódott [17]. A nagyenergiás ütközések során létrejövő kvarkanyag tehát egy erősen kölcsönható, szinte tökéletes folyadéknak tekinthető.

Femtoszkópia, HBT-korrelációk

A kvarkanyag további feltérképezésére egy izgalmas módszer a femtoszkópia. A nehézion-fizika ezen alterülete a rádiócsillagászatból ered, R. Hanbury Brown és R. Q. Twiss felfedezései alapozták meg [18]. Az általuk kifejlesztett módszerrel a távoli csillagokból érkező fény intenzitáskorrelációjának segítségével képesek voltak

meghatározni a csillag geometriai méretét (szögátmérőjét). Ennek a módszernek az analógiáját G. Goldhaber és kutatótársai találták meg nagyenergiás ütközések esetén, ahol azonos bozonok (egész spinű részecskék) impulzus-korrelációit vizsgálták [19].

Ma már ismert, hogy az azonos bozonok megkülönböztethetlenségéből adódó kvantumstatisztikus korrelációk segítségével feltérképezhető a kvarkanyag tér-időbeli geometriája. A CERN kísérleteiben legújabbán a részecskekeltő forrás alakjának a korábbiaknál sokkal pontosabb meghatározása is lehetséges, amely egy hatványfüggvényszerű, Lévy-stabil eloszlásnak adódott [20, 21].

Összefoglalás, kitekintés

Az elmúlt évtizedekben rengeteg izgalmas felfedezés született a nehézion-fizikában, amely alapjaiban befolyásolta az erős kölcsönhatásról alkotott képet, és a QCD különböző fázisainak leírását. A CERN kísérleteiben, többek között az NA49, NA61, ALICE, és CMS kísérletekben a kezdetek óta jelentős a magyar részvétel, a magyar kutatócsoportok jelenleg is aktívan részt vesznek a nehézion-fizikai programokban.

Mit is tudunk tehát ma a kvarkanyagról? Tudjuk, hogy nagyenergiás nehézion-ütközésekben létrejön a kvark-gluon-plazma. Ez egy erősen kölcsönható anyag, amely elnyeli a nagyenergiás hadronok energiáját, azonban a színtelen direkt fotonokét nem. A kezdeti hőmérséklete extrém magas, 300 MeV (3,5 terakelvin) nagyságrendű. A hadronspektrumok segítségével mérhető a kémiai kifagyási hőmérséklet, ami 155 MeV körüli, illetve a kinetikus kifagyási hőmérséklet, ami 100–150 MeV körüli, ezek 1–2 terakelvinnek felelnek meg. A hidrodinamikai számítások sok megfigyelést reprodukálnak, különösen a hibrid, hadronszórás is figyelembe vevő modellek. Mindezek alapján a kvarkanyag egy nagyon alacsony viszkozitású, szinte tökéletes folyadéknak tekinthető.

A nehézion-fizika mára a precíziós korszakába lépett, a jelenleg is zajló mérések a korábbiaknál nagyságrendekkel pontosabbak. Ez egyre nagyobb kihívást jelent az elméleti modelleknek is, hogy a kísérleti eredményeket reprodukálni tudják. Izgalmas új terület a kollektivitás vizsgálata nagy multiplicitású proton-proton ütközésekben, illetve a kezdeti állapot fluktuációinak kapcsolata az alacsonyenergiás magfizikával és az atommag deformációs paramétereivel.

Köszönetnyilvánítás

A cikk a Kulturális és Innovációs Minisztérium EKÖP-24 kódszámú Egyetemi Kiválósági Ösztöndíj Programjának a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült. A szerző kutatásait az NKFIH OTKA K-138136 és PD-146589 pályázatok támogatták.

1. Politzer H. D.: Reliable perturbative results for strong interactions? Phys. Rev. Lett. 30 (1973) 1346–1349.
2. Fritzsche H., Gell-Mann M., Leutwyler H.: Advantages of the color octet gluon picture. Phys. Lett. B 47 (1973) 365–368.
3. Gross D. J., Wilczek F.: Ultraviolet behavior of nonabelian gauge theories. Phys. Rev. Lett. 30 (1973) 1343–1346.
4. Heinz U. W., Jacob M.: Evidence for a new state of matter: An assessment of the results from the CERN lead beam program (2000). arXiv: nucl-th/0002042
5. Adcox K., et al.: Formation of dense partonic matter in relativistic nucleus-nucleus collisions at RHIC: Experimental evaluation by the PHENIX collaboration. Nucl. Phys. A 757 (2005) 184–283.
6. Adams J., et al.: Experimental and theoretical challenges in the search for the quark gluon plasma: The STAR Collaboration's critical assessment of the evidence from RHIC collisions. Nucl. Phys. A 757 (2005) 102–183.
7. Aamodt K., et al.: Charged-particle multiplicity density at mid-rapidity in central Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Rev. Lett. 105 (2010) 252301.
8. Chatrchyan S. et al.: Observation and studies of jet quenching in Pb-Pb collisions at nucleon-nucleon center-of-mass energy = 2.76 TeV. Phys. Rev. C 84 (2011) 024906.
9. Braun-Munzinger P., Koch V., Schäfer T., Stachel J.: Properties of hot and dense matter from relativistic heavy ion collisions. Phys. Rept. 621 (2016) 76–126.
10. Abelev B., et al.: Centrality dependence of π , K, p production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Rev. C 88 (2013) 044910.
11. Acharya S., et al.: Production of 4He and 4He in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV at the LHC. Nucl. Phys. A 971 (2018) 1–20.
12. Siklér F., et al.: Hadron production in nuclear collisions from the NA49 experiment at 158-GeV/c/A. Nucl. Phys. A 661 (1999) 45–54.
13. Adhikary H., et al.: Measurements of π^+ , K^+ , p and $\bar{p}$ spectra in $^{40}\text{Ar}+^{48}\text{Sc}$ collisions at 13A to 150A GeV/c. Eur. Phys. J. C 84 (2024) 416.
14. Abelev B. et al.: Transverse momentum distribution and nuclear modification factor of charged particles in p-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 082302.
15. Chatrchyan S., et al.: Study of high- p_T charged particle suppression in PbPb compared to pp collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. J. C 72 (2012) 1945.
16. Adam J., et al.: Direct photon production in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Lett. B 754 (2016) 235–248.
17. Aamodt K., et al. Higher harmonic anisotropic flow measurements of charged particles in Pb-Pb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 2.76$ TeV. Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 032301.
18. Hanbury Brown R., Twiss R. Q.: A test of a new type of stellar interferometer on Sirius. Nature 178 (1956) 1046–1048.
19. Goldhaber G., Goldhaber S., Lee W.-Y., Pais A.: Influence of Bose-Einstein statistics on the anti-proton proton annihilation process. Phys. Rev. 120 (1960) 300–312.
20. Adhikary H., et al.: Two-pion femtoscopic correlations in Be+Be collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 16.84$ GeV measured by the NA61/SHINE at CERN. Eur. Phys. J. C 83 (2023) 919.
21. Tumasyan A., et al.: Two-particle Bose-Einstein correlations and their Lévy parameters in PbPb collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 5.02$ TeV. Phys. Rev. C 109 (2024) 024914.

MI AZ ANTANYAG ÉS HOVA TŰNT?

Horváth Dezső^{1,2}

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

²Babes-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

E-mail: horvath.dezso@wigner.hun-ren.hu

1. Bevezetés

Az antianyag izgalmas téma, a *Fizikai Szemle* is sok cikkben foglalkozott vele – mind kísérleti [1–3], mind pedig elméleti [4, 5] szempontból. A CERN születésének 70. évfordulója alkalmából áttekintjük* a CERN antianyag-vizsgálatait, különös tekintettel az esetenkénti magyar részvételekre. A szerző elnézést kér, amiért az érthetőség kedvéért kénytelen bizonyos mértékig idézni a [4] cikkből, és elkerülhetetlen némi tartalmi átfedés a korábbi hasonló publikációkkal.

A szerző köszönetet mond Pásztor Gabriellának (ELTE) a cikk gondos lektorálásáért és javító megjegyzéseirért.

* A szerző 2024.05.15-én elhangzott akadémiai előadása alapján.



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 Babes-Bolyai Egyetemen.

2. Az antianyag születése

Paul Dirac megpróbált számot adni az elektron saját per-dületéről, a spinről, de nem tetszett neki Erwin Schrödinger kvantummechanikai mozgásegyenlete, mert az a lendülettől és helykoordinátáktól elválasztva kezelte az energiát és az időt, ellentmondva az egységes téridő fogalmának. Dirac 1928-ban közölt egy lineáris egyenletet [6], amelynek azonban a kétféle spinállapotnak megfelelően kívül volt még két elképesztő megoldása is: pozitív töltésű és negatív energiájú, azaz negatív tömegű elektron kétféle spinállapotban. Negatív tömeg nem létezhet, de nyolc évvel később Carl Anderson kozmikus sugarakban megfigyelt egy pozitív töltésű elektront. Fokozatosan kiderült, hogy valamennyi anyagi részecskénknek, az alapvető fermionoknak, valamint a belőlük képezhető összetett részecskéknél, a hadronoknak létezik antirészecskéje ellentétes töltéssel, de egyébként azonos tulajdonságokkal. A részecskéket és antirészecskéiket megkülönböztető töltés lehet nemcsak elektromos – a kvarkok például színtöltéssel, az antikvarkok pedig antiszínnel is rendelkeznek. A proton három kvarkból, $p = [uud]$, az antiproton pedig, amellyel cikkünk főszereplőjeként sokat találkozunk, három antikvarkból áll: $\bar{p} = [\bar{u}\bar{u}\bar{d}]$, ahol u és d a két legkönnyebb kvark, és az antirészecskét felülvonás jelzi.

Az antirészecskék a fermionokra vonatkozó Dirac-egyenlet negatív energiájú megoldásai, tehát az elemi bozonokra nem is értelmezhető a fogalom, csak például a két fermionból álló mezonokra. Ilyen pár például a negatív és pozitív pion: $\pi^- = [\bar{u}d]$ és $\pi^+ = [u\bar{d}]$. A gyenge kölcsönhatást közvetítő W^+ és W^- bozont is szokták egymás antirészecskéinek tekinteni, de az is téves, hiszen nem is alkalmazható rájuk a C részecske $\leftrightarrow$ antirészecske transzformáció. Az a gyakran olvasható kijelentés pedig, hogy a foton a saját antirészecskéje, teljesen értelmetlen, főleg mivel az elektromágneses mező a C transzformáció hatására előjelet vált.

3. Az antianyag eltűnése

Amikor részecske és antirészecske *találkozik*, azaz ütközik, megsemmisülhetnek, a teljes energiájuk sugárzássá alakul. Az elektron és pozitron kis energián fotonokká, a proton és antiproton viszont, sokkal nagyobb energiát szabadítva fel, elsősorban mezonokká alakul. Az ellenkező folyamat is működik: elegendően nagy energiával rendelkező fotonok az atommagok elektromágneses terében fermion-antifermion párokat tudnak kelteni: kisebb energián csak elektron-pozitron párt, de elegendően nagy energián ($E > 2m_p c^2$, legalább a protontömeg kétszerese) már proton-antiproton párt is.

Az ősrobbanás elmélete szerint a világegyetem egészen korai szakaszában a teljes energia sugárzás formájában létezett, és a fokozatos lehűlés folyamán alakultak ki részecskék. A sugárzásból párban kellett keletkezniük, ugyanannyi részecskének és antirészecskének, azonban az általunk belátható világegyetemben nincs jelentős mennyiségű antianyag, egy antianyag-galaxis körül sugárzási övezetnek kellene ugyanis lennie. Vajon hova lett az antianyag? A számítások szerint mintegy billiomodrészrel több részecskének kellett keletkeznie, mint antirészecskének, hogy megmagyarázza jelenlegi állapotunkat.

4. A CPT -invariancia

A fizika egyik alaptörvénye a CPT -invariancia [1–4], amely kimondja, hogy három tükrözés egyidejű végrehajtásakor az elemi részecskék mérhető tulajdonságai nem változnak meg. A töltés tükrözése (operátorának jele C mint *charge*) a részecskéből antirészecskét készít; a második tükrözés a térkoordináták tükrözése (jele P mint *parity*), a harmadik pedig az időé (T mint *time*).

Így a töltésen kívül egy részecske és antirészecskéje azonos tulajdonságokkal kell, hogy rendelkezzen. Van azonban egy sokkal fontosabb következmény is, amelyet *Richard Feynman* ismert fel: egy mozgó antirészecske kezelhető a téridőben ellenkező irányban haladó részecskének, még kölcsönhatások esetében is [6, 8]. Ezt a Feynman-gráfok, a részecskereakciókat leíró grafikus egyenletek ki is használják, és az, hogy az így végzett számítások eredménye a lehető legpontosabban egyezik

a mérési adatokkal, a CPT -invariancia legsúlyosabb bizonyítéka.

A negatív tömeget a részecskefizika standard modellje tehát roppant egyszerűen, a CPT -invarianciát kihasználva kezeli: részecskékkel számol antirészecske helyett, ellenkezőre fordítva a téridő-koordinátákat. Az egyetlen probléma az energia visszafordíthatatlansága: emiatt a t idő és az E energia kapcsolatára hagyatkozva az időtükrözést komplex konjugálással kombináljuk, és így visszafordítjuk az energia előjelét a szabad részecske e^{-iEt} energiafüggésében.

A [4] cikkben részletesen körbejártuk a antirészecskék kezelését a részecskefizika elméletében, a standard modellben, itt elsősorban a kísérleti vizsgálatokkal fogunk foglalkozni.

5. Mi itt a probléma?

Az antirészecskékkel kapcsolatban jó néhány probléma merül fel.

- Az alapkérdés: miért nincs antianyag a világegyetemben? Az ősrobbanás után pontosan ugyanannyinak kellett keletkeznie, mint anyagnak. Hova lett az antianyag?
- Lehet ici-pici különbség anyag és antianyag tulajdonságai között? Ez ugyan sértené a szent tehénként tisztelt CPT -invarianciát, de vannak a standard modellnek enyhén CPT -sértő kiterjesztései, tehát célszerű ellenőrizni.
- Létezhet olyan anyagi részecske, amely a saját antirészecskéje (Majorana-fermion)? A neutrínó elvben lehet olyan, de eddig nem sikerült ezt kísérletileg kimutatni, bár több kísérlet keresi ezt neutrínómentes kettős béta-bomlásban.
- Gyanúsán hangzik a negatív tömeg: lehetséges, hogy az antirészecskék a Földön felfelé esnek?
- Van gyakorlati jelentősége az antianyagnak, vagy az csak a fizikusok drága játékszere?

6. Tényleg egyformák?

Azt, hogy mennyire azonosak részecske és antirészecskéje tulajdonságai, kísérletileg kell ellenőrizni. A semleges K -mezonok egymásba alakulása, a kaon-ízrezgés megfigyelése óriási segítséget nyújtott ehhez: a kísérletek szerint a kaon és az antikaon tömegkülönbsége

$$[m(K^0) - m(\bar{K}^0)]/m(\text{átlag}) < 10^{-18}.$$

Ez máig a CPT -invariancia legpontosabb közvetlen kísérleti bizonyítéka. A Feynman-gráfok működése elvben ennél pontosabb, de nem közvetlen. Világegyetemünk anyaga azonban nem mezonokból, hanem protonokból és neutronokból áll, tehát az igazi ellenőrzés azok összehasonlítása antirészecskéikkel. A tömeg, töltés és mágneses momentum mérése merül fel mint lehetőség.

Bármilyen részecsketulajdonság mérésére a részecskét le kell lassítani és valamilyen módon csapdázni. Ezt

könnyű megtenni a protonnal és a nagyon nehéz neutronnal. Ugyanez antiprotonnal is lehetséges, hiszen elektromos térben lassítható és mágneses csapdában az elért vákuumtól függő ideig benn is tartható [7]. Antineutronnal viszont nem működik a dolog, hiszen az is csak viszonylag nagy energiával keletkezik, és nem lehet lelassítani, mert az elektromos tér nem hat rá, és anyaggal ütközve megsemmisül.

7. A CERN antianyaggyára

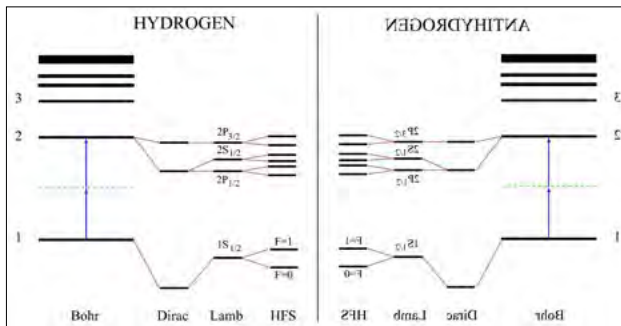
Az antiproton tehát lassítható és csapdázható, csak a kósza elektromos terek miatt a tömegét nagyon nehéz mérni, mert az elektromágnesség sokkal erősebb, mint a tehetetlenség vagy a gravitáció. A CERN felkérésére 1992-ben írtunk egy megvalósíthatósági tanulmányt (majd jelentősen bővítve publikáltuk [7]) arról, hogy a CPT-invariancia vizsgálatára az antiprotont és pozitront tartalmazó antihidrogén atom a legalkalmasabb, és azt elő lehet állítani laboratóriumi körülmények között a CERN-ben. Tanulmányunk is hozzájárult ahhoz, hogy a CERN megépített és 1999-ben üzembe helyezett egy komplex antiproton-lassító berendezést (*Antiproton Decelerator*, a továbbiakban AD), amelyet később fellelőzően Antianyaggyárnak neveztek el (1. ábra).



1. ábra. A CERN antianyaggyára. A CPT-invariancia ellenőrzésére épült 1997–1999-ben, azóta is folyamatosan fejlesztik

Az AD 26 GeV energiájú¹ protonokat nyer a proton-szinkrotronból, amelyek anyaggal ütközve proton-antiproton párokat keltenek. Az antiprotont leválasztják és elektromágneses tárológyűrűbe vezetik, ott több lépésben kisebb energiára (6 MeV körülire, 1 MeV = 106 eV) lelassítják, majd a különböző kísérletek elektromágneses csapdáihoz továbbítják. A lassítás elektromos térrel történik, de minden lépés után az antiprotonokat hűteni kell, azaz az egymáshoz képesti impulzusszórásukat minimalizálni, nehogy szétszóródva elveszenek. Az AD 100 s-onként egyszerre $3\text{--}4 \times 10^7$ antiprotont juttat a kísérletekhez, illetve a nemrég üzembe helyezett ELENA (*Extreme Low ENergy Antiprotons*) utólassító gyűrűbe, amely már keV-es energiára lassított részecskéket szol-

¹ A proton 1 eV energiát nyer 1 V feszültség átszelésekor, 1 GeV = 10^9 eV.



2. ábra. A hidrogén és az antihidrogén atomi energiaszintjei [7]. A 2s-1s spektroszkópia egymással szemben haladó fotonokkal rendkívül pontos energiámérést tesz lehetővé, mert kiküszöböli a hosszanti mozgás torzító hatását

gáltat. Az AD hat nagyobb kísérletnek biztosított helyet: az ALPHA és az ATRAP együttműködés az antihidrogén-atomban levő pozitron 2s-1s átmenetének általunk javasolt spektroszkópiai vizsgálatát célozta meg, de az csak az ALPHA kísérletnek sikerült, az ASACUSA és a BASE a proton és antiproton tulajdonságait (tömeg, töltés és mágneses momentum) hasonlítja össze, az AEGIS és a GBAR az antihidrogén gravitációs tömegének mérését tervezi.

8. Az antihidrogén vizsgálata

Az antihidrogén-spektroszkópiához sok lépésen át jutunk el, és azt a sorozatot az ALPHA (*Antimatter Laser PHysics Apparatus*, antianyag-lézerfizikai berendezése) kísérletnek sikerült elsőnek (és mindmáig egyedül) végigcsinálnia. Az első sikeres antihidrogén-spektroszkópia lépései a következők voltak:

- Csapdáztak, azaz mágneses Penning-csapdába fogtak, és közel nulla sebességre hűtöttek [3] kilencven ezer antiprotont.
- Hozzákeverték 3 millió hideg pozitront, így keletkezett mintegy ötven ezer $\bar{\text{H}}$ -atom.
- Eltávolították a csapdázó elektromos potenciál lekapcsolásával a megmaradt töltött részecskéket.
- Sikeresen lehűtöttek és csapdában tartottak 20 $\bar{\text{H}}$ -atomot $T = 0,54$ K hőmérsékletnél. A kötött pozitron mágneses momentumát felhasználva egy oktapólus-mágnessel csapdában tartják az antihidrogén-atomokat, ami csak az egyik spinállású atomot csapdázza.
- Az $\bar{\text{H}}$ -atomokat mágneses térrel csapdában tartották mintegy 10 s ideig, amely elegendő arra, hogy az 1s alapállapotra jussanak.
- Az 1s $\rightarrow$ 2s gerjesztést egymással szemben haladó fotonokkal végezték. Ezt úgy oldották meg, hogy az $\bar{\text{H}}$ -atomokat $t = 300$ s ideig tükrök között 243 nm körülire finomhangolt hullámhosszú állóhullámoknak tették ki. A 2s állapotból az $\bar{\text{H}}$ -atom azonnal annihilál, ami jól észlelhető, ez tehát egy *megjelenési* mérés.
- Mikrohullámú rezonancia segítségével a pozitron spinállása átfordítható, azzal kisöpörték a maradék alapállapotú atomot, amelyek ekkor szintén szétsugároztak, ez az *eltűnési* mérés.

- Végül a csapdázó inhomogén tér lekapcsolása megsemmisíti az összes túlélő $\bar{H}$ -atomot.

A lehető legalacsonyabb hőmérséklet a kísérlet minden pillanatában nagyon fontos, és az adott rendkívül magas vákuumban ezt csak elektromágneses részecskehűtéssel lehet elérni. Amint azt a [7] tanulmányban kifejtették, kétféle reakcióban kelthető antihidrogén-atom: egy antiproton és két pozitron háromrészecskés ütközésében, vagy egy antiproton és egy pozitronium (pozitron-elektron kötött állapot) ütközésében. A harmadik részecskére a kötési energia elviteléhez van szükség, mert a spontán, fotonkissugárzással történő pozitron-antiproton egyesülés valószínűsége nagyon kicsi.

Az ALPHA kísérlet *Jeffrey Hangst* (Aarhus Egyetem, Dánia) vezetésével a háromrészecskés ütközést, a legnagyobb hatásfokú antihidrogén-keltő folyamatot alkalmazta. Így az antihidrogén magasan gerjesztett állapotban keletkezik, pedig a vizsgálatokhoz alapállapotú atomra van szükség. Többféle módszert is ajánlottak a legerjesztéshez, de az ALPHA kísérleté a legegyszerűbb: meg kell várni, hogy magától elérje fotonátmenetekkel az 1s alapállapotot. Mivel az antiproton annihilációja 4–5 töltött részecskét szabadít fel, jól mérhető az annihiláció térbeli helyzete, tehát ellenőrizhető, hogy az $\bar{H}$ -atom nem az edény falának ütközve semmisült meg. A kísérlet utolsó három lépése egymással nagyon jól egyező eredményt adott, és a hidrogénnel való összehasonlítás igazolta a CPT-invarianciát 2×10^{-12} pontossáig. Ezzel az eredménnyel kihúzták a szőnyeget a konkurens ATRAP kísérlet alól, amely ekkor el is távozott az AD-ból.

Az ALPHA kísérlet alaposan körbejárta az antihidrogén tematikáját, és mindenben a közönséges hidrogénéval azonos tulajdonságokat rögzített – persze a kísérleti bizonytalanságon belül. Megmérték az antihidrogén mágneses momentumát mikrohullámú rezonanciával. Elektromos impulzusokkal (természetesen mélyen a kötési és gerjesztési energiák alatt) lökdösve ellenőrizték, mennyire hat rá az elektrosztatikus tér. Természetesen kiderült, hogy ugyanannyira semleges töltésű, mint a hidrogén, tehát az antiproton és a pozitron töltése azonos nagyságú.

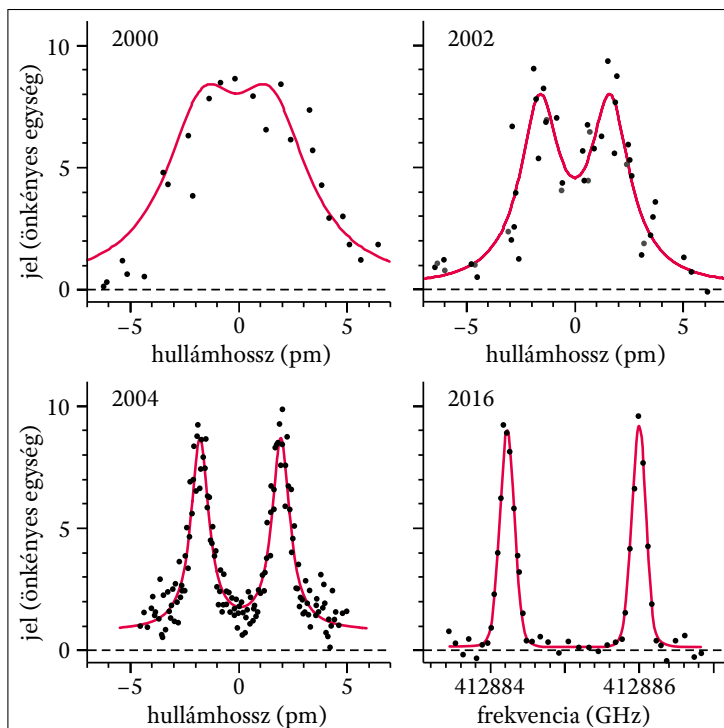
9. Az antiproton tömege

Látunk a világban antirészecskéket – ha nem is eleget –, de hogyan értelmezzük a negatív energiát, ami nyugalmi állapotban negatív tömeget jelent? Amint már láttuk, a részecskefizika a kérdést rövidre zárta Feynman negatív téridejével, de az ilyesmit ellenőrizni kell. A mi ASACUSA kísérletünk japán, dán, olasz, osztrák és magyar együttműködésben az antiproton tömegének mérésére született. A magyar csoportot a szerző szervezte budapesti és debreceni fizikusok-

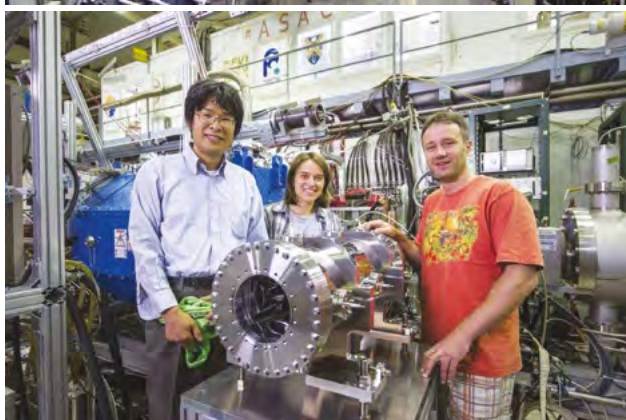
kal, az utóbbi időben Sótér Anna, Barna Dániel, Juhász Bertalan és Radics Bálint vett részt magyarként a közös munkában. Az együttműködésnek a nem japán résztvevők, elismerve a Tokiói Egyetem domináns szerepét, az ASACUSA nevet javasolták az *Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons* (atomspektroszkópia és ütközések lassú antiprotonokkal), mivel Aszakusza a neve Tokió templomi negyedének. A kísérlet jele (logója) ezek után az Aszakusza kapujánál lógó óriási lampion képe lett.

A kísérlet azon alapult, hogy egy lassú antiproton atomi csapdába tud kerülni egy héliumatombban, amikor kilökve az egyik elektront, a másik elektron társaságában atomi pályára kerül. Ez az állapot molekulaszerű lesz, mert a negatív antiproton sokkal nehezebb, mint az elektron, és természetesen erősen torzítja a hátrahagyott elektron pályáját. Ezt a rendszert megfelelően hangolt lézerrel ki lehet billenteni a metastabil állapotából. Ekkor az antiproton azonnal befogódik az atommagba és felrobbantja azt, remek észlelési lehetőséggel. Egy dubnai elméleti fizikus, Vlagyimir Korobov hihetetlen pontosan ki tudta számolni az összes ilyen háromtestállapot kötési energiáját, feltételezve a proton és antiproton tömegének azonosságát, és így lézerspektroszkópia segítségével be tudtuk határolni a tömegek különbségét 10^{-12} pontossáig.

Ez természetesen nem ment egyik napról a másikra, az elméleti és kísérleti pontosság párhuzamosan fejlődött. Az utóbbira remek példa egy felhasadt energiaállapot mérésének fejlődése 16 év alatt: a spektroszkópiai felbontást a vonalvastagság jelzi (3. ábra).



3. ábra. Az ASACUSA kísérlet lézerspektroszkópiájának fejlődése évről évre, ugyanazon a felhasadt antiproton-átmeneten, a középvonaltól való eltérés függvényében. Az első három ábra x tengelyén a hullámhossz eltérése (pm, azaz 10^{-12} m egységben), az utolsón a frekvenciafüggés látható, ami csak ellenkező x irányt jelent



4. ábra. Az ASACUSA kísérlet mérőrendszere 2016-ban és a berendezés építői: Hori Maszaki, Sótér Anna és Barna Dániel. A különleges hűtőrendszer a betonfal mögött van, csak az összekötő csöve látszik

A kísérlet két kiemelkedő eredménye: 2011-ben az első kétfotonos spektroszkópiával elért tömegmeghatározás, majd 2016-ban 1,7 K hőmérsékletre lehűtött antiprotonos héliumatomon végzett mérés. Ez utóbbi mérőrendszere és alkotói láthatók a 4. ábrán, az eredmény pedig a 3. ábra 2016-os részabráján. Májig a mi kísérletünk adja az antiproton-proton tömegkülönbség legpon-



5. ábra. Az ALPHA kísérlet mérőberendezése a gravitációs mérés idején. Középen látható az antiproton-röptetés függőleges hengere

tosabb mérését: a lehetséges relatív különbség 10^{-12} -nél kisebb, azaz a 12. jegyben lehet. Az évek folyamán természetesen részleteiben tanulmányoztuk az antiprotonos héliumatom tulajdonságait és kölcsönhatását a környezetével. A kétfotonos publikáció négy, a különleges hűtésűn három magyar szerző volt.

A BASE (*Baryon Antibaryon Symmetry Experiment*) japán–német együttműködés egyetlen csapdában tartott antiproton keringési frekvenciáját mérte mágneses csapdában a protonnal összehasonlítva, és 10^{-9} pontossággal egyformának találta őket. Mivel a keringési frekvencia a töltés és a tömeg hányadosával arányos, arra ad megszorítást. Feltételezve a *CPT*-invarianciát, ez az eredmény Einstein ekvivalenciaelvét [9] is igazolja a Föld gravitációs terében $6,8 \times 10^{-7}$ pontossággal.

A mi ASACUSA kísérletünknek sikerült elsőként antihidrogén-nyalábot, csapdából kiröptetett antihidrogén-atomokat előállítania. Az ehhez épített mérőberendezést a valaha élt leghíresebb japán szamuráj emlékére MUSASHI-nak kereszteltük: *Monoenergetic Ultra Slow Antiproton Source for High-precision Investigations* (monoenergiás ultralassú antiprotonok forrása nagy pontosságú vizsgálatokhoz). Ez a munka is egy évtizedig tartott, és az antihidrogén mágneses momentumát akartuk röptetésben megmérni, de az ALPHA kísérlet bennünket is megelőzött.

10. Antigravitáció?

Az antirészecskék negatív tömege máig izgalomban tartja a közvéleményt. Az anyagunk tömege jórészt energia, tehát nem lehet negatív. A pozitroné is pozitív, de ez mind tehetetlen tömeg, és a gravitáció sok mindenben kilóg a kölcsönhatások közül. Miért ne eshetne a pozitron vagy az antikvark felfelé? A *CPT*-invariancia elve csak azt mondja ki, hogy az antianyag almát ugyanúgy vonzaná egy antianyag Föld, mint az almát a Föld. Az antialma és a Föld kölcsönhatása hasonlóságát csak Einstein ekvivalenciaelvével feltételezi. Az antigravitáció egyelőre csak a tudományos fantasztikumban létezik, eddig ugyanis például minden repülő csészealj UFO-megfigyelést sikerült megcáfolni, de azért ezt kísérletileg muszáj ellenőrizni.

Sajnos, az elektromágneses kölcsönhatás olyan sok nagyságrenddel erősebb a földi gravitációnál, hogy töltött részecskével lehetetlen egy laboratóriumban gravitációs gyorsulást mérni. A kilencvenes években én is részt vettem egy ilyen elvetélt olasz kísérletben: azt szerettük volna megmérni, hogyan hat a földi gravitáció egy homogén mágneses térben keringő antiprotonra. A szimulációk azonban megmutatták a kísérlet reménytelenségét a mérőberendezés szórt elektromágneses terében.

Ott van viszont a semleges antihidrogén. Az AD-ban két nagyobb együttműködés is alakult ilyen vizsgálatokra, ezek az AEGIS (*Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, and Spectroscopy*, antianyag-kísérlet: gravitáció, interferometria és spektroszkópia)

és a GBAR² (*Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest*, a nyugvó antihidrogén gravitációs viselkedése). Mindkét kísérlet alapállapothoz közeli antihidrogént állít elő pozitronium (elektron-pozitron kötött állapot) és antiproton ütközésében. Az AEGIS azután egy Moiré-interferométeren készül átröptetni őket, a GBAR pedig egy nagy térfogatban fogja ellenőrizni a süllyedésüket. Még egyik kísérlet sem jutott el az adatgyűjtésig.

Ezzel szemben az ALPHA együttműködés (ALPHA-g néven) 2023-ban egy óriási függőleges hengerben (5. ábra) felfelé röptetve az antihidrogén-atom gravitációs tömegét is megmérte. Az természetesen pozitívnak adódott, ha egyelőre nagyon nagy relatív bizonytalansággal is. Maga Hangst nevetve mondta, hogy jobb lett volna, ha felfelé esnének, mert akkor megkapta volna a Nobel-díjat. Távolítlag a lézerrel hűtött antihidrogén-atomok gravitációs tömegét ezrelék pontossággal akarják megmérni, mert azzal az igazi elemi részecskék, a pozitron és az antiproton antikvarkjainak negatív tömegét is kizárhatják.

11. Antianyag a világűrben?

A világegyetem barionos (tehát nem sötét) anyagának túlnyomó része hidrogén és hélium (3:1 arányban), minden nehezebb anyag csillagok felrobbanásával kerül az űrbe. A Földet folyamatosan bombázzák nagyenergiás részecskék, főként protonok és hélium-atommagok. Ha van antianyag jelentős mennyiségben, ezek antirészecskéinek is kell érkeznie. Nagyenergiás részecskeütközésben mindig keletkezhetnek antiprotonok, az antihélium kimutatása viszont bizonyítaná az antianyag jelenlétét az univerzumban.

Erre készült Samuel Ting Nobel-díjas fizikus vezetésével a CERN AMS-2 (*Alpha Magnetic Spectrometer*) mérőberendezése (6. ábra), amelyet egy amerikai űrrepülőgép vitt fel a Nemzetközi Űrállomásra 2011-ben. A szerkezet hasonló a nagyenergiás kísérletekben használatosokhoz, a teljes súlya 8500 kg, amelyből 1200 kg egy ál-



6. ábra. Az AMS-2 kísérlet észlelőrendszere a Nemzetközi Űrállomáson

² Ez szójáték, mert a G gravitációt kombinálja az antirészecskék felhívásával, amely angolul *bar*.

landó mágnes. A berendezést a CERN-ből vezérlik, persze Houston közreműködésével. Az újsághírek ellenére a kísérlet egyelőre nemigen észlelt antihéliumot, bár láttak két olyan eseményt, amely származhatott abból. Keresik a sötét anyag saját magával történő annihilációjának jeleit is, a sötét anyag részecskéje ugyanis bizonyos modellek szerint Majorana-részecske, azaz a saját antirészecskéje. A berendezés ugyanakkor mérhetetlen mennyiségű értékes információt gyűjtött és gyűjt a kozmikus sugárzás tulajdonságairól.

12. Mire jó az antianyag?

Van az antianyagnak egy mindenki számára jól ismert hasznosítása: a pozitronemissziós tomográfia, a PET. Ehhez antirészecskét, pozitront juttatunk a szervezetbe, és egy sokdetektoros mérőrendszerrel rekonstruáljuk az annihilációk helyét. A rákos sejtek igen heves metabolizmust mutatnak, tehát a jelzett cukorszármazékot gyorsan begyűjtik, a képen emiatt nagy aktivitású, sötét foltokként jelennek meg. Az AD-ban kezdetben működött egy kisebb ACE (*Antiproton Cell Experiment*, antiprotonos sejt-kísérlet) nevű együttműködés is, amely az antiproton élő sejtekre gyakorolt hatását vizsgálta rákterápiás céllal. Pár év után azonban távozott, mert terápiára az antiproton nagyon drága, és annihilációja nagyenergiás másodlagos részecskéket, főként pionokat kelt, amelyek szintén roncsoló hatásúak.

Az antianyag komoly felhasználásától távolodva, egy szélhámos társaság megpróbált a NASA-nak *eladni* egy antiprotonos rakétahajtóművet. A tervükben csak azt felejtették elmondani, honnan veszik majd az antiprotonot: a hajtómű mögé csak egy nagy ládát rajzoltak *antiproton-raktár* névvel.

A CERN-t meglepte annak idején Dan Brown „Angyalok és démonok” című regénye. A cselekmény szerint a CERN titkos, föld alatti laboratóriumából ellopnak egy termosznyi antianyagot, és fel akarják robbantani vele a Vatikánt. A főhős, szerencsére, megakadályozza ezt. A CERN a könyvnek honlapot nyitott, amely közölte a következőket:

- A CERN valóban létezik, megépítette a világ legnagyobb részecskegyorsítóját, a Nagy Hadronütköztető (LHC) 27 km-es gyűrűjét, 100 m-rel a föld alatt.
- Ugyanakkor a CERN teljesen nyitott intézmény, nincsenek titkos laboratóriumai, és főleg semmi baja a Vatikánnal.
- Valóban előállít antihidrogén-atomokat (nehezebb antiatomokat nem tud) az AD-nál (és nem az LHC-ban), de tisztán tudományos célra és csak mikroszkopikus mennyiségben, ami nem alkalmas bombakészítésre.

Amikor kitudódott, hogy film is készül a regényből, a CERN vezetői meghívták a film készítőit és felajánlották a CERN-t helyszínnek a film elejére. Azok mindent lefényképeztek, azután felépítették Los Angelesben az

LHC hasonmását, és ott forgattak. Ez az LHC üzembe helyezése előtt történt: még viccelődünk is, hogy a végén még a Higgs-bozon is Hollywoodban fogják megtalálni, nem a CERN-ben.

A film CERN-ben játszódó képsora meglehetősen hitelesnek látszik, jó munkát végeztek a díszlettervezők. A CERN kiállítást is készített a filmnek, ahol szembeállították a film antianyag-edényét az antiprotonok tényleges előállításával. Az üvegedényben fortyogó antianyagot összehasonlíthatjuk például az ASACUSA kísérlet háromtonnás antiprotoncsapdájával, amelyben néhány tucat atomot sikerült megfognunk.

13. Konklúzió

A kozmológia ősrobbanás-modellje azonos mennyiségű anyagot és antianyagot írta elő a világegyetemünkben, de antianyag-galaxisokat nem látunk. A részecskefizika általánosan elfogadott és kísérletileg jól alátámasztott elmélete ugyanakkor erősen épít a részecske-antirészecske egyenértékűséget kimondó elvre, a *CPT*-invarianciára. A CERN többféle kísérletben is ellenőrzi ezt az elvet, de ezidáig nem talált annak ellentmondó jelenséget.

Irodalom

Valamennyi alább idézett cikk megtalálható teljes egészében a világhálón, a [6] tankönyv kivételével. A cikkemben említett kísérletekről is rengeteg információ elérhető, ha a böngészőnk keresőjébe beírjuk a kísérlet nevét CERN-nel (pl. ALPHA CERN). Hiteles információt a kísérletek saját honlapjai és a Wikipédia nyújt. Ezen a körön kívül legyen mindenki óvatos, mert például az AMS-2 kísérletről valakik megírták, hogy tucatnyi antihélium-atommagot észleltek, miközben a kísérlet maga csak két olyan észlelést említ, amely esetleg antihéliumnak tulajdonítható.

1. Horváth Dezső: Szimmetriák és sértésük a részecskék világában – a paritásértés 50 éve. Fizikai Szemle, 2007/2, 47.
2. Horváth Dezső cikkei antianyag-vizsgálatokról: Fizikai Szemle, 2004/3, 90.; 2009/6, 200.; 2017/4, 115.
3. Barna Dániel: Antianyag-vizsgálatok a CERN-ben. Fizikai Szemle, 2006/5, 151.
4. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Antirészecskék? Fizikai Szemle, 2022/11, 347–351.
5. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. Fizikai Szemle, 2008/7–8, 246.
6. Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: Bevezetés az elemi részek fizikájába, második, javított és bővített kiadás. TypoTex, Budapest, 2021.
7. Charlton M., Eades J., Horváth D., Hughes R. J., Zimmermann C.: Antihydrogen physics. Physics Reports, 241 (1994) 65–117.
8. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában – a 2008. évi fizikai Nobel-díj. Fizikai Szemle, 2008/12, 417.
9. Hráskó Péter: Ekvivalenciaelv és kvantumelmélet. Fizikai Szemle, 1998/9, 283.

A NEUTRÍNÓK FIZIKÁJA

Pei Wenna^{1,2}

¹ELTE Atomfizikai Tanszék, Budapest

²University College London

E-mail: pei.wenna@ttk.elte.hu

Bevezetés

A standard modell [1] névre hallgató elméleti keretrendszer, amely kategorizálja az összes ismert elemi részecskét és leírja azok kölcsönhatásait, tagadhatatlanul a részecskefizika történetének legnagyobb diadala. A standard modell elméleti kidolgozásához és kísérleti alátámasztásához szükséges több mint nyolcvan évet a Higgs-bozon 2012-ben bekövetkezett felfedezése koronázta meg. Ám ezzel korántsem ért véget a világegyetem építőköveit körülölelő rejtélyek sorozatának felderítése [2]. Jelenleg nincs magyarázat az észlelt anyag-antianyag aszimmetriára, a sötét anyag mibenlétére, vagy éppen a neutrínók bizonyos tulajdonságaira.



Pei Wenna a University College London doktorandusza, kutatási területe a standard modellen túli neutrínófizika. Fizika BSc-diplomáját a Kenti Egyetemen (University of Kent) szerezte 2019-ben, Fizika MSc-diplomáját a londoni Imperial College-ben 2020-ban.

A neutrínó a standard modell egyik legizgalmasabb, legrejtélyesebb részecskéje, amely rengeteg felfedezésre váró tulajdonságot rejt magában. Bár a jelenlegi elméletek csak részben adnak számot a neutrínók viselkedésére, folyamatosan új megfigyelésekkel és innovatív kísérletekkel bővítjük tudásunkat, hogy egyre közelebb kerüljünk ezen titokzatos részecske teljes megértéséhez. A neutrínók megismeréséhez vezető út elkerülhetetlenül a standard modellen túlra vezet, az új fizika világába. Ennek a még felfedezetlen terepnek a leírására számos elmélet létezik, azonban kizárólag kísérletek révén derülhet ki, hogy ezek közül melyik írja le világunk működését, vagy esetleg egy eddig meg nem alkotott elméletre van szükség. Az idén 70. születésnapját ünneplő CERN kulcsszerepet játszott a kísérleti neutrínófizika előrelendítésében, tudományos célkitűzéseivel összhangban pedig a jövőben is központi szereplője lesz ennek a tudományterületnek. Ahhoz, hogy teljesebb képet kaphassunk a neutrínófizika helyzetéről, érdemes először megtárgyalni, hogy mik is pontosan a neutrínók, miért fontosak, illetve, hogy a jelenlegi és a jövőben tervezett kísérletek milyen módon tudnak válaszokat adni a neutrínókkal kapcsolatos kérdésekre.

Mik azok a neutrínók?

A neutrínó létezését először Wolfgang Pauli osztrák származású Nobel-díjas svájci fizikus feltételezte 1930-ban, hogy feloldja a radioaktív béta-bomlás során keletkező elektron energiáját körülvevő kételyeket. Akkoriban, a neutrínó létezéséről mit sem sejtve, úgy gondolták, hogy a magok kéttest-bomlásából születő elektronnak muszáj fix energiát kapnia, azaz minden alkalommal ugyanazt, hiszen úgy vélték, hogy rajta kívül nem található egyéb részecske a végállapotban. A kísérlet elvégzése során a fix energiaérték helyett folytonos energiaeloszlást figyeltek meg, ami ellentmondásban állt a vártakkal. Erre a döbbenetes eredményre két magyarázat létezhet: az energiamegmaradás nem univerzális fizikai törvény, vagy az elektronon kívül más részecske is megbújik a végállapotban. Az előbbi lehetőség elrugaszkodottsága miatt Pauli a második opciót részesítette előnyben, és javaslatot tett egy semleges töltésű könnyű részecske bevezetésére.

Egészen 1956-ig kellett várni a neutrínó felfedezésére, ami Clyde Cowan és Frederick Reines nevéhez fűződik [3], és amiért 40 évvel később Reinesnek ítéltek a fizikai Nobel-díjat (Cowan akkor már nem élt). A kísérlet során atomreaktorban születő antineutrínók által CdCl_2 vizes oldatában keltett inverz béta-bomlás során kilökődő pozitronok elektronokkal történő kioltásából származó gamma-fotonokat figyeltek meg ($p^- \nu_e \rightarrow n^+, e^+ e^- \rightarrow \gamma\gamma$), hármas koincidenzában a neutron befogadása miatt gerjesztett állapotú kadmium gammasugárzásával ($n^{108}\text{Cd} \rightarrow ^{109}\text{Cd} \rightarrow ^{109}\text{Cd}\gamma$). Ezzel közvetve bizonyították az új semleges könnyű részecske, a neutrínó létezését.

A neutrínók a töltött leptonok (az elektron, a müon és a tau) elektromosan semleges párjai, amelyek szintélessel sem rendelkeznek, azaz kizárólag a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt. Három különböző fajtájukat, azaz ízüket különböztetjük meg: az elektron- (ν_e), a müon- (ν_μ) és a tau-neutrínókat (ν_τ), amik a gyenge kölcsönhatásban résztvevő sajátállapotok.

Keletkezési mechanizmusukat tekintve a neutrínók létrejöhetnek mind természetes, mind mesterséges módon. Az előbbi kategóriába tartoznak a teljesség igénye nélkül azok a neutrínók, amik a Nap belsejét fűtő radioaktív folyamatok során keletkeznek, valamint azok, amik a banánban is megtalálható kálium bétabomlása során jönnek létre. Mesterségesen többek között reaktorokban vagy részecskegyorsítókban állíthatók elő. Annak ellenére, hogy számtalan keletkezési mechanizmusuk révén a világegyetem egyik leggyakoribb részecskéi, a neutrínókat szinte lehetetlen közvetlenül észlelni, hiszen semleges töltésük miatt nagyrészt észrevétlenül suhannak át a kísérletek detektorain. Felmerül tehát a kérdés: ha ennyire nagy erőfeszítések árán lehet csak megfigyelni ezeket a részecskéket, miért éri meg velük foglalkozni?

Miért fontosak a neutrínók?

Az univerzum legalapvetőbb folyamatainak résztvevőiként a neutrínók kiemelten fontos szereppel vannak felruházva. A csillagokat működtető magfúziótól a szupernóvák és a Föld belsejében zajló folyamatokig mindenhol jelen vannak, és következőképp hatalmas számban fordulnak elő: átlagban másodpercenként megközelítőleg 100 trillió halad át egy ember testén, tehát 220 másodperces olvasási idővel számolva ez 22000 trillió hivatlan átutazót jelent a cikk kezdete óta! Alapvető igényünk a világ kialakulásának és fejlődésének megértésére pedig elkerülhetetlenné teszi, hogy kíváncsiak legyünk arra, amiből sok van.

A neutrínók íz-sajátállapotukban (ν_α , ahol $\alpha = e, \mu, \tau$) vesznek részt a gyenge kölcsönhatásban, és ebben a formájukban figyelhetjük meg őket kísérletek során. Azonban tömegsajátállapotukban utaznak mind vákuumban, mind az anyagban. Az íz- és tömeg-sajátállapotok azonban nem egyeznek meg, a Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata-féle (PMNS) U keveredési mátrix révén lehet meghatározni az egyes íz-sajátállapotok összetételét, ami a tömeg-sajátállapotok, ν_i (ahol $i = 1, 2, 3$) lineáris szuperpozíciójaként írható fel:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle. \quad (1)$$

A konvenció szerint m_1 rendelkezik a legnagyobb, m_3 pedig a legkisebb elektron-neutrínó komponenssel.

2015-ben a fizikai Nobel-díjat a kanadai SNO kísérlet vezetőjének, Arthur B. McDonaldnak és a japán Super-Kamiokande kísérlet vezetőjének, Takaaki Kajitának osztották ki a neutrínóoszilláció, vagyis ízrezgés megfigyeléséért, aminek során a propagáló neutrínó íze megváltozik. Az SNO kísérletben a Napban keletkező elektron-neutrínók (ν_e) átalakulását vizsgálták, a Super-Kamiokande kísérletben pedig emellett az atmoszferikus müon-neutrínókat [4] (ν_μ) is.

Annak a valószínűsége, hogy egy eredetileg α ízű neutrínó β ízűvé változzon

$$\begin{aligned} \mathcal{P}_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = & \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \Re[M_{\alpha\beta,ij}] \sin^2\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E}\right) \\ & + 2 \sum_{i>j} \Im[M_{\alpha\beta,ij}] \sin\left(\frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}\right), \end{aligned} \quad (2)$$

ahol L a megtett távolságot, E a neutrínó energiáját, Δm_{ij}^2 pedig két neutrínótömeg-sajátállapot tömegnégyzete közötti különbségét jelöli. Ez utóbbi két modellparamétert jelent, hiszen a harmadik tömegkülönbség már nem független tőlük: $\Delta m_{32}^2 = \Delta m_{31}^2 - \Delta m_{21}^2$. A kifejezésben ezen túl a keveredési mátrixból képzett $M_{\alpha\beta,ij} = U_{\alpha i} U_{\beta i}^* U_{\alpha j} U_{\beta j}^*$ mennyiség valós ($\Re$) és képzetes ($\Im$) része is megjelenik.

A standard modell tömeg nélküli részecskének jósolja a neutrínókat, azonban ízrezgés csak abban az esetben következhet be, amennyiben $\Delta m_{ij}^2 \neq 0$. Tehát az oszcillációk kísérleti észlelése bizonyítékkal szolgál arra, hogy a neutrínóknak van tömegük, és arra, hogy a standard modell

kiterjesztésre szorul. Ahogy a következőkben látni fogjuk, a neutrínók pontos tömegét és azok előállítási folyamatát leíró elmélet bizonyosan új, még ismeretlen fizikán alapszik, amihez a neutrínószektor jelentheti a kulcsot.

Nyitott kérdések a neutrínókról

Láthattuk, hogy pusztán elméleti megközelítéssel zsákutcában lyukadunk ki a neutrínók megismeréséhez vezető úton, hiszen tömegük révén ellentmondanak a standard modellnek. De hogyan kapnak tömeget? És mekkorák ezek a tömegek pontosan?

A (2) egyenletben felírt valószínűség a tömegkülönbség négyzetével arányos, tehát az oszcillációs adatokból nem derül ki, hogy milyen előjelű ez a paraméter, azaz hogy melyik tömegrendezés valósul meg a természetben: a normális ($m_1 \ll m_2 < m_3$), ahol a tömegek nagyságának sorrendje hasonlít a fermioncsaládoknál tapasztaltnak, azaz a legnagyobb (legkisebb) elektron-neutrínó-komponensű a legkönnyebb (legnehezebb), vagy a fordított ($m_3 \ll m_1 < m_2$). A két tömegrendezési lehetőséget az 1. ábra mutatja be. Mivel az ízrezgés periódusának hossza arányos a neutrínóenergia és az ízek közti tömegnégyzet-különbség hányadosával, a Napból származó alacsony ($\sim \text{MeV}$) energiájú elektron-neutrínók eltűnésének (ízrezgésének) vizsgálatával a kisebb $\Delta m_{\text{sol}}^2 = \Delta m_{21}^2 \approx 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$ paraméter, a míg a magasabb ($\sim \text{GeV}$) energiájú légköri neutrínók mérésével a több mint 30-szor nagyobb $\Delta m_{\text{atm}}^2 \approx \Delta m_{32}^2 \approx \Delta m_{31}^2 \approx 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ paraméter határozható meg.

A standard modellben a fermionok a Higgs-bozonnal való kölcsönhatásuk révén kapják tömegüket, aminek során a Higgs-bozon egy bal- és egy jobbkezes fermionhoz

csatolódik: ezt nevezzük Dirac-tömegnek. A neutrínók esetében azonban maximális paritássértést látunk, azaz minden neutrínó balkezes. Ebből következik, hogy vagy kell lennie egy felfedezésre váró jobbkezes neutrínónak, vagy a neutrínóknak valami más tömeggenerálási mechanizmusra van szükségük [6]. Mivel nem ismert a neutrínók tömegéért felelős mechanizmus, semmi sem követeli meg, hogy a standard modell többi fermionjához hasonlóan a neutrínók is Dirac-részecskék legyenek, azaz, hogy a neutrínó és antirészecskéje, az anti-neutrínó különbözzenek. Ha a neutrínók Majorana-részecskék, ami annyit jelent, hogy a neutrínó önmaga antirészecskéje, annak fontos kísérleti következményei vannak. Fontos kiemelni, hogy eddig egyetlen elemi Majorana-fermion sem mutatott ki. Sok kísérlet keresi Majorana-neutrínók jeleit a neutrínó nélküli dupla bétabomlás kimutatásával, hogy eldönthessük, a neutrínók vajon Dirac- vagy Majorana-részecskék, és ezzel meg-szorítsuk a standard modell megengedett kiterjesztéseit.

Ugyan a neutrínók pontos tömege nem ismert, a jelenlegi felső korlát $0,8 \text{ eV}$ [7] a trícium béta-bomlásának vizsgálatából. Összevetve ezt a legkönnyebb töltött fermion, az elektron 10^6 eV nagyságrendű tömegével, felmerül a kérdés, hogy miért ilyen drámai a különbség a neutrínók és a többi fermion tömege között. Három neutrínót biztosan ismerünk, de vajon léteznek továbbiak is? Akár a sötét anyag is lehet egy ilyen, még ismeretlen neutrínó?

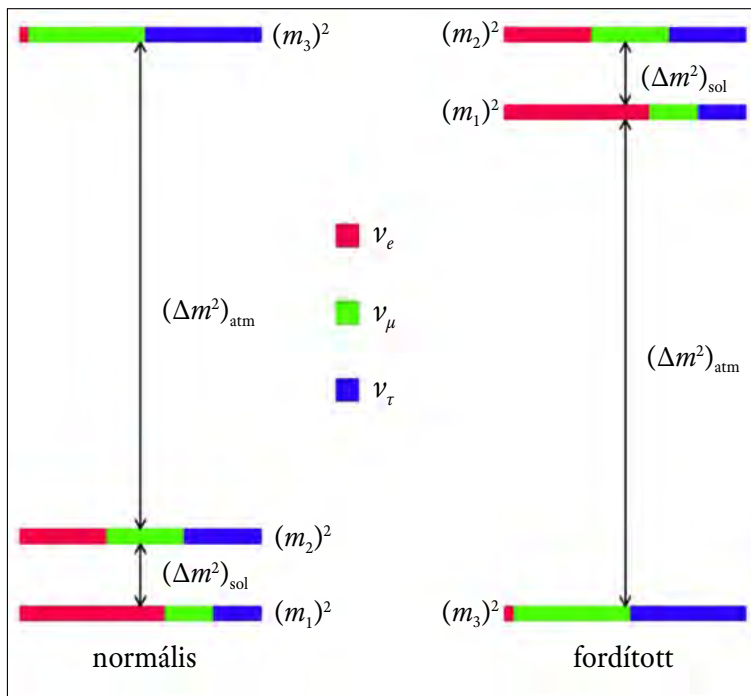
A standard modell alapján az ősrobbanás során egyenlő mennyiségű anyagnak és antianyagnak kellett volna keletkeznie. Létezésünk arra utal, hogy a korai világegyetemben történt valamilyen folyamat, amely során aszimmetria alakult ki az anyag és antianyag között, létrehozva az anyag dominanciáját, és ezzel lehetővé téve később az univerzumban található struktúrák kialakulását.

Ha a neutrínószektorban lenne jelentős töltéstükrözés-paritássértés (CP-sértés), az magyarázatul szolgálhatna az észlelt mértékű anyagtöbblet-re. Ez tehát egy alapvető kérdés a világegyetem és az emberiség létezésének szempontjából.

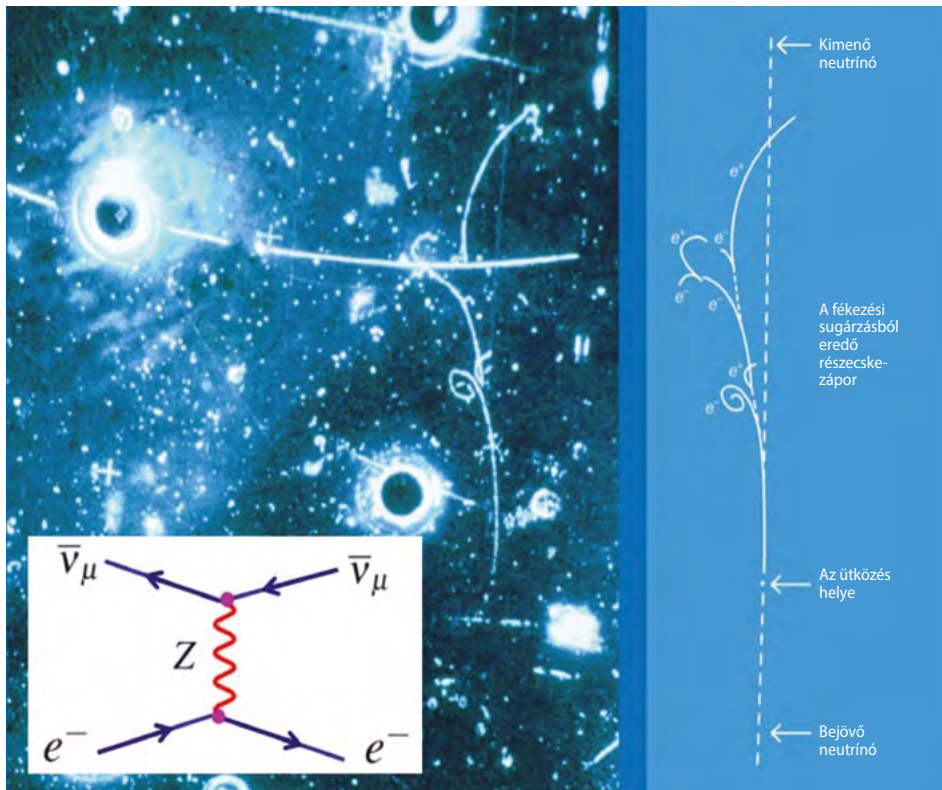
Már 1964-ben kimutatták kaonbomlásokban [8], hogy a gyenge kölcsönhatás CP-sértő. De van CP-sértés a neutrínószektorban is? Az első eredmények a T2K és NOvA kísérletekből [9] biztatóak, de nem konkluzívak, így kizárólag jövőbeni mérések révén fogunk biztos válaszokat kapni, amiknek a megalapozásához régóta fennálló neutrínóprogramjával a CERN is nagyban hozzájárul.

Neutrínófizikai mérőkövek a CERN-ben

A CERN célzott neutrínóprogramja mindössze két évvel a neutrínó 1956-os felfedezése után, már 1958-ban elindult. A kutatási program első nagy eredményét a Garga-



1. ábra. A két lehetséges tömegrendezés: normális (bal) és fordított (jobb) [5]



2. ábra. A beérkező anti-müon neutrínó kölcsönhatásba lép egy atomi elektronnal, és kilöki azt, egy elektro-mágneses záport elindítva így [11]

melle buborékkamrában 1973-ban felfedezett semleges gyenge áram és a hozzá tartozó közvetítő, a Z-bozon közvetett kimutatása jelentette. A buborékkamrában a semleges neutrínó nem hagy nyomot, azonban részt vehet szóródási folyamatokban. A 2. ábrán alul látható, semmiből előtűnő elektronnyom egy neutrínótól kapta a lendületét, bizonyítva a Z-bozon által közvetített semleges áram létezését. Ezt követte 1990-ben a Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető (LEP) eredménye, amely $e^+e^- \rightarrow Z$ események tanulmányozásával a könnyű neutrínófajták számát háromban határozta meg, összhangban a három ismert fermioncsaláddal [10].

2012-ben fejeződött be a CNGS kísérlet, amelynek keretei között egy tiszta ν_μ neutrínónyalábot küldtek a CERN-ből az olaszországi Gran Sassóba, ahol sikeresen detektáltak ν_τ neutrínókat, vagyis megfigyelték a $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ ízregést. Ezt követően jött létre a Neutrino Platform névre hallgató K+F projekt, amelynek célja a neutrínó-alapkutatás elősegítése világszerte és a globális neutrínó-kísérletek támogatása.

A CERN FASERv kísérlete

Szintén a CERN-ben indult el a FASERv kísérlet, amelynek fő tudományos célja a részecskeütköztetőben keletkezett neutrínók első detektálása volt. A FASERv, a FASER kísérlet aldetektora, a Nagy Hadronütköztető (LHC) óriási ATLAS detektorának közvetlen közelében, attól mindössze 500 méterre helyezkedik el, hogy teljesí-

teni tudja sokrétű tudományos célját a proton-proton ütközésekben keletkező neutrínók tanulmányozásával. Fő célját, a részecskeütköztetőben keletkezett neutrínók első közvetlen észlelését ugyan 2023-ban teljesítette [12], azonban ezzel nem fejeződött be munkája. Tudományos küldetése részeként a FASERv eddig nem vizsgált energiatartományban szondázza a neutrínó-kölcsönhatásokat. További célja a ν_μ kölcsönhatások részletes vizsgálata és a csekély számú regisztrált ν_τ esemény gazdagítása.

A töltött leptonokat, tehát az elektront (e), a müont (μ) és a taut (τ) csak a tömegük különbözteti meg egymástól a standard modellben. Ezért azon folyamatok valószínűsége, amelyekben ezen leptonok neutrínókkal egyetemben

részt vesznek, nem függhet a neutrínó fajtájától – ezt nevezzük leptonuniverzalitásnak. Ugyan az LHCb új mérései jó egyezést mutatnak a standard modellel a B-mezonok $K\ell^+\ell^-$ végállapotot eredményező bomlásainak vizsgálata során, más feszültségek továbbra is fennállnak az adatokkal a nehéz b-kvarkok gyenge kölcsönhatáson keresztüli leptonos bomlásai esetén. A $D\ell\nu$ végállapot tanulmányozásának összesített eredményei és az elmélet előrejelzései között nem elhanyagolható különbség mutatkozik [13], ami új fizika jele lehet. Ugyan az eltérések mögött állhat mérési hiba vagy statisztikus fluktuáció, azzal, hogy a FASERv további adatokat gyűjt a leptonuniverzalitás vizsgálatára, ablakot kínálhat az új fizika felé.

CERN Neutrínó Platform

A már említett Neutrínó Platform, amely az európai részecskefizikai stratégiával összhangban valósult meg, 2013 óta támogatja világszerte a részecskegyorsítókban folytatott neutrínófizikai alapkutatásokat. Az erre a célra létesített infrastruktúrákban különböző nemzetközi együttműködések szakértői kapnak lehetőséget és támogatást ahhoz, hogy a neutrínókísérletek következő generációjának prototípusait fejleszthessék. Jelenleg a Neutrínó Platform keretein belül zajló fejlesztések közül talán a DUNE kísérlet detektorprototípusainak tervezése, építése és tesztelése – a ProtoDUNE – a legkiemelkedőbb

projekt, ami tetemes beruházással és erőforrás-ráfordítással jár a CERN részéről is.

DUNE

A neutrínótulajdonságok pontosabb megértésére és alapvető részecskefizikai kérdések megválaszolására létrejött DUNE a Fermilab által üzemeltetett mély földalatti neutrínókísérlet, ahol egy Illinoisban létrehozott neutrínónyalábot küldenek az 1300 km-re lévő dél-dakotai Stanfordba. Ugyan nem hagyományos CERN-kísérlet (a CERN a konzorcium tagja), mégis érdemes említést tenni róla, hiszen az elkövetkező évtizedek egyik legmeghatározóbb kísérlete lesz a neutrínófizika területén. A kollaboráció nagy nemzetközi összefogás keretein belül valósul meg, több mint harminc ország ezer főnél is többet számláló tudósgárdájával, ahol Magyarországot az ELTE csoportja képviseli. Jelenleg zajlik a kísérleti csarnok feltárása, a detektorok építése pedig már folyamatban van annak érdekében, hogy a kísérlet 2030-ra tervezett megkezdése megvalósulhasson.

A DUNE a részecskefizika egyik legambiciózusabb projektje, ezzel összhangban pedig sokrétű tudományos küldetéssel van felruházva. Feladata nem kevesebb, mint a részecskefizika alapvető folyamatainak megértése és az új fizika kutatása. Három jól definiált fő tudományos célja: i) az anyag eredete és az ízrezgés jelensége közti kapcsolat keresése, ii) a kölcsönhatások egyesítésének vizsgálata és iii) a fekete lyukak kialakulásának megfigyelése.

A fizikában központi szerepet tölt be a természetben fellelhető szimmetriák tanulmányozása. A töltéstükrözés-paritás-időtükrözés (CPT) szimmetria – mai tudásunk szerint – sértetlen a természetben, de a CP-szimmetria sérül. Ahogyan már láthattuk, a neutrínók egyik ízből a másikba oszcillálhatnak. Ugyanakkor nagyon fontos kérdés, hogy ezen ízrezgési folyamatok ugyanazok-e antineutrínók esetében is, azaz, hogy van-e CP-sértés a neutrínószektorban [14], amit a (2) egyenlet utolsó tagja ír le. Az antineutrínók oszcillációját kísérleti úton kell tanulmányozni és összevetni a neutrínó esetében megfigyelttel. Amennyiben eltérés mutatkozik – ahogy azt számos eddigi kísérleti eredmény sugallja – az magyarázattal szolgálhat az anyag-antianyag aszimmetria eredetére a világegyetem korai szakaszában.

Einstein álma egy nagy egyesített elmélet volt, egy felsőbbrendű teória, ami mindent megmagyaráz az univerzumban. Jó példa ilyesfajta egyesítésre az alacsony energiákon az elektromágneses és gyenge kölcsönhatást leíró térelméletek magasabb energiás (100 GeV fölötti) közös modellje, az elektrogyenge kölcsönhatás leírása. Elképzelhető, hogy hasonló módon egyesíthető a standard modell három kölcsönhatása (elektromágnesesség, gyenge és erős kölcsönhatás), és akár még a gravitáció is. Ugyan a Nagy Egyesítés és a Mindenség Elméletének megtalálása még várat magára, sok törekvés létezik az ismert térelméletek összehangolására. Ezeknek közös vonása a hipotetikus protonbomlás megjelenése. A standard modell

szigorúan megtiltja ezt a folyamatot, s ezzel párhuzamban eddig egy kísérlet sem fedezett fel ilyen bomlásra utaló jeleket. Pozitív jel híján a kísérletek a proton élettartamára alsó korlátot határoznak meg, ami jelenleg nagyságrendileg 10^{34} év [15] – ez sokkal hosszabb, mint a világegyetem életkora! Ebből adódóan a DUNE egyik fő tudományos célja a protonbomlás keresése, hiszen annak megfigyelése egyértelmű bizonyítéka lenne az új fizikának.

A szupernóvák bizonyos csillagok életének látványos és erőteljes végső állomásai. A folyamat során a haldokló csillag nem tudja a rá ható gravitációs erőt ellensúlyozni, összezuhan saját súlya alatt, ezzel hatalmas robbanást előidézve. A nagy belső nyomás hatására a csillag belsejében található elektronok és protonok az elektronbefogásként ismert folyamat ($p + e^- \rightarrow n + \nu_e$) révén neutronokat és elektron-neutrínókat hoznak létre. A szupernóvából felszabaduló gigantikus energia nagyrészt erőteljes neutrínónyaláb formájában távozik. Amennyiben a robbanás után is elég nagy tömegű a maradványcsillag magja, az a szupernóva fekete lyukba való összeomlását eredményezi. A DUNE a szupernóva-neutrínók észlelésén keresztül szeretné megfigyelni egy fekete lyuk kialakulását valós időben, hiszen jelenleg vajmi kevés információ áll a kutatók rendelkezésére az univerzum egyik legextrémebb folyamatáról, ahol az általunk ismert fizikai törvények elveszítik érvényességüket.

A SHINE nehézion- és neutrínókísérlet

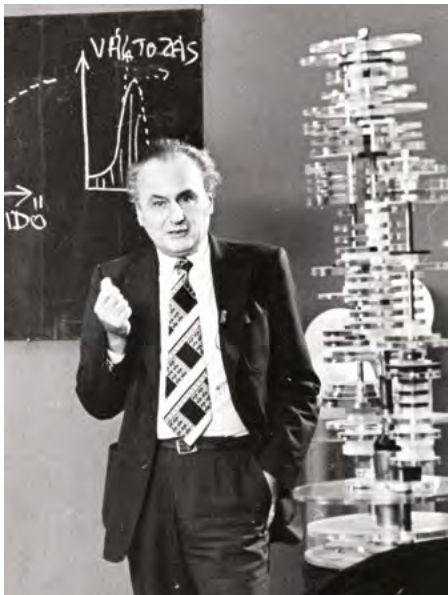
A neutrínókísérletek mérési eredményeinek pontosságát elkerülhetetlenül meghatározzák a kísérlet különböző részleteiből adódó bizonytalanságok, mint például a neutrínónyaláb összetételének ismerete. Az előállítási és detektálási pontok között utazó neutrínók egy kis része kölcsönhatásba léphet a közeget alkotó anyaggal, amin áthalad a nyaláb. Ilyen szórási folyamatok következtében a neutrínók hadronokká és leptonokká alakulnak át, ezáltal a nyalábban a neutrínók száma csökken, vagyis ez alacsonyabb neutrínófluxust eredményez a vártnál. Ahhoz, hogy a kísérletek minél pontosabban tudják mérni a vizsgált paramétereket, fontos a kölcsönhatásokból származó neutrínóvesztés megszüntetése.

A CERN-ben található SHINE (NA61) kísérlet célja, hogy a hadronok előállítási folyamatainak vizsgálatával pontosabb képet alkosson a neutrínónyalábok fluxusának változásáról, ezzel segítve a kísérletek során használt nyalábok megértését és tervezését. Ebben a kísérletben – ahogy számos más CERN-projektben – jelentős a magyar hozzájárulás az ELTE és a Wigner FK szakembereinek köszönhetően.

A neutrínófizika magyar úttörője:

Marx György

A magyarok hozzájárulása a neutrínófizikához nem újkeletű, ugyanis Marx György (1927–2002) Kossuth-díjas magyar fizikus, kutató, előadó, író, a tudományok lelkes



3. ábra. Marx György fizikus, az MTV „Jövők titkai” című tévéműsora első részének felvételén, 1981

híve és szóvivője már a 20. század közepén hozzájárult a tudományterülethez üttörő munkássága révén.

Marx nevéhez fűződik a leptonszám-megmaradás elve, miszerint az elemi részecskék kölcsönhatásai során a bemenő és a kimenő részecskék leptontöltésének összege változatlan marad. Ezért az eredményért 28 évesen Kossuth-díjjal tüntették ki. Mindezek mellett neki köszönhetjük a Föld belsejében zajló radioaktív folyamatok neutrínótermelésének számszerűsítését, amit a japán Kamiokande neutrínókísérlet tervezése során is figyelembe vettek. Diákjával, Szalay Sándorral levezette és felírta a neutrínótömegre vonatkozó Marx–Szalay asztrofizikai felső korlátot, ami a leptonszám megmaradásának elve mellett az egyik legnagyobb tudományos eredménye.

Életének utolsó szakaszában sem hagyott fel a kutatással, a sötét anyagot alkotó rejtélyes részecskék mibenlétére kereste a választ. Utolsó munkájában azt vizsgálta, hogy ez a láthatatlan anyag állhat-e kis tömegű neutrínókból.

Marx munkássága nem csak a kutatásban merült ki: nagykövete is volt a tudománynak. Neki köszönhetjük a „Neutrínó” elnevezésű konferenciasorozat létrehozását és első megrendezését 1972-ben, amelynek résztvevői között a 20. századi fizika legikonikusabb alakjai közül többen is jelen voltak, mint például Richard Feynman, Jakov Zeldovics, Frederick Reines, Raymond Davis vagy éppen John Bahcall.

Marx György szívügye volt a tudománynépszerűsítés, amelynek fontosságába vetett hitét bizonyítja, hogy egyetemi tankönyvei mellett tíz laikus közönségnek szánt kötetet jelentetett meg. Jól mutatja Marx széles

körü tudományos szakértelmét és sokrétű munkásságát, hogy negyvenöt éven át, egészen a haláláig betöltötte a *Fizikai Szemle* főszerkesztői pozícióját.

Összegzés

A neutrínók tanulmányozása nem csupán a részecskefizika, hanem az univerzum alapvető kérdéseinek megértése szempontjából is kritikus fontosságú. Láthattuk, hogy a neutrínófizika számos kérdőjellel van teletűzdelve, amikre a standard modell keretein belül hiába keressük a válaszokat, és amik új, ismeretlen fizika ujjenyomait hordozzák magukon. A lehetséges magyarázatok útvesztőjében a neutrínókísérletek jelentik az iránytűt, amelyek a CERN immáron hetven éve zajló vezető és támogató tevékenységével valósulhattak meg.

Izgalmas idők küszöbén áll a neutrínófizika, hiszen az új generációs kísérletek minden bizonnyal hozzásegítenek minket a neutrínók titkainak feltárásához és tovább gazdagítják tudásunkat a természet alapvető törvényeiről. A neutrínófizika területét tehát igazán érdemes kutatni és figyelemmel követni, hiszen a neutrínók tanulmányozásán keresztül lehetőségünk nyílna a világ-egyetemet és a saját létezésünket érintő legalapvetőbb kérdések megválaszolására.

Irodalom

- Horváth D.: A részecskefizika anyagelmélete: A standard modell. *Fizikai Szemle*, 2008/7–8, 246.
- Trócsányi Z.: A részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után. *Fizikai Szemle*, 2022/9, 269–273.
- Cowan Jr. C. L., et al.: Detection of the free neutrino: A confirmation. *Science*, 124(3212), (1956) 103–104.
- Kun E.: Neutrínócsillagászat. *Fizikai Szemle*, 2024/7–8, 255–265.
- Cahn R., et al.: White paper: Measuring the neutrino mass hierarchy. arXiv:1307.5487, 2013.
- Horváth D., Trócsányi Z.: Antirészecskék? *Fizikai Szemle*, 2022/11, 347–351.
- Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nature Physics*, 18(2), (2022) 160–166.
- Christenson J. H., et al.: Evidence for the 2π decay of the K_S^0 meson. *Physical Review Letters*, 13(4), (1964) 138.
- Ajmi A.: Latest results from the T2K and NOvA experiments. *PoS, HQL2023:024*, (2024).
- Schael S., et al.: Precision electroweak measurements on the Z resonance. *Phys. Rep.*, 427, (2006) 257–454.
- Riessmann K.: 50th anniversary of neutral current interaction in the Gargamelle bubble chamber (1973). 2023. 07. 19.
- Petersen B.: First physics results from the FASER experiment. In: *Proceedings of the 57th Rencontres de Moriond, 2023-Gravitation La Thuile, Italy, 18–25 March, 2023*, pp. 33–38.
- Pásztor G.: Jelek a standard modellen túlról? *Fizikai Szemle*, 2023 74/2, 48–52.
- Radics B.: A CP-szimmetriasértés kísérleti megfigyelése neutrínó-oscillációkban. *Fizikai Szemle*, 2020/7–8, 245–249.
- Takenaka A., et al.: Search for proton decay via $p \rightarrow e+\pi^0$ and $p \rightarrow \mu+\pi^0$ with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV. *Physical Review D*, 102(11), (2020) 112011.

fizikaiszemle.elft.hu

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

FELFEDEZŐ RÉSZECSEKEFIZIKA A CERN-BEN: AZ ELEKTROGYENGE BOZONOKTÓL A TITOKZATOS SÖTÉT ANYAGIG

Pásztor Gabriella

ELTE Atomfizikai Tanszék, Budapest

E-mail: gabriella.pasztor@ttk.elte.hu

A múlt nagy felfedezései: a gyenge kölcsönhatás anatómiája

Az Európai Nukleáris Kutatási Szervezet, a CERN történelme már a kezdetektől szorosan összekapcsolódik az elektrogyenge kölcsönhatás vizsgálatával.

Az első gyorsítót, a Szinkrociklotront 1957-ben adták át. Első jelentős visszhangot kiváltó eredménye a töltött pionok ritka bomlásának kimutatása volt elektronra és neutrínóra már 1958-ban, az axiálvektor-áramon alapuló elméleti leírás ellenőrzése során. A gyenge erő hatására végbemenő folyamat legpontosabb elméleti előrejelzésével összhangban, amely a standard modell $V-A$ (vektor-axiálvektor) áramán alapul, az elektronos és müonos pionbomlások gyakoriságának aránya $B(\pi \rightarrow e\nu)/B(\pi \rightarrow \mu\nu) \approx 1,23 \cdot 10^{-4}$. Ennek mérése szép igazolása a gyenge kölcsönhatás balkezes természetéből adódó „helicitáselnyomásnak” a lendület- és perdület-megmaradás miatt.

A kísérleti adatok egyre növekvő gazdagsága mellett az 1960-as évek óriási elméleti fejlődést hoztak. Sheldon Glashow már 1961-ben felvetette, hogy az elektromágneses és a gyenge erők egyesíthetők egy közös keretben, ha a már korábban elképzelt töltött közvetítő részecskék ($W^\pm$) mellett egy nehéz, elektromosan semleges részecske (Z^0) is létezik, amelynek tömege körülbelül $100 \text{ GeV}/c^2$. A továbblépéshez a fordulatot a Robert Brout és François Englert, valamint tőlük függetlenül Peter Higgs által 1964-ben javasolt BEH-mechanizmus hozta, amely megmutatta, hogy a közvetítő részecskéknek tömege lehet, ha létezik egy skalármező, amelynek értéke egy spontán szimmetriasértés után az üres térben sem nulla. Higgs azt is felvetette, hogy ekkor megjelenik egy új különleges skalár- (nulla spinű) részecske, amelyet ma Higgs-bozon (H) néven ismerünk. 1967-re Steven Weinberg és Abdus Salam sikeresen integrálták a BEH-mechanizmust Glashow modelljébe, létrehozva az elektrogyenge kölcsön-

hatás egységes elméletét, amelynek legfontosabb jóslata a gyenge semleges áramok létezése volt.

1973 ezek után két óriási felfedezést hozott, megszilárdítva a fiatal modellt. Az elméleti áttörést Gerard 't Hooft és Martinus Veltman bizonyítása hozta arról, hogy az elektrogyenge modell renormálható, azaz minden lehetséges fizikai folyamat valószínűsége 0 és 1 közé esik. Ez biztosítja, hogy az elmélet matematikai ellentmondástól mentes legyen. A kísérleti oldalon pedig a CERN-ben a Gargamelle-együttműködés egy óriási buborékkamrát müon-neutrínó-nyalábbal bombázva kimutatta a neutrínók szóródását atomi elektronokon és más részecskéken a visszalökődő töltött részecskék megfigyelésével (2. ábra az [1] cikkben). A folyamat ritkaságát jól jelzi, hogy több mint 1 millió fényképen csupán három $\nu_\mu e \rightarrow \nu_\mu e$ szórási eseményt fedeztek fel. Ezzel a semleges gyenge erő, illetve közvetve a Z-bozon mint közvetítő felfedezése megtörtént. Néhány évvel később, 1979-ben Glashow, Weinberg és Salam megkapja a Nobel-díjat. Elméletük pedig, kibővítve az erős kölcsönhatással, standard modell [2] néven máig rendkívül sikeres karriert mondhat magáénak, meglepően pontosan leírva a laboratóriumi megfigyeléseket.

Bár a Gargamelle-eredményekből meg lehetett becsülni az új közvetítő részecskék tömegét ($m_W \approx 60-80 \text{ GeV}/c^2$ és $m_Z \approx 75-95 \text{ GeV}/c^2$), közvetlen felfedezésükre 1983-ig kellett várni, hiszen ehhez egy új nagy energiájú ütköztető építésére volt szükség. Mivel a protonok összetett, dinamikus szerkezettel rendelkező objektumok, amelyek kvarkokból és az őket összetartó gluonokból állnak, az ütközésben a proton kinetikus energiájának csupán egy része hasznosulhat új nehéz részecskék keltésére. Ezért Carlo Rubbia meggyőzte a CERN tanácsát, hogy alakítsák át a frissen átadott maximum 450 GeV energiát elérő Szuper Protonsinkrotron (SPS) gyorsítót, amit hagyományos álló céltárgyas kísérletekhez terveztek. A cél egy modern proton-antiproton ütközőgyűrű megépítése volt, amely $\sim 600 \text{ GeV}$ energiájával már elegendő számú ritka W- és Z-bozon termeléséhez vezethetett.

Ehhez egy fontos technológiai kihívást is le kellett győzni: megfelelően intenzív antiprotonnyalábot kellett létrehozni. A holland gyorsítófizikus Simon van der Meer már 1972-ben publikálta a sztochasztikus nyalábhűtés elvét, amellyel a nyalábsomagokban utazó részecskék helyét és impulzusát lehetett közel tartani egymáshoz, és ezzel a csomagot erősen fókuszálni. Az ötlet egyse-



Pásztor Gabriella részecskefizikus, az MTA-ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport vezetője, az ELTE Atomfizikai Tanszék oktatója. Fő kutatási területe a részecskefizika standard modelljén túlmutató jelenségek vizsgálata. Tagja a CERN LHC CMS együttműködés vezető testületének. A BRIL nyalábmegfigyelő és luminozitásmérő rendszer projektmenedzserként modern mérőberendezések működtetését, tervezését és megépítését irányítja. Korábban az ATLAS kísérletben részt vett a Higgs-bozon felfedezésében. Az OPAL Együttműködés fizikakoordinátoraként irányította a LEP-adatok végső feldolgozását, a kísérlet tudományos örökségének publikálását.

rú: a nyalábcsoomagokban az egyes részecskék (vagy részecskecsoportok) pozícióját és lendületét megméri, és ezeket az értékeket elektromos jelekké átalakítva előküldik a gyűrű átelles pontjára, hogy a megfelelő statisztikai alapon kiszámolt korrekciókat alkalmazhassák a részecskék megérkezésének időpontjában az ideális sebességértékek eléréséhez. Ez a módszer tette lehetővé az SPS előgyorsítóiban a megfelelően fókuszált, jó minőségű antiprotonnyaláb előállítását.

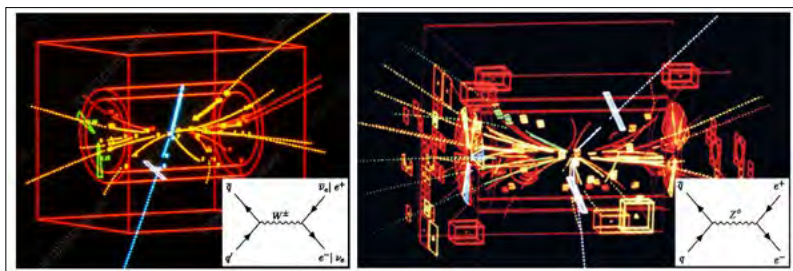
1981-ben lépett működésbe a Szuper Proton-Antiproton Szinkrotron (Sp̄pS, és két évvel később a W- és Z-részecskéket felfedezte az UA1 (Rubbia vezetésével) és az UA2 kísérlet, amelyek neve az angol „underground area” avagy földalatti terület rövidítéséből származik. A közvetítő részecskéket elsősorban elektronos bomlásaik alapján ismerték fel: $W \rightarrow e\nu$ és $Z \rightarrow e^+e^-$, ahogy az 1. ábra mutatja. Ennek oka, hogy műonokra az UA1 detektor lendületfelbontása az érdekes ~ 40 GeV/c tartományban csupán 20% volt (míg az UA2 nem is rendelkezett műondetektorral). Összehasonlítva, az elektronok energiefelbontása a kaloriméterben nagyjából 2,5%-os volt. Az 1983-as felfedezést egy évvel később követte Rubbia és Van der Meer

Nobel-díja. Rubbia később a CERN főigazgatójaként 1989 és 1993 között jelentős erőfeszítéseket tett a mai csúcsberendezés, a Nagy Hadronütköztető megvalósításáért, amelynek megépítését 1994-ben hagyták jóvá.

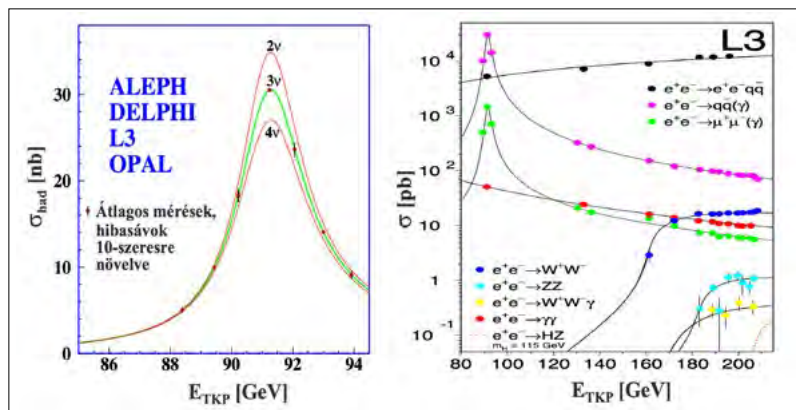
Az 1. ábra kapcsán érdemes egy másik úttörő technológia felfedezést is megemlíteni, amely lehetővé tette a töltött részecskék útjának észlelését elektronikusan, nagy térfogatban. 1968-ban George Charpak a CERN-ben fejlesztette ki a sokszálas proporcionális kamrát (MWPC-t), amelyben a nagy energiájú részecskék ionizálják a kamrában lévő gázmolekulákat. Az így szabadabbá váló elektronokat egy elektromos mező párhuzamosan futó huzalokra irányítja, amelynek közelében elektronlavina alakul ki, felerősítve az elektromos jelet. A szálakra beérkező töltések eloszlását vizsgálva meghatározható a részecskék pontos nyomvonala. Charpak újítása, amiért 1992-ben vehette át a Nobel-díjat, lehetővé tette az első modern részecskefizikai detektorrendszerek megépítését.

A Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető (LEP) már az Sp̄pS ötlete, illetve a W- és Z-bozonok felfedezése előtt tervezés alatt állt, hogy elemi részecskék (e^+e^-) tiszta kölcsönhatásaiban pontosan megvizsgálhassa a gyenge erőt közvetítő részecskék tulajdonságait, és az akkori remények szerint felfedezhesse a standard modell szívében álló Higgs-bozont. A 27 km körű, 100 mélyen fekvő föld alatti alagútban elhelyezett tárológyűrű nyaláb-energiája 44 GeV és 104,5 GeV között változott 1989-től 2000-ig terjedő pályafutása alatt. Megmérve az $e^+e^- \rightarrow Z, WW, ZZ$ folyamatok hatáskeresztmetszeit (többek között) a tömegközépponti energia függvényében (2. ábra) és tanulmányozva a Z és W bomlási folyamatait, a négy LEP-együttműködés szigorúan ellenőrizte a standard modell jóslatait, és megszorította annak lehetséges kiterjesztéseit. Mintegy 17 millió Z-bozon-esemény feldolgozásával a Z tömegét ($m_Z \approx 91,2$ GeV/c²) 0,002%-os pontossággal, a könnyű neutrínófajták számát pedig a Z-rezonancia pontos alakjának vizsgálatával kisebb mint 0,3% pontossággal 3-ban határozták meg.

Magyarország 1992-es hivatalos belépése a CERN tagállamai közé megnyitotta az utat a hazai intézmények kutatói előtt az intenzív együttműködés számára. A LEP L3 és OPAL együttműködéseiben jelentős szerepet játszottunk mind detektorfejlesztési, mind adatfeldolgozási projektekben. Ekkor indult el a szívemhez közel álló kísérleti kutatási irány a standard modellen túli fizika felé, amelyről cikkem második felében írok



1. ábra. Bal oldal: egy $W \rightarrow e\nu$ esemény képe: a kék részecskenyom a W-bomlásból származó elektronhoz tartozik, amellyel más részecske nem tart egyensúlyt, hiszen a csak gyenge erőt érző neutrínó nyom nélkül távozik a detektorból, a kék nyílal jelölt hiányzó lendületet hagyva maga után. Jobb oldal: az első Z-bozon-keletkezés észlelése az UA1 kísérletben 1983-ban: a két fehér részecskenyom egy elektron-pozitron párt jelöl a Z bomlásából. A nagy központi driftkamrában megjelenő többi nyom mindkét képen alacsony lendületű részecskéktől származik, amelyek a közvetítő bozonokkal együtt keletkeztek a proton-antiproton ütközésben



2. ábra. Bal oldal: az $e^+e^- \rightarrow Z \rightarrow$ hadronok folyamat hatáskeresztmetszete a LEP tömegközépponti energiájának függvényében. A színes vonalak az elmélet jóslatát mutatják 2, 3 és 4 könnyű neutrínófajta esetén. Jobb oldal: a különböző elektrogyenge folyamatok hatáskeresztmetszete a tömegközépponti energia függvényében. A mérések (pontok bizonytalanságzakkal) jó egyezést mutatnak a standard modell jóslataival a teljes energiatartományban öt hatáskeresztmetszet-nagyságrenden át. A hatáskeresztmetszet feltüntetett mértékegységei: 1 nb (pb) = 10^{-37} (10^{-40}) m²

majd. Az óriási erőfeszítések és az utolsó év izgalmai el-
lenére sem fedezett fel új elemi részecskét a LEP [3]: a
természet túl magasra választotta ehhez a Higgs-bozon
tömegét. A LEP azonban pontos méréseivel képes volt
megjósolni az akkor még fel nem fedezett elemi részecskék,
a Higgs-bozon és a legnehezebb t-kvark tömegét,
ezzel megszilárdította a standard modellt, kizárta annak
számos kiterjesztését, és előkészítette a terepet az LHC
számára.

A jelen izgalmai: a skalárszektor rejtélyei

A LEP alagútjában elhelyezett LHC protonok és nehéz
ionok sűrű csomagjait gyorsítja rekordenergiára (jelen-
leg 6,8 TeV). 2009-ben egy rövid próbafutással kezdte
évtizedeken átívelő működését, amely 2041 végéig biz-
tosított. Az LHC fő céljai között szerepelt az elemi ré-
szecskéknek tömeget adó elektrogyengeszimmetria-sértés
mechanizmusának tanulmányozása, a Higgs-bozon
felfedezése és tulajdonságainak pontos mérése, valamint
a standard modell nagy energián érvényes kiterjesztésé-
nek felkutatása.

A Higgs-bozon 2012-es felfedezése az LHC ATLAS
és CMS kísérleteiben, amelyről már sokszor olvashat-
tunk a *Fizikai Szemle* hasábjain is [4–7], új korszakot nyi-
tott a részecskefizikában. A Nobel Bizottság is kiemelte
a CERN-kísérletek szerepét, amikor a díjat mindössze
egy évvel később Englert és Higgs számára ítélte oda
(Brout 2011-ben elhunyt). A standard modell immár ré-
szecsketartalmát tekintve teljes, és pontosan számot ad
a méréseinkről. Válaszokat azonban annál kevesebbet
nyújt nyitott kérdéseinkre. Hogyan, hát, tovább?

A Higgs-bozon egy új kísérleti eszköz is kezünkben.
Segítségével feltérképezhetjük a skalármező potenciális
energiáját [8]. A 2030 körül induló Nagy Luminozitású
LHC (HL-LHC) a rendelkezésünkre álló adatmennyisé-
get egy évtized alatt megtízszerezi majd, megnyitva az
utat a különösen ritka Higgs-önkölsönhatások vizsgá-
lata felé, amely közvetlenül szondázza a skalárpotenciál-
ban megjelenő, eddig kísérletileg meg nem szorított ska-
lár-önkölsönhatási erősség paraméterét. Ezzel mélyebb
ismereteket szerezhetünk az elektrogyenge fázisátalaku-
lás természetéről, az univerzum korai fejlődéséről és sta-
bilitásáról, feszegetve a jól ismert ősi kérdéseket: honnan
jöttünk és hová tartunk?

Az LHC adataiban anomáliák és egzotikus jelenségek
után kutatva kíváncsian keressük, vajon mi bújik meg a
standard modell mögött. Felbukkannak új részecskék, az
új fizikai modell hírnökei, a titokzatos sötét anyag alkotói?
Megmutatkoznak új szimmetriák, rejtett térbeli dimen-
ziók [9], új kölcsönhatások? Sikerül egyesítenünk ezek
segítségével az ismert kölcsönhatásokat, ahogyan azt
Glashow, Salam és Weinberg (számos más kutató segít-
ségével) megtette az elektrogyenge kölcsönhatás esetén?
Felfedezzük új forrásait az anyag-antianyag aszimmet-
riának ritka folyamatokban? Megannyi, még megválaszo-
latlan kérdés áll a jelen és jövő kutatói előtt [10–12].

Nem véletlen, hogy számos új projektet készít elő a
nagyenergiás fizikusok közössége a CERN koordiná-
ciójával. Trócsányi Zoltán cikkében [13] az Európai Ré-
szecskefizikai Stratégia középpontjában álló tervezett
ütköztetőgyűrű (Future Circular Collider, FCC) nyúj-
totta lehetőségekről ír, elsősorban a Higgs-bozonok fi-
zikája körüli kérdésekre összpontosítva. A továbbiakban
mi pedig az egyik legégetőbb kérdés, a sötét anyag ter-
mészetének felderítésére irányuló erőfeszítéseket járjuk
körül.

A jövő ígérete: a sötét anyag¹

A kozmológia standard Λ -CDM modellje szerint az uni-
verzum csupán 5%-át teszi ki az általunk ismert anyag
(elsősorban hidrogén és hélium), 25% hideg, azaz a fény-
sebességnél jelentősen lassabban haladó sötét anyag (cold
dark matter, CDM), 70% pedig a gyorsuló tágulásért fe-
lelős sötét energia, amit a kozmológiai állandó (Λ) ír le.

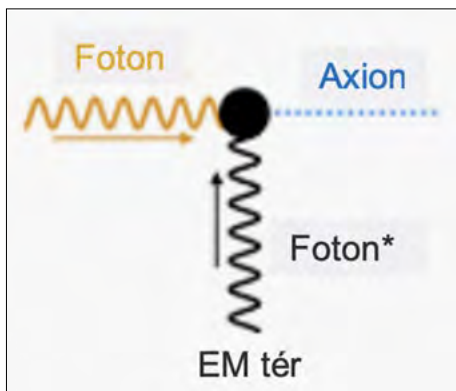
Az univerzum energiájának domináns anyagformája
titokzatos sötétségbe burkolódik, hiszen nem nyel el vagy
bocsát ki elektromágneses sugárzást, és csupán gravitá-
ciós hatásából következtethetünk létezésére; például a
galaxisok forgásának sebességgörbéit vagy a fény elhajlá-
sát tanulmányozva nagy galaxishalmazok körül.

De mi lehet a sötét anyag? Rengeteg lehetséges, a
megfigyelésekkel összhangban lévő modell létezik,
amelyek igen széles tömeg- és kölcsönhatási erősség-
tartományt fednek le: a gyengén kölcsönható nehéz ($m \sim$
TeV/ c^2) részecskéktől (weakly interacting massive par-
ticle, WIMP) a több nagyságrenddel erőtlenebbül köl-
csönható könnyű (akár $m \sim \mu\text{eV}/c^2$) részecskékig (feebly
interacting particle, FIP). Éppen ezért érdemes azt is
megvizsgálni, hogy a jelöltek milyen más nyitott kérdés-
re tudnak választ adni.

FIP-jelöltek

A FIP-jelöltek leghíresebbike, az axion [15] az erős köl-
csönhatás egy rejtélyére kínál megoldást. A kvantum-
mechanikai totalitárius elv szerint: minden kötelező, ami
nem tilos. Hasonlóan a gyenge kölcsönhatáshoz, ahol sé-
rül az ún. CP- (töltéstükrözés $\times$ tértükrözés) szimmetria,
erre a standard modell az erős kölcsönhatás esetén is ad
lehetőséget. A mérések azonban azt mutatják, hogy a ré-
szecskék és antirészecskék ugyanúgy viselkednek az erős
kölcsönhatásban. Felmerül tehát a kérdés, mi akadályoz-
za meg a CP-sértő folyamatok lejátszódását az erős köl-
csönhatás során. Roberto Peccei és Helen Quinn szerint
a válasz: egy új szimmetria. Hasonlóan a Higgs-bozon
eredetéhez az elektrogyengeszimmetria-sértésben, en-
nek az új szimmetriának a sérülése egy új részecskének,
az axionnak a megjelenéséhez vezet, ami szintén skalár-
bozon.

¹ A szerző 2024. május 15-én elhangzott, az MTA 197. közgyűléséhez
kapcsolódó, a CERN 70. születésnapja tiszteletére rendezett tudomá-
nyos rendezvényen elhangzott előadása, a [14] alapján.



3. ábra. Axionkeletkezés fotonból elektromágneses térben

Az axion nagy mennyiségben keletkezhetett a korai univerzumban, és így jelentős komponense lehet a sötét anyagnak. Kimutatható lehet a galaxisok sötétanyag-koronájában, de ma is keletkezhet fotonokból a csillagok (például a Nap) belsejében vagy laboratóriumban, erős elektromágneses térben (3. ábra).

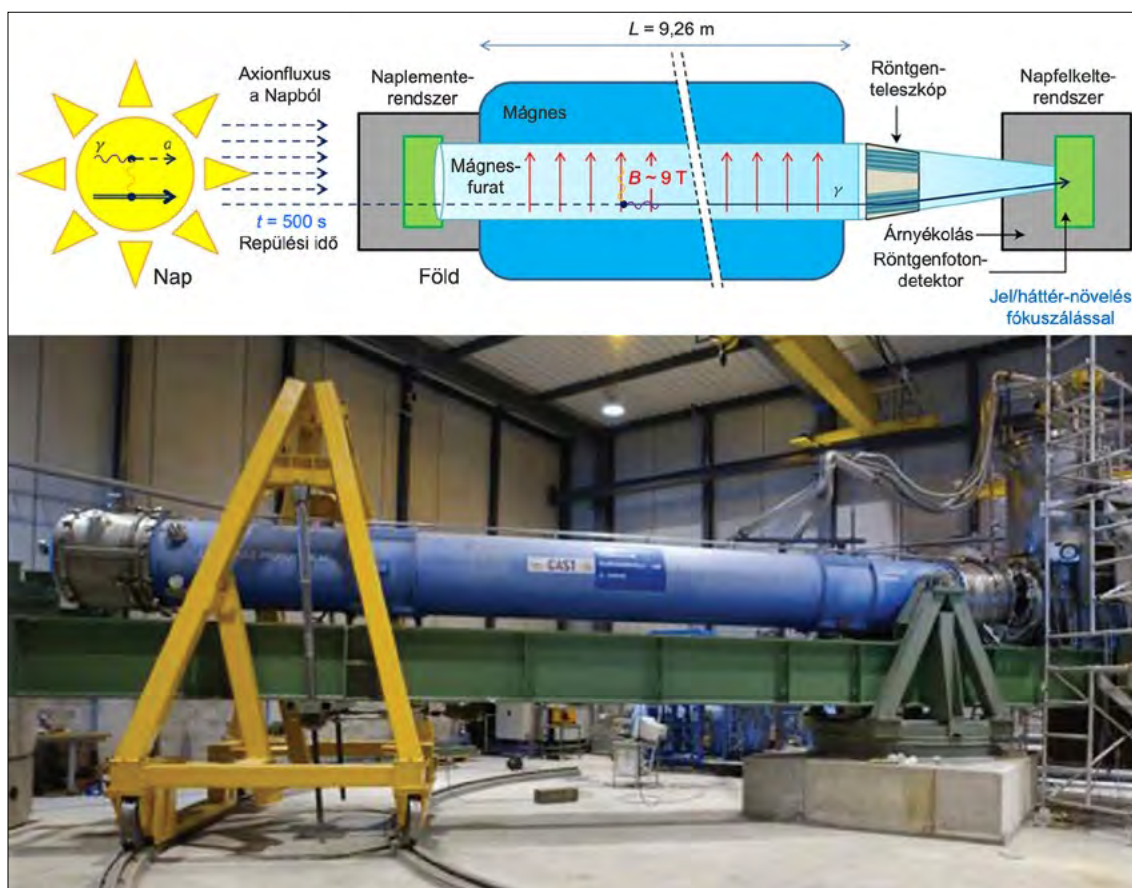
A CERN Axion-Napteleszkópja (CERN Axion Solar Telescope, CAST) a Napban keletkező axionokat kutatja, egy LHC-hez tervezett szupravezető dipólusmágnes nyalábsövét használva távcsőnek, amivel követhető a Nap mozgása napkelte és napnyugtá idején (4. ábra). A mágnesben röntgenfotonokká alakuló axionokat egy fő-

kuszáló tükrrendszer juttatja el a teleszkóp végén lévő detektorba. Az eredmény a várt háttérnek megfelelő, azaz nem észlelték több beütést, amikor a mágnes a Napra néz. Ebből korlátokat adtak meg az axion tömegére és csatolására a fotonhoz (5. ábra).

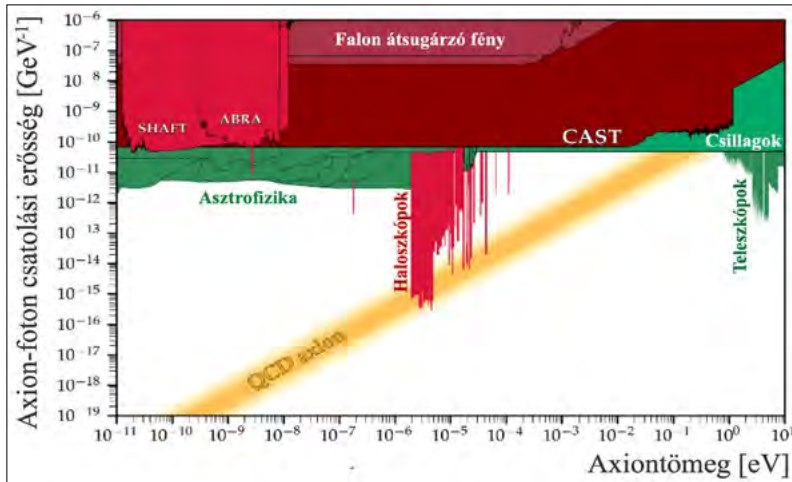
A Budapest–Wuppertal rácstérelméleti együttműködés számításai szerint az axion tömege 28 és $1500 \mu\text{eV}/c^2$ között várható, ahol a kisebb értéknél az axion teszi ki a sötét anyag 100% -át, míg a nagyobb értéknél csupán 1% -át. A következő generációs axionkísérlet, a Nemzetközi Axion Obszervatórium (International Axion Observatory, IAXO) [16] jelentős részét lefedi majd ennek a tartománynak; elődjéhez hasonlóan mind a Nap, mind a Tejút sötétanyag-koronája felől érkező axionokat kutatva.

A WIMP-ek

A lehetséges sötétanyag-spektrum másik végén találjuk a WIMP-eket. A termikus kifagyási (freeze-out) modell szerint a korai univerzumban a részecskék termikus egyensúlyban voltak (6. ábra). A hőmérséklet csökkenésével a nehéz részecskék keletkezési valószínűsége mérséklődött, és a tágulás okozta sűrűségcsökkenés következtében a részecske-ütközések száma is ritkult; így a sötétanyag-megsemmisülés gyakorisága visszaesett.



4. ábra. Fent: egy helioszkóp elvi vázlata: a Napból érkező axionok a fénytől elzárt erős mágneses térben fotonokká alakulnak, amelyeket egy detektorral érzékelünk. Alul: a CAST (CERN Axion Solar Telescope) fényképe



5. ábra. Korlátok az axion tömegére és csatolási erősségére a fotonhoz különböző kísérletekből. Az erős kölcsönhatás CP-problémáját megoldó paramétertartomány sárgával van jelölve

Ezzel „kémiaailag szétcsatolódtak” a többi részecskétől, és sűrűségük változását az univerzum tágulási sebessége határozza meg. A modell visszaadja a szükséges sötétanyag-sűrűséget $m \approx 0,1\text{--}1 \text{ TeV}/c^2$ tömegű részecskékre, ha azok kölcsönhatási erőssége megfelel a gyenge kölcsönhatásénak. Ez az eredmény, párosítva azzal, hogy ilyen részecske számos jól motivált standardmodell-kiterjesztésben megjelenik, illetve kísérletileg több módon is tanulmányozható, a „WIMP-csoda” néven ismert.



6. ábra. A sötét anyag kölcsönhatása a standard modell részecskéivel a korai univerzumban és a különböző észlelési módszerek esetén

A standard modell egyik legnépszerűbb kiterjesztése egy új „szuperszimmetriát” (SUSY) feltételez nagy energián a feles spinű fermionok és az egész spinű bozonok között. Ekkor minden ismert részecskének lesz egy (eddig nem észlelt) partnere azonos kvantumszámokkal, kölcsönhatásokkal de $\hbar/2$ -vel eltérő spinnel és (a szimmetria sérülése miatt alacsony energián) különböző tömeggel. A SUSY modellek számos nyitott kérdésre kínálnak választ, amelyek bemutatása külön cikket igényelne. Minimális feltételek megkövetelése esetén, a legkönnyebb SUSY-részecske remek WIMP sötétanyagjelölt: mind elektromosan, mind az erős kölcsönhatás szempontjából semleges, stabil, és tömege a $\sim\text{TeV}$ tartományba esik. Az eddigi kísérletek eredményei (köztük a LEP és az LHC mérései) természetesen megszorításokat adnak a SUSY modellek lehetséges paramétereire, azonban azoknak még így is széles tartománya nyitva áll.

A sötét anyag keresése

De hogyan is kutathatjuk a sötét anyag létezését? Három egymást kiegészítő módszert alkalmazunk (6. ábra).

- Közvetlen észlelés: a körülöttünk száguldozó sötétanyag-részecskék szóródhatnak egy detektor anyagában, megölve annak atomjait, amit észlelhetünk.
- Közvetett észlelés: a világűrben ritkán, de találkozhatnak sötétanyag-részecskék, és megsemmisülhetnek energiájukat részecskepárok formájában kisugározva. Nagy energiájú fotonok, neutrínók, antirészecskék észlelésének gyakoriságát vizsgálva a Földön vagy a világűrben, kimutatható lehet ezen folyamat hozzájárulása. A CERN-ben

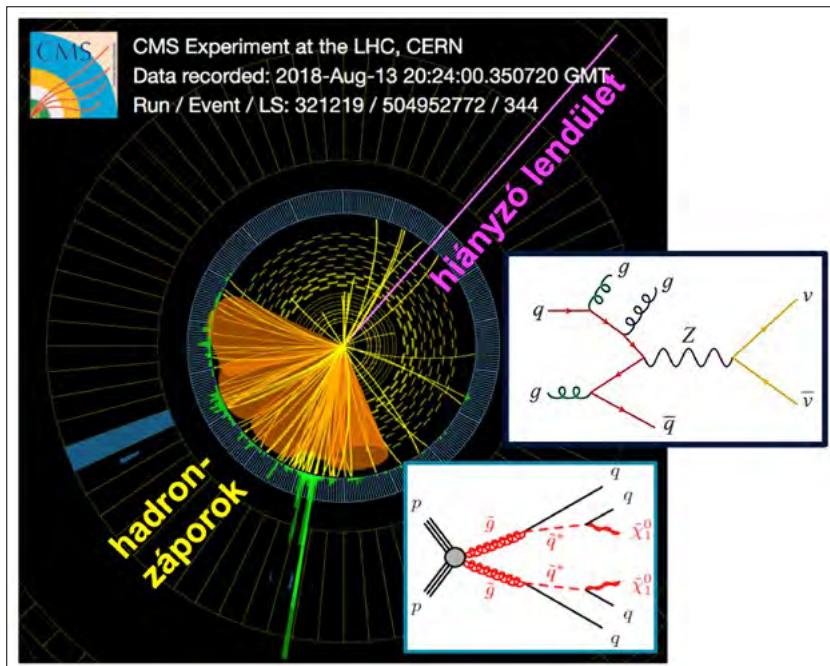
található a Nemzetközi Űrállomáson működő AMS2 (Alpha Magnetic Spectrometer) asztro-részecskefizikai kísérlet (6. ábra a [17] cikkben) irányítóterme. A kísérlet pozitronok és antiprotonok spektrumát vizsgálva kutatja a sötét anyag természetét.

- Részecskeütköztetők mint sötétanyaggyárak: kereshetjük sötétanyag-részecskék megjelenését a CERN (HL-)LHC-ben [9], FCC-ben vagy más jövőbeli berendezések nagy energiájú ütközéseiben, ahol a felszabaduló kinetikus energiából új nehéz részecskék keletkezhetnek.

Ez utóbbi esetben a fő kísérleti kihívást az jelenti, hogy a sötét anyag gyakorlatilag nem hat a detektor anyagra, tehát azt közvetlenül nem tudjuk észlelni, csupán a vele együttesen keletkező részecskéket. Ehhez a lendületmegmaradást hívjuk segítségül. Kiszámolva az eseményben megjelenő részecskék lendületének vektoriális összegét, meghatározhatjuk a fellépő egyensúlyhiányt, amit a távozó nem kölcsönható sötétanyagjelöltnek tulajdoníthatunk (7. ábra). Természetesen a standard modell által leírt folyamatok is hagyhatnak hasonló nyomot a detektorban. Gondoljunk a neutrínóra, amely a sötét anyaghoz hasonlóan alig van hatással az ismert anyagra. A feladatunk az, hogy meghatározva a standard modellből várt események számát, megállapítsuk, hogy a kísérleti adatok mutatnak-e eseménytöbbletet.

Az LHC kutatásai (a Higgs-bozon felfedezése óta) nem mutattak ki még új egzotikus részecskéket. Azonban eddig csupán a tervezett adathalmaz nagyjából 10%-át gyűjtöttük össze. A gyorsító és a detektorrendszerek megújítása után, 2030-tól indul a HL-LHC szakasz, amely új lehetőséget ad a ritka folyamatok felfedezésére.

Természetesen az is előfordulhat, hogy a részecskék túl nehezek ahhoz, hogy kimutassuk őket az LHC-n, és az FCC-re vagy más jövőbeli gyorsítóra vár ez az izgalmas feladat. Sőt, az is lehet, hogy a részecskék túl erőtellenül hatnak az anyagra, és ezért kerülték el eddig kíváncsi szemeinket. Ez utóbbi esetben izgalmas új esemény-



7. ábra. Egy jellegzetes esemény a CMS egyik méréséből, amely szuperszimmetrikus sötét anyag keletkezését kutatta. A kép jobb alsó sarkában a keresett folyamat Feynman-gráfja látható: egy proton-proton ütközésben az erős kölcsönhatás közvetítő részecskéjének, a gluonnak a szuperszimmetrikus sötétanyagjelöltre bomolhatnak. Az utóbbi nagy lendülettel, de nyom nélkül távozna a detektorból. Jobb közepén pedig egy standard modellben lehetséges folyamat látható, ami ugyanolyan észlelt eseményre vezethet. Ekkor gluonok és egy kvark mellett egy Z-bozon keletkezik, amely neutrínópárra bomlik. Mindkét folyamat során a kvarkok és gluonok részecskeszáporokat keltve jelentős impulzust hagyhatnak a detektor egyik oldalán

topológiák jelenhetnek meg, például hosszú élettartamú közvetítő részecskék, amelyek csupán a detektortól távol bomlanak el.

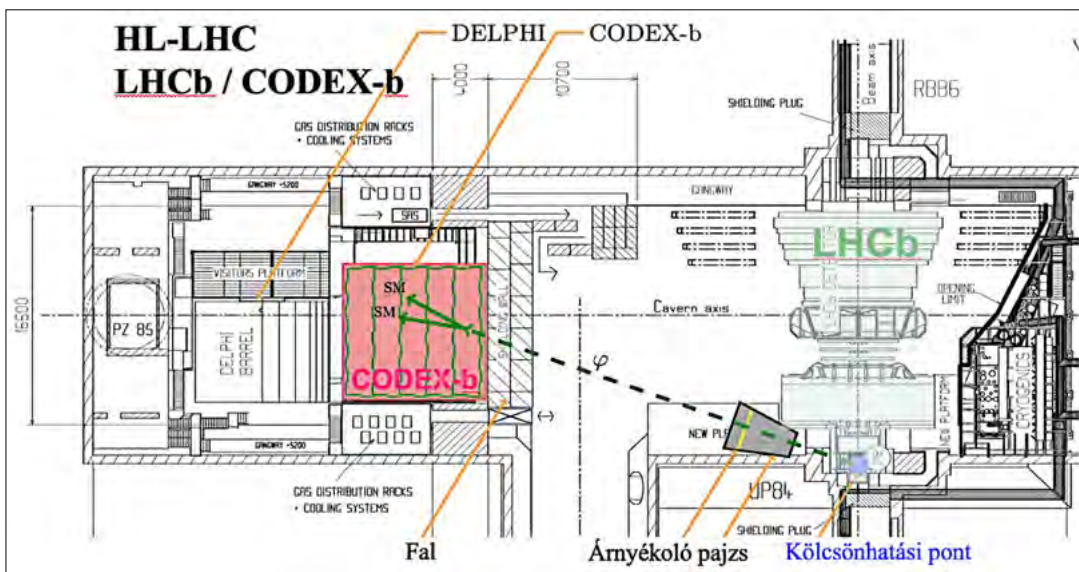
Az LHC b-hadron-bomlások [18] tanulmányozására épített LHCb kísérlete mellé ezért tervez az ELTE kutatóit is magába foglaló CODEX-b (COmpact Detector for

EXotics at LHCb, magyarul: Kompakt Detektor Egzotikus Részecskéknek az LHCb-nél) együttműködés egy transzverzális aldetektort [19], amellyel gyengén kölcsönható, nagyjából 20 m repülés után elbomló részecskék felkutatását célozzák meg (8. ábra).

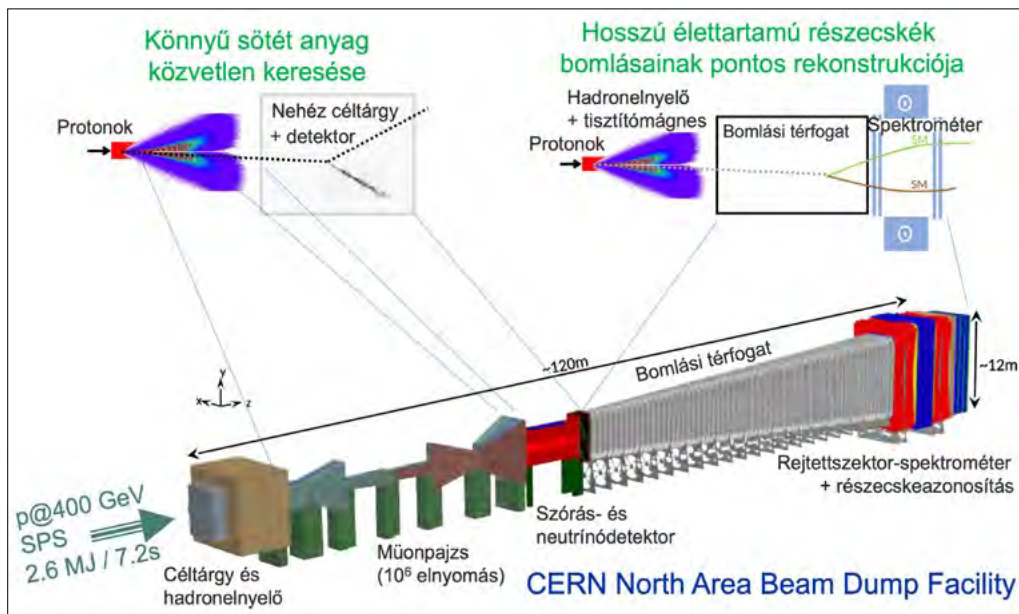
A rejtett szektor felkutatására érdekes nyálábtemető kísérletet hagyott jóvá a CERN tanácsa, hogy kiegészítse az LHC nagy energiás és precíziós ízfizikai méréseit. A SHiP (Search for Hidden Particles, magyarul: Rejtett Részecskék Kutatása) kísérlet 2031-től 15 év alatt $6 \cdot 10^{20}$ 400 GeV energiájú protont fog fogadni az SPS gyorsítótól. Célja, hogy hadronok bomlásaiban és fotonok kölcsönhatásaiban keletkező egzotikus, szupergyengén kölcsönható részecskék megjelenését keresse. A könnyű sötétanyag-részecskék közvetlen kimutatását atomi elektronok vagy atommagok visszaszórásának észlelésével tervezik. A hosszú élettartamú részecskék bomlásainak pontos rekonstrukciójával pedig lehetővé válik azok élettartamának és tömegének meghatározása a MeV/c^2 – $10 \text{ GeV}/c^2$ tartományban.

Kitekintés

Az CERN története azt tanítja számunkra, hogy a szoros, erőteljes együttműködés az elméleti kutatók, a kísérleti fizikusok és a berendezésépítők között elengedhetetlen



8. ábra. A CODEX-b kísérlet, az LHCb tervezett transzverzális aldetektora a rejtett szektor hosszú élettartamú részecskéinek felkutatására. A 8×3 réteg gáztöltésű nyomkövető detektorból álló erősen árnyékolt berendezés nagyon alacsony háttér mellett keresi majd egzotikus részecskék bomlásait



9. ábra. A SHiP nyalábtető kísérlet a CERN SPS mellett könnyű sötétanyag-részecskék és szupergyengén kölcsönható rejtettsektorbéli részecskék után kutat majd

a részecskefizika fejlődéséhez. A CERN számos korszakkalkító felfedezéssel vitte előre a tudományt, amelyek közül a három elektrogyenge nehéz bozon felfedezését emeltem ki. Széles programja az olyan óriás gyorsítók mellett, mint a (HL-) LHC vagy az FCC, számos ezeket kiegészítő kisebb projektet is tartalmaz. A sötét anyag témakörére fókuszálva ezek közül az axion- és nyalábtető kísérleteket tárgyaltuk, amelyek az új fizikát jósoló modellek más-más csoportját célozzák meg.

Természetesen mindig felmerül a kérdés, hogy mi lesz a következő nagy áttörés. Vajon a sorozat ismét egy új bozonnal folytatódik? A sötét anyag részecskéjével, netán a rejtett szektorban megbúvó közvetítővel, vagy éppen a superpartnerek egyikével? A lehetőségek skálája már-már zavarba ejtő, és csupán a kísérleti adatok mutathatják meg számunkra az utat a természet alapvető törvényeinek, az univerzum múltjának és jövőjének mélyebb megértése felé.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki Péli Zoltánnak, akinek a Magyar Tudományos Akadémián 2024. május 15-én elhangzott előadásából [21] is szemezgetett a cikk első részének megírásához, valamint az NKFIH TKP2021-NKTA-64 és K_22 143460 kutatási támogatásáért.

Irodalom

1. Pei Wenna: A neutrínók fizikája. Fizikai Szemle, 2024/11, 375. (ebben a számban)
2. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. Fizikai Szemle, 2008/7–8, 246.
3. Igó-Kemenes Péter: Emlékezés. Fizikai Szemle, 2012/10, 328.
4. Pásztor Gabriella: Higgs-vadászat @ CERN. Fizikai Szemle, 2012/10, 358.
5. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmei – 1. rész: a Higgs-bozon keresése. Fizikai Szemle, 2021/2, 37.
6. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmei – 2. rész: a Higgs-bozon megfigyelése. Fizikai Szemle, 2021/3, 84.
7. Veszprémi Viktor: A Higgs-bozon kutatása: befejezett vagy csak most kezdődik? Fizikai Szemle, 2020/4, 118.
8. Péli Zoltán, Trócsányi Zoltán: Metastabil világegyetem. Fizikai Szemle, 2023/02, 40.
9. Pásztor G.: Rejtett dimenziók nyomában az ATLAS detektorral, Természet Világa, 144 (2013) I. különszám, „Mikrovilág-2012” 53–58.
10. Pásztor Gabriella: Az Univerzum titkai és a Nagy Hadronütköztető: nyitott kérdések a részecskefizikában. Fizikai Szemle, 2023/2, 43.
11. Trócsányi Zoltán: A részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után. Fizikai Szemle, 2022/9, 269.
12. Trócsányi Zoltán: Hol tart a részecskefizika? Fizikai Szemle, 2019/7–8, 233.
13. Trócsányi Zoltán: Részecskefizikai kutatási lehetőségek a CERN tervezett gyorsítógyűjűjén. Fizikai Szemle, 2024/11, 388. (ebben a számban)
14. Pásztor Gabriella: A sötét anyag keresése, előadás elhangzott az MTA 197. közgyűlési programsorozatának 2024. május 15-i „FCC és 70 éves a CERN” című rendezvényén. <https://indico.cern.ch/event/1417749/>
15. Patkós András: Axion-elektrodinamika. Fizikai Szemle, 2022/12, 386.
16. IAXO Collaboration: Armengaud E., et al.: Physics potential of the International Axion Observatory (IAOXO). JCAP 06 (2019) 047.
17. Horváth Dezső: Mi az antianyag és hova tűnt? Fizikai Szemle, 2024/11, 369. (ebben a számban)
18. Pásztor Gabriella: Jelek a standard modellen túlról? Leptonuniverzalitás-anomáliák és leptokvarkkeresés a Nagy Hadronütköztetőn. Fizikai Szemle, 2023/2, 48.
19. CODEX-b Collaboration: Aielli G., et al.: The Road Ahead for CODEX-b. arXiv:2203.07316
20. Alekhin S., et al.: A facility to Search for Hidden Particles at the CERN SPS: the SHiP physics case. Rept. Prog. Phys. 79 (2016) 12, 124201, arXiv:1504.04855.
21. Péli Zoltán: Elektrogyenge fizika. Az előadás elhangzott az MTA 197. közgyűlési programsorozatának 2024. május 15-i „FCC és 70 éves a CERN” című rendezvényén. <https://indico.cern.ch/event/1417749/>

RÉSZECSEFIZIKAI KUTATÁSI LEHETŐSÉGEK A CERN TERVEZETT GYORSÍTÓGYŰRŰJÉN

Trócsányi Zoltán

ELTE Elméleti Fizikai Tanszék, Budapest

E-mail: zoltan.trocsanyi@cern.ch

Az Európai Részecskefizikai Kutatóközpont 2024-ben ünnepli 70. születésnapját. A hazai megemlékezések egyik jelentős eseménye a jövőbe tekintett. Az MTA 197. közgyűléséhez kapcsolódó tudományos rendezvények között május 15-én a Jövő Ütköztetőgyűrűje (Future Circular Collider, FCC) terveiről hallottunk nagyszerű előadást a projekt egyik főszereplőjétől, Michael Benedikttől, amelyet magyar kutatók előadásai követtek az FCC-hez kapcsolódó hazai kutatások különböző vonatkozásairól.

A bevezető előadásom a részecskefizikai kutatási lehetőségeket foglalta össze. Az előadásra készülve a bennem elsőként megfogalmazott üzenet az volt, hogy a nagyszabású berendezés sikeres megépítése a részecskefizikai kutatásokhoz szinte felmérhetetlenül széles körű adatgyűjtési lehetőséget fog biztosítani, amelyről több száz oldalas előtanulmányok jelentek meg szakfolyóiratokban [1]. Ebben az írásban az angol nyelvű előadásom [2] összefoglalóját magyarul közlöm. Az erősen behatárolt terjedelem csupán ízelítőt enged felvillantani a számos izgalmas kutatási lehetőségéből.

Az emberiség történelmében a legtöbb adat- és ismeretgyűjtési lehetőséget biztosító, részecskéket ütköztető nagyberendezés a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC), amely majdnem fénysebességre gyorsított protoncsomagokat lő egymásba. Genf mellett, a földfelszín alatt mintegy 100 méter mélyen fúrt, 27 km kerületű alagútban helyezték el a korábban ugyanott működő Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető (Large Electron Positron Collider, LEP) helyére. Részecskefizikus-körökben az elektronok ütközését „precíziós fizika”, a protonok ütközését „felfedező fizika” néven szokás emlegetni.

Noha a széles közönséget általában az új felfedezések hozzák tűzbe, a kutatók jól tudják, hogy a felfedező fizika az alapos precíziós fizikára épül. A pontos mérések és számítások összevetéséből kapunk iránymutatást arra, hogy „hová érdemes nézni, amikor a tűt keressük a szénakazalban”. Például az új fizika kvantumkorrekcióit a standard folyamatok valószínűségeinek számításában is

figyelembe kell venni, majd ezek is befolyásolják a mért csatolások értékeit.

Az elektronok elemi részecskék, ezért ütközéseikben a kezdeti állapotot pontosan ismerjük, így a végállapot tanulmányozásával pontos mérések végezhetők. A protonok összetett, további alkotórészekből („elemi” kvarkokból és az ezeket összetartó „elemi” gluonokból) álló dinamikus rendszerek, ezért nem ismerjük pontosan az ütközés során a kölcsönható elemi részecskék lendületét. Mivel azonban a protonokat lényegesen nagyobb energiára lehet gyorsítani, ezekben a folyamatokban nagyobb energiasűrűséget lehet elérni az ütközés helyén – ez a lehetőségek szélesebb körét adja az új részecskék előállítására.

A LEP-LHC tandem messzemenőleg beteljesítette az elvárásokat: a LEP-en az addig ismert fizikai paramétereket (például a gyenge kölcsönhatást közvetítő Z-bozonok tömegét vagy a könnyű neutrínók számát) pontosan sikerült megmérni, az LHC-n pedig számos új felfedezés született, amelyek közül kiemelkedik a Higgs-részecske létezésének kimutatása.

Bár az LHC még legalább másfél évtizedig működik, a részecskefizika jövőjét tervező kutatók már régóta foglalkoznak a távolabbi jövő részecskefizikájával, a következő nagy gyorsító építésével. Több lehetőség is felmerül, amelyek közül a CERN és az európai kutatók közössége egyre inkább az FCC-t részesíti előnyben – a LEP és az LHC működése során szerzett jó tapasztalatokra alapozva. Az FCC-t is a LEP-LHC tandemhez hasonló módon tervezik megvalósítani: előbb működne az FCC-ee, amely elektron-pozitron ütközéseket tanulmányozna, majd a helyére tennék az FCC-hh protonokat ütköztető gyorsítót. Köztes lehetőségként felmerült az FCC-eh is, amely elektron-proton ütközéseket vizsgálna, és a világ legnagyobb elektronmikroszkópja lenne a proton szerkezetének tanulmányozására.

A gyorsítók paramétereinek tervezéséhez részletesen tanulmányozni kell, hogy az eddigi elméleti ismereteink alapján milyen mérési és felfedezési potenciál várható ezektől a berendezésektől. A továbbiakban elsősorban az FCC-ee gyorsítónál várható mérési pontosságokból és felfedezési lehetőségekből adok ízelítőt az [1] közlemény alapján.

Új fizikai elméletet és kísérleti terveket mindig a már megszerzett tapasztalatokra építünk. A részecskefizika jelenleg ismert elmélete a standard modell, amely mély szimmetrielvekre (mértékszimetriára), valamint az elektromágneses és gyenge erőket egyesítő elektrogyenge mértékszimetria különös sérülésére alapoz [3]. Az eddig működő gyorsítók – köztük elsősorban az LHC –



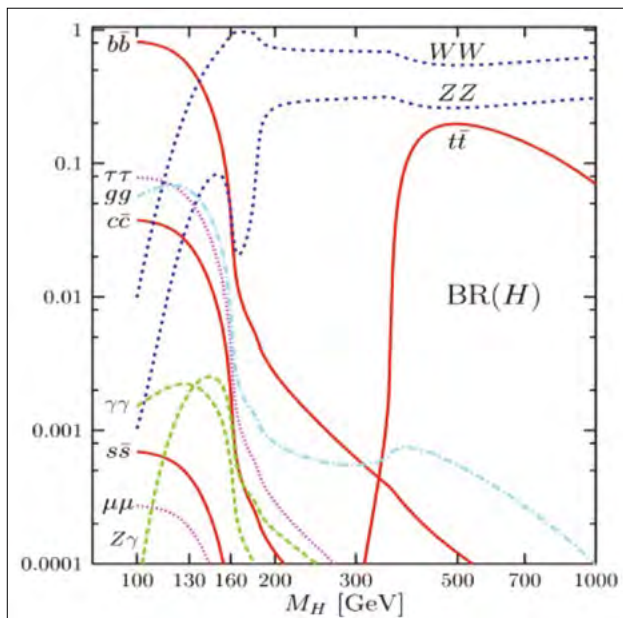
Trócsányi Zoltán fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE Elméleti Fizika Tanszék egyetemi tanára, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. Demény Andrásval társszerzője a „Fizika I.” egyetemi tankönyv Mechanika részének, Horváth Dezsővel pedig a „Bevezetés az elemi részek fizikájába”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

eredményeit röviden a következő pontokban foglalhatjuk össze:

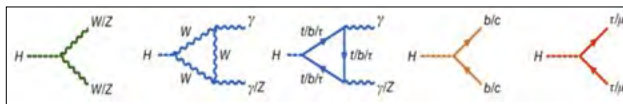
- felfedeztük az elméleti várakozásnak pontosan megfelelő Higgs-részecskét, és elkezdődött a feltételezett elektrogyenge szimmetriasérülés kísérleti tanulmányozása;
- megdöbbentően jó az egyezés a standard modellen alapuló elméleti számítások és a mérési eredmények között;
- az LHC-n bekövetkező ütközések között az új részecskék felfedezésére utaló jelek a legjobb esetben is tűnékenyek tekinthetők;
- a gyorsító- és részecskeészlelő berendezések működése, a mérésekben elért pontosság a tervezési várakozásoknál mindig jobb;
- az elméleti számítások pontosságának folyamatos javulása határozott biztatást ad a kísérletek érzékenységeinek javításához.

Mindezek alapján az FCC-re elsősorban *precíziós berendezésként* tekint a közösség, legyen az akár az FCC-ee, akár az FCC-hh – az utóbbi esetében a jelentős felfedezési potenciált is elismerve.

Tekintsük a Higgs-mező és a többi ismert fizikai mező egymásra hatásának erősségét, a többnyire g -vel jelölt csatolásokat annak bemutatásához, hogy milyen javulás várható a különböző FCC-gyorsítókon! Elsősorban ezeknek a csatolásoknak a nagysága határozza meg azt,



1. ábra. A Higgs-részecske bomlásának elágazási arányai a különböző lehetséges végállapotokba a standard modellben a Higgs-tömeg függvényében. A Higgs-bozon mért tömege 125 GeV

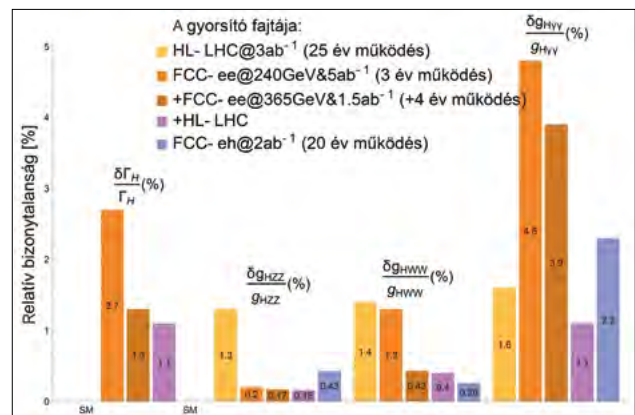


2. ábra. Különböző lehetséges részecskekölsönhatások, amelyek erősségét a megfelelő g csatolások szabályozzák, például az első gráfon g_{HWW} , illetve g_{HZZ} s.t.t.

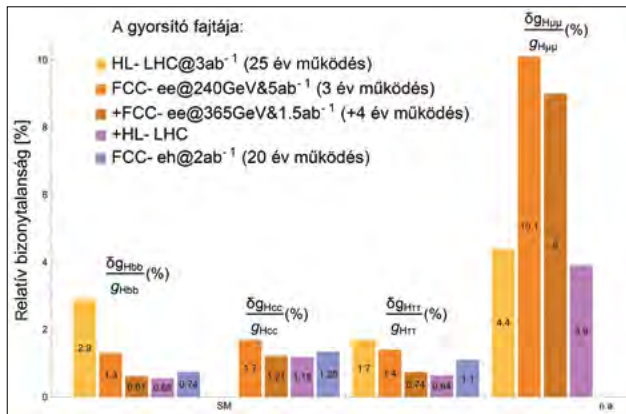
hogy a Higgs-részecske milyen valószínűséggel bomlik a különböző részecskepárookra. Az ilyen bomlási valószínűségekre vonatkozó, a standard modellben számított pontos becsléseket látjuk az 1. ábrán a Higgs-részecske tömegének függvényében. Az LHC-n megmért Higgs-tömeg nagyjából 125 GeV/ c^2 . Látjuk, hogy a megfigyelt Higgs-tömeg éppen akkora, hogy a legtöbbféle bomlási lehetőséget vizsgálhatjuk: i) fermionpárba, ami jelenthet kvarkpárt ($b\bar{b}$, $c\bar{c}$), taupárt ($\tau\bar{\tau}$), müonpárt ($\mu\bar{\mu}$), illetve ii) bozonpárba, ami lehet tömeges mértékbozonpár (WW , ZZ). Sőt, bár a Higgs-bozon közvetlenül nem kapcsolódik nulla tömegű részecskékhez, kvantumfolyamatok révén még gluonpár (gg) és fotonpár ($\gamma\gamma$) is keletkezhet a végállapotban.

Az elméleti becslések és a mért kísérleti értékek összehasonlításából lehet következtetni a csatolásokra, amelyek a 2. ábrán mutatott részecskekölsönhatások erősségét szabályozzák. A 3. és 4. ábra mutatja azt, hogy a tervezett FCC projektben milyen relatív százalékos bizonytalansággal lehet megmérni a csatolásokat a különböző berendezéseken, összehasonlítva azzal is, hogy a HL-LHC (az LHC továbbfejlesztett, nagy luminozitású üzemmódja, amely a 2030-as években fog adatot gyűjteni) milyen eredmények elérésére lesz képes. A 3. ábra a teljes Higgs-részecske bomlási szélességet (az élettartamának reciprokát), valamint a Higgs-vektorbozon csatolásokat tünteti fel, a 4. ábra pedig a Higgs-fermion csatolásokat. Az FCC különböző szakaszaiban tervezett adatgyűjtés révén elérhető javulás látványos – legalább is a szakmabeliek számára mindenképpen. A legpontosabb eredményeket akkor érjük el, ha az FCC-hh adatait is figyelembe tudjuk majd venni (5. ábra). Vegyük észre, hogy az 5. ábrán a függőleges tengely logaritmikus. Látjuk, hogy a csatolások bizonytalansága 1% alá szorítható, kivéve a Higgs-önkölsönhatás erősségét szabályzó g_{HHH} esetét.

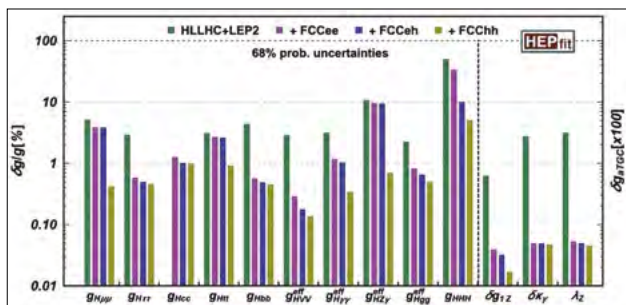
Természetesen nem csupán a csatolások lesznek mérhetők. Az [1] cikk 3. táblázata jónéhány egyéb paraméter



3. ábra. A Higgs-részecske teljes bomlási szélessége (Γ_H), valamint a Higgs-vektorbozon csatolások (g_{HVV} , $V = Z, W, \gamma$) mérésének várható relatív bizonytalansága a különböző jelenlegi és tervezett gyorsítók adatainak feldolgozásával. Ha a mérés nem kivitelezhető érdemlegesen az adott gyorsítón, akkor az „SM” jelzést alkalmaztuk, ami a standard modell elméleti becslésre utal, kísérleti bizonytalanság nélkül



4. ábra. A Higgs-fermion csatolások (h_{Hff} , $f = b, c, \tau, \mu$) mérésének várható relatív bizonytalansága a különböző jelenlegi és tervezett gyorsítók adatainak feldolgozásával



5. ábra. Egyes paramétermérések relatív bizonytalanságának várható csökkenése a különböző gyorsítófajtákon gyűjtendő adatok „összegzésével”. A szaggatott vonaltól balra a Higgs-részecske csatolásai, jobbra egy egyszerű kiterjesztett elmélet paramétereinek szerepelnek

és mérhető mennyiség mérési pontosságának várható javulását mutatja. A tanulság az, hogy az FCC-ee gyorsítóval a jelenlegihez képest

- a paraméterek mérési bizonytalanságát legalább tízszer kisebbre lehet majd csökkenteni,
- mintegy 20–50-szer pontosabban lehet majd megmérni az elektromgyenge precíziós mennyiségeket.

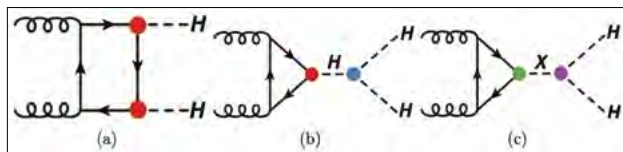
Hogy mire jó mindez? Először is kiderülhet, hogy a standard modell mégsem írja le a mérési eredményeket a kisebb kísérleti bizonytalanságok pontosságának fényében, és ez megszorítaná a modell bővítésének lehetséges változatait. (A standard modell bővítésének szükségességével a [4] cikk foglalkozik a *Fizikai Szemle* hasábjain.) Kiderülhet az is, hogy a jelenleg a tömegüktől eltekintve azonos tulajdonságokkal felruházott könnyű fermionok (elektron, müon, tau) mégsem azonos erősséggel lépnek kölcsönhatásra (szaknyelven: sérül a leptonuniverzalitás) [4].

Az utóbbi negyedszázad kutatásainak érdekes fejleménye, hogy a legkisebb és legnagyobb méretek fizikája, tehát az elemirész-fizika és a kozmológia nem függetlenek egymástól. Éppen ellenkezőleg, az ősrobbanást követő néhány percben a Világegyetemet kitöltő anyag sűrű és forró volt. Az ilyen plazmaállapot mennyiségi jellemzéséhez pedig a részecskék kölcsönhatásainak ismerete nélkülözhetetlen; és azt a részecskefizikából szereztük.

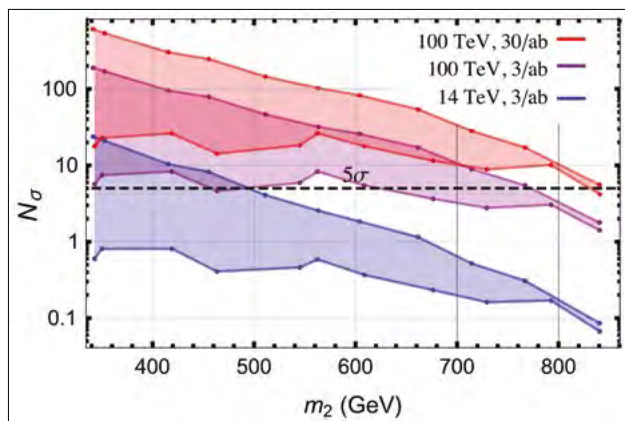
A kozmológiában van néhány, egyelőre megmagyarázatlan megfigyelés, amelyekre szintén az FCC mérései segíthetnek választ találni. Az egyik ilyen az anyag-anti-anyag aszimmetria a Világegyetemben [5]. Az ősrobbanást követően miért volt icipicit több anyag, mint anti-anyag, annak ellenére, hogy a laboratóriumi mérések szerint egy adott részecske és antirészecskéje tömege nagyon pontosan egyenlő [6]? Az uralkodó elmélet szerint ehhez két feltétel teljesülése mindenképpen szükséges: i) az egyidejű töltés- és tértükrözési (CP) szimmetria elegendően nagy sérülése, ii) kellően erős elsőrendű fázisátmenet az anyag mértékszimetrikus és szimmetriasértett fázisai (tehát elegendően nagy „olvadáshő a kétféle halmazállapot”) között. A standard modellben ugyan van CP-szimmetriasérülés is, illetve fázisátalakulás is a szimetrikus és sértett szimmetriájú fázisok között, azonban egyik sem elegendően erős az észlelt barion-aszimmetria értelmezéséhez. A standard modellen túli új fizika modelljeiben azonban egyik is, másik is elegendő mértékben lehetséges.

A kellően erős CP-sértés kimerítő feltárásához nem lesz elegendő az FCC adathalmaz, de a szimmetriasértő fázisátalakulás vizsgálatához meghatározott modellekben igen. Erre akkor lesz lehetőség, ha az új fizika energiaskálája (részecskéinek tömege) nem haladja meg az 1 TeV/ c^2 nagyságrendet, és az új részecskék(k)re elég erősen hat a Higgs-bozon, hogy kellően módosítsa a skalármező potenciális energiáját az ősrobbanást követő pillanatban.

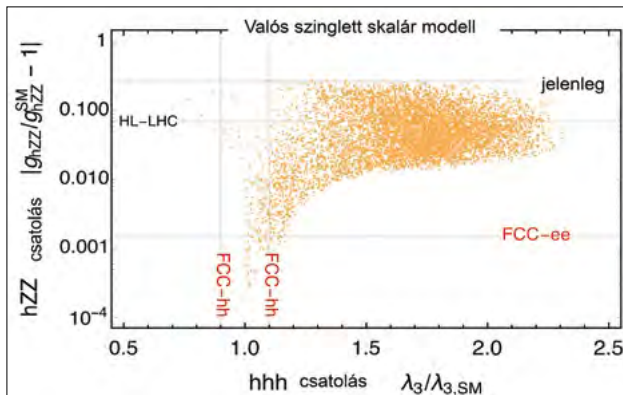
A standard modell ilyen bővítésének talán legegyszerűbb módja a kiterjesztés egyetlen skalárbozonnal (nulla spinű részecskével), amit valós skalárszinglet mo-



6. ábra. Higgs-bozonpár keletkezésének lehetséges módjai a gluon-gluon fúzióban (a gluon az ütköző proton alkotórésze). A harmadik lehetőség a standard modell valósskalár-kiterjesztésében lehetséges



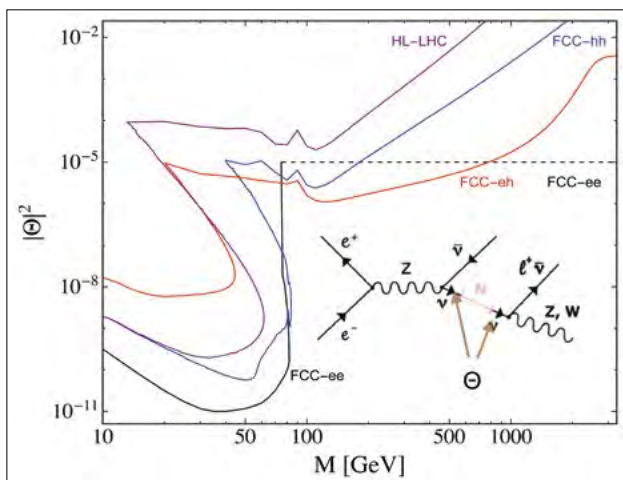
7. ábra. Egy új skalár részecskével (S) bővített standard modellben az $S \rightarrow HH$ két Higgs-részecskét adó folyamat felfedezésének várható szignifikanciája az új részecske tömegének függvényében a HL-LHC-n és az FCC-hh gyorsítón különböző adatmennyiségek feldolgozása után. A színes területek jelölik a megengedett paramétertartományt



8. ábra. A Higgs-önkölsönhatás erősségét mérő csatolás (λ_3) és a Higgs- Z^0 bozon csatolás (g_{hZZ}) értékei a standard modellbeli értékekhez képest a standard modell erős elsőrendű fázisátalakulást adó skalárkiterjesztésében. A különböző gyorsítók adatainak feldolgozásával a mérés érzékenységi határának változása is látható. A jobb oldali FCC-hh függőlegesen vonal 3 ab^{-1} , a bal oldali pedig 30 ab^{-1} integrált luminozitáshoz tartozik

dellnek hívnak. Ebben a modellben a Higgs-részecske (H) mellett létezik egy másik hasonló skalárrészecske (S), amely csak a Higgs-bozonra hat a standard modell részecskéi közül. A modell felfedezése (vagy kizárása) akkor lehetséges, ha a szimmetriasértő fázisátalakulás kellően erős, és az új skalár-Higgs kölcsönhatás lehetővé teszi, hogy a skalárbozon elegendő számban keletkezzen az FCC ütközéseiben például a $pp \rightarrow S \rightarrow HH$ folyamatban (6. ábra).

A 7. ábrán a színes sávok jelzik azt a paraméterterületet, ahol kellően erős elsőrendű fázisátalakulás történhet, továbbá ahol az új skalár közvetlen felfedezése lehetséges két Higgs-részecskére bomlásán keresztül a HL-LHC-n (kék sáv), illetve az FCC-hh gyorsítón két integrált luminozitásérték mellett (lila és rózsaszín sávok). A vízszintes tengelyen az új skalár tömege, a függőlegesen a felfedezés szignifikanciája van feltüntetve. Látnuk, hogy az 5σ szignifikanciájú felfedezési határt (ahol a véletlen fluktuációból származó pozitív eredmény esélye



9. ábra. Nehéz jobbkezes neutrínók keresésének kilátásai a különböző FCC gyorsítóknál a neutrínótömeg és a bal-, illetve jobbkezes neutrínók Θ keveredési szöge által kifeszített síkon. A vonalak feletti paraméterterületek lesznek elérhetők a különböző kísérletekben. A bevágott folyamatokra a részecske-alkotás folyamatot szemlélteti

már kevesebb, mint egy a millióból) a legfelső sáv meghaladja minden olyan tömegérték mellett, ahol a fázisátalakulás kellően erős.

A 8. ábrán a valós skalárszinglettel bővített standard modellben a Higgs-önkölsönhatás erősségét mérő λ_3 csatolásnak, illetve a Higgs- és a Z-bozonok g_{hZZ} csatolásának a standard modellbeli értékeihez viszonyított változása közötti korrelációt látjuk: a Higgs-önkölsönhatás erőssége nő, a hZZ csatolás csökken. Az erős elsőrendű fázisátalakulás a narancssárga színű pontok esetén lehetséges, amelyek mind az FCC érzékenységi tartományába esnek, a HL-LHC viszont csupán egy részüket éri el. Így az FCC-hh-n a HH állapot közvetlen felfedezése és az FCC-ee-n a Higgs-részecske paramétereinek mérése együtt elegendő adatot szolgáltat a modell szerepéről az elektrogyenge fázisátalakulásban.

Természetesen az FCC-n további új részecskék felfedezése is lehetséges. Előfordulhat, hogy sikerül kimutatni egy 5. erőt közvetítő mezőnek az elemi részecskéjét (például Z' -bozon) vagy a sötétanyag-részecskét vagy egészen gyengén kölcsönható részecskéket az $5-100 \text{ GeV}/c^2$ tömegtartományban, mint például egy lehetséges jobbkezes neutrínót, amely a neutrínók igen alacsony tömegének magyarázatát adhatja meg a standard modell kiterjesztésében. A 9. ábrán láthatjuk a különféle FCC gyorsítóknál elérhető paraméterteret a jobbkezes neutrínó M tömege és a bal-, illetve jobbkezes neutrínók Θ keveredési szöge által kifeszített síkon megszorítva balról és felülről.

Zárásként elmondhatjuk, hogy az FCC a fizikai jelenségek rendkívül gazdag palettájának tanulmányozásával kecsegtet: i) nagymértékben pontosítható a részecskefizikai modellek paramétereinek mérése; ii) majdnem teljesen feltárható a jelenleg még csak részlegesen ismert skalárszektor; iii) remek lehetőséget biztosíthat a standard modell különféle kiterjesztései közötti választáshoz; és végül, de nem utolsósorban iv) új részecskék felfedezéséhez vezethet. A nagy kérdés, hogy kinek és mikor adatik meg a szerencse, hogy mindebben részesülhet.

Irodalom

1. The FCC Collaboration: A. Abada et al.: FCC Physics Opportunities, Eur. Phys. J. C (2019) 79.
2. Zoltán Trócsányi: Physics Potential of the FCC. Az előadás elhangzott az MTA 197. közgyűlési program-sorozatának 2024. május 15-i „FCC and CERN 70” c. rendezvényén, <https://www.youtube.com/watch?v=1CC1cGFyMo8> a 64. perctől.
3. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. Fizikai Szemle, 2008/7–8, 246.
4. Pásztor Gabriella: Jelek a standard modellen túlról? Leptonuniverzalitás-anomáliák és leptokvarkkeresés a Nagy Hadronütköztetőn. Fizikai Szemle, 2023/2, 48.
5. Trócsányi Zoltán: Hol tart a részecskefizika? Fizikai Szemle, 2019/7–8, 233.
6. Horváth Dezső: Anyag és antianyag (avagy Angyalok és démonok?) Fizikai Szemle, 2009/3, 200.

LÁTOGATÁS A CERN-BEN

Vígh-Kiss Erika Rozália^{1,2}

¹Balassi Bálint Nyolcévolyamos Gimnázium, Budapest

²PE HTK Neveléstudományi Intézet, Veszprém

E-mail: vighkisserik@gmail.com

Már régi vágyam volt, hogy eljuthassak a CERN-be (European Organization for Nuclear Research), a világ legnagyobb részecskefizikai laboratóriumába. Moróné Tapody Éva fizikatanároknak szánt körleveléből értesültem a lehetőségről, amelyet meg is ragadtam. Genf felé a repülőúton megismerkedtünk kísérőinkkel, Oláh Éva Máriával és Horváth Dezsővel, a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont kutatóival. A 14 résztvevő között általános, szakközépiskolai és gimnáziumi fizika- sőt matematikaszakos tanárok is voltak, mint például jómagam. Kedves házigazdaként Béni Noémi és Szillási Zoltán, a HUN-REN Atommagkutató Intézet (ATOMKI) tudományos munkatársai a kései órán elvittek minket a genfi repülőtérről a CERN területén található szállásunkra.

A CERN felderítése

Másnap reggel Jeff Wiener, a CERN Teacher Programmes vezetője köszöntött minket, majd Béni Noémi adott tájékoztatást a CERN-ről. Ezt követően Oláh Éva tartott ráhangoló színes és ízes részecskefizikai foglalkozást. Megismerkedtünk az atomokat alkotó hatféle kvark tulajdonságaival. Majd süteményekből és gumicukrokból részecskéket készítettünk – követve a megismert szabályokat. Jómagam az 1. ábrán is látható „íztelen” hadront készítettem el.



1. ábra. Néhány részecske színes és ízes illusztrációja



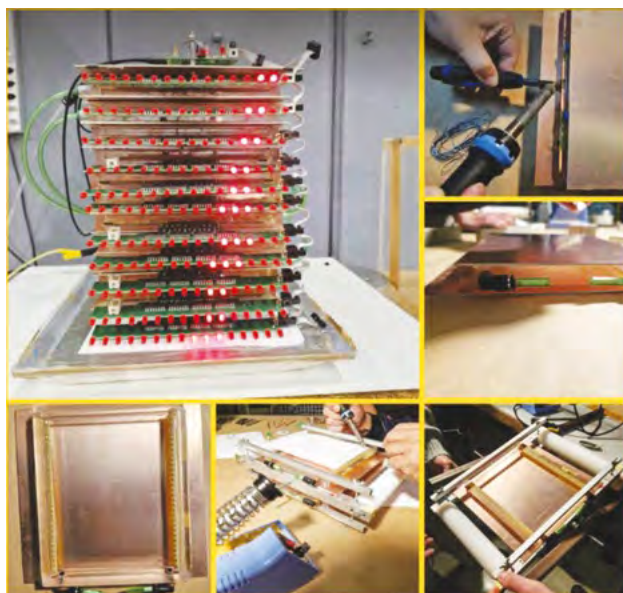
Dr. Vigh-Kiss Erika Rozália okleveles matematikatanár, okleveles tehetségfejlesztő tanár, a matematika területén mérés- és értékelésszakértő, mesterpedagógus. Doktori fokozatát 2021-ben az SZTE Neveléstudományi Doktori Iskolában szerezte. Munkahelye: Pannon Egyetem HTK Neveléstudományi Intézet, Veszprém (adjunktus), illetve Balassi Bálint Nyolcévolyamos Gimnázium, Budapest.

Éva felhívta a figyelmünket arra, hogy részecskékre vonatkozó gondolkodtató feladat a nyolcadikos MOZAIK-os matematika-tankönyvben is szerepel a halmazelmélet kapcsán. Számomra emiatt is különösen érdekes és hasznos volt ez a délelőtti.

Ebéd után elsétáltunk a CERN 1957-ben épült első gyorsítójához, a Szinkrociklotronhoz (SC), majd a világ legnagyobb ütköztetőgyűrűjének, a Nagy Hadron-ütköztetőnek (LHC) ATLAS kísérletéhez, ahol Béni Noémi tartott előadást. Délután busszal átvittek minket Franciaországba, a világ legnagyobb mágnesgyárába, amelynek Szillási Zoltán mutatta be a tevékenységét. Ezt követően utaztunk a CERN Control Centerbe (CCC), ami a CERN kiterjedt gyorsítórendszerének vezérlőközpontja. Végül a Nemzetközi Űrállomáson működő részecskefizikai kísérlet, az AMS-02 irányítótérme következett Noémi és Zoltán vezetésével.

A vacsorát követően elsétáltunk a világ első hadron-ütköztetője, az ISR melletti kutatólaboratóriumhoz. Oláh Éva ismertette velünk, hogyan kell sokszálas műondetektort építeni, amely elődjének felfedezésért a CERN kutatója, Georges Charpak kapott Nobel-díjat. Kétfelé oszlott a csapat, és neki is fogtunk a nem könnyű feladatnak, amelyen éjfélig folyt a munka.

A második napon először Veres Dóra előadását hallgattuk meg a részecskegyorsítóról, majd Varga Dezsőét



2. ábra. A sokszálas kamra és az építés folyamata

a detektorokról. Ujvári Balázs a részecskefizika rejtelmeibe vezetett be. Ebéd után átsétáltunk a 2023 októberében megnyílt interaktív kiállítóközpontba (CERN Science Gateway). Itt Béni Noémi és Szillási Zoltán útmutatásával ködkamrát építettünk 4–5 fős csapatokban. A részecskevadászat során a ködkamra segítségével sikerült elektronokat, protonokat és müonokat detektálnunk, amelyről fényképeket és videót is készítettünk. Jeff Wiener bemutatta nekünk a kiállítást, majd vacsora után folytattuk az ISR-nél a sokszálas kamra építését Zoltán és Noémi laboratóriumában, akiket óriási köszönet illet. Munkánkat a helyszín biztosításán kívül azzal is nagyban segítették, hogy a kamraépítéshez szükséges hozzávalókat összeszedték. A kamraépítést Oláh Éva és Varga Dezső vezette. Segítőink mindkét napon a BME hallgatói, Tercsi László és Moncz Dávid voltak. Éjszére a detektorok működésbe is léptek, ahogy azt a mellékelt 2. ábra mutatja.

Az este folyamán egyik kolléganőnk, Siposné Schuster Andrea vezetésével papíralátétekből és színes papírokból a kvarkok témáját követő Dobble-kártyalapokat készítettünk, majd ki is próbáltuk ezt a kártyajátékot oktatóink nagy örömeire.

A harmadik napon a CERN Számítógépes Egérmenhelyén pihenő öreg egerek és famacskák előtt elsétálva megtekintettük a Számítógépközpontot, amelyről Noémi és Zoltán tartott történeti összefoglalót. A World Wide Web (WWW) létrejöttét a CERN-ben dolgozó brit tudosnak, Tim Berners-Lee-nek köszönhetjük. Ma már el sem tudjuk képzelni az internet e rétege nélkül a munkánkat. A web továbbfejlesztett változata, a grid (világháló) már tárhelyek, adatbázisok, alkalmazások megosztására is alkalmas. Az épületbejárás során azokat a robotokat is láthattuk, amelyek segítik a kutatók munkáját olyan helyekre is eljutva, amelyek veszélyesek az emberek számára.

Az Antiproton Lassítóban (AD) végignéztünk egy rövidfilmet az antianyaggyár működéséről. Nagy örömmünkre köszöntött minket Jeffrey Scott Hangst kísérleti fizikus, az ALPHA kutatócsoport világhírű vezetője (a 3. ábrán közepén látható, a háttérben a mérőberendezése,



3. ábra. A CERN Magyar Tanári Program résztvevői az antianyaggyár ALPHA kísérlete előtt. Fotó: Oláh Éva



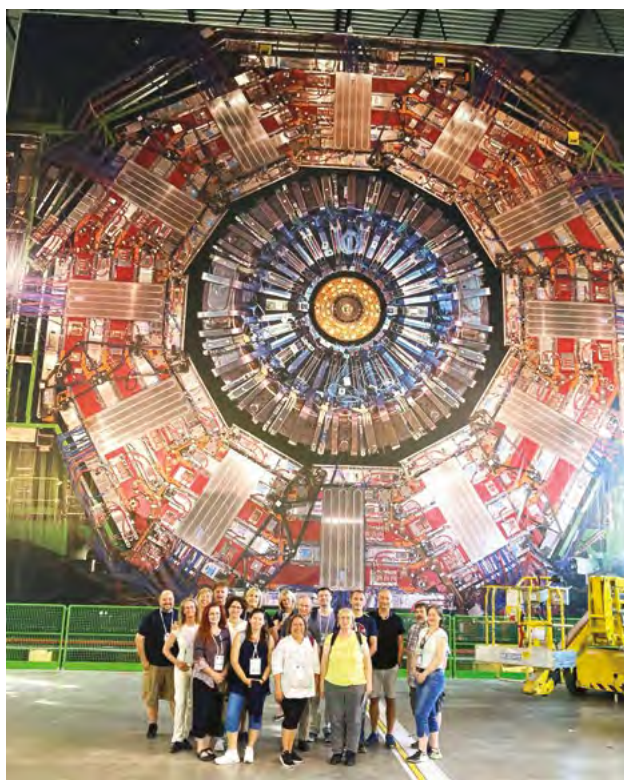
4. ábra. Horváth Dezső előadásán

amely segítségével antihidrogén-atomokat tudnak csapdában tartani).

Ezután Horváth Dezső adott elő a magyarok CERN-ben végzett tevékenységéről (4. ábra). Boldogság volt hallani, milyen sok magyar tudós járul hozzá a részecskefizika és nehézion-fizika sikereihez.

Ebéd után Oláh Éva útmutatása alapján kincsvadászatra indultunk. Kis csoportokban fedeztük fel Genf történelmi látnivalóit, szépségeit. A városnézést kulináris élvezetekkel zártuk. A fondüvacsorán kedves vendég látónk Jeff Wiener volt, a kötetlen beszélgetés során számos érdekességet megtudtunk a CERN-ről.

Negyedik nap reggel Horváth Dezső érdekfeszítő előadásait hallgattuk a kozmológiáról. Áttekintette a modern kozmológia kialakulását, az ősrobbanás elméletét és kísérleti bizonyítékait, beszélt a gravitációs hullámok 2016-os felfedezéséről, és érintette a különböző vallási irányzatok ősrobbanáshoz való viszonyát is.



5. ábra. Látogatás a CMS-ben, a fotó a 100 méterrel alattunk található detektor életnagyságú poszttere előtt készült



6. ábra. John Ellis professzor úr és a magyar csapat

Varga Dezső a nehézion-fizika és a gyorsítók világába kalauzolt el bennünket. A nehézionok nagy energiájú ütközésében az anyag egy különleges fázisa jelenhet meg, amelyben a kvarkok és gluonok kiszabadulnak a hadronokból, és egy igen nagy sűrűségű plazmában erősen kölcsönhatnak egymással. Érdekes volt hallani a kvarkpárok elolvadásának folyamatáról.

Ezután Krasznahorkay Attila világított rá az adat-elemzés és a számítástechnika fontosságára a fizikai kutatásokban. Itt szeretném megjegyezni, milyen fantasztikusan izgalmasak voltak az előadások abból a szempontból is, hogy az előadók mellett más, a CERN-ben dolgozó kutatók, diákok, PhD-hallgatók is bejöttek, és időnként egymással vitatkozva mutattak rá fontos jelenségekre. Ezt zseniális ötletnek tartom.

Ebéd után ismét buszra szálltunk, és Franciaországban megtekintettük az LHC CMS, LHCb és ALICE kísérleteit, amelyekben magyar kutatócsoportok is részt vesznek. Lenyűgöző volt az óriási berendezések méretével, komplexitásával személyes közelségből találkozni, amit a CMS detektor feletti csarnokban készült fotó is jól szemléltet (5. ábra).

Végül Ujvári Balázs megtartotta harmadik előadását a részecskefizikáról. Egy másik előadásából megtudtuk, hogyan járulnak hozzá a CERN-ben végzett kísérletek a gyógyításhoz, a diagnosztikai eljárások, úgymint a CT, az MR, a PET sikeréhez.

Egész héten lelkesen készültünk az ötödik napra, amikor be kellett számolnunk a sokszálas kamra készítéséről. Szabaduláshozát készítettünk előadóink, Oláh Éva, Béni Noémi és Horváth Dezső számára. A feladatok között szerepelt egy többsoros részecskefizikai témájú mondat eljuttatása a terem egyik végéből a másikba (postásjáték). Ezután néhányan kvark-Dobblét játszottunk, természetesen a nyertes neve adta az újabb két betűt a szabaduláshoz. Végül izgalmas Kahoot-kérdésekre választottunk, és mindenki kiszabadult.

A nap fénypontja John Ellis professzor úr előadása volt, akit a 6. ábrán a részecskefizika standard modelljét leíró egyenletet népszerűsítő póloban láthatunk. Prezentációjában a Paul Gauguin által feltett kérdésekre kereste a választ: Mik vagyunk? Honnan származunk? Hová tartunk? Mindezekre az LHC-ben folyó kísérletek választ kínálnak. Arról is hallottunk, hogy miért van tömege a tárgyainknak, és miért fontos a Higgs-bozon felfedezése. Megtudtuk, hogy az LHC nemcsak a legerősebb mikroszkóp, hanem a legnagyobb teleszkóp is egyben.



7. ábra. Az üres petpalack a hegyre menetel előtt és után

Tanárainktól a délelőtti folyamán tanácsokat kaptunk arra vonatkozóan, hogyan vihetünk diákokat a CERN-be. A programzárásra érkezett Charlotte Lindberg Warakaulle, aki megköszönte, hogy eljöttünk. Kérdéseinkre elmondta, hogy Oroszország társult tagságát 2022. március 25-től felfüggesztették, viszont a CERN több tagországa engedélyezi, hogy színeiben részt vegyenek orosz kutatók a CERN-ben folyó kutatómunkában. Ebéd után előadóink válaszoltak a 40 órás tanári továbbképzés résztvevőinek kérdéseire. Délután kis csoportokban folytattuk Genf nevezetességeinek felderítését. Beülhettünk olvasni a Genfi Egyetem könyvtárába, aminek nagyon örültünk.

Szombaton egy felejthetetlen kiránduláson vettünk részt Chamonix városkába, ahonnan felmentünk a Mont Blanc melletti 3842 magasan fekvő csodaszép Aiguille du Midi-re. Szomorúan figyelhettük meg a gleccserek visszahúzódását, morajlását. Megtapasztalhattunk, milyen ritka fenn a levegő, mennyire nehezen lehet pár lépcsőfokot is megtenni, és egy üres petpalackkal is végeztünk egy érdekes kísérletet (7. ábra).

A nap végén kis búcsúvacsorával kedveskedtünk és köszöntük meg előadóinknak, kísérő tanárainknak az áldozatos szervezőmunkát.

A hetedik napon elutazás előtt még alkalmunk nyílt a Science Gateway interaktív kiállítás megtekintésére, az ott látható eszközök kipróbálására. Ez a kiállítás ingyenes, és bárki meglátogathatja.

A CERN a nyitott közösség jó példája. Az itt folyó kísérletek részletei, a kutatási anyagok bárki számára hozzáférhetők, az intézet részei látogathatók, mindenütt szabad fényképezni.

A tanári program anyagai innen elérhetők: <https://indico.cern.ch/event/1416624/timetable/>. A Science Gateway honlapján számos hasznos információt és izgalmas kísérletek leírásait is megtalálhatjuk: <https://visit.cern/index.php/>

Köszönetnyilvánítás

Hálás szívvel köszönjük a professzionális szervezést, a kiváló előadásokat! Köszönjük a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont munkáját és a felejthetetlen tanulási élményeket a nagyszerű felkészültségű, élvonalbeli kutató fizikusoknak! Köszönjük a Külgazdasági és Külügyminisztériumnak, hogy a résztvevőktől átvállalta a szállásköltséget, és Papp Gabriella tudománypolitikai osztályvezetőnek, hogy ennek intézésében segítségükre volt. Inspiráló, hasznos, érdekes volt a továbbképzés, rengeteget tanulhattunk belőle. Ezt a tudást továbbadjuk diákjainknak, kollégáinknak.

HOGYAN VÁLJUNK SZUPERHŐSÖKKÉ A CERN-BEN?

Horváth Dezső^{1,2,@}, Jarosievitz Beáta^{3,#}, Oláh Éva Mária^{1,4}, Sükösd Csaba^{5,*}

¹HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest, ²Babes–Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

³Budapest XIV. Kerületi Teleki Blanka Gimnázium, Budapest

⁴Bozzay Pál Német Nemzetiségi Nyelvtanító Általános Iskola, Budapest

⁵BME Nukleáris Technikai Intézet, Budapest

@E-mail: horvath.dezso@wigner.hun-ren.hu; #E-mail: jarosievitz@gmail.com; *E-mail: sukosd@reak.bme.hu

Bevezető

Napjainkban sajnálatos módon csökken a fiatalság érdeklődése a természettudományok iránt. Elkeserítő a hazai tanárképzés helyzete: a rendszerváltás óta eltelt évtizedek alatt változatlanul folytatódik a természettudományos tanári pályát választó egyetemisták számának és minőségének csökkenése. Ez világjelenség, de a fejlett országokban – és erre Németország a legjobb példa – agresszív ismeretterjesztő politikával sikerült megállítani, illetve bizonyos mértékig vissza is fordítani ezt a rendkívül aggasztó folyamatot. A kérdés megközelíthető három oldalról: a nagyközönség, a diákok és a tanárok felől. Képzésünk a harmadik lehetőséget célozza meg, a tanárok motivációjának erősítésével, és rajtuk keresztül a diákok érdeklődésének a felkeltésével a modern természettudományok iránt.

A CERN egy részecskefizikai világlaboratórium Svájc és Franciaország határán, Genf közelében található. Jelenleg 24 ország a tagja, és a kísérletekben a Föld szinte valamennyi országa részt vesz, mintegy 17 000 kutatóval. A részecskefizikán kívül a CERN szinte alapítása (1954) óta foglalkozik szervezett oktatással. A kísérletekben részt vevő több ezer doktoranduszon és diplomamunkáson kívül minden évben vendégül lát 150 egyetemi hallgatót nyári diákként, és százával foglalkoztat mérnök-hallgatókat. Nyaranta vendégül lát ezen kívül mintegy száz fizikatanárt a CERN-tagországoiból kéthetes, angol nyelvű részecskefizikai képzésre. E cikk mindkét tanár szerzője részt vett ezen.

2004 és 2008 között Robert Aymar (1936–2024) volt a CERN főigazgatója (director general). Ezt megelőzően Aymar a franciaországi Cadarache-ban nemzetközi együttműködéssel épülő ITER fúziós kísérleti berendezés igazgatója volt. Egyik szerzőnk (Sükösd Csaba) akkoriban magyar delegáltként részt vett Brüsszelben az ITER-rel kapcsolatos megbeszéléseken, ott találkozott Aymarral. Egy kávészünetben beszélgettek arról, hogy hogyan lehetne a fúziós ismereteket a nagyközönség számára közelebb hozni. Csaba megemléltette, hogy a fizikatanároknak lehetne ebben szerepük, ám ők általában nem jól értenek angolul, ezért a saját nemzeti nyelvükön kellene továbbképzést szervezni számukra. Nem lehet tudni, hogy volt-e benne szerepe ennek a beszélgetésnek, vagy sem, mindenesetre egy évvel az után, hogy Aymar a CERN főigazgatója lett, 2005-ben meghirdették a fizikatanárok anyanyelvi továbbképzését. Természetesen nem a fúziós ismeretek, hanem a CERN profiljába tartozó területek kerültek bele ezekbe a továbbképzésekbe: részecskefizika, kozmológia, gyorsítók stb.

A történethez hozzátartozik, hogy amikor Jarosievitz Beáta, a CERN angol nyelvű International High School Teacher Programme HST programjának [1] korábbi résztvevőjeként megkapta a nemzeti nyelvű továbbképzés ötletének hírét, kapcsolatba lépett Mick Storral (Beáta éppen a CERN-hez közel síelt Franciaországban, és Mick Storr ott látogatta meg). Ezek után az előzmények után talán nem véletlen, hogy a CERN első egyhetes, anyanyelvi tanár-továbbképzését az Eötvös Loránd Fizikai Társulat részéről Sükösd Csaba és Jarosievitz Beáta



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 Babes–Bolyai Egyetemen.



Dr. Jarosievitz Beáta 2022-től kezdve és jelenleg is a Budapest XIV. Kerületi Teleki Blanka Gimnázium fizikaszakos tanára (főiskolai tanár, mesterpedagógus, tanfelügyeleti szakértő, közoktatási szakértő: fizika, informatika) és a „Természeti” munkaközösség-vezetője, az iskola akkreditált kiváló tehetségpontjának kapcsolattartója. Szívéigye a fizika népszerűsítése. 9 éven keresztül az Ericssonnal közösen sikeresen megszervezte az „Öveges tanár úr utódai” elnevezésű ismeretterjesztő előadásokat, 10 éven keresztül (2005–2015) a CERN-beli tanártoábbképzést.



Dr. Oláh Éva Mária 2018-ban sikeresen védte meg PhD-fokozatát a fizika tanítása témakörben. 2021 óta kutatótanári minősítéssel matematikát és fizikát tanít egy általános iskolában, és tehetséges középiskolásoknak szervez kutatási lehetőségeket a HUN-REN Wigner Fizikai Kutatóközpontban. Egyik kutatási területe a STEM- és STEAM-pedagógia szak módszertanának a fejlesztése. 2016 óta egyik szervezője és előadója a CERN-ben folyó fizikatanári továbbképzéseknek.



Sükösd Csaba (1947) a BME címzetes egyetemi tanára, az ELFT elnökségi tagja. Kísérleti magfizikus, aki kísérleti munkáját nagyrészt külföldi kutatóintézetekben végezte. Kutatási területe a magreakciók, óriásrezonanciák és nemely asztrofizikailag releváns magreakció vizsgálata radioaktív ionnyalábokkal. Marx György tanítványaként részt vett a 70-es évek MTA oktatási kísérletében. Azóta is szoros kapcsolata van a fizikatanárok közösségével, több tanári és oktatással kapcsolatos program vezetője.

szervezte meg 2006 augusztusában. A kinti foglalkozások előkészítésére és lebonyolítására a CERN igazgatósága Horváth Dezsőt kérte fel, a helyi logisztikát és a látogatásokat Mick Storr (CERN) intézte, és jelentős segítséget kaptunk a kint dolgozó magyar kollégáktól.

Tíz éven át évente 35–40 fizikatanár bérelt autóbusszal történő utazását és teljes kinti ellátását sikerült biztosítani. Az útiköltséget pályázatokból teremtettük elő, a kinti szállást és étkezési hozzájárulást a CERN biztosította – részben „hálából” azért, hogy elsőként mi mozdultunk rá erre a programra. 2016-ban azonban sok minden módosult: megszűnt a korábbi hazai támogatás forrása, és a CERN is szigorított. Már nem fizették a szállást, és étkezési hozzájárulást sem adtak. Ezek miatt a program felépítését 2016-ban módosítani kellett, új támogatót is kellett keresni. Azóta 20 fizikatanárt tudunk eljuttatni az egyhetes továbbképzésre, és az idő jobb kihasználása érdekében repülővel utazunk. A programon résztvevőkre pedig nagyobb anyagi terhek jutnak, mint korábban. A továbbiakban bemutatjuk a 2016 előtti tíz évet, majd a mostani program sajátosságait ismertetjük.

A programról

A program 3 lábon állt 2006 és 2015 között:

- a) Magyar „specialitások”: a hosszú autóbusszút előnyei-
nek a kihasználása, a tanári kísérletek.
- b) A CERN előírása alapján a kinti program végrehaj-
tása. Előadások, üzemlátogatások.
- c) Kulturális programok.

a) A CERN-be egy augusztusi vasárnap délután kellett megérkezni, hogy hétfőn reggel a program elkezdődhessen. Ehhez szombaton reggel korán el kellett busszal indulni Budapestről, így a vidéki kollégáknak már pénteken este Budapestre kellett érkezni. Ezt használtuk ki arra, hogy pénteken délután tartottunk egy ismerkedéssel egybekötött, „bevezető-bemelegítő” rendezvényt a TIT Kossuth Klubban, Budapesten. Ezen a csapatépítésen néhány előadás hangzott el, és még a levegő radon-tartalmának a mérését is elvégezte egy mérőcsoport a „porszívós” kísérlettel. A magyar specialitás másik része ugyanis egyes tanári kísérletek elvégzése volt. Ezeket a tanári kísérleteket a CERN által ajánlottakon felül iktattuk be. A tanárok – előre megalakított csoportokban – olyan kísérleteket állítottak össze, amelyeknek valamilyen közük volt ahhoz, ahogy a busz útja során a külső körülmények, paraméterek változnak. A kísérletek azonban iskolai körülmények között is könnyen végrehajthatók. A kísérletek listája a következő:

- Torricelli kísérlete vízzel a CERN-ben és a Mont Blanc Aiguille du Midi csúcsán (a légnyomás változásának kimutatása).
- A hangsebesség mérése a CERN-ben (augusztusi melegben) és a Mont Blanc-on (hidegben). A hangsebesség hőmérséklettől való függésének mérése.
- A természetes háttérsugárzás mérése az út során, több helyszínen. A Mont Blanc-on a kozmikus hát-

térsugárzás hatásának kimutatása dózisteljesítménymérővel.

- A víz forráspontjának mérése a CERN-ben és a Mont Blanc-on (a forráspont nyomástól való függésének kimutatása).
- Földrajzi helymeghatározás a Nap segítségével az út során több helyszínen (a busszal történő többszáz kilométeres elmozdulások kimutatása egyszerű eszközökkel).
- A radonkoncentráció kimutatása, porszívóval a pincében gyűjtött radioaktív minta effektív felezési idejének mérése GM-csővel.

A jelentkezések tavaszi lezárását követően már megalakítottuk a mérőcsoportokat. A tanár kollégáknak több hónapjuk volt arra, hogy a kísérletekre felkészülhessenek. Ugyancsak magyar specialitás volt, hogy a résztvevő kollégáktól elvártuk, hogy a CERN-beli foglalkozásokat írásban véleményezzék, leosztályozzák, és az egész programról részletes írásbeli beszámolót készítsenek. Ezeket a beszámolókat átnéztük, és ha voltak benne szakmai hibák (időnként voltak), azokat az érintett kollégákkal megbeszéltük. Szerintünk nagyon fontos, hogy a tanárok ne hibás információkat továbbítsanak a diákjaik felé.

A busszal történő utazás nagyobb kísérleti eszközök szállítását is lehetővé tette. Sajnos 2016 után ezekről az érdekes tanári kísérletekről le kellett mondani.

b) A hivatalos program és a foglalkozások hétfőtől péntekig, reggeltől késő estig tartanak a CERN-ben. Ez így volt 2016 előtt, és így van most is. A CERN előírásai alapján a tanárok a következő témákban hallottak, illetve hallanak kinti előadásokat magyar kutatóktól:

- Bevezető előadás a CERN-ről (történet, felépítés, helyi ismeretek)
- Részecskefizika (I., II., III.)
- Kozmológia (I., II.)
- Gyorsítók
- Detektorok
- Adatfeldolgozás és számítástechnika
- A fizikai felfedezések orvosi alkalmazásai
- Hogyan hozzunk tanítványokat a CERN-be?

Ezekhez mi hozzátettünk két témát, amelyeket fontosnak éreztünk hazai vonatkozásban:

- A kvarkanyag kutatása, nehézion-fizika
- Magyar aktivitás a CERN-ben

A CERN is felajánlott egy tanári kísérletet a résztvevőknek, amely azóta is része a programnak: egy Wilson-féle ködkamra építését. A diffúziós ködkamra ionizáló sugárzások [2], töltött részecskék nyomát képes megmutatni. A kamrában az izopropil-alkohol túlhűtött gőze a részecskék által keltett ionokon [3] kicsapódik (kondenzálódik). A jelenség ugyanaz, mint a repülőgépek kondenzcsíkja [4].

Drótkamra építése 2014 óta része a továbbképzésnek, és csak a magyar fizikatanárok végzik, más nemzetek ta-

nári programjaiban nem szerepel. A középiskolai diákoknak a HUN-REN Fizikai Kutatóközpontban már sok éve van lehetőségük bekapcsolódni a Részecske és Magfizikai Intézet Nagyenergiás Fizika Osztályán működő detektorfejlesztő kutatócsoport munkájába. Az évek során a diákok aktív közreműködésével megépült egy úgynevezett „villogós” detektor, ami a professzionális, sokszálas gáztöltésű detektorokhoz (MWPC) teljesen hasonló elrendezésben készült el, azzal a különbséggel, hogy kisebb a felülete, és a többnyire műon részecskék által keltett jeleket egy LED-sor segítségével láthatóvá teszi. A kozmikus sugárzásban keletkező müonokat a tudósok számos alkalmazott kutatásban használják, többek között barlangok, vulkánok, piramisok szerkezetvizsgálatát végzik segítségével. Az elmúlt 10 évben közel 50 diák vett részt a sokszálas proporcionális kamrák összeállításában, ezért fontosnak tartottuk, hogy fizikatanáraink is megismerhessék ezt a különleges tanulási módszert. 2014 óta a tanárok gyakorlatképpen sokszálas gáztöltésű detektort építenek, ehhez a Wigner Fizikai Kutatóközpont Innovatív Detektorfejlesztő Kutatócsoportja és a CERN CMS együttműködése nyújt segítséget. A tanárok a CERN hivatalos továbbképzési programja után esténként, kis csoportokban elkészítenek 3–4 új kamrát, amit az előző években elkészült kamrarendszerhez kapcsolunk. A legtöbb tanár életében először használ forrasztópákát, ismeri meg a száltekerés folyamatát, és érzi azt a hatalmas örömet, ami egy saját magunk által készített eszköz sikeres beindításával jár.

Játékos részecskefizika

Ez ugyancsak egy „hungaricum”, az egyik szerzőnk (Oláh Éva) fejlesztése. Az egyhetes továbbképzés során a CERN vezetői és a továbbképzés szervezői többször is hangsúlyozzák, hogy mennyire fontos szerepük van a fizikatanároknak a továbbképzést követően. „Szuperhősök” lesznek az egy hét alatt, hiszen magabiztosabbá, motiváltabbá válnak, a részecskefizika „nagyköveteknek” szerepét is be kell tölteniük. Ez azt jelenti, hogy a program során látottakat, hallottakat diákjaik számára továbbítaniuk kell, meg kell ezért ismertetni őket a részecskefizika legújabb kutatási eredményeivel, a témakör alapjaival. Sajnos a résztvevők nagy része olyan korú, hogy egyetemi tanulmányaik során csak érintőlegesen hallott a mikrovilágban zajló folyamatokról. Ehhez járul még az, hogy az elmúlt évtizedekben nagyon sok új felfedezés született ezen a területen is. A pedagógusok visszajelzései alapján kiderült, hogy a tudástranszfer azért nem tud igazán megvalósulni, mert a részecskefizika tudományát mélyebben nem sajátították el, illetve a mai oktatási rendszerben divatos *hands-on, mind-on* módszert nem tudják alkalmazni, ha maguk sincsenek tisztában a részletekkel. Ennek kapcsán született meg az az ötlet, hogy a szakmai előadássorozat előtt egy játékos részecskefizikai foglalkozást is tartunk, ahol a *learning by doing* módszert ismerhetik meg. Ekkor maguk is kipróbálhatják a gya-

korlatban, miként lehet diákjaik érdeklődését felkelteni a témakör iránt és a legalapvetőbb fogalmakat elsajátítani.

Üzemlátogatások – a kísérleti berendezések meglátogatása

A CERN gondoskodik a kísérletek meglátogatásának megszervezéséről, és természet biztosít az előadásokhoz. Az „üzemlátogatások” jelentik a CERN-beli tanártovábbképzés csúcspontját és kvintesszenciáját. Ezeknek csak a CERN-ben lehet szerét ejteni – az előadásokat (és még a tanári kísérleteket is), itt Magyarországon is el lehetne végezni. A helyszíni látványt, a leszállást a föld alá 100 méteres mélységbe és ott törpeként állni a több emelet magas CMS detektoróriás mellett, bámulni a milliárdnyi kábel kusza rengetegét, amelyen az univerzum titkait feltáró információk utaznak iszonyatos sebességgel – no, ezt az élményt nem lehet megkapni sehol máshol a világon! Ezt nem pótolja az a videóközvetítés sem, amelyen – a kinti magyar kollégáknak, Szillási Zoltánnak és Béni Noéminek köszönhetően – már sok magyar iskola is részt vehetett.

Itt csak nagyon röviden ismertethetjük ezeket az üzemlátogatásokat:

- **Számítóközpont** (Data Center). A CERN nemcsak a részecskefizika fellegvára, hanem a WWW születésének a helye is. Azóta is a számítástechnika fejlődésének egyik éllovasa. Szükség is van erre, hiszen a CERN kísérletei emberi ésszel felfoghatatlan mennyiségű adatot termelnek. Nagy élmény a halkan duruzsoló, sokezer processzort és gépet tartalmazó terembe belépni.
- **NA61 kísérlet + Szinkrociklotron + PS, LEIR gyorsítók.** Itt mindegyikről sokat lehetne írni. Az NA61 még nem az LHC nyalábját használja, hanem a Szuper Protonszinkrotronét (SPS). A Szinkrociklotron már nem üzemel, de egy nagyon érdekes és szép kiállításon fény- és hangjáték keretében mutatják be. A PS (Protonszinkrotron) pedig a CERN legrégebbi nagy gyorsítója. 1959-ben építették – 5 évvel a CERN alapítása után –, és úgy tervezték, hogy kb. 15 évig fog működni. Még ma is működik, és a CERN gyorsítókomplexumának igen fontos tagjaként szorgalmasan küldi a felgyorsított protoncsomagokat az SPS-be.
- **A CMS detektor meglátogatása** – 100 méterrel a föld alatt – volt a továbbképzés csúcspontja a tanárok többségének véleménye szerint. Ez volt az egyik detektoróriás, amelynek segítségével sikerült megtalálni a régóta keresett Higgs-részecskét.
- **ATLAS, LHCb és ALICE, valamint a többi LHC-kísérlet:** azoknál a föld alá nem mehettünk, csak a hozzájuk fűződő kiállításokat és vezérlőtermüket tudtuk a helyszínen megnézni.
- **Az antianyaggyár.** Az antianyag nemcsak az egyszerű emberek (és filmesek) fantáziáját mozgatta meg (*Angyalok és démonok*), hanem a tudósok számára is rejtélyes. A CERN nagy energiájú ütközéseiben minden

létrejött részecske mellé keletkezik az antirészecskéje is. A világ ilyen szempontból teljesen szimmetrikusnak látszik. Ugyanakkor akármerre tekintünk az univerzumban, csak anyagi részecskékből álló világokat látunk, az antianyagból álló világ hiányzik. Máig rejtély, hogy mi ennek az aszimmetriának az oka. Ezt is kutatják a CERN-ben az antianyaggyárban.

- *AMS-vezérlő + CERN-vezérlő + az SM18 és az LHC mágnesei és gyorsító elemei.* Az AMS (Alpha Magnetic Spectrometer), amelyet a Nemzetközi Űrállomás a Föld körüli pályán tart, a sötét anyag és az antianyag kutatásában játszik szerepet. Ennek az eszköznek a vezérlése és az adatainak a feldolgozása ugyancsak a CERN-ben történik. A látogatások során megnézhetjük ennek a vezérlőtermét, és követhetjük a Nemzetközi Űrállomás helyzetét. Ellátogatunk „Houstonba” is, abba a terembe, ahol a CERN nagy gyorsítóit irányítják. Sok száz számítógép képernyőjén villognak a gyorsítók adatai. Az LHC hatalmas szupravezető mágnesei a maguk kategóriájában a legnagyobbak a világon. Ezeknek a tesztelése, beállítása folyik az SM18 csarnokban. Itt testközelből láthatjuk ezeket a hatalmas eszközöket.

Csapatépítés

A korábban 10 napos, az utóbbi években már csak 7 napos továbbképzés a részecskefizika tudományában való elmélyülés mellett azt a rendkívül fontos célt is szolgálja, hogy a magyarországi, de sokszor a határon túli magyar településeken tanító fizikatanárok szakmai és baráti kapcsolatokat is kialakítsanak. Ennek két formája is jelen van a szabadidős tevékenységek, illetve közös gyakorlatok során. A buszos utazás során látogatást tettünk a müncheni Deutsches Museumban, megálltunk a Rajnai vízesésnél, a csoport szabadnapján pedig majdnem minden évben feljutottunk Európa legmagasabb hegyének, a Mont Blanc masszívumnak az Aiguille du Midi nevű, látogatók számára is elérhető csúcsára. Kíváncsi turisták szeme láttára végeztük ebben a magasságban Torricelli légnyomást megmérő kísérletét vízzel és vörösborral. Hasonlóan közkedvelt kiránduló úti cél a Mer de Glace gleccser belsejében lévő jégbarlang vagy a Mont Salève és Genf városának felfedezése, amely játékos formában, „kincsvadászattal” történik. A közös munka, a tanulás és az élmények minden évben egy nagyon összetartó csapat létrejöttét eredményezik, amelyben a kapcsolatok a program lezárását követően is fennmaradnak.

Mint említettük korábban, a részt vevő tanároknak beszámolási és értékelési kötelezettségei is vannak. A visszajelzéseket egy őszi vagy decemberi utótalálkozáson beszéljük meg, amely egyben jó alkalom arra is, hogy újból személyesen is találkozassanak a kollégák.

A 2006 és 2015 közötti utótalálkozók egy részét Budapesten, a Kazinczy u. 21.-ben található Magyar Elektrotechnikai Múzeumban tartottuk. Ezen a rendezvényen újra alkalom nyílt a találkozásra és a kötetlen beszélge-

tésre. Legtöbb alkalommal a szponzoraink egy része is képviseltette magát, és a CERN-ből Mick Storr fizikus, kapcsolattartónk, barátunk is részt vett. Emellett a kollégák újabb tudással is gazdagodhattak a meghallgatott szakmai előadásból. Ebben a múzeumban láthattuk Jedlik Ányos bécsi világkiállításra készített és mai napig is működő csöves „villamfeszítőjének” a másolatát [5], amivel kb. 50 cm-es „villám” is előállítható. A résztvevők mind részesei lehettek egy „rendkívüli fizikaórának”, ahol elvégezhettek néhány interaktív kísérletet is. Ezt a foglalkozást Jarosievitz Zoltán [6] matematika-fizika szakos nyugdíjas tanár úrnak köszönhetjük.

Nagyköveti szerep

A CERN-ben töltött egy hét során a fizikatanárok tudása sokat gyarapodik, a kollégák inspirálódnak és saját bevalásuk szerint sokkal motiváltabbakká válnak. Úgy érzik, hogy a kutatóközpont vezetői, segítői rendkívül fontosnak tartják az oktatásban betöltött szerepüket, amit rendszeresen hangsúlyoznak is. A CERN főigazgatójától kezdve az oktatási igazgatóig és a tanárprogram vezetőjéig mindenki szuperhősöknek tartja az összes fizikatanárt, aki részt vesz a továbbképzésen. Nagyra értékeli, hogy többlettudásra akarnak szert tenni a részecskefizika különleges világában. A mindennapi oktatás során ezt ritkán érzi egy tanár, ezért még fontosabb, hogy feltöltve, új tervekkel, ötletekkel gazdagodva térjen vissza az útja után. Egyfajta nagyköveteivé válnak a tudománynak, hiszen a világhírű laboratóriumban látottakat tovább kell adniuk diákjaiknak, akiknek a modern fizika tudományában való jártasságát szintén fejleszteniük kell. Számos eseményre kerül sor a továbbképzést követően, szinte mindenki tart beszámolót kollégáinak, diákcsoportjainak, de többen szakköri órák keretén belül adják tovább a látottakat, hallottakat, gyakorlati foglalkozásokon modellezik a mikrovilágban zajló folyamatokat. A Lorentz-erő gyakorlati alkalmazásánál [7] a CERN-ről külön iskolai órát érdemes tartani. A kint élő kollégák a virtuális látogatást is messzemenőleg segítik, támogatják.

Sok iskola látogatást is szervez érdeklődő diákjai számára, de akiknek erre nincs anyagi lehetőségük, azoknak a kinti kutatók egy rendhagyó virtuális látogatás során viszik házhoz a CMS detektort.

Összegzés

Minden év februárjában hirdetjük meg az augusztus 20-a körüli hét programját olyan aktív (elsősorban középiskolás) fizikatanárok számára, akik még nem vettek részt CERN-es oktatásban. Programjainkon eddig több száz magyar fizikatanár vett részt, nemcsak Magyarországról, hanem Romániából, Szlovákiából és Ukrajnából is. Sok fizikatanár, aki részt vett a CERN-tanfolyamon, a helyismeretet megszerezve, diákcsoportokat vitt ki később a CERN-be. Volt olyan kolléga, aki évente többet is. A kurzus egyik előadása

éppen az, hogy hogyan kell ilyen csoportos diáklátogatást előkészíteni és lebonyolítani. Az összes eddigi képzés teljes programja az előadások anyagával együtt megtalálható a CERN Hungarian Teacher Programme lapján [8], a korábbi programokról sok információ van Sükösd Csaba és Jarosievitz Beáta CERN-oldalán [9]. Az augusztusi program tanulságait a beszámolók alapján utótalálkozókon elemezzük, a legutóbbi ilyen utótalálkozónk programja a CERN eseményhirdető lapján [10] is megtalálható.

Irodalom

Nagyon sok információt adnak Sükösd Csaba és Jarosievitz Beáta tanárprogrammal kapcsolatos lapjai:

https://nuklearis.hu/sites/default/files/nukleon/16_2_256_Jarosievitz.pdf
<https://sukjaro.hu/JBea/CERN/sukjaro.pdf>
https://sukjaro.hu/JBea/pdf/MMO2017/jarosievitz_sukosd2017_poszter.pdf
https://sukjaro.hu/JBea/pdf/MMO2017/jb_sukosd2017_eloadas_poster.pdf

A *Fizikai Szemlé*ben is több, továbbképzéssel kapcsolatos publikáció jelent már meg a tanárképzés résztvevőinek tollából: <https://fizikai-szemle.elft.hu>. Az alábbiakban csak a megjelenés évét/hónapját és az első szerző nevét soroljuk fel:

2008/10.	Jónás Katalin	2013/06.	Riedel Miklós
2009/01.	Szabó László	2014/04.	Sükösd Csaba
2009/04.	Baranyai Klára	2014/09.	Oláh Éva
2009/10.	Holics László	2016/02.	Nyirati László
2013/05.	Riedel Miklós	2024/11.	Vígh-Kiss Erika Rozália

A kamraépítéssel kapcsolatban több publikáció is született, itt csak kettőt említünk:

Varga D., Gál Z., Hamar G., Molnár J. S., Oláh É., Pázmándi P.: Cosmic muon detector using proportional chambers. Eur. J. Phys. 36 (2015) 065006.

Barnaföldi Gergely és társai: Kincskeresés kozmikus müonokkal, avagy kozmikus müondetektálás alkalmazott kutatásokban. Fizikai Szemle, 2011/12, 401.

Hivatkozások

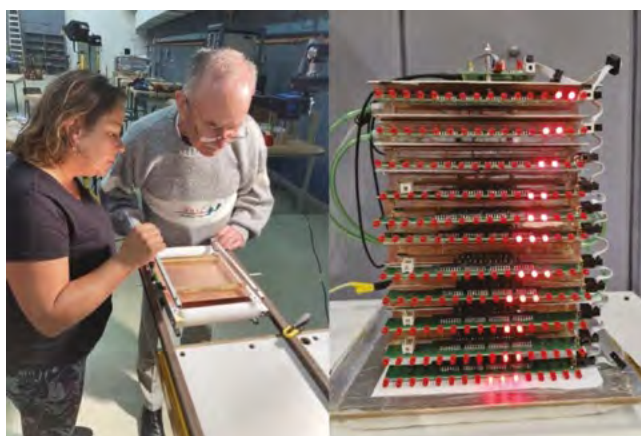
1. <https://hst-archive.web.cern.ch/hst/2001/work/index.htm>
2. https://hu.wikipedia.org/wiki/Ionizáló_sugárzás
3. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Ion>
4. <https://hu.wikipedia.org/wiki/Kondenzcsík>
5. <https://sites.google.com/view/villamossagtan2023/i-elektrosztatika/1-22-elektrosztatikai-gépek>
6. <https://sukjaro.hu/jb/szuleim/jarosievitz-zoltan/>
7. <https://sites.google.com/view/villamossagtan2023/iii-mágnesesség/3-12-lorenz-erő-gyakorlati-alkalmazásai/3-12-2-cern>
8. <https://teacher-programmes.web.cern.ch/hungarian-teacher-programme>
9. <http://cern.sukjaro.eu/>
10. <https://indico.cern.ch/event/1214084>



Wilson-féle ködkamra építése



Protonmuffin



Sokszálas proporcionális kamra építése és a kész kamratorony egy átfutó müon jelével



John Ellis professzor előadást tart a tanárainknak a CERN-ben



Jarosievitz Zoltán bemutatja az Elektrotechnikai Múzeum-beli utótalálkozó történet



Esti csapatépítés



Játékos kvarkmodellkészítés



2013-as csoportkép a CMS látogatása alkalmával

Pillanatképek a CERN Magyar Tanári Programja eseményeiről 2006 és 2024 között



HUN-REN WIGNER FIZIKAI KUTATÓKÖZPONT ADATKÖZPONT

Budapesten, a XII. kerületben a KFKI Telephelyen nyújtunk folyamatos magas rendelkezésre állású és minőségű szolgáltatásokat:

INFRASTRUKTÚRA BÉRLET

- Hidegfolyósós rendszer
- Kontrollált páratartalom
- **24 órás műszaki helyszíni felügyelet**
- Automata oltórendszer és tűzjelző berendezés
- Villamos energiaellátás és hűtés tekintetében **99,982%-os** rendelkezésre állás
- Redundáns 10 kV betáplálás
- Szünetmentes elosztó rendszer (UPS)
- Dízel aggregátor áramkiesés esetére
- Rackszekrényenként redundáns PDU (mérhető áramelosztó berendezés)
- Géptermi rack dimenziói: **47U** befogadására alkalmas, **80 cm széles**, 120 cm mély
- Saját kulcsos zárható rackszekrény
- Naplózott kártyás beléptetőrendszer a géptermekekhez
- Kiépített kamerarendszer
- Internetszolgáltatók felé optikai összeköttetési lehetőség

EMELT SZINTŰ ADATKÖZPONTI SZOLGÁLTATÁS

- CERN felé nyújtott szolgáltatási minőséget megtartva
- Rack hosztíng mellé megegyezés szerint:
- Hálózati & informatikai tanácsadás
- IT hosztíng támogatása IT technikai csapattal
- **Strukturált kábelezés**, eszközök beszerelése
- Hardveres felügyelet és munkaidőben hibajavítások
- Hibajegykezelő rendszer biztosítása

Immáron 11 éve!

Adatközpontunk 2012-ben a Wigner Fizikai Kutatóközpontban kezdte működését.

- modern MW IT kapacitású géptermekek az **Európai Nukleáris Kutatási Szervezet (CERN)** számára a gyorsítók adatainak tárolása és feldolgozása céljából
- infrastruktúra biztosítása a **HUN-REN Központ (Magyar Kutatási Hálózat)** és a **HUN-REN** kutatási hálózat intézményi szereplői számára
- támogatásnyújtás a **fizikai kutatások (WSCLAB)** számára
- gépterembérlet más állami és piaci szereplők részére

HUN-REN
Wigner Fizikai Kutatóközpont
Adatközpont

18-as épület
1121 Budapest, Konkoly-Thege Miklós út 29-33.
<https://wignerdc.wigner.hu>

Adatközpont elérhetősége:
hosting.wdc@wigner.hun-ren.hu