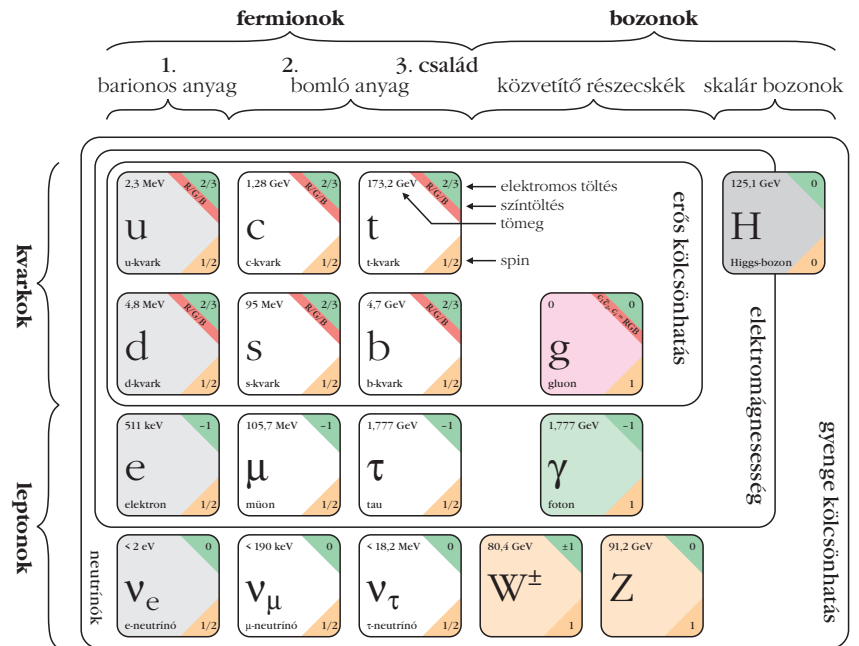


A RÉSZECSEKEFIZIKA HELYZETE TÍZ ÉVVEL A HIGGS-BOZON FELFEDEZÉSE UTÁN

Trócsányi Zoltán
ELTE Elméleti Fizikai Tanszék

A Nagy Hadronütköztető¹ ATLAS² és CMS³ kísérletei 2012. július 4-én jelentették be az akkor már közel fél évszázada megjósolt, de hiába keresett Higgs-bozon megfigyelését. Az észlelés korszakalkotó jelentőségű volt. A különleges részecske felfedezése egyszerre adta a részecskefizikai standard modell helyességének végső bizonyítékát, és nyitott új távlatokat a nagyenergiás kísérleti és elméleti kutatásokban. Az elmúlt 10 év során mind a kísérleti, mind az elméleti kutatások jelentős lépéseket tettek a Higgs-bozon tanulmányozásán keresztül a mikrovilág pontosabb megértése felé. Milyen eredményeket hozott az évtized, hol tartunk ma és merre visz az utunk a természet megismerése felé a ma elérhető legkisebb méret- és legnagyobb energiasűrűség-skálákon?



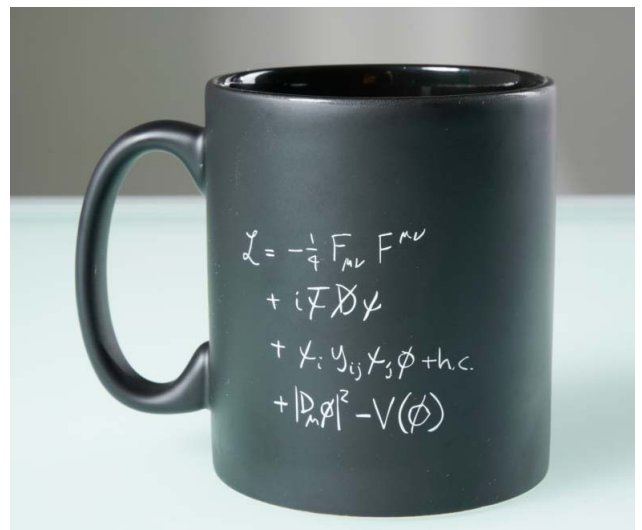
1. ábra. A standard modell mezői. A keretek azokat a mezőket határolják, amelyekre a jelzett erő hat.

Bevezetés: a részecskefizikai standard modell

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

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

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



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

¹Nagy Hadronütköztető: LHC, Large Hadron Collider

²ATLAS: A Toroidal LHC Apparatus, egy toroidális LHC-berendezés

³CMS: Compact Muon Solenoid



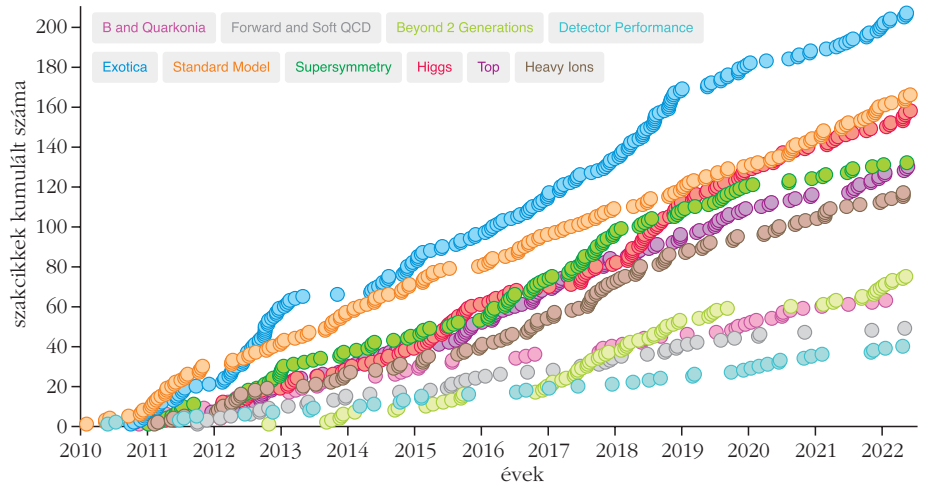
Trócsányi Zoltán fizikus, az MTA rendes tagja, az ELTE Elméleti Fizika Tanszék egyetemi tanára, az erős kölcsönhatás elméletének nemzetközileg elismert kutatója. Demény Andrással társszerzője a *Fizika 1.* egyetemi tankönyv Mechanika részének, Horváth Dezsővel pedig a *Bevezetés az elemi részecskék fizikájába* című, 2019-ben angolul is megjelent tankönyvnek. Emellett ismeretterjesztő előadások és művek rendszeres szerzője. Tudományos közleményeire százezernél több független hivatkozást kapott.

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

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

A ma ismert Higgs-részecske

A nagyjából $125 \text{ GeV}/c^2$ tömegű skalárbozon első megfigyelése csupán az első lépés volt az LHC rendkívül gazdag kísérleti programjában. A 3. ábra mutatja a CMS együttműködés⁴ által közölt tudományos közlemények számának gyarapodását az idő szerint. Az LHC kísérletei által megjelentetett közlemények témájuk szerint három nagy csoportba oszthatók: (i) a standard modell paramétereinek minél pontosabb mérése; (ii) a standard modellbe nem illeszkedő részecskék keresése; (iii) egyéb, ideértve például a standard mo-



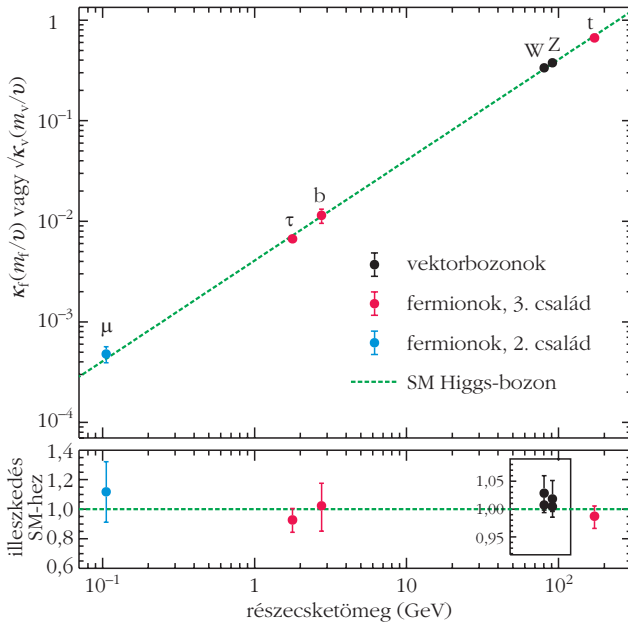
3. ábra. A CMS együttműködés által megjelentetett – 2022 júniusáig összesen 1137 darab – szakcikkvek számának növekedése különböző kutatási munkacsoportokban (csoportokat feliratok színek alapján lehet azonosítani).

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

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

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

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



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

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

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

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

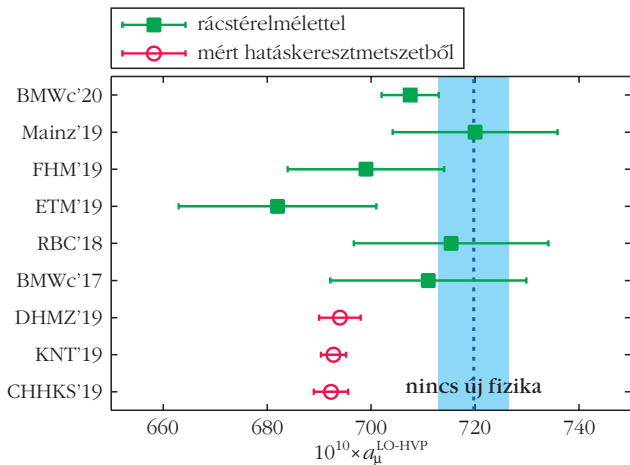
A standard modell által nem értelmezett kísérleti tények

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

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

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

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



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

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

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

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

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

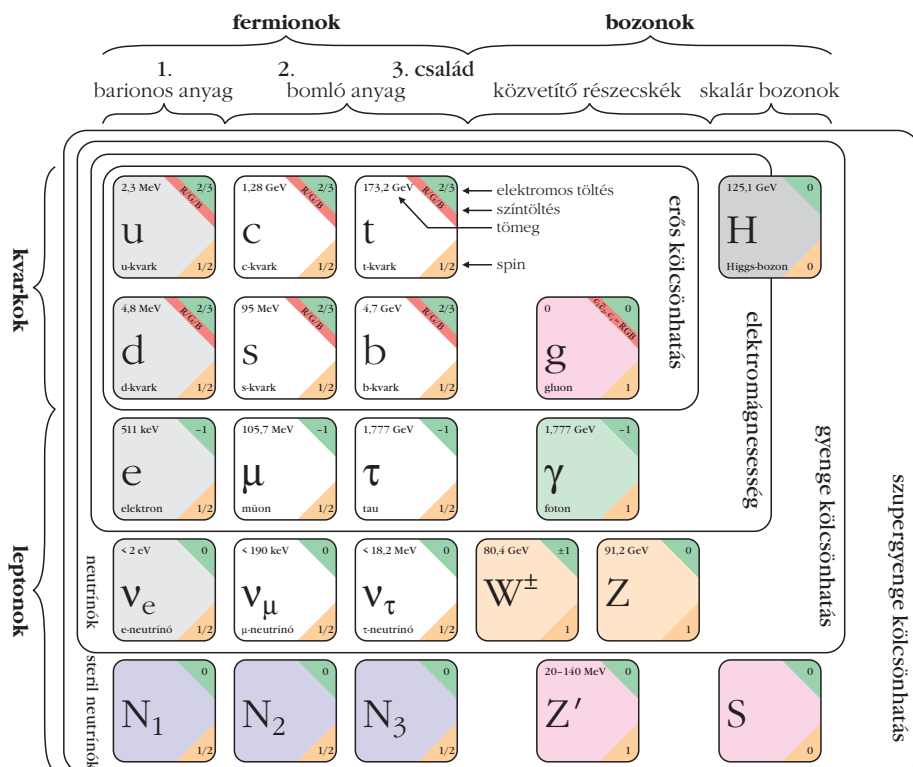
A neutrínók tömege, a barionaszimmetria, a sötét anyag létezése olyan kísérleti tények, amelyek elméleti megértése egyelőre várat magára. Ide sorolhatunk még olyan megfigyeléseket is, mint a Világegyetem gyorsuló tágulása, a BEH-mező potenciális energiájának instabilitása, vagy a kozmológiai infláció,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

Merre tovább?

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

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

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



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

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

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

Irodalom

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

Magyar Fizikus Vándorgyűlés 2022

A Fizikai Szemle

kéri a Magyar Fizikus Vándorgyűlés előadóit

és a posztareket bemutatókat, hogy eredményeiket

osszák meg a folyóirat olvasóival is!