A STANDARD MODELLEN TÚL I.*

PRÓBÁRA TETT PONTOSSÁG: A HIGGS-BOZON ÉS AZ ELEKTROGYENGE BOZONSZÓRÁS

Pásztor Gabriella
ELTE Fizikai és Csillagászati Intézet, Budapest
E-mail: gabriella.pasztor@ttk.elte.hu

A részecskefizika mai alapelmélete, az úgynevezett standard modell [1], az emberiség valaha alkotott legpontosabb tudományos modelljei közé tartozik. Leírja az elemi részecskék tömegét, töltését, kölcsönhatásait: jóslatai kísértetiesen igazolódnak, sok esetben több tizedesjegy pontossággal (az elektron anomális mágneses momentuma esetén 12 tizedesjegyre!). Mégis tudjuk, hogy nem ez a végső elmélet, mert a világegyetem több alapvető jelenségéről egyszerűen nem ad számot [2–4].

Az a kérdés, hogy mi rejtőzik a standard modellen túl, ma a részecskefizika legizgalmasabb nyitott problémája. Ennek kutatásába nyújt bepillantást kétrészes cikksorozatunk, méghozzá a legnagyobb tudományos kísérleti eszköz, a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) segítségével. Ebben az első részben azt mutatjuk be, hogyan teszik próbára a standard modellt a precíziós mérések; a közvetlen keresésekről a következő részben lesz szó.

A standard modell: diadalok és hiányosságok

A standard modell az anyag alapvető alkotóelemeit két nagy csoportba osztja. Az anyag építőkövei a protonokat és neutronokat is felépítő kvarkok, illetve az atommag körül keringő elektron és nehezebb rokonai, a müon és a tau, valamint szinte tömeg nélküli, semleges párjaik, a neutrínók (közösen leptonok). A kölcsönhatásokat közvetítő részecskék – fotonok, W- és Z-bozonok, valamint gluonok – kötik össze ezeket az elemi részeket. A Higgs-bozon, amelyet 2012-ben fedezett fel a CERN ATLAS- és CMS-kísérlete [5–8], igazolja azt a spontán szimmetriasértésen alapuló mechanizmust, amely tömeghez juttatja az elemi részecskéket. (A standard modell rövid összefoglalása megtalálható keretes írásunkban.)

Bármennyire sikeres az elméleti keret, amit a Higgs-bozon felfedezése is remekül szemléltet, a hiányosságok is szembeötlők. A standard modell négy alapvető kölcsönhatás közül csak hármat ír le – az erős, az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatást. A gravitáció, amely a kozmikus léptékű jelenségeket uralja, teljesen hiányzik az elméletből. A sötét anyag [9], amelynek létezéséről, többek között, galaktikus forgásgörbék, gravitációs lencsehatás és a kozmikus háttérsugárzás egyaránt tanúskodik, szintén nem szerepel benne – holott az ismert anyag mintegy ötszörösét teszi ki. A sötét energia, amely az univerzum gyorsuló tágulásáért felelős és a vákuum energiájához köthető, még rejtélyesebb. Az elmélet arra sem ad választ, miért van az Univerzumban több anyag, mint antianyag [10]. Ráadásul a standard modell belső szerkezete is vet fel nyugtalanító kérdéseket – ezekre sorozatunk második részében térünk vissza.

Az LHC- és a CMS-detektor: részecskegyár és óriáskamera

A 27 km kerületű tárológyűrűben több ezer parányi csomagban protonok (p) száz milliárdjai száguldanak a fénysebességhez közel két, egymással ellentétes irányban. 2022 és 2026 között (Run 3) a p-p ütközések energiája elérte a 13,6 TeV-ot.

Az ütközési pontokban komplex detektorok figyelik a keletkező részecskéket. Ezek egyike a Kompakt Müon Szolenoid (Compact Muon Solenoid, CMS), amely a „kompakt” jelző ellenére egy 14 000 tonnás, 15 méter átmérőjű berendezés. A detektor magját egy szupravezető mágnes alkotja, amely 3,8 T erősségű teret hoz létre – ez a Föld mágneses terének közel százezerszerese. A belső szilícium nyomkövető több mint 100 millió elektronikus csatornával mikrométeres pontossággal rekonstruálja a töltött részecskék pályáját. A kalorimétereknek elnyelik a részecskéket, és megmérik az energiájukat; csak a müonok és a neutrínók jutnak át rajtuk. A legkülső réteg, a müonspektrométer, a kalorimétereken áthatoló müonokat azonosítja. Az elektrogyenge bozonszórásról szóló részben látható *4. ábra* a CMS által rögzített egyik esemény képét mutatja, és szemlélteti a detektorban megjelenő különböző fizikai objektumok (pl. elektronok, müonok, részecskesugarak) tulajdonságait.

Az LHC 2010 óta folyamatosan üzemelt, a téli leállásokat és a fejlesztési szüneteket leszámítva. A Run 3-at lezáró, 2026 júniusában kezdődő hosszú leállásig mintegy

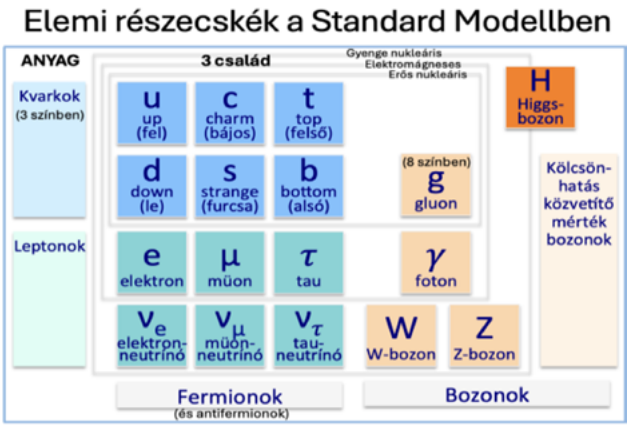
* A cikksorozatot a szerző „How do we search for physics beyond the Standard Model?” című előadása inspirálta, amelyet a MaFiHe Balatoni Nyári Iskolán tartott 2026 júliusában, Balatonfüreden.



Pásztor Gabriella részecskefizikus, az MTA–ELTE Lendület CMS Részecske- és Magfizikai Kutatócsoport vezetője, az ELTE Atomfizikai Tanszék tanszékvezető egyetemi tanára. Fő kutatási területe a részecskefizika standard modelljén túlmutató jelenségek vizsgálata. Tagja a CERN LHC CMS-együttműködés vezető testületének. A BRIL nyalábmegfigyelő és luminozitásmérő rendszer projektmenedzsereként 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.

A standard modell dióhéjban

A részecskefizika szabálykönyve a standard modell, ami a természettudomány legpontosabb és legalaposabban tesztelt elmélete: leírja, miből épül fel a látható univerzum a legalapvetőbb szinten, és hogyan hatnak egymásra az összetevői. Ez az alapvető fizika „periódusos rendszere”.



Az energiát elektronvoltban (eV) mérjük: ennyit nyer egy elektron 1 V feszültségen gyorsítva. Az $E = mc^2$ összefüggés alapján a tömeg is megadható így (pontosabban eV/c^2-ben). Az ún. természetes egységekben a fénysebesség (c) és a redukált Planck-állandó ($\hbar$) értéke 1, így a tömeg, az energia és a lendület egysége egyaránt az eV, a spin pedig egyszerűen ½ vagy 1. A proton tömege kb. 1 GeV (10^9 eV).

Az alapvető összetevők: anyagrészecskék

Az égitestektől az élőlényekig minden két alapvető részecsketípusból, kvarkokból és leptonokból épül fel. Mindkettő fermion: spinjük ½ (belső impulzusmomentumuk $\hbar/2$). Abban különböznek, hogy mely kölcsönhatásokban vesznek részt. Az elemi részecskék tovább nem bonthatók, de átalakulhatnak egymásba.

Kvarkok építik fel az összetett szubatomi részecskéket, például a protonokat és a neutronokat. Hat különböző „ízű” kvark létezik, töltésük az elemi töltés +⅔ vagy –⅓ része. A körülöttünk lévő stabil anyag szinte csak *u-* és *d-kvarkokat* tartalmaz. Nehezebb társaik, az *s-, c-, b-* és *t-kvarkok* nagyenergiájú kozmikus sugarakban és részecskegyorsítókban születnek.

A leptonok közé tartozik az elektron, nehezebb, rövid életű rokonai, a *müon* és a *tau,* valamint a szellemszerű *neutrínók*. Ez utóbbiak szinte tömegtelen, elektromosan semleges részecskék, és másodpercenként billiószámra haladnak át minden anyagon nyom nélkül.

Minden anyagrészecskének van azonos tömegű, de ellentétes töltésű (kvantumszámú) *antirészecskéje;* az elektroné például a pozitron. Ha egy részecske és antirészecskéje találkozik, szétsugároznak (annihilálódnak): tömegük energiává alakul. A fermionok három egyre nagyobb tömegű *generációba* (családba) rendeződnek, ezek az ábra oszlopai.

A ragasztók: az erők és közvetítő részecskéik

A részecskék az alapvető kölcsönhatásokon keresztül vonzzák és taszítják egymást, egyesülnek és elbomlanak. Az erőket 1 spinű közvetítő részecskék, mértékbozonok hordozzák. Ezek többnyire csak „virtuálisan” léteznek: a kvantummechanika megengedi, hogy egy részecske rövid időre a tömegének nem megfelelő energiával és impulzussal jelenjen meg. Az ilyen virtuális részecskék cseréje közvetíti az erőket, és apró kvantumkorrekciókkal minden mért mennyiséget, így a részecskék tömegét is befolyásolja.

Elektromágnesesség (foton): az elektromosan töltött részecskék között hat, pl. az elektronokat az atommaghoz köti.

Erős kölcsönhatás (nyolc gluon): a *színtöltéssel* (piros, zöld, kék) rendelkező részecskék között hat, ilyenek a kvarkok. Szuperragasztóként köti őket össze a protonokban (p) és a neutronokban (n), és tartja egyben az atommagokat az elektromos taszítás ellenében. Kvark-antikvark párokat *(mezonok)* vagy három kvarkot *(barionok)* kapcsol össze „fehér”, többnyire – a nukleonokat (p és n) leszámítva – rövid életű kötött állapotokká *(hadronok)*. A kvarkokat és gluonokat *partonoknak* nevezzük.

A gluonok maguk is színesek (egy színt és egy antiszínt hordoznak), így a kvarkok közötti erő a távolsággal nem gyengül. Kvarkok és gluonok szabadon soha nem figyelhetők meg, csak hadronokba zárva *(bezárás)*. Az ütközésekben kilökött partonok ezért a detektorban hadronok keskeny nyalábjaként, részecskesugárként jelennek meg.

Gyenge kölcsönhatás (W- és Z-bozonok): minden elemi fermion részt vesz benne; felelős a radioaktív β-bomlásért, és beindítja a Napot tápláló magfúziót. A neutrínók csupán ezt az erőt érzik, ezért annyira nehéz őket kimutatni.

Bár az elektromágneses és a gyenge kölcsönhatás első látásra nagyon különbözőnek tűnik, ezek a közös *elektrogyenge kölcsönhatás* két megjelenési formája. Alacsony energián a Higgs-mezőhöz kötődő szimmetriasértés miatt válnak szét.

A **gravitáció** nem része a standard modellnek; szubatomi szinten olyan gyenge, hogy nem befolyásolja a részecskeütköztetőknél vizsgált folyamatokat.

A kulcselem: a Higgs-bozon

Csak 2012-ben, a Higgs-bozon felfedezésével lett bizonyítéka a standard modell alapfeltevésének, amely egyes részecskék (pl. a Z-bozon és a t-kvark) nagy, míg mások (pl. a foton) nulla tömegét magyarázza. A 125 GeV tömegű, nulla spinű (skalár-) Higgs-bozon az egész univerzumot kitöltő, láthatatlan Higgs-mező fizikai megnyilvánulása. Az elemi részecskék e mezőn áthaladva „ellenállást” tapasztalnak: minél erősebben hatnak vele kölcsön, annál nehezebbek. A kölcsönhatások erősségét csatolásnak nevezzük.

De miért nem nulla a Higgs-mező értéke az üres térben? A mező energiáját leíró Higgs-potenciál egy „mexikói kalap” alakú felület: legmélyebb pontja nem a kalap közepén, hanem a karima menti völgyben van. A vákuum a völgy egy pontjába „gurul”, és megtöri az elmélet eredeti szimmetriáját (spontán szimmetriasértés). A kialakuló, nem nulla vákuum-várhatóérték ad tömeget a W- és Z-bozonoknak, a kvarkoknak és a töltött leptonoknak. A Higgs-bozon a mező apró rezgése e völgy aljában. (A körülöttünk lévő anyag tömegének nagy része viszont a protonokat és neutronokat összetartó erős kölcsönhatás energiájából származik.)

Miért tesztelik ma is kísérletileg a standard modellt?

Sikerei ellenére a standard modell befejezetlen, számos rejtélyt megmagyarázatlanul hagy.

- Nem írja le a sötét anyagot és a sötét energiát, amelyek együttesen az univerzum ~95%-át teszik ki.
- Nem magyarázza meg, miért tartalmaz a világegyetem sokkal több anyagot, mint antianyagot.
- Nem tud számot adni arról, miért van kicsi, de nem nulla tömege a neutrínóknak.
- Nem tartalmazza a gravitációt.
- Nem magyarázza meg, miért marad a Higgs-bozon tömege kicsi a gravitáció energiaskálájához képest, holott a kvantumkorrekciók hatalmasra növelnék (hierarchiaprobléma).

A standard modell folyamatainak pontos mérése és a Higgs-bozon részletes vizsgálata olyan finom eltéréseket – a modell repedéseit – mutathatják meg, amelyek elvezethetnek a fizika új, eddig felfedezetlen törvényeihez.

40 billiárd proton-proton ütközés zajlott le a CMS-detektorban. Ezekből a valós idejű eseményválogató (trigger) rendszer több mint száz milliárdot rögzített teljes részletességgel.

Az ELTE 2015 óta vesz részt a CMS-kísérletben – többek között a detektor luminozitásmérésének fejlesztésében. A csoport jelentősen hozzájárult ahhoz, hogy az integrált luminozitást évente egy százaléknál pontosabban határozhassuk meg. A luminozitás az ütközési ráta mértéke, az a szám, amellyel az összes mért eseményszámot abszolút hatáskeresztmetszetté kell konvertálni, és amelynek pontossága így szinte minden fizikai eredményt közvetlenül befolyásol. A HUN-REN Wigner FK kutatói elsősorban a kísérlet belső nyomkövető detektorán, míg a debreceni csoportok a müonrendszeren dolgoznak.

Az adatok feldolgozása gondos detektorkalibrációt, pontos eseményrekonstrukciót és komplex analízist igényel. Ezért a legtöbb alábbi eredmény még a 2015 és 2018 közötti időszak (Run 2) adatain alapul. Ez 138 fb^{-1} integrált luminozitásnak felel meg, ami a teljes eddig rögzített adatmennyiség nagyjából 30%-a (~11 billiárd proton-proton ütközés). Ebben az időszakban a p-p tömegközépponti energia 13 TeV volt.

Két stratégia az ismeretlen keresésére

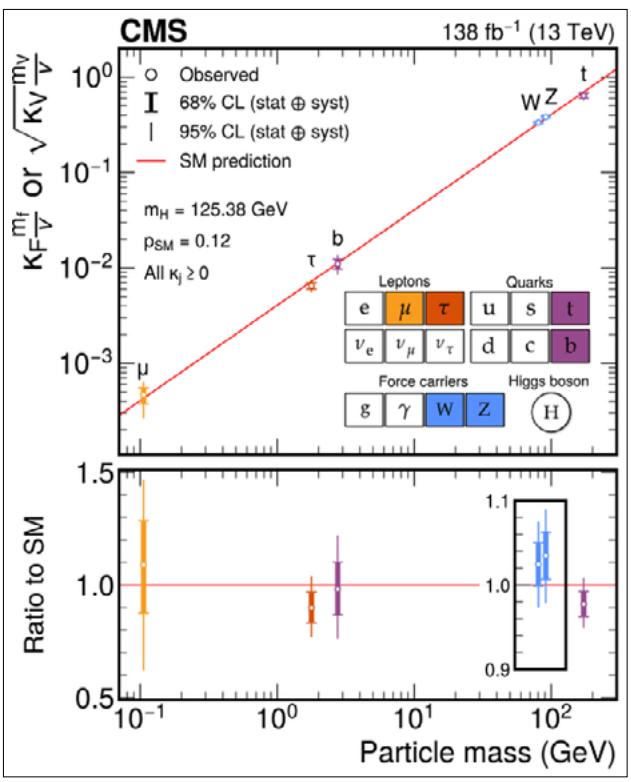
Alapvetően két úton keressük a standard modellen túli fizikát. Az első az egyenes konfrontáció: ha az új részecske elég könnyű, közvetlenül elő lehet állítani és detektálni az LHC-ben. A másik út közvetettebb: még ha az új részecskék túl nehezek is lennének ahhoz, hogy közvetlenül megjelenjenek, nyomot hagynak a megfigyelt folyamatokon, amelyek ekkor kismértékben eltérnek a standard modell jóslataitól.

Ez utóbbi megközelítés régi hagyományra tekint vissza. Az 1930-as években Enrico Fermi leírta a radioaktív béta-bomlást egy egyszerű „négyfermion-kölcsönhatással", jóval azelőtt, hogy a W-bozon – a valódi közvetítő részecske – fogalma felmerült volna. Fermi elmélete alacsony energián kitűnően működött a gyenge kölcsönhatás leírására; csak magasabb energiákon vált nyilvánvalóvá, hogy a valódi fizika bonyolultabb. Ugyanez az elv érvényes ma is: ha nem tudjuk, mi az új fizika, kereshetjük annak effektív térelméleti leírását, és megmérhetjük, milyen mértékben tér el a standard modell jóslata a valóságtól.

A Higgs-bozon keletkezése és az elektrogyenge bozonszórás – azaz a W- és Z-bozonok egymással való szórása – éppen ilyen szondák, amelyeknek különleges szerepét a következő fejezetek tárgyalják részletesen. A közvetlen keresések terén az egyszerűsített modellek adnak közös keretet. Ebbe illeszkedik a sötét szektorok, a szuperszimmetria vagy az extra dimenziók [11] feltételezésével kiterjesztett elméletek jóslatainak keresése. Ezekről sorozatunk következő részében szólunk részletesen.

A Higgs-bozon: precíziós mérések

A 2012-es felfedezés óta eltelt időszakban a Higgs-bozon – kulcsszerepéhez hűen – a precíziós mérések központi tárgyává vált. A CMS ezrelék alatti pontossággal határozta meg a tömegét (m_H = 125,04 ± 0,12 GeV) [12], a szögkorrelációs mérések pedig egyértelműen a standard modell által előírt 0 spint és pozitív paritást támasztják alá. A különböző keletkezési és bomlási csatornák együttes elemzése szerint a Higgs-bozon csatolásai – vagyis kölcsönhatásainak erőssége – a W- és Z-bozonokhoz, valamint a harmadik generációs fermionokhoz (t- és b-kvark, τ-lepton) a jósolt erősségűek, és már a második generációs müonhoz (μ) való csatolására is meggyőző kísérleti bizonyíték áll rendelkezésre *(1. ábra)*. Az összesített jelerősség (a mért és a jósolt eseménygyakoriság aránya) a standard modell értékének $(1{,}014^{+0{,}055}_{-0{,}053})$-szorosa [13].



1. ábra. A Higgs-bozon csatolásainak erőssége a részecskék tömegének függvényében a CMS teljes Run 2 adatai alapján. A standard modell szerint a Higgs-bozon annál erősebben csatolódik egy részecskéhez, minél nagyobb annak tömege: ezt mutatja a piros egyenes, amely a könnyű müontól a nehéz top-kvarkig több mint három nagyságrendet fog át, és minden mért érték erre esik. A függés a fermionoknál (müon, τ-lepton, b- és t-kvark) lineáris, a bozonoknál (W- és Z-bozon) kvadratikus. Az alsó panel a mért és a jósolt érték arányát mutatja, amely minden esetben a hibahatáron belül van [13]

Sokat elárul a Higgs-bozonról a teljes bomlási szélessége is, amely azt fejezi ki, milyen gyorsan bomlik el a részecske: minél rövidebb az élettartama, annál „szélesebb", azaz annál kevésbé élesen meghatározott a tömege. Ha a Higgs-bozon a standard modellben nem szereplő, ismeretlen részecskékre is elbomolhatna, a szélessége nagyobb lenne a vártnál. A jósolt érték mind-

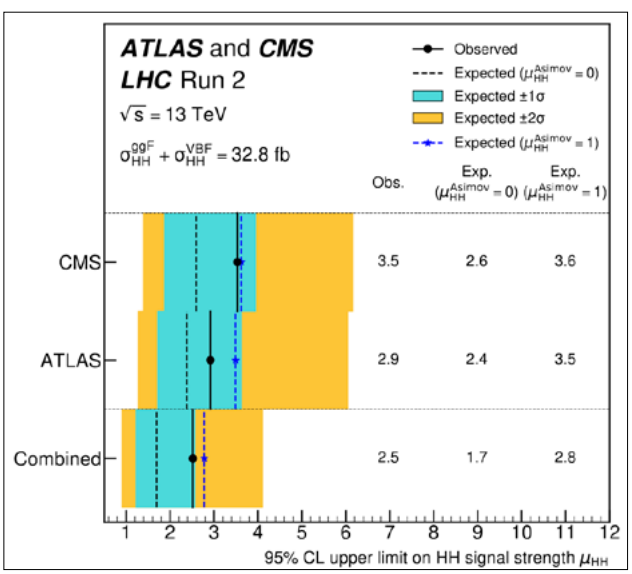
össze 4,1 MeV, ezt pedig közvetlenül nem lehet mérni: a detektor mintegy 1 GeV-es tömegfelbontása annál lényegesen durvább. Ezért közvetett módszert alkalmaznak. A Higgs-bozon kis valószínűséggel úgy is keletkezhet, hogy a tömege a szokásos 125 GeV-nél jóval nagyobb, akár több száz GeV – ez a kvantummechanikában megengedett „virtuális" állapot, amelyet tömeghéjon kívüli *(off-shell)* keltésnek neveznek. Az ilyen, ZZ-párt eredményező Higgs-bozon-események gyakoriságát a tömegcsúcsban mért gyakorisággal összevetve kiszámítható a bomlási szélesség. A CMS legújabb eredménye $5{,}1^{+2{,}0}_{-1{,}8}$ MeV [14], ami jól egyezik a standard modell jóslatával.

Statisztikailag szignifikáns eltérést a standard modelltől eddig egyetlen Higgs-mérés sem mutatott; a ritka H → Zγ bomlás [15] korábbi elemzésekben látott enyhe többlete, akárcsak a top-kvarkpárral együtt keletkező Higgs-bozonok (ttH) korai méréseiben tapasztalt többlet, az újabb adatok fényében eltűnt [16], a mért gyakoriságok ma már kitűnően illeszkednek a jóslathoz.

A Higgs-bozon és a vákuum: az öncsatolás vizsgálata

Továbbra is alapvető nyitott kérdés a Higgs-bozon öncsatolása, vagyis az, hogy a Higgs-bozonok milyen erősen hatnak kölcsön egymással. Ez kulcsfontosságú, mivel ez határozza meg, a Higgs-bozon tömegével együtt, hogy a Higgs-mező mely értéke vezet a legkisebb energiájú (vákuum-) állapothoz.

Az energia Higgs-mezőtől való függését az úgynevezett Higgs-potenciál írja le. Ezt szemléletesen egy „mexikói kalap" formájú felülettel szokás ábrázolni: az energia minimuma nem a kalap közepén, hanem a karima menti völgyben található, ezért a Higgs-mező értéke a vákuumban nem nulla. Éppen ez a nem nulla érték juttatja tömeghez az elemi részecskéket, ahogy azok kölcsönhatnak az így mindent átható Higgs-mezővel. Maga a Higgs-bozon ennek a nyugalmi állapotnak egy apró rezgése olyan, mint a völgy alján merőlegesen meglökött golyó ide-oda gurulása. A Higgs-bozon tömege a völgy görbületétől függ. A völgy mentén gördülő mozgás a W- és Z-bozonok tömegéhez kapcsolódik (ebből lesz az ún. longitudinális polarizációjuk, amelyre később visszatérünk). Hogy a potenciál pontosan olyan alakú-e, amilyet a standard modell feltételez, az a vákuum stabilitására [17] és a korai univerzum fejlődésére is kihat.



2. ábra. Az ATLAS és a CMS adataiból kapott felső korlátok a Higgs-bozonpárok keltésének jelerősségére (μ_{HH}, vagyis a mért gyakoriság a standard modell jóslatához viszonyítva). A fekete pontok a mért, a szaggatott vonalak és a színes sávok a várt korlátokat jelölik. Eszerint az eredmény egyelőre konzisztens a standard modellel, és a párkeltés legfeljebb 2,5-ször lehet gyakoribb a várt értéknél [18]

Az öncsatolás mérése, amely Higgs-bozonpárok keltésén keresztül lehetséges, ellenőrzi a potenciál alakját. Ha ez eltérne a várttól, az új fizikára utalna, és azt is jelentené, hogy másképp zajlott a korai univerzum lehűlése, és másképp alakul a vákuum hosszú távú stabilitása. Higgs-párok keltését még nem sikerült megfigyelni. Az ATLAS- és CMS-együttműködések közös eredménye a párok keletkezési gyakoriságára a standard modell értékének legfeljebb 2,5-szeresét engedi meg *(2. ábra)* [18].

A Higgs-bozon további vizsgálata a részecskefizika és a kozmológia több nagy nyitott kérdésének is kulcsa lehet [19]. Miért annyival gyengébb a gravitáció a többi kölcsönhatásnál? Miért van több anyag, mint antianyag a világegyetemben? Mi a sötét anyag? Honnan erednek az elemi részecskék tömegei közti óriási különbségek? Hogyan kapnak tömeget a neutrínók? A Higgs-bozon mindegyik kérdéshez kapcsolódik, ezért ha a tulajdonságai – csatolásai vagy öncsatolása – akár csak kicsit is eltérnének a jóslattól, az a standard modellen túli fizika első jele lehetne.

Az elektrogyenge bozonszórás: a Higgs-bozon főszerepben

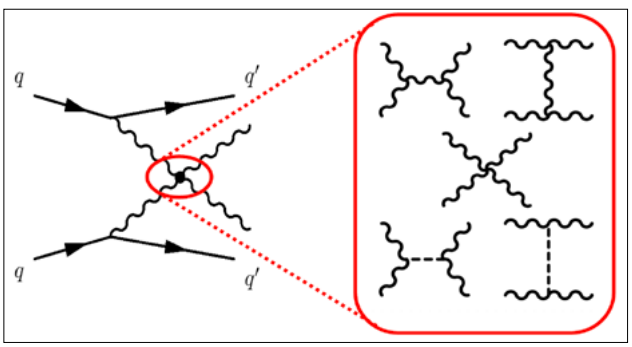
Az elektrogyenge bozonszórás nem véletlenül került a kutatás középpontjába: ez az a folyamat, amely a standard modell egyik legmélyebb belső összefüggését tárja fel.

A kvantumtérelmélet alapkövetelménye, hogy minden folyamat valószínűsége legfeljebb száz százalék lehet – a fizika nyelvén: a folyamatot leíró kölcsönhatási amplitúdónak unitérnek kell maradnia. A W-bozonok egymással való szórása esetén viszont, ha a Higgs-bozon nem létezne, a szórási amplitúdó az energiával együtt korlátlanul nőne, és körülbelül 1,2 TeV-en megsértené ezt az alapelvet. A Higgs-bozon éppen ezt akadályozza meg: egy finoman illeszkedő járulékot ad a folyamathoz, amely pontosan kiejti a problematikus tagokat. Ez az egyik oka annak, hogy a részecskefizikusok már az 1970-es években biztosak voltak benne: valamilyen új fizikának, Higgs-bozonnak vagy valami hasonlónak nagyjából 1 TeV-es energiáig be kell lépnie. Ez volt az LHC megépítésének egyik fő mozgatórugója.

A Higgs-bozon felfedezésével azonban a történet nem zárult le. A kiejtés csak akkor tökéletes, ha a Higgs-bozon pontosan a standard modell által jósolt erősséggel csato-

lódik a W- és Z-bozonokhoz. Ha ettől akár csak néhány százalékkal eltér – például mert a Higgs-bozon összetett részecske, vagy mert több Higgs-szerű részecske osztozik a szerepén –, a szórási valószínűség nagy energián ismét növekedni kezdene. Az elektrogyenge bozonszórás így azt teszteli, hogy a Higgs-bozon valóban maradéktalanul elvégzi-e azt a feladatot, amelyet az elmélet szánt neki.

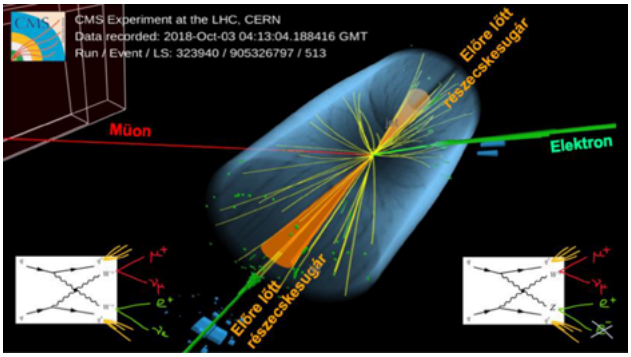
A folyamatban *(3. ábra)* a két proton egy-egy kvarkja egy W- vagy Z-bozont sugároz ki. Ezek egymáson szóródnak, míg a két kvark kis eltérüléssel „előrerepül", és két ún. előrelőtt részecskesugárként jelenik meg a detektorban. A mérés jellegzetes szignatúrája tehát: két elektrogyenge bozon bomlástermékei és két, egymástól nagy szögtávolságra lévő részecskesugár (*jet*, j).



3. ábra. Az elektrogyenge bozonszórás diagramja, ahol az ütköző protonokban található kvarkok (nyilakkal irányított vonalak) által kibocsátott W- vagy Z-bozonok (hullámos vonalak) lépnek egymással kölcsönhatásba (bal oldal). A négyes csomópontra fókuszálva (jobb oldal) a standard modell által megengedett folyamatok láthatók. A Higgs-bozonok (szaggatott vonal) közvetítésével lejátszódó szórás nélkül (vagy ha a Higgs-bozonok csatolása eltér a standard modellbeli értéktől) a folyamat gyakorisága korlát nélkül nő az impulzusátadással ($\sim p^2$), ami sértené az alapvető fizikai elveket

Az LHC-n legelőször azonos előjelű W-bozonpárt ($W^{\pm}W^{\pm}jj$) sikerült megfigyelni a leptonos végállapotban, azaz amikor a W-bozon egy lepton-neutrínó ($e\nu_e$ vagy $\mu\nu_\mu$) párra bomlik el *(4. ábra)*. Ennek a folyamatnak a háttere viszonylag kicsi, mert az ilyen két azonos töltésű leptont tartalmazó esemény ritka a standard modell egyéb folyamataiban. A CMS-kísérlet azóta a WZ- és a ZZ-csatornákat is megmérte. Minden eredmény összhangban van a standard modell jóslataival – ami egyrészt a Higgs-mechanizmus újabb kísérleti megerősítése, másrészt meghatározza, mekkora eltérés engedhető meg a négyes mértékbozon-csatolási erősségekben.

A Higgs-bozon szerepe a W- és Z-bozonok egy különleges állapotának, az ún. longitudinális polarizációnak a szórásában döntő. Ezek az állapotok a Higgs-potenciál „mexikói kalap" képében a völgy mentén történő mozgásból erednek: a W- és Z-bozonok ezt „nyelik el", amikor tömegre tesznek szert. A CMS végezte el az első polarizált mérést, de jelenleg az ATLAS-kísérlet találta a legerősebb utalást a longitudinálisan polarizált W-bozonok szórására. Azt a folyamatot, amelyben mindkét szóródó W-bozon longitudinális, egyelőre még nem sikerült a felfedezéshez megkívánt statisztikai biztonsággal kimutatni.

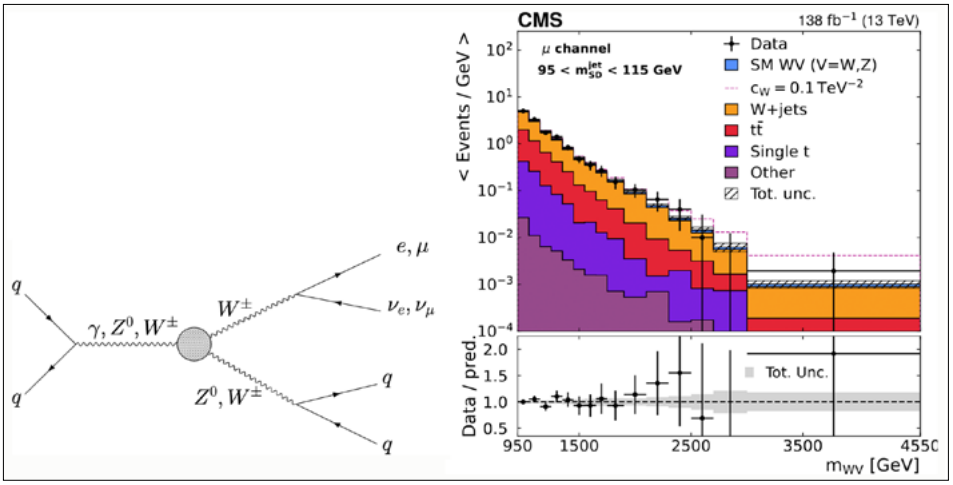


4. ábra. Egy azonos töltésű leptonpárt és két előrelőtt részecskesugarat tartalmazó esemény a CMS adataiban. A sárga ívelt vonalak a belső nyomkövető detektorban észlelt töltött részecskék pályáját mutatják, ahogy azok eltérülnek az erős mágneses térben. A jobbra mutató zöld vonal egy elektron útját mutatja, amely megáll a kaloriméterben, és leadja minden energiáját: a zöld trapézok mérete az egyes cellákban leadott energiával arányos. A balra mutató piros nyom egy müonhoz tartozik: a felső sarokban látható téglatest mutatja a müondetektor-elemet, amelyen áthaladt. A nyalábirányba mutató, narancssárga küppal kiemelt töltött részecskék kvarkokból született részecskesugarakat alkotnak. Az esemény topológiája megfelel az elektrogyenge bozonszórás hipotézisének: a vizsgált WW-szórásnak vagy az ennek hátttereként fellépő WZ-szórásnak, ha a Z bomlásából származó egyik elektront nem észleli a detektor. Az alsó sarokban felrajzolt diagramok mutatják, hogyan alakulhat ki az észlelt esemény ezekben a folyamatokban (*Forrás:* CMS/CERN, az esemény vizualizációjának szerkesztett változata)

Éppen ezekben a még megengedett eltérésekben bújhat meg az új fizika. Ha valamilyen ismeretlen részecske vagy kölcsönhatás módosítja a W- és Z-bozonok négyes csatolását, az a mért hatáskeresztmetszetben megjelenik – különösen magas, néhány TeV-es invariáns kétbozontömeg esetén. Az ilyen „anomális" (rendellenes) négyes mértékcsatolásokat (aQGC) – Fermi elméletéhez hasonlóan – egy effektív térelméleti keretben [17] írják le: a standard modell egyenleteit új tagokkal (ún. nyolcdimenziós operátorokkal) egészítik ki, amelyek az ismeretlen, nehezebb részecskék általunk elérhető energiákon érezhető hatását foglalják össze. Ezeknek a tagoknak az erősségét a mért adatokból lehet korlátok közé szorítani.

A négyes csatolások vizsgálata azonban nem választható el a hármas csatolásokétól, ahogy a *3. ábra* is illusztrálta. A bozonszórásban mindkét fajta csomópont szerepet játszik, és az effektív térelmélet legalacsonyabb rendű (ún. hatdimenziós) operátorai egyszerre módosítják mindkettőt: ugyanaz a tag, amely a hármas csomópont erősségét megváltoztatja, az elmélet mértékszimmetriája miatt elkerülhetetlenül a négyes csomópontét is eltolja.

A hármas csatolásokat a jóval gyakoribb kétbozonkeltésben lehet a legjobban mérni: ilyenkor egy kvark és egy antikvark ütközésekor keletkező virtuális bozon két W-bozonná vagy egy W- és egy Z-bozonná alakul. A CMS egy friss elemzése ezt a folyamatot vizsgálta olyan eseményekben, ahol az egyik W-bozon egy leptonra (itt elektronra vagy müonra) és egy neutrínóra, a másik bozon pedig egy kvarkpárra bomlik (*5. ábra* és a címlapkép). Mivel az új fizika hatása a legnagyobb energiákon lenne a legerősebb, az elemzés azokra az ütközésekre



5. ábra. Elektrogyenge mértékbozon-párkeltés (WV = WZ vagy WW) diagramja (balra) és a CMS által mért WV invariánstömeg-spektrum (jobbra). A színes egymásra ültetett hisztogramok a standard modell (SM) jóslatát mutatják, a szaggatott vonal ezen felül egy új fizikából származó lehetséges hozzájárulást, amelynek hatása nagy tömegeknél jelentős. A pontok statisztikus bizonytalansággal a mért adatok, amelyek nem mutatnak többletet a SM-en felül, és ezzel korlátozzák az új fizikát leíró paraméter (itt c_W) értékét [20]

összpontosított, ahol a nagy lendületű bozon bomlásából származó két részecskesugár a detektorban egyetlen széles sugárrá olvad össze; ezek azonosításához gépi tanuláson alapuló osztályozót fejlesztettünk ki. Bár eltérést a standard modelltől még nem észleltünk, a hármas mértékbozon-csatolások lehetséges anomáliáira minden korábbinál szigorúbb korlátokat szabtunk – ami a bozonszórás-mérések értelmezését is megkönnyíti [20].

Az eddigi mérések alapján mind a hármas, mind a négyes csatolásokat módosító paraméterek nullával konzisztensek, tehát az ismeretlen fizika a jelenlegi kísérleti érzékenységen belül egyelőre nem látszik.

A CMS nemrég az eddigi legátfogóbb összesítést is elkészítette: hét különböző mérés Run 2-es adatait egyetlen közös illesztésben kombinálta, egyszerre vizsgálva az azonos és az ellentétes töltésű W-bozonpárok, valamint a WZ- és ZZ-párok szórását – sőt a W-bozonokat elektromos töltésük szerint is szétválasztva. Mivel a közös illesztés figyelembe veszi a csatornák közötti összefüggéseket, érzékenyebb, mint az egyes mérések külön-külön, és az elektrogyenge kölcsönhatás szerkezetének egységes próbáját adja. Az eredmény itt is egyértelmű: valamennyi szórási folyamat gyakorisága összhangban van a standard modell jóslatával [22].

Az ELTE kutatócsoportja aktívan részt vesz a kétbozon-folyamatok mérésében a CMS-kísérletben, és most az LHC 3. adatgyűjtési periódusának nagyobb statisztikai erejű adatai felé fordítja a figyelmét.

Kitekintés

Az elektrogyenge bozonszórás és a Higgs-mérések tehát egyelőre ugyanazt üzenik: a standard modell a jelenlegi kísérleti pontosság mellett is meglepően jól írja le a valóságot. Ez azonban nem a vizsgálódás vége. A CMS Run 3 adatainak feldolgozása megkezdődött, és a Magas Luminozitású LHC (HL-LHC) az elkövetkező évtizedben nagyjából megtízszerezi a rögzített ütközések számát. Ez jóval érzékenyebbé teszi a kétbozon-folyamatok méréseit, és talán a Higgs-bozonpárok keltésének kimutatását – s ezzel a Higgs-potenciál alakjának közvetlen ellenőrzését – is lehetővé teszi.

A CERN következő tervezett nagy projektje a Jövő Köralakú Gyorsítója (Future Circular Collider, FCC), amely egy 91 km kerületű alagútban, első lépésben elektron-pozitron ütközésekben „Higgs-gyárként" működne: a Higgs-, a W- és Z-bozonok (valamint a t-kvark) tulajdonságait a mainál nagyságrendekkel pontosabban mérhetné meg [21], optimálisan folytatva és kiegészítve az LHC-n folyó kutatásokat.

A precíziós mérések mellett ugyanakkor ott a másik út is: az új részecskék közvetlen keresése. A sötét anyag és a szuperszimmetria nyomában járó kutatásokról sorozatunk következő részében számolunk be.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönetét fejezi ki az NKFIH TKP2021-NKTA-64, K143460 és 2026-4.1.1-MISSZIÓK-2026-00005 kutatási támogatásáért.

Irodalom

1. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a standard modell. *Fizikai Szemle,* 2008/7–8, 246.
2. Pásztor Gabriella: az Univerzum titkai és a Nagy Hadronütköztető: nyitott kérdések a részecskefizikában. *Fizikai Szemle,* 2023/2, 43.
3. Trócsányi Zoltán: a részecskefizika helyzete tíz évvel a Higgs-bozon felfedezése után. *Fizikai Szemle,* 2022/9, 269.
4. Trócsányi Zoltán: Hol tart a részecskefizika? *Fizikai Szemle,* 2019/7–8, 233.
5. Pásztor Gabriella: Higgs-vadászat @ CERN. *Fizikai Szemle,* 2012/10, 358.
6. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmei – rész: a Higgs-bozon keresése. *Fizikai Szemle,* 2021/2, 37.
7. Horváth Dezső: Séta a Higgs-bozon körül: az adatelemzés rejtelmei – rész: a Higgs bozon megfigyelése. *Fizikai Szemle,* 2021/3, 84.
8. Veszprémi Viktor: a Higgs-bozon kutatása: befejezett vagy csak most kezdődik? *Fizikai Szemle,* 2020/4, 118.
9. Pásztor Gabriella: Felfedező részecskefizika a CERN-ben: az elektrogyenge bozonoktól a titokzatos sötét anyagig. *Fizikai Szemle,* 2024/11, 381.
10. Horváth Dezső: Mi az antianyag, és hova tűnt? *Fizikai Szemle,* 2024/11, 369.
11. Pásztor Gabriella: Rejtett dimenziók nyomában az ATLAS detektorral. *Természet Világa,* 144 (2013) I. különszám, „Mikrovilág–2012", 53–58.
12. CMS Collaboration: Measurement of the Higgs boson mass and width using the four-lepton final state in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ =13 TeV. *Phys. Rev. D* 111 (2025) 9, 092014.

13. CMS Collaboration, Combined measurements and interpretations of Higgs boson production and decay in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ =13 TeV. *Rep. Prog. Phys.,* 89 (2026) 087801.
14. CMS Collaboration: Off-shell Higgs boson measurements: Yukawa couplings, self-coupling, compositeness, and width. *Phys. Rev. D* (beküldve), arXiv: 2607.23352 [hep-ex].
15. CMS Collaboration: Search for the rare Higgs boson decay H → Zγ in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ = 13 and 13.6 TeV. *Phys. Lett. B* (beküldve), arXiv: 2609.04402 [hep-ex].
16. CMS Collaboration: A portrait of the Higgs boson by the CMS experiment ten years after the discovery. *Nature,* 607, (2022) 60–68.
17. Péli Zoltán, Trócsányi Zoltán: Metastabil világegyetem. *Fizikai Szemle,* 2023/02, 40.
18. ATLAS and CMS Collaborations: Combination of ATLAS and CMS searches for Higgs boson pair production at $\sqrt{s}$ = 13 TeV. *Phys. Rev. Lett.,* 137 (2026) 131803.
19. G. P. Salam, L.-T. Wang, G. Zanderighi: The Higgs boson turns ten. *Nature,* 607, (2022) 41–47.
20. CMS Collaboration: Search for anomalous couplings in WW and WZ production with single-lepton final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV. *Phys. Lett. B* (beküldve), arXiv:2608.18245 [hep-ex].
21. Trócsányi Zoltán: Részecskefizikai kutatási lehetőségek a CERN tervezett gyorsítógyűrűjén. *Fizikai Szemle,* 2024/11, 388.
22. CMS Collaboration: Combination of vector boson scattering measurements in leptonic final states in proton-proton collisions at $\sqrt{s}$ = 13 TeV. *Phys. Lett. B* (beküldve), arXiv:2608.01289 [hep-ex].