

HORVÁTH DEZSŐ

# A részecskefizika sérült szimmetriái vajon megoldják-e a problémáit?

A részecskefizika elmélete, a Standard Modell szimmetriákon alapul, közülük azonban jó néhányat sért a gyenge kölcsönhatás. A Higgs-bozon felfedezése 2012-ben igazolta a részecsketömegek létrejöttének Brout–Englert–Higgs mechanizmusát spontán szimmetriasértéssel. Minden sikere ellenére, a Standard Modell elméleti nehézségekkel küszködik, amelyek további sérülő szimmetriákra utalnak. A cikkben áttekintjük ezeket a problémákat lehetséges elméleti megoldásukkal és a kísérletekkel, amelyek eddig egyiket sem támogatják.

A részecskefizika általánosan elfogadott elméletét, amelynek történetileg *Standard Modell* a neve, 45 éve építették, és azóta fejlesztik. Mértékszimmetriákon alapul, amelyek részben sérülnek. Wigner Jenő írta a mértékszimmetriákról: „A kvantumelméletben az invariancielvek még a klasszikus mechanikánál is messzebbre vezetnek... Ez a mértékszimmetria, természetesen, mesterséges képződmény, ahhoz hasonló, mint amikor az egyenleteinkbe egy kísérletet helyezünk helyzetmeghatározással. Az egyenletek megoldásának a kísérlet koordinátáitól függetlennek kell lennie, és emiatt nem világos, mire jók azok a koordináták.”

A sérült szimmetriák fontos részei a Standard Modellnek. *Frank Wilczek* írja: „Az elmélet központjában egy spontán sérülő mértékszimmetria áll. Ezen elv szerint a fizika alapegyenleteiben több szimmetria van, mint a való fizikai világban.” A Standard Modell több ilyen szimmetriát is tartalmaz: *Steven Weinberg véletlen szimmetriáknak* hívja őket. A legrégebben felismert sérülő szimmetria a részecskék világában a kiralitás vagy paritásértés, a kémiában Pasteur már egy évszázaddal korábban felfedezte. Azóta több sérülő szimmetria is előkerült, utoljára az elektromágneses és gyenge kölcsönhatást egyesítő, az elemi részecskék tömegét létrehozó *Brout–Englert–Higgs (BEH-)* mechanizmus spontán szimmetriasértését sikerült igazolni a Higgs-bozon felfedezésével. Vannak még feltételezett sérült szimmetriák is, a legismertebb közöttük a *szuperszimmetria*, amely az új részecskefizikai kutatások középpontjában áll.

A szimmetriák lehetővé teszik, hogy egyszerűen írjunk fel egyenleteket, meg

sérülés esetén is. Ennél azonban sokkal komolyabb a szerepük. *Emmy Noether* híres tétele értelmében a térelmélet minden folytonos szimmetriája fizikai mennyiségek megmaradásához vezet. Abból, hogy koordináta-rendszerünk kezdőpontját és szögét, valamint időmérésünk kezdetét tetszőlegesen felvehetjük (attól nem függhetnek a mérhető fizikai mennyiségek), következik a lendület, és a Dirac-egyenlet mértékinvarianciája, amely szerint a mérhető mennyiségek nem változnak meg, ha a rendszer állapotfüggvényét megszorozzuk egy  $e^{i\phi}$  imaginárius tényezővel, a fermionszám megmaradását vonja maga után.

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

**1. táblázat. A Standard Modell elemi fermionjainak három családja. A leptonokat és a kvarkokat a gyenge kölcsönhatás balra polarizált (L) párokba rendezi a  $T_3$  gyenge izospin kvantumszámával. Az antifermionok jobbra polarizált párokba rendeződnek. A kvarkállapotokat a gyenge kölcsönhatás keveri, azt jelzi az aposztróf**

Kölcsönhatás	relatív erősség	potenciál	élettartam (folyamat)	közz. bozon	$M$ (GeV)
Erős	1	$\propto r$	$10^{-23}$ s ( $\Delta \rightarrow p\pi$ )	8 gluon	0
Elektromágneses	$10^{-2}$	$\propto \frac{1}{r}$	$10^{-20} - 10^{-16}$ s ( $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ )	foton	0
Gyenge	$10^{-7}$	$\propto \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{R}}$ $R \sim \frac{\hbar}{M_W c}$	$> 10^{-12}$ s ( $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$ )	$W^\pm$ $Z^0$	80 91

**2. táblázat. A Standard Modell alapvető kölcsönhatásai. A harmadik oszlopban a potenciál távolságfüggése látható, a negyedikben jellemző bomlási folyamat élettartammal, az utolsó kettőben a közvetítő bozon és tömege a nagyenergiás fizika szokásos energiaegységében ( $1 \text{ GeV} = 1,602 \times 10^{-10} \text{ J}$ )**

Az érdeklődő olvasó sok idevágó információt, talán emészthetőbb részletességgel megtalál az [1] ismeretterjesztő könyvben, illetve a [2] tankönyvben.

## A Standard Modell kölcsönhatásai

A Standard Modell szerint világunkat két-féle elemi (azaz pontszerű, belső szerkezet nélküli) részecske alkotja, a fermionok és a bozonok, amelyeket belső perdületük, spinjük különböztet meg egymástól. A redukált Planck-állandó,  $\hbar = 1,055 \times 10^{-34}$  Js egységében mérve a bozonok spinje egész,  $S = 0, 1, 2, \dots$ , a fermionoké pedig fél-egész,  $S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \frac{5}{2}, \dots$ . Az elemi fermionokat három családba soroljuk, családonként egy-egy pár kvarkot és leptont tartalmaznak (**1. táblázat**). Valamennyi fermionnak létezik antirészecskéje azonos tulajdonságokkal, de ellenkező töltéssel. A leptonok szabadon is léteznek, de a kvarkok csak három-kvark közötti állapotaként (ezek a *barionok*, mint a neutron vagy a proton) vagy kvark+antikvark kötött állapotban fordulnak elő (*mezonok*). Három antikvark természetesen antibariont alkot, mint amilyen az antiproton. A kvarkokból összetett részecskéket, a barionokat és mezonokat együtt hadronoknak hívjuk, ezért kapta a CERN óriási, protonokat és nehéz ionokat ütköztető gyorsítóberendezése a *Nagy hadronütköztető* (LHC, Large Hadron Collider) nevet.

Az elemi fermionokat tekintjük az anyagot alkotó részecskéeknek, az elemi bozonok viszont a kölcsönhatásokat közvetítik (**2. táblázat**). A három alapvető kölcsönhatást lokális (azaz a tér-idő koordináta-rendszerben meghatározott módon változó) mértékinvariációkból származtatjuk. Az erős kölcsönhatás mértékinvariációja az SU(3) szimmetriacsoportnak felel meg: a speciális (egységnyi determinánsú), unitér ( $U^{-1} = U^\dagger$ ),  $3 \times 3$ -as mátrixokénak. Az SU(3) globális mértékinvariancia vezet az erős kölcsönhatás háromféle töltésének (ezt a színlátással való analógia miatt *színtöltésnek* hívjuk) megmaradásához, a lokális SU(3) pedig magához a hadronokat összetartó erős kölcsönhatáshoz. Mivel a kvarkok közötti erős kölcsönhatás a háromféle színtöltés cseréjét jelenti, közvetítéséhez 8 bozonra, a gluonokra van szükség, a  $3 \times 3$ -ból egy színkombináció (a három szín egyenletes, színtelen keveréke) ugyanígy kiesik.

Az elektromágneses kölcsönhatás leírásához természetesen adódik az U(1) (itt nem kell az S előtag, mert az  $1 \times 1$ -es mátrixok képzetes számok) a gyengééhez pedig az SU(2) szimmetria magától adódik, de önmagában egyik sem működik. Egyesíteni kellett a kettőt, alkalmazni rá a spontán szimmetriásértés BEH-mechanizmusát, majd újra szétválasztani elektromágneses U(1)-re, és a megmaradt rész lett a gyenge kölcsönhatás pontos leírása. Így sikerült létrehozni mind a fermionok, mind pedig a gyenge kölcsönhatást közvetítő

tő bozonok tömegét, az utóbbiak minden egyéb feltételezés nélkül kiszámíthatók lettek a kölcsönhatás erősségéből. A közvetítő bozonok virtuálisak, amikor a kölcsönhatásban álló fermionok között *közlekednek*: a nulla tömegű foton véges tömeggel kell, hogy rendelkezzen, amikor energiát és lendületet visz át, és a 80 GeV tömegű W bozon a saját tömegénél csaknem négy nagyságrenddel kisebb energiát közvetít a neutron béta-bomlásakor. Mindezt a Heisenberg-féle határozatlansági összefüggés teszi lehetővé elegendően kis távolságon és rövid ideig. Ugyanakkor ezek a bozonok a valóságban léteznek és kísérletileg tanulmányozhatók, bár a fotonon kívül csak a bomlásaik eredményében. A foton nem hordozza az elektromos töltést, de a gluon hordozza a saját töltését, ezért a gluonok egymással kölcsönhatásba léphetnek. A gyenge kölcsönhatás valamennyi fermionra hat, az elektromágneses a töltöttekre, az erős pedig a kvarkokra. Matematikai nehézségek elkerülése végett a **2. táblázat** bozonjain kívül még szükség van egy olyan bozonra, amelynek a tömegén kívül valamennyi jellemző tulajdonsága nulla (töltések, spin), ezt *skalár bozonnak* hívjuk, és a BEH-mechanizmus szolgáltatja a tömegképződés melléktermékeként: ez a Higgs-bozon.

## Paritássértés

Ha mindhárom térkoordinátánk előjelét megfordítjuk, azaz ellenkezőre igazítjuk a Descartes-koordináta-rendszer tengelyeit, az egyenértékű azzal, mintha csak az egyik tengelyt fordítanánk meg, tehát jobbkezesből (amikor az x-tengelyt az y-ba forgatva a jobb csavar z irányba mutat) balkezes rendszerbe térünk át. Ha páros egy függvény, akkor ilyenkor nem vált előjelet, a páratlan viszont igen. Az egyszerű fizikai rendszerek függvényei általában vagy párosak, vagy páratlanok, de bármelyik függvény szétbontható páros és páratlan függvény összegeként, például a sorfejtési tagok szétválogatásával (mint a Taylor-sor páros és páratlan kitevőjű tagjai). A  $P$  paritásoperátor megváltoztatja a négyes tér-idő-koordináta előjelét:

$$P\psi(r, t) = \psi(-r, t); \quad P^2 = 1,$$

és természetesen unitér. Gömbszimmetrikus potenciál nem tudja megváltoztatni az állapot paritásállapotát, tehát az elektromágneses kölcsönhatás biztosan megőrzi a paritást. A részecskékhöz saját paritás rendelhető, a fotoné például alapállapotban negatív, azaz a  $P$  operátor a függvényét előjelváltásra készíti.

A paritássértés felfedezése paradoxonnal kezdődött: megfigyeltek két teljesen azonos, de különböző belső paritású ré-

szecskét, az egyik ugyanis két fotonra bomlott, a másik pedig háromra. 1956-ban Lee és Yang arra jutottak, hogy ez talán egyazon részecske, csak a paritásszimmetria sérül gyenge kölcsönhatásban. Óriási meglepetésre, két kísérleti csoport ezt hamarosan meg is mutatta. Kiderült, hogy a gyenge kölcsönhatás maximálisan sérti a tükröszimmetriát: a béta-bomlás kizárólag balra polarizált (fizikus szlengben *balkezes*) részecskéket és jobbra polarizált antirészecskéket kelt. Allítólag *Wolfgang Pauli* így fakadt ki akkor: „Nem tudom elhinni, hogy Isten gyenge balkezes!” A jelenséget viszonylag könnyű volt beépíteni az elméletbe: formálisan vetíteni kellett a részecskék áramát balra, az antirészecskéket pedig jobbra polarizált formába. Ezt jelképezi az **1. táblázat** L (left, bal) indexe a fermionpárok jele mellett.

## CPT-invariancia és CP-sértés

A paritáson kívül még két másik tulajdonságot is tükrözhetünk az elemi részecskék állapotfüggvényében: ellenkezőjére fordíthatjuk az idő folyását (*T-tükrözés*, az angol *time*, idő után) és a résztvevő részecskéket antirészecskékké helyettesíthetjük (*C-tükrözés*, az angol *charge*, töltés alapján). A részecskefizika elméletének egyik legalapvetőbb tétele, hogy a mérhető fizikai mennyiségek nem változhatnak mindhárom tükrözés egyidejű végrehajtásakor. Ez a *CPT-szimmetria* rendkívül szigorúan érvényesül, kísérletileg igen pontosan igazolták, és igencsak súlyos elméleti nehézségekkel járna, ha sérülne. Elektron és antirészecskéje, a pozitron kölcsönhatása szétsugárzáshoz vezet, amely matematikailag pontosan leírható úgy, hogy beérkezik egy elektron, kisugároz két vagy három foton, majd térben és időben kihárít a képből, a pozitron ugyanis egyenértékű egy ellenkező irányban haladó elektronnal.

Wigner Jenő szerepe itt is úttörő volt. Megmutatta, hogy az ilyen tükrözési invariancia vagy unitér, vagy antiunitér, és az időtükrözése antiunitér, azaz egy komplex konjugálást (egyszerű esetben az imaginárius egység előjelváltását) von maga után. Ezt a legegyszerűbb a  $P$ - és  $T$ -tükrözés összehasonlításával megérteni. A  $P$ -tükrözés a helykoordinátát ellenkezőjére fordítja, tehát megváltoztatja a hely- és a lendületvektor előjelét, a vonatkozó Heisenberg-összefüggés a hely és lendület együttes meghatározására tehát rendben marad, mert a két  $(-1)$  szorzó közömbösíti egymást. Ugyanakkor a  $T$ -tükrözés csak az idő előjelét változtatja meg, az energiát nem, tehát elrontja az energia-idő összefüggést, amely az állapotfüggvényben

$e^{-iEt}$  fázisszorzóként jelenik meg, hiszen az energia nem lehet negatív. A problémát az időtükrözéssel együtt alkalmazott komplex konjugálás oldja meg, azzal az energia pozitív marad.

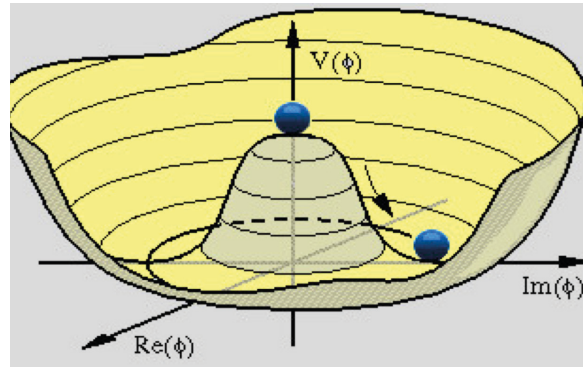
Az elemi részecskék világában az időtükrözési invariancia gyakorlatilag követelmény, azonos valószínűséggel várjuk a mikroreakciók lefolyását előre és hátra. A paritásértés felfedezése után a fizikusok ezt is megkérdőjelezték. Ha elfogadjuk a CPT-szimmetriát, akkor a T-szimmetriából a CP-invariancia következik. A kísérletek megmutatták, hogy a gyenge kölcsönhatás a CP-szimmetriát is sérti, de csak igen kevéssel, nem maximálisan, mint a paritásért. Mára az időtükrözési szimmetria sértését is sikerült kísérletileg megmutatni.

A kvarkok erős kölcsönhatásban keletkeznek, de gyenge kölcsönhatásban bomlanak, és a két kölcsönhatás sajátállapotai különbözőek, a gyenge tehát kevert állapotok érzékeli a kvarkok erős kölcsönhatásban létrejövő állapotait. A CP-szimmetria sértését Kobayashi és Maskawa építette be az elméletbe: a kvarkok gyenge keveredését leíró transzformációs mátrixban egyetlen fázisszorzó elég volt erre.

### A spontán szimmetriasértés BEH-mechanizmusa

Az üres tér, a vákuum (amely persze a valóságban soha nem üres) tökéletesen szimmetrikus, minden irányban azonos. A BEH-mechanizmus spontán sérti ezt a szimmetriát egy olyan potenciáeloszlás behelyezésével, amelynek minimuma nem a nullában található. Ezt kiválóan szemlélteti a sombrero (1. ábra), az ugyanis tökéletesen szimmetrikus a függőleges tengelye körül, amíg a csúcspontra helyezett golyó le nem gurul a völgybe. A rendszer tehát spontán megsérti saját szimmetriáját.

A spontán szimmetriasértést csaknem egyidejűleg többen is bevezették 1964-ben, elsőnek R. Brout, F. Englert és P. W. Higgs. Négykomponensű mezővel tölti ki a teret, amely így négy szabadsági fokot ad az elméletnek, három közülük tömeget teremt a gyenge kölcsönhatást közvetítő bozonoknak, a negyedikből pedig létrejön a Higgs-bozon. A BEH-mechanizmus lehetővé tette a gyenge bozonok tömegének kiszámítását, létrehozta az elméleti számítások számára fontos skalár bozont és lehetővé tette a fermionok tömegének bevezetését az elméletbe. Habár a Higgs-bozont csak 48 évvel a BEH-mechanizmus születése után sikerült felfedezni, a részecskefizikusok túlnyomó többsége biztos volt benne, hogy meg fogják találni. Azért nem min-



1. ábra. A BEH-mechanizmus szemléltetése. A potenciál hengerszimmetriáját nem rontja el a csúcsára helyezett golyó, annak szükségszerű legurulása viszont igen. A hengerszimmetria ugyanakkor lehetővé teszi, hogy a koordináta-rendszer elforgatásával a golyó a  $\Phi$  komplex tér  $(v,0)$  minimumába kerüljön

denki: Stephen Hawking a felfedezés bejelentésekor közölte: „Úgy látszik, vesztettem 100 dollárt”.

A Standard Modell elektrogyenge kölcsönhatását leíró, igencsak bonyolult energiasűrűség rendkívül tömören felírható a következő formában, amely elterjedten látható pótlókon és kávésbögréken a CERN környékén:

$$-\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu} + i\bar{\psi}\not{D}\psi + \psi_i y_{ij}\psi_j\Phi + (D_\mu\Phi)^2 - V(\Phi)$$

Az első tag a mező (erőtér) saját energiája, a második a  $\psi$  állapotfüggvényű fermion kölcsönhatása a mezővel, ahol a  $\not{D}$  az erőtér eloszlását is tartalmazó kovariáns differenciálást jelöli. A harmadik tag generálja a fermion tömegét a  $\Phi$  BEH-térrel kölcsönhatásban, negyedik a gyenge bozonokét, az utolsó pedig a BEH-mező energiasűrűsége.

### A Higgs-bozon keresése és felfedezése

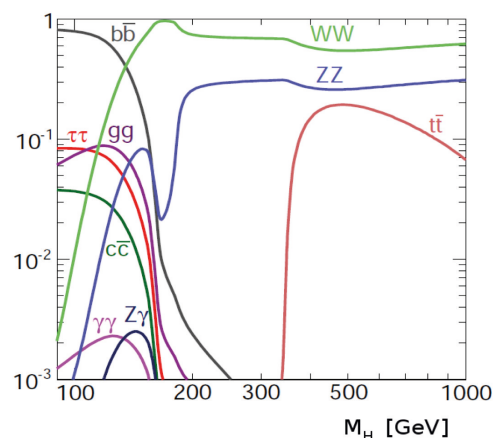
Ugyan Peter Higgs azt írta: „Igazából csak 1972-ben kezdődött az életem bozonként”, de a BEH-mechanizmust, minden sikere ellenére, addig nem fogadhatták teljesen el, amíg termékét, a Higgs-bozont meg nem figyelik. Négy évtizeden át építettek egyre nagyobb részecskegyorsítókat a megfigyelésére. A Standard Modell Higgs-bozonja az egyetlen létező skalár részecske: minden kvantumszáma nulla, a tömege az egyetlen mérhető tulajdonsága. A Standard Modell paramétereinek részle-

tes kísérleti tanulmányozása megmutatta, hogy a Higgs-bozon tömegének 100 GeV környékén kell lennie, attól ugyanis a többi paraméter is függ.

Ehhez az értékhez a CERN-ben a LEP elektron-positron ütköztető jutott a legközelebb. A statisztika gonosz volt a fizikusokkal: a négy LEP-kísérlet közül az egyik majdnem kimutatott egy 115 GeV tömegű Higgs-bozont, de a másik három ugyanott semmit nem észlelt. A megfigyelés komoly izgalmat váltott ki, nagyon sok fizikus kérte a CERN főigazgatójától a LEP működésének

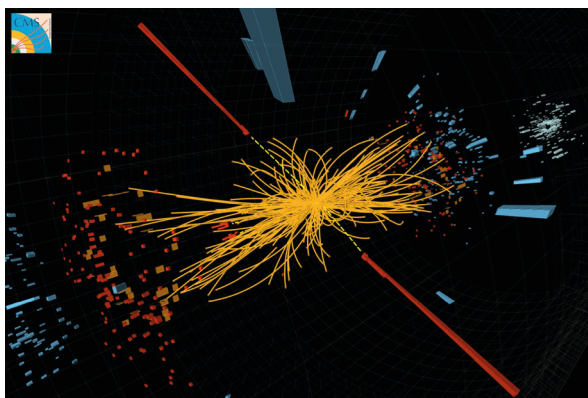
meghosszabbítását, de az nem engedett, mert kellett az alagút az LHC-nak, amelynek már javában épültek a részegységei.

A LEP-hez hasonlóan, az LHC-nak is négy ütköztetési pontja van, de az elődjével ellentétben, a kísérletei meglehetősen különböznek. Kettő, az ATLAS (A Toroidal Lhc ApparatuS) és a CMS (Compact Muon Solenoid) kezdetben kimondottan a Higgs-bozon felfedezésére összpontosított, az LHCb a világegyetem anyag-antianyag aszimmetriájára próbál fényt deríteni a b-kvark fizikája tanulmányozásával, a negyedik, az ALICE (A Large Ion Collider Experiment) pedig a világegyetem keletkezésekor feltételezett őanyagot próbálja rekonstruálni nagyenergiás nehézion-ütköztetéssel. Az ATLAS a világ legnagyobb



2. ábra. A Standard Modell Higgs-bozonjának lehetséges bomlási csatornái: a bomlási módusok relatív gyakorisága a Higgs-bozon tömegének függvényében. Vegyük észre, milyen kicsiny a legfontosabb felfedezési csatorna,  $H \rightarrow \gamma\gamma$  kétfotonos bomlás részaránya

együttműködése és a CMS (amelynek a szerző is tagja) szorosan a nyomában van: a CMS-nek 2016 végén 5250 résztvevője volt (közötte 1916 MSc- és PhD-diák, valamint 1274 mérnök és technikus) 45 ország 198 intézményéből, a 40 magyar résztvevőt a budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont és az Eötvös Loránd Tudományegyetem, valamint a debreceni Atommagkutató Intézet és a Debreceni Egyetem delegálja.



**3. ábra.** CMS-esemény két fotonnal, amelyek valószínűleg a Higgs-bozon bomlásánál keletkeztek. A protoncsomagok ütközésekor óriási a kibocsátott hadronok száma, amint azt a töltött részecskék mágneses mezőben görbült pályája mutatja. A fotonok nem hagynak nyomot (egyeses szaggatott vonal) és nagy energiájuk ellenére, amelyet a hosszú hasábok jelképeznek, teljes egészében elnyelődnek az elektromágneses észlelőrendszerben. A kék hasábok a hadronok észlelését mutatják a hadrondetektorban, a semlegesekhez ott sem tartozik pályanyom

A Higgs-bozon tömegét 100 GeV környékére vártuk. A LEP viszont már a 114 GeV alatti területet kizárta, fel kellett tehát készülnünk a legbonyolultabb, 120 GeV-es tömegtartomány vizsgálatára, ahol rengeteg egymással versengő reakció lehetséges (2. ábra). Már a korai szimulációk megmutatták, hogy a két legígéretesebb felfedezési csatorna a  $H \rightarrow \gamma\gamma$  és a  $H \rightarrow ZZ$ , amikor mindkét Z-bozon két-két töltött leptonra, elektron- vagy müonpárra bomlik. Mindkét reakció valószínűsége nagyságrendekkel kisebb, mint a hadronos bomlásoké, de azokat az LHC óriási hadronhárterétől nagyon nehéz elválasztani (3. ábra).

2012. július 4-én, a melbourne-i nagyenergiás óriáskonferencia kezdetén, az ATLAS és CMS kísérlet vezetői beszámoltak a CERN-ben (természetesen internetes kapcsolatban az ausztrál konferencia nagytermével és az egész világgal) a Higgs-bozon felfedezéséről. A két nevezetes bomlási csatornában a két kísérlet egyenként a becslült bizonytalanság öt-szörösével látott 125 GeV-es tömegnél a

Higgs-bozontól várt tulajdonságokkal egy új részecskét. A későbbi adatok természetesen messzemenően megerősítették a felfedezést. Az új bozon valamennyi tulajdonsága, keletkezési és bomlási valószínűségei a különböző folyamatokban megfelelnek a Standard Modell előrejelzéseinek. Ugyanakkor a megfigyelt 125 GeV-es tömeg kétségbe ejtette a részecskefizikusokat, mert túl könnyű és túl nehéz volt. Mint tudjuk, közvetlen köze van a vákuumhoz, viszont viszonylag kis tömege annak stabilitási hátterére helyezi: nem elképzelhetetlen, hogy többféle vákuumállapota is van és elvben át is csúszhat a világunk egy másikba. Ezzel Hawking is riogatta az emberiséget, holott az ősrobbanás után olyan óriási energiák tobzódtak, hogy ha van is másik vákuumállapota a BEH-térnek, a világunk biztosan a minumba került.

### A Standard Modell problémái

A Higgs-bozon felfedezésével a részecskefizika látszólag lezárta fejlődését, hiszen valamennyi nagyenergiás kísérleti adat megbízhatóan kiszámítható a Standard Modell segítségével. Ez utóbbi

azonban valamilyen értelemben kétségbeejtő, hiszen a modellnek jó néhány elméleti hiányossága van, amelyek közül néhányat felidézünk.

– Nem ad számot a gravitációról, amely rendkívül különbözik a részecskefizika három kölcsönhatásától.

– Nem képes leírni a kozmológiai megfigyeléseket, a sötét anyagot, a sötét energiát és az antianyag hiányát a világegyetemben.

– A BEH-mechanizmus nem származtatja, csak megengedi a kvarkok és a töltött leptonok tömegét, és az a megfigyelés, hogy a neutrínók is tömegesek, teljesen elmentmond neki.

– Nem tudja megmagyarázni a neutrínó-oszcillációt, ahhoz ugyanis szükség volna a gyengén kívül még egy kölcsönhatásra a neutrínók számára, de ilyen nem ismeretes.

– Rejtélyes, hogy lehet a protonnak pontosan feles a spinje, holott a tömege túlnyomó részét a benne gomolygó, 1-es spinű gluonok és virtuális kvark-antikvark párok adják.

– Honnan jön a bűvös hármas szám? A kvarkok harmados töltése, a három fermioncsalád (a kísérletek szerint nincs több) és az erős kölcsönhatás három színtöltése.

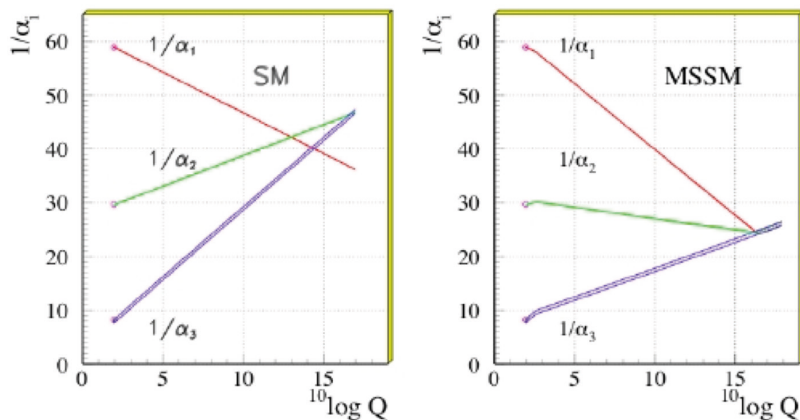
– A Standard Modellt a világunkat 19 szabad paraméter segítségével írja le. Ezek tömegek, a kölcsönhatások erősségére jellemző csatolási állandók és keveredési paraméterek. Ezt lehet soknak tekinteni, de hozzájön még hét, ha a neutrínóállapotok keveredését is beleszámoljuk.

– Talán a legsúlyosabb a *hierarchia-probléma*. A Higgs-bozon tömegének számításánál eszementen óriási járulékok jelennek meg (ún. *sugárzási korrekciók*), amelyekről valahogyan meg kell szabadulni.

### Szuperszimmetria

Ezt a modellt, amely a leírt problémák egy részére jó megoldást kínál, a hierarchia-probléma sugallja. Azok a bizonyos óriási korrekciók kioltják egymást, ha a fermionok és a bozonok párokban léteznek azonos tulajdonságokkal, csak különböző spinnel. Mivel a gyenge kölcsönhatás különbséget tesz a balra és jobbra polarizált részecskék között, a Standard Modell minden fermionjához két bozont, és minden bozonjához egyetlen fermiont kell rendelnünk. Az utóbbit úgy érjük el, hogy azok a fermionok saját antirészecskéi (Majorana-részecskék) lesznek. Ez a SUSY-nak becézett szimmetria nyilvánvalóan sérül, hiszen ilyen részecskéket nem látunk, ha léteznek is, sokkal nagyobb a tömegük, mint a Standard Modell részecskéié. SUSY lehetővé teszi a gravitáció csatolását a mértékkölcsönhatásokhoz,  $S=2$  spinű közvetítő bozonnal, amelyet *gravitonnak* neveznek. Szimpatikus jelöltet kínál a sötét anyagra. Ha ugyanis megmarad a szuperszimmetria saját kvantumszáma, akkor a legkönnyebb SUSY-részecske stabil lesz, nincs hova bomlania. Ugyanakkor nem is csomósodhat, mert saját antirészecskéje lévén, szétsugároz, ha túl közel kerül egymáshoz.

A SUSY-modelleknek legalább két különböző, két komponensű BEH-mezőre van szükségük, hogy megalkothassák az alsó és felső típusú, balra és jobbra polarizált fermionok bozontársainak tömegét. Mivel ez 8 mezőt jelent, és hármat elhasználnunk a gyenge bozonok tömegére, a maradék szabadsági fok 5 Higgs-bozont hoz létre, három semlegest és két töltöttet. A legkönnyebb semleges Higgs-bozon tömegét a becslések 100 GeV alá várták, és annak hasonlóan kell lennie a Standard Modelléhez, ebben az értelemben találtak túl nagyok a mért tömeget. Az is család-



4. ábra. A három mértékkölcsönhatás csatolási állandója (erőssége) az energiacsere függvényében. Balra: A Standard Modell csatolási állandói ugyan összetartanak, de nem találkoznak. Jobbra: A Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell három csatolási állandója közös pontban találkozik  $10^{16}$  GeV körül: azt hívjuk a nagy egyesítés energiájának

dást okozott, hogy az LHC-ban elérhető energián nincs másik Higgs-bozon, hiszen annak felfedezése jelentősen növelte volna a SUSY hitelt. Ugyanakkor óriási pozitívum, hogy a *Minimális Szuperszimmetrikus Standard Modell* nagy energián egyesíti a kölcsönhatásokat (4. ábra), amire a Standard Modell viselkedése ugyan utal, de azt nem teljesíti.

Sajnos, a Standard Modell minimális kiterjesztése 105 új paramétert visz be a Standard Modell 19-e mellé, ami csaknem kezelhetlenné teszi a modellt. A nagy részecskegyorsítóknál évtizedek óta keressük nyomait. Született néhány rendkívül leegyszerűsített változata, amely feltételezte, hogy a nagy egyesítés energiája felett az összes részecske tömege azonos, de ezeket a kísérleti adatok nem támogatják. Mivel a sötét anyag jelöltje, a legkönnyebb SUSY-részecske nem észlelhető, keletkezése nagy hiányzó lendületet jelent az észlelt eseményben, például erősen féloldalas eseményt. A leptonos reakciók neutrínói hasonlóan jelentkeznek, tehát ez a technika is nagyon pontos számításokon alapuló szimulációkat igényel. A jelenlegi keresési stratégia az, hogy egyszerű, jól leírható, de nagy hiányzó energiával jelentkező eseménytípusok tanulmányozásával eltéréseket keressünk a Standard Modellel végzett szimulációktól.

A szuperszimmetria, ha egyáltalán igaz, mindenképpen sérül, hiszen ilyen részecskéket nem látunk a jelenlegi gyorsítókkal elérhető energiákon. A legkönnyebb SUSY-részecskét a két nagy LHC-kísérlet gyakorlatilag már 2 TeV (2000 GeV) energia alatt kizárta. Ennek ellenére máig ez a Standard Modell legszimpatikusabb kiterjesztése, hiszen nagy elődjéhez, a BEH-

mechanizmushoz hasonlóan, egy szimmetriasértés bevezetésével számos problémát megoldani látszik.

### Neutrínótömegek

A neutrínók repülés közbeni egymásba alakulása, a neutrínó-ízregzés (oszilláció) megfigyeléséből az következik, hogy a Standard Modell háromféle neutrínója között két tömegkülönbséget látunk, közülük tehát legalább kettőnek véges (bár nagyon kicsi) tömege van, és az nem életszerű, hogy az egyik éppen nulla tömegű legyen. A Standard Modell ezzel szemben kizárólag nulla tömegű neutrínókkal működik. Jogos a kérdés, mi az akadálya annak, hogy a többi elemi fermionhoz hasonlóan, a neutrínókra is beírjunk tömegtagokat az energiasűrűségbe? A nehézség az, hogy a tömeges neutrínóknak jobbra polarizált részecske- és balra polarizált antirészecske-árama is lesz, amelyek nem vehetnek részt a Standard Modellben a neutrínó számára egyedül rendelkezésre álló gyenge kölcsönhatásban. Ráadásul az egyetlen kölcsönhatás kizárja a neutrínó-ízregzéshez szükséges kétféle sajátállapotot is. A neutrínókat tehát az ízregzés és a véges tömeg többszörösen kivezeti a Standard Modell kereteiből, és azon a szuperszimmetria elmélete sem segít.

### Antianyag a világegyetemben

Az ősrobbanás után, a sugárzási időszakot követő lehűléskor részecskének és antirészecskének egyforma mennyi-

ségben kellett keletkeznie, a csillagászok viszont nem látnak antianyag-galaxisokat és a kozmikus sugarakban sem lehet kimutatni jelentősebb mennyiségben antibarionokat. Ezt az aszimmetriát nem magyarázza semmilyen kézzelfogható elv. Az egyik ezzel kapcsolatos elképzelés például az, hogy az ősrobbanás elején lezajló gyors felfűvódás eltávolított egymástól térrészeket, amelyek némelyike valamivel több részecskét, mások meg több antirészecskét tartalmaztak, és a fénysebességnél gyorsabb tágulás következtében ezek egymás eseményhorizontján kívül kerültek, tehát többé nem láthatók egymás számára.

Ha volna különbség részecske és antirészecske között, az magyarázná ezt az aszimmetriát, de a kísérletek azok egyenértékűségét bizonyítják igen nagy pontossággal. A CERN megépítette a kissé fellegzősen *Antianyaggyárnak* nevezett Antiproton-lassító berendezését, ahol jelenleg hat kísérlet vizsgálja a részecskék és antirészecskék egyenértékűségét kimondó CPT-szimmetria teljesülését, egyre növekvő pontossággal, amely jelenleg már elérte a  $10^{-9}$  relatív értéket.

### Összefoglalás

A részecskefizika elmélete, a Standard Modell tartalmaz jó néhány sérülő szimmetriát. A tértükrözési paritás-szimmetriát a gyenge kölcsönhatás maximálisan sérti, és az időtükrözést is, de sokkal kisebb mértékben. Az elemi részecskék, a fermionok és a bozonok tömege az elmélet szerint spontán szimmetriasértés következménye. Mindez ma már a Standard Modell szerves része megfelelő matematikai háttérrel és kísérleti bizonyítással.

Valamennyi sikere ellenére azonban a Standard Modell elméleti nehézségekkel, hiányosságokkal küszködik, amelyek megoldására további szimmetriasértő modelleket javasolnak, közöttük a sérülő szuperszimmetria a legnépszerűbb. Az kétségtelenül jó néhány problémát megoldana, de korántsem valamennyit, és semmiféle kísérleti bizonyíték nincs a létezésére. A kísérleti részecskefizikában komoly erőfeszítések történnek ezek tisztázására.

### Irodalom

- [1] Horváth Dezső: *A Higgs-bozon*, Typotex, 2017.
- [2] Horváth Dezső és Trócsányi Zoltán: *Bevezetés az elemi részek fizikájába*, Typotex, 2017.