

Ismerd meg!



Részecskefizika és furcsaságai

Részecskefizikus lévén kedvenc tudományterületem a részecskefizika. Ezt azért bocsátom előre, mert a továbbiakban annak teljesen elképesztő, helyenként ellentmondásos tulajdonságairól, paradoxonjairól fogok írni. Miheztartás végett, hadd idézzem *Richard Feynman** egyik mondását: *Paradoxon az, amikor a Természet másmilyen, mint amilyennek szerintünk lennie kellene*. Vegyük tehát sorra a furcsaságokat. Mindenekelőtt azonban fel kell hívnom a kedves olvasó figyelmét arra, hogy a fizika kísérleti tudomány, igazi nyelve a matematika, a fizikusok ezért szeretik, és az iskolások többsége ezért utálja. Amit írok, szavak, de azok csak mankók, az időnként sánta szöveg mögött pontos matematikai számítás és az azt igazoló kísérleti tapasztalat van. Írásom célja felkelteni az olvasó érdeklődését az igazi fizika iránt.

Elemi alkatrészek

Világunk legkisebb alkotó elemeit elemi részecskéknek szoktuk nevezni, de már ekörül is sok a vita. Vannak ugyanis anyagi jellegű és kölcsönhatást hordozó részecskék, az előbbieket *Enrico Fermi* után fermionoknak, az utóbbiakat *Satyendra Bose* nyomán bozonoknak nevezzük. Világunkban mindössze két olyan anyagi részecske létezik, amelyik nem bomlik más részecskékre, tehát állandó: a hidrogénatomot alkotó elektron és proton. Minden más részecske rájuk bomlik az icipici semleges neutrínókat kivéve, amelyek összevissza röpködnek, és egymásba alakulnak. Igazán persze akkor elemi egy részecske, ha nincsenek alkatrészei, és ez az állandó anyagi részecskéink közül csak az elektronra igaz, mert a proton három, jelen tudásunk szerint tényleg elemi részecskéből áll, a kvarkokból, amelyek azonban szabadon nem létezhetnek. Ez utóbbit úgy kell érteni, hogy nem figyeltük meg, és remek elméletet dolgoztunk ki arra, miért nem, de erre még visszatérünk.

* Az írásomban emlegetett fizikusokról bőséges irodalom áll rendelkezésre a Wikipédián.

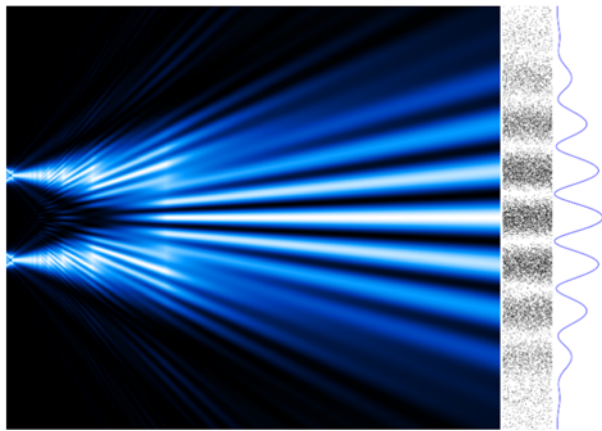


Léteznek egyáltalán részecskék?

Az esetleges belső szerkezet alkatrészeit úgy tudjuk megfigyelni, ha nagy erővel ütköztetjük a részecskéket: a proton belsejében úgy figyelték meg a kvarkokat, hogy nagy energiájú elektronokkal bombázták. A részecskék hullámként mozognak, csak akkor viselkednek önálló részecskeként, amikor keletkeznek vagy elnyelődnek. A hullámelmélet szerint, amelyet egy igazi francia herceg, *Louis de Broglie* dolgozott ki (a hercegek között valószínűleg az egyetlen Nobel-díjas), minél nagyobb a részecske energiája, annál rövidebb hullámhosszon mozog, tehát annál érzékenyebb az anyagszerkezet apró részleteire, hiszen a hosszabb hullámhossz megkerüli a kis alkotóelemeket. Mivel a részecskék picik, a vizsgálathoz nagy energia kell, amelyet hatalmas részecskegyorsítóban állítunk elő. A részecskefizikát ezért nagyenergiás fizikának is szokták nevezni. A protont tehát nem is szabad elemi részecskének nevezni, hiszen az elektron egészen nagyonak és összetettnek látja.

Látjuk tehát, hogy meg kell kérdőjeleznünk a részecske fogalmát, hiszen hullámként közlekedik. Ez nemcsak valamilyen matematikai trükk, hiszen áll az az elképesztő megfigyelés, hogy egy magányos elektron egy fésű valamennyi résén egyidejűleg átmegy, és csak az elnyelődéskor lesz belőle tisztességes, oszthatatlan, pontszerű elektron. Az elemi részecskék pontszerűek abban az értelemben, hogy

méréseink jelenlegi képessége mellett, ami 10^{-18} méter méretnek felel meg, nem észlelhető a méretük, tehát kisebbek, mint 0,000 000 000 000 000 001 m. A hullámként kezelés teszi lehetővé, hogy leírjuk egy részecske más részecskévé alakulását, ezért váltotta fel a múlt század végén a részecskék mozgását leíró hagyományos kvantummechanikát a kizárólag hullámcsomagokkal dolgozó kvantummező-elmélet.



*A kétreses kísérlet:
az elektronok egyenként is hullámként haladnak át
mindkét résen, és csak az észlelésükkor fogódnak be
pontszerű részecskéként, kirajzolva
a hullámokra jellemző képet.*



És az antirészecskék?

Paul Dirac, angol elméleti fizikus 1928-ban felírt egy szebb egyenletet az elektron mozgására. Van, aki kétségbe vonja a szépség szerepét a fizika fejlődésében, de az tagadhatatlan, még többször visszatérünk erre a kérdésre. Az zavarta őt, hogy a kvantummechanika alapjául szolgáló, Erwin Schrödinger által felállított hullámegyenlet nem kezelte egységesen a három térkoordinátát és az időt, pedig Einstein speciális relativitáselmélete szerint azok egységes tér-időként szolgálnak.

Először négyzetes egyenletet kapott (ma már az is tankönyvi anyag), de a ma róla elnevezett egyenletet úgy nyerte, hogy négyzetgyököt vont belőle. Mint tudjuk, a 4-nek két négyzetgyöke is van, hiszen a $(+2) \cdot (+2)$ és a $(-2) \cdot (-2)$ egyaránt $+4$ -et ad. Dirac tehát kétféle elektront kapott, egy tisztességes, negatív töltésű és pozitív tömegűt, és egy borzasztóan természetellenes, pozitív töltésű és negatív tömegűt. A tömeg nem lehet negatív, ezt tehát először elvetették, de aztán *Carl Anderson* pár évvel később felfedezte a pozitív töltésű és tömegű antielektront, a pozitront kozmikus sugarakban. Kiderült, hogy minden anyagi részecskéknek van antirészecskéje, amelyek ütközésekben szívesen keletkeznek párokban a részecskéjükkel együtt, ha elegendő energia áll rendelkezésre. A negatív tömeget viszonylag könnyen el

lehetett intézni a matematikai formalizmusban, tehát a Dirac-egyenlet remekül működik. A fizika kimondja, hogy a töltése előjelen kívül az antirészecske minden tulajdonsága egyezik a részecskéével. Ennek a szimmetriának van egy elképesztő következménye: az antirészecske matematikailag úgy kezelhető, mint egy térben és időben ellenkező irányban közlekedő, hátráló részecske, és ezt a számítások mélyen ki is használják.

	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	$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}_L$	$\begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix}_L$	$+\frac{2}{3}$ $-\frac{1}{3}$	$+\frac{1}{2}$ $-\frac{1}{2}$

A részecskefizika elemi anyagi részecskéi (fermionjai).

Csak két stabil anyagi részecskénk van, az elektron (e) és az (udd) kvarkösszetételű proton.

A gyenge kölcsönhatás rendezi balkezes, L polarizációval (azaz mozgáskor a lendületükkel ellentétes irányú) párokba őket saját töltéseik, a T_3 gyenge izospin szerint.

Mindegyik fermionnak van antirészecskéje ellentétes töltéssel és jobbkezes, R polarizációval.

Az alsó kvarkállapotokat a gyenge kölcsönhatás keveri, azt jelzik a vesszők.



Ezek után viszont újabb csavar következik, mert mindez igazából csak a szabad részecskékre igaz, a kölcsönhatások ezt a szép szimmetriát tönkreteszik.

Mivel a részecskét antipárjától csak a töltés előjele különbözteti meg, egy semleges fermion elvben lehet a saját antirészecskéje. Ilyesmit eddig nem sikerült kimutatni, bár sok kísérlet keresi, mert a semleges neutrínókra teljesülhet.

Miből erednek a kölcsönhatások?

Jelenleg a fizika négyféle kölcsönhatást tart számon, és abból hármat bozonok közvetítenek. Essünk gyorsan túl a legrégebben ismert gravitáción, az ugyanis nem igazán írható így le. Einstein általános relativitáselmélete azt az energiatartalommal (nyugvó test esetén a tömegével) úgy hozza összefüggésbe, ahogyan azt a zseniális *Douglas Adams*, a *Galaxis útikalauz stopposoknak* regényciklusban megfogalmazza: *Az anyag megmondja a térnek, hogyan görbüljön, a tér meg az anyagnak, hogyan mozogjon.* A gravitáció tehát Einstein felfogásában nem erő, hanem mozgásállapot, amelyet az energiatartalom által létesített térgörbület határoz meg.

Közismert kölcsönhatás az elektromágneses, a lakásunkban mindent az mozgat és világít. A forrása az elektromos töltés. Az álló elektromos töltés az azonos előjelű (pozitív vagy negatív) töltést taszítja, a különbözőt vonzza, ha viszont mozog, elektromos áram lesz belőle, mágneses mezőt hoz létre maga körül, és annak változásával energiát sugároz: fényt, rádióhullámot vagy radioaktív sugárzást. A fizika ezt a kölcsönhatást úgy írja le, hogy az egyik töltés kibocsát egy fotont, a sugárzás egy adagját, a másik pedig elnyeli azt, tehát energiát cserélnek a foton közvetítésével. Ez nulla tömegű és semleges lévén, nem hordozza forrását, a töltést. Az erőssége (potenciálja) a töltések közötti távolsággal fordítva arányos, a távolság növekedésével tehát csökken.

Az elektromágnességnél jóval erősebb a kvarkokat és az atommagot összetartó erős kölcsönhatás. Forrása egy háromállapotú töltésféle, amelyet az emberi színlátáshoz való hasonlósága miatt színtöltésnek hívunk, és három alapállapota a színlátás alapszíneinek megfelelően vörös (R), zöld (G) és kék (B) angol kezdőbetűkkel. A kvarkok tehát szín(töltés)t, az antikvarkok pedig antiszín (\bar{W} , \bar{L} , \bar{G}) hordoznak. Az erős kölcsönhatás közvetítéséhez 8 olyan bozonra van szükség, amely színt és antiszín is hordoz, de a tömege nulla. A nyolcas szám úgy jön ki, hogy a kilencféle szín+antiszín kombinációból egyet elvetünk, mert az $(R\bar{W} + G\bar{L} + B\bar{G})$ kombináció színtelen, tehát nem közvetít színtöltést. Ebből az következik, hogy a kvarkokkal ellentétben a gluonok nem tiszta szín-antiszín állapotok, hanem azok keverékeit tartalmazzák. Az erős kölcsönhatás



erőssége a távolsággal nő, tehát végtelenné válna, ha sikerülne végleg eltávolítani két kvarkot egymástól, ezért nem látunk szabad kvarkokat, ezt kvarkbezárásnak hívjuk. A gluonok is színesek, tehát ők sem szabadulhatnak ki a kötésükből.

Kölcsönhatás	relatív erősség	potenciál	élettartam (folyamat)	közv. 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}	$\propto \frac{1}{r} e^{-\frac{r}{R}}$ $R \sim \frac{\hbar}{M_{W,Z}c}$	$> 10^{-12}$ s ($\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}$)	W^\pm Z^0	80 91

A részecskefizika három alapvető kölcsönhatása. A gyenge kölcsönhatás véges R hatótávolsága és relatív gyengesége a közvetítő bozonok nagy M tömegéből következik.

A gyenge kölcsönhatás intézi a kvarkok és leptonok, valamint leggyakrabban összetett rendszereik egymásba bomlását. Forrása a részecskék saját perdületéhez, spinjéhez hasonló szimmetria-tulajdonságú gyenge izospin, amely például a neutrínókra $+1/2$, a töltött leptonokra, mint az elektron, a $-1/2$ értéket veszi fel (lásd a fermionok táblázatát). Három bozon közvetíti, két töltött és egy semleges, W^+ , W^- és Z^0 . Azért látszik gyengének, mert mindhárom bozonja a fotonnal és a gluonokkal ellentétben nehéz, tömege a hidrogénatom tömegének csaknem százszorosa. *Werner Heisenberg* bizonytalansági összefüggése ugyan megengedi, hogy a tömegüknél kisebb energiát közvetítsenek, de csak nagyon kis távolságokon és rövid időre.

A kölcsönhatást közvetítő elemi bozonoknak nincs antirészecskéjük, mert a Dirac-egyenlet csak a fermionokra teljesül. Időnként olvashatunk olyasmit, hogy a foton a saját antirészecskéje: ez egyszerűen képtelenség.

Szimmetriák a részecskefizikában

Már említettem a szépséget mint előremutató elvet, és az nemcsak a fizikában működik. Már az emberi test is szimmetrikus kívülről, de a belső szerveinkre ez már egyáltalán nem igaz. A művészet is kedveli a szimmetriákat, bár voltak, akik kimondottan küzdöttek ez ellen. Az építészetben sokáig tartotta magát, de voltak



ellene neves építőművészek, mint a katalán *Antoni Gaudí* és az osztrák *Friedensreich Hundertwasser*. A szimmetriák elmélete a kémiából ered, legnagyobb prófétája, *Wigner Jenő* is eredetileg vegyész volt. Érdekes kijelentést tett *Frank Wilczek* az Einstein-féle 1905-ös csodaév (négy egészen alapvető, új dolgot hozott akkor az elméleti fizikába) 100-ik évfordulójára írt, *Az elveszett szimmetria nyomában* című cikkében: *Úgy látszik, a fizika egyenletei több szimmetriát tartalmaznak, mint a való világ.* Jogos a kérdés, minek egy szimmetria, ha egyszer nem teljesül. Egyrészt sokkal egyszerűbb és áttekinthetőbb a szimmetrikusan felépített matematikai formalizmus, amelyet szükség szerint később kicsit elronthatunk. Másrészt, a szimmetriák gyakran rávilágítanak belső összefüggésekre, így hozta létre például *Dmitrij Mengyelejev* a kémiai elemek periódusos rendszerét. Végül pedig áll minden idők egyik legnagyobb matematikusának, *Emmy Noether*nek a tétele, miszerint a fizikában a folytonos szimmetria megmaradási törvényhez vezet. A mechanika klasszikus megmaradási törvényei (energia, lendület, impulzusmomentum megmaradása) például levezethetők abból a magától értetődő szimmetriaelvből, hogy egy fizikai jelenség nem függhet a leírásához használt időskálától és koordináta-rendszerétől, azt tologathatom tetszés szerint.

A részecskefizika elmélete, amelyet történeti okokból standard modellnek hívunk, ezen messze túlmegy, mert a három alapvető kölcsönhatását, az erős, elektromágneses és gyenge kölcsönhatást is szimmetriákból származtatja, de ezek nem merev, hanem lokális, azaz a tér-időben, helyről helyre meghatározott módon változó szimmetriák (invarianciaelveknek is nevezik őket).

Szimmetriák sértése

Önmagában az, hogy egy szimmetria kicsit sérül, senkit sem lep meg a fizikában. Az azonban, amikor egy kísérleti megfigyelés magyarázatára *T.D. Lee* és *C.N. Yang* 1956-ban felvetette, hogy a gyenge kölcsönhatás talán sérti a részecskefolyamatok tükörszimmetriáját, és azt szinte azonnal többen meg is figyelték, már mindenkit elképesztett. Kiderült, hogy a gyenge kölcsönhatás a részecskék bomlásakor egyértelműen a mozgásukkal ellentétes irányú mágneses momentumú (azaz balkezes) részecskéket és jobbkezes antirészecskéket szeret termelni. Erre *Wolfgang Pauli* így fakadt ki: *Nem tudom elbinni, hogy Isten gyenge balkezes!* Ezt a jelenséget paritásértésnek hívjuk, mert a fizikai rendszereket leíró függvények párosságával vagy páratlanságával függ össze (azaz, hogy a koordináta-rendszer tükrözésekor előjelet váltanak vagy sem). Arra, hogy ez miért fontos a fizikában, nincs magyarázatunk, a kvantummező-elmélet kidolgozója, *Steven Weinberg* véletlen szimmetriának nevezi.

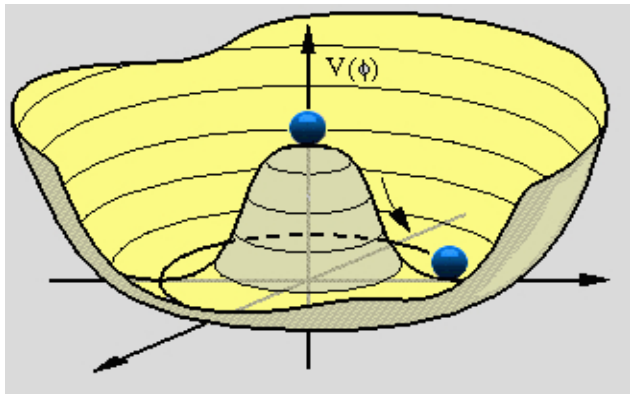
Hoppá! Ezek szerint a gyenge kölcsönhatás keresztbe tesz anyag és antianyag gyönyörű szimmetriájának? Valóban, bár a már említett csodálatos technika, az,



hogy az antirészecske matematikailag kezelhető tér-időben ellenkező irányban haladó részecskének, továbbra is igaz, csak a kölcsönhatásoknál figyelembe kell vennünk a balkéz-jobbkéz megkülönböztetést. Szerencsére ezt matematikailag viszonylag egyszerű megtenni: gyenge kölcsönhatásnál egyszerűen lenullázzuk a bemenő részecske jobbkezes összetevőjét (az antirészecskénél pedig a balkezes), mert az nem fog részt venni a folyamatban.

Honnan vannak a tömegek?

Az anyag tömege szinte tiszta energia, az elemi alkatrészek csak pár százalékot tesznek hozzá. De van tömege az elektronnak, sőt a részecskék bomlását vezérlő gyenge kölcsönhatás bozonjainak is. Az erős, elektromágneses és gyenge kölcsönhatást, ahogyan korábban már említettem, igen szép szimmetriaelvekből tudjuk származtatni, és azok felkínálják a kellő mennyiségű közvetítő bozont, a



*Higgs-mechanizmus: spontán szimmetriasértés.
A potenciál alakja körkörös szimmetrikus,
és azt nem ronjtja el,
ha a csúcsára golyót helyezünk;
az viszont legurul a völgybe, elrontva a szimmetriát.*

töltések számának megfelelően. Az egyetlenféle elektromos töltés (a pozitron pozitív töltését az elektron antitöltésének tekinthetjük) egy bozont, a gyenge kölcsönhatás kétféle izospin-állapota három, az erős színekölcsönhatás a három szín miatt 8 bozont igényel, az utóbbi két N^2-1 bozont, ahol N a töltésfélék száma. Ez mind nagyon szép, de az említett szimmetriák hadilábon állnak a tömegekkel, csak nullának szeretik. A nulla tömegű fotonnal és gluonokkal rendben is vagyunk, de valamit tennünk kell a gyenge bozonok tömegének érdekében.

Peter Higgs és tőle függetlenül, de vele egyidejűleg még két másik kutatócsoport 1964-ben rájött a megoldásra, amelyet egyébként korábban már többen felvetettek, csak nem dolgoztak ki: szimmetriasértésre van szükség. Egyesítették a gyenge és elektromágneses szimmetriát, és feltételezték, hogy az így létrejött

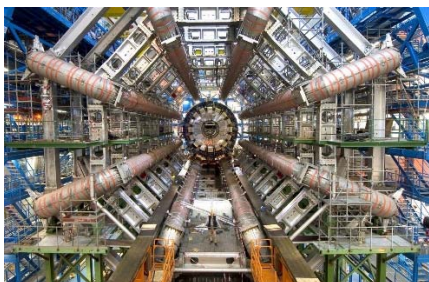


elektronye kölcsönhatáshoz tartozó tér-idő eleve tartalmaz egy szimmetriasértő potenciált (azt ma Higgs-mezőnek, vagy az elnevezést kibővítve Brout-Englert-Higgs mezőnek hívjuk). Bevezettek tehát egy olyan mezőt, amely teljesen állandó, és nincs töltésszerű forrása, viszont egyenletesen kitölti az üres teret, elrontva annak tökéletes szimmetriáját. Elég képtelennek hangzik, nem is hitték el, amíg egy évtized alatt ki nem derült, hogy ez a faramuci elmélet a részecskefizika csaknem valamennyi problémáját egy csapásra megoldja, *Leon Lederman* ezért nevezte el a Higgs-bozont Isten-részecskének. A szimmetriasértés tömeget teremtett mind a négy elektronye bozonnak, de mivel a fotonnak nulla a tömege, a rá jutó részt át kellett vinni a két töltött gyenge bozon (W^+ és W^-) mellett keletkező semleges Z bozonra, amely emiatt jóval nehezebb a másik kettősnél. A kölcsönhatások ismert erősségéből meg lehetett jósolni a gyenge bozonok tömegét, amelyet utána meg is találtak a kísérletezők. Az említett szimmetriák a fermionok tömegét sem kedvelik, de a Higgs-mechanizmus ezen is segített: a kvarkok és a töltött leptonok is a szimmetriasértés során nyernek tömeget. Ezek után biztosak voltunk benne, hogy a Higgs-mező gerjesztéseként megjósolt Higgs-bozonnak is léteznie kell, de arra az elmélet felállítása után 48 évet kellett várni, Peter Higgs és Francois Englert csak akkor kaptak Nobel-díjat (Robert Brout azt már sajnos nem érte meg).

A Higgs-bozon

A Higgs-bozon felfedezése kulcsfontosságú volt a részecskefizika elmélete szempontjából, mivel már minden mást sikerült igazolni benne. Egyre nagyobb részecskegyorsítókat építettünk érte, amíg végül 2012-ben sikerült a CERN Nagy hadronütköztetőjénél (angolul Large Hadron Collider, LHC) két óriási kísérletnek, az ATLAS-nak és a CMS-nek. A szerző 40 magyar és mintegy 5000 külföldi kutatóval együtt a CMS tagja. Ezeket a sokezer tonnás észlelőrendszereket célzottan a Higgs-bozon megfigyelésére építették, bár természetesen figyelembe véve a rengeteg más érdeklődésű résztvevő kívánságait. Az LHC protonokat ütköztet egymással óriási energián, a proton alkatrészei külön-külön lépnek egymással kölcsönhatásba, és az elméleti számítások azt jelezték előre (jósolták), hogy Higgs-bozon a legnagyobb valószínűséggel gluonok összeolvadásából fog keletkezni; ezt a mérések igazolták is. Az első megfigyelés után felmerült a természetes kérdés, hogy valóban a Higgs-bozont látjuk-e, vagy esetleg valami mást. A két kísérlet első publikációja erről csak annyit mondott, hogy látunk egy új bozont, a standard modell számításainak megfelelő tulajdonságokkal. Később sikerült többszáz olyan adatot mérni vele kapcsolatban, amely mind egyezett a modell előjelzéseivel, tehát az tényleg a Higgs-bozon.





A Nagy hadronütköztető két kísérlete, amelyek felfedezték a Higgs-bozont, építés közben. Balra: Az ATLAS kísérlet óriási toroid-mágnes, mielőtt az érzékelőegységeket behelyezték, a méretét jól illusztrálja a közepén alul álló ember. Jobbra: A CMS detektor központi egységét a világ legnagyobb szupravezető szolenoid-mágnesével leeresztik a föld alatti mérőhelyre.

Mindent tudunk?

Megvan a Higgs-bozon, igazoltuk a részecskefizika elméletét, mire kellenek a továbbiakban a részecskegyorsítók és fizikusai? Habár a Higgs-bozon felfedezése tényleg feltette a koronát a standard modellre, de a mikrofizika még mindig számtalan megoldatlan problémával terhelt.

Sötét anyag

Az első és legfontosabb probléma a világegyetem sötét anyaga. A galaxisok és csillagok mozgása azt mutatja, hogy a galaxisok körül sokkal több, ötször annyi tömeg gomolyog, mint amennyi a csillagokban, csillagközi porban, gázban és sugárzásban megjelenik. Ezt csillagászok már a múlt század elején megfigyelték, de *Vera Rubin*, amerikai csillagász rendszerezte a megfigyeléseket, és elnevezte a láthatatlan, csak gravitáló anyagot sötét anyagnak. Ilyen részecskét nem ismer a részecskefizika a neutrínón kívül, de az gyakorlatilag nulla tömeggel, fénysebességgel röpköd, nem gomolyoghat a galaxisok körül. A részecskefizikát tehát nyilvánvalóan ki kell egészítenünk egy ilyen részecskével.

Neutrínók

A másik komoly teher a neutrínók érzékelése, oszcillációja. A neutrínók csak a gyenge kölcsönhatásban vesznek részt, mert nincs sem elektronos, sem szintöltésük. A csillagok állandóan ontják a neutrínókat, az ujjunk hegyén másodpercenként trilliónyi neutrínó repül át. Mivel csak a gyenge kölcsönhatásban vesz részt, nagyon-nagyon gyenge kölcsönhatása az anyaggal, és rendkívül nehéz észlelni, sokezer tonnás detektorokra van hozzá szükség.



A standard modell feltételezi, hogy a neutrínók tömege nulla. Ez logikusan következik a gyenge kölcsönhatás paritássértéséből: ha ugyanis a neutrínónak van tömege, akkor kell lenniük jobbkezes neutrínóknak és balkezes antineutrínóknak, azoknak azonban nem lehet párjuk a töltött leptonok között, és nem vehetnek részt semmiféle kölcsönhatásban, mivel a gyenge töltésük, az izospinjük is nulla. Ugyanakkor biztosan van tömegük, ha nagyon kicsi is, mert megfigyelték, hogy a háromféle neutrínó, az elektron és két nagy testvére, a müon és a tau-lepton neutrínói repülés közben egymásba alakulnak, és az csak nem-nulla tömegnél lehetséges, amint azt *Vlagyimir Gribov* és *Bruno Pontecorvo* megmutatták. Ők már nem érték meg a jelenség felfedezését, de a felfedezők, a kanadai *Arthur McDonald* és a japán *Takaaki Kajita* elnyerték érte a Nobel-díjat. Itt tehát felmerül, milyen, a standard modellen túli kölcsönhatás teszi lehetővé a neutrínók izregzését, és hogyan helyezhető el a kiterjesztett modellben a neutrínók tömege. Megjegyezzük, hogy a neutrínók tömege a kísérletek szerint nagyon-nagyon kicsi, ezért nem befolyásolja észrevehetően a részecskefizikai számításokat.

A neutrínókhöz fűződik még egy érdekesség. Elképzelhető ugyanis, hogy a neutrínó a saját antirészecskéje; erre még nem sikerült kísérleti bizonyítékot lenni, bár jó pár kísérlet foglalkozik vele.

Hogyan tovább?

Látjuk tehát, hogy a részecskefizika valóságos diadalmenetet jár, egyik felfedezés a másikat követi benne, óriási észlelőrendszereket épít sok tízezer fizikussal. Azt is megmutattuk, hogy egyáltalán nem minden tisztázott körülötte, a megoldott problémák újabb kérdéseket vetettek fel, amelyek megoldásán dolgozunk. Várjuk szeretettel az érdeklődő ifjúságot ebben a nagyon érdekes és teljesen nemzetközi munkában. Kísérletemben, a CERN CMS együttműködésében, az 5500 résztvevő kutatót 56 ország 246 intézménye (egyetem, kutatóintézet) biztosítja, és az ATLAS kísérlet még valamivel nagyobb is nála. Ezeknél nemzetközibb munkát nehéz elképzelni.

Horváth Dezső

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
és Babeş-Bolyai Tudományegyetem, Kolozsvár

