

Horváth Dezső

Részecskefizika: megvan a Higgs-részecske?

Szimmetriák

A természet megismerésének egyik iránya egyre mélyebbre hatolni az anyag szerkezetében. Ennek során, minden nagyobb lépés eredményeképpen újabb, oszthatatlannak hitt részecskék jelentek meg: Demokritosz 4 atomja (a-tom = oszthatatlan), Dalton és Mendelevjev elemei - atomjai, Rutherford atommagja, majd az u.n. elemi részecskék, amelyek közül a legismertebb az elektron, a proton és a neutron, látható világunk fő alkatrészei. Az elektron valóban elemi, de a proton és a neutron egyáltalán nem azok, komoly belső szerkezettel rendelkeznek.

A részecskefizika elmélete teljes egészében szimmetriákra épül, azok a részecskefizikában még fontosabb szerepet játszanak, mint a kémiában vagy a szilárdtestfizikában. A jégben a hidrogénatomok tetraédes szimmetriával helyezkednek el az oxigénatomok körül; ettől lesz a sűrűsége kisebb a folyékony víznél, amelyben nincs ilyen megszorítás; az anyagok elektromos, hő- és hangvezetési tulajdonságai pedig a különböző kristályrács-szimmetriákra vezethetők vissza. A részecskék belső szerkezetét, mindenfajta anyagelmélethez hasonlóan, szimmetriák írják le, a részecskefizikában viszont minden a szimmetriákból (vagy azok sérüléséből) származtatható: a megmaradási törvények, a kölcsönhatások, sőt a részecskék tömege is.

Terünk alapvető szimmetriái vezetnek a megmaradási törvényeinkhez. Ezek a szimmetriák a jelenségeket leíró egyenletek invarianciájaként jelentkeznek különböző transzformációkkal szemben, ami egyszerűen azt jelenti, hogy a szimmetriával rendelkező feltételek változásakor az egyenletekből származtatható fizikai mennyiségek nem változnak meg. Az energia és lendület megmaradása levezethető abból a kézenfekvő szimmetriából, hogy a fizikai törvények nem függhetnek attól, hol vesszük fel az időskálánk és koordináta-rendszerünk kezdőpontját, a perdület megmaradása pedig koordináta-rendszerünk tetszőleges szögállásának a következménye. Általában minden folytonos szimmetria valamilyen megmaradási törvényhez vezet, a vonatkozó megmaradási törvények pedig a kölcsönhatások fontos jellemzői, ezért is olyan fontos a szimmetriák felderítése. Különlegesen fontos szerepük van az erők szimmetriáinak, amelyek a töltések megmaradásához vezetnek. A legismertebb ilyen szimmetria az elektrosztatikus potenciálé: csak a különbsége számít, a zéruspontját tetszőlegesen felvehetjük (ezért üldögekelhetnek madarak a nagyfeszültségű vezetéken, számukra az a zérus), a gyenge és az erős kölcsönhatáshoz is tartozik hasonló szimmetria. Együttesen *mértékszimmetriának* vagy *mértékinvarianciának* hívjuk őket.

A részecskéket belső szimmetriájuk szerint két csoportra osztjuk, fermionokra és bozonokra. Ama roppant egyszerű transzformáció hatására, hogy kicserélünk az állapotot leíró függvényben két azonos részecskét, a függvény vagy előjelet vált, akkor fer-

mionnak hívjuk, vagy nem, akkor bozonnak. A fermionok száma megmarad, de bozonokat kelthetünk vagy elnyelhetünk: egy lámpa akárhány látható bozont (fotont) kisugározhat és egy vevőantenna akárhányat elnyelhet, csak az energia és lendület megmaradását kell biztosítanunk. Ugyanakkor a képcsöves televízió képernyőjét felvillantó elektront, amely fermion, oda kell vezetnünk és dolga végeztével vissza kell vinnünk. Érdekes és a fizika szempontjából igen lényeges különbség az is, hogy adott állapotban akárhány bozon lehet egyidejűleg, de fermionból csak egy, ez a Pauli-elv. A Pauli-elv természetesen következik az állapotfüggvény előjelváltásából, hiszen ha két elektron ugyanabban az állapotban van, akkor a közös állapotfüggvényük nem változhat meg amikor kicseréljük őket, és csak egyetlen olyan függvény van, amely nem változik meg az előjele átváltásakor, a zérus. Ennek következtében töltenek be az atomi elektronok egyre növekvő energiájú energiahéjakat, és ez akadályozza meg, hogy az atomok az anyagban és a nukleonok az atommagban egymásba hatoljanak, ilyen módon biztosítva makroszkópikus formát tárgyainknak.

A részecskék másik osztályozási szempontja az, hogy a jelenleg ismert négy alapvető kölcsönhatás, a gravitációs, elektromágneses, gyenge és erős közül melyekben vesznek részt. Valamennyi részecskére hat ugyan a gravitáció, de szerepe csak csillagászati szinten jelentős, laboratóriumi szinten elhanyagolhatjuk. Ugyancsak minden részecskére hat a gyenge és minden töltéssel vagy mágneses momentummal rendelkezőre az elektromágneses kölcsönhatás. Az atommagot összetartó erős kölcsönhatásban résztvevő részecskéket *hadronoknak*, közöttük a fermionokat *barionoknak*, a bozonokat pedig *mezonoknak* hívjuk. Az erős kölcsönhatásban részt nem vevő részecskék a *leptonok*. A nevek a kezdetben megfigyelt részecskék tömegéből erednek: a leptonok (mint az elektron) könnyűek, a mezonok (mint a pion) közepes tömegűek, amíg a barionok (mint a proton és a neutron) nehéz részecskék.

A Standard Modell

A részecskefizika jelenleg érvényes elmélete, a Standard Modell szerint a világunk alapvető építőkövei fermionok, amelyek között bozonok közvetítik a kölcsönhatásokat. Az elemi fermionok három családba sorolódnak, minden családban egy-egy pár lepton és kvark van, és valamennyihez tartozik egy-egy azonos tulajdonságokkal, de ellentétes előjelű töltéssel rendelkező antirészecske. A leptonpárok egyike töltött, ezek az elektron, a müon és a tau-lepton, a pár másik tagja a hozzájuk tartozó három semleges neutrínó. A kvarkok harmados elektromos töltéssel és az erős kölcsönhatás háromféle töltésével (az analógia alapján ezt színnek nevezzük) rendelkeznek, és a közöttük levő szín-szín kölcsönhatás annyira erős, hogy nem is létezhetnek szabadon. Kitűnő az analógia a színlátással, hiszen a kvarkok csak a kétféle *színtelen* kötött állapotban létezhetnek: a mezonok kvark+antikvark (azaz szín + antiszín vagy kiegészítő szín), a barionok 3-kvark állapotok, a 3 alapszín egyenletes keverékeként. A kvarkmodellt a kísérletek messzemenően igazolják: az összes ilyen módon kikombinálható kvarkállapot létezik és nem találtunk olyant, amely kilógna a sorból, bár igencsak kerestük. A keresések komoly erőfeszítést igényelnek és rengeteg elméleti számítás van egzotikus állapotokra, de eddig egyetlen ilyen sem sikerült találni.

A részecskék kölcsönhatásait bozonok közvetítik: az elektromágnesest a foton, a gyenge kölcsönhatást 3 nagy tömegű gyenge bozon, az erős (szín-) kölcsönhatást pedig

8 *gluon*. A 8-as szám onnan származik, hogy a kvarkok a gluonok segítségével színt cserélnek, a gluonnak tehát színt és antiszínt kell hordoznia, ami $3 \times 3 = 9$ szabadsági fokot jelent, de a 3 szín egyenletes keveréke nem csinál semmit, és ez eggyel csökkenti a szabadsági fokok számát.

A Standard Modell az alapvető kölcsönhatásokat lokális, azaz helyről helyre meghatározott törvényszerűség szerint változó mértékszimetriák segítségével származtatja. Ezek a szimetriák azonban nem engedik, hogy tömegük legyen az elemi részecskéknél, a kvarkoknak és leptonoknak, valamint a kölcsönhatásaikat közvetítő *mérték-bozonoknak*, ez ugyanis sértené a kölcsönhatást létrehozó szimetriákat. Márpedig a megfigyelt folyamatok törvényszerűségei a szimetriákat igazolni látszottak. A fizika kísérleti tudomány, és a mérési adatok szerint a kvarkok, a leptonok, sőt a gyenge kölcsönhatást közvetítő gyenge bozonok is rendelkeznek tömeggel, a lokális mértékszimetria tehát valahogyan sérül. A fizika számos sérülő szimetriát kezel, a legismertebb közöttük a részecskék jobb-bal szimetriája, a paritászimmetria, amelyet a gyenge kölcsönhatás sért, mert csak a balra polarizált (azaz a mozgásirányával szembe mutató mágneses momentummal rendelkező) részecskéket és jobbra polarizált antirészecskéket *kedveli*. Nagy elméleti fizikusaink közül S. Weinberg ezeket *véletlen szimetriáknak* nevezi, F. Wilczek pedig megjegyzi „*Az elveszett szimetriák nyomában*” című remek cikkében, hogy „*A fizika egyenletei több szimetriával rendelkeznek, mint a való világ.*” Wilczek kijelentése nyilvánvalóvá teszi, miért van szükség sérülő szimetriákra: matematikailag egyszerűsítik a fizikai jelenségek leírását.

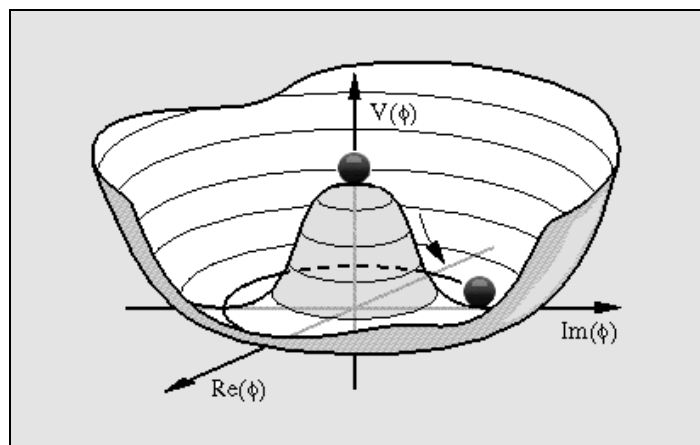
A Peter Higgs (és vele egyidejűleg, de tőle függetlenül mások is) által javasolt spontán szimmetriasértési¹ mechanizmus a részecskefizika elméletének, a Standard Modellnek számos problémáját megoldja. Megteremti többek között a gyenge kölcsönhatást létrehozó lokális szimetria sértésével a kölcsönhatást közvetítő részecskék tömegét, lehetővé teszi az alapvető anyagi részecskék, a leptonok és a kvarkok tömegének létrejöttét, és — mintegy melléktermékként — megteremti a Higgs-bozont, ezt az igen furcsa, hipotetikus részecskét. Óriási dolog volt annak idején, hogy a gyenge kölcsönhatást közvetítő három bozon tömegét azonnal ki lehetett számítani a Higgs-mechanizmus segítségével, és évekkel később a kísérlet azt megerősítette.

A spontán szimmetriasértést legegyszerűbb a mexikói kalappal, a sombreroval illusztrálnunk (*1. ábra*). Az tökéletesen hengerszimmetrikus, és elvben azzal sem rontjuk el a szimmetriáját, ha a csúcspontjára helyezünk egy golyót. Ez az állapot azonban nem lesz stabil, stabil állapotot a rendszer csak akkor talál, amikor a golyó legurul valahova a völgybe. Az természetesen véletlenszerű, hogy konkrétan hova gurul, de akárhol áll meg, megbontja a hengerszimmetriát. A szimmetriát a rendszer tehát spontán megsérti. Hasonló helyzet áll elő, ha egy kötötűt hosszában megnyomunk: valamire elhajlik, és azzal megbontja az eredeti szimmetriáját, pedig mind a kötötű, mind pedig a rá ható erő tökéletesen hengerszimmetrikus. A fizika igazi nyelvén, tehát matematikailag ezt úgy fejezzük ki, hogy a rendszernek nem stabil a zérus potenciálú állapota, tehát nem zérus a vákuumbeli várható értéke.

A Standard Modell tehát feltételezi, hogy a fizikai vákuumot kitölti a négy komponensű, szimmetriasértő Higgs-tér; a négy szabadsági fokból hármat elvesz a gyenge

1 Igazából Anderson – Englert – Brout – Higgs – Guralnik – Hagen – Kibble mechanizmusnak illenék nevezni a bevezetőiről. A Higgs-bozont viszont valóban Peter Higgs vezette be.

kölcsönhatást közvetítő három mértékbozon tömege, a negyedik adja a Higgs-bozont. Az elmélet szerint az elemi részecskék a szimmetriasértő Higgs-térben mozogva, azzal kölcsönhatásban nyernek tömeget, mint amikor térdig érő vízben futunk a normálisnál sokkal nagyobb tehetetlenséget érezve. Makroszkopikus világunk tömege azonban nem ennek köszönhető, hiszen a proton és a neutron tömegében az őket alkotó elemi részecskék, a kvarkok tömegjáruléka igen kicsiny, néhány százaléknyi, a legnagyobb része a kvarkok és gluonok mozgási energiájának tulajdonítható.



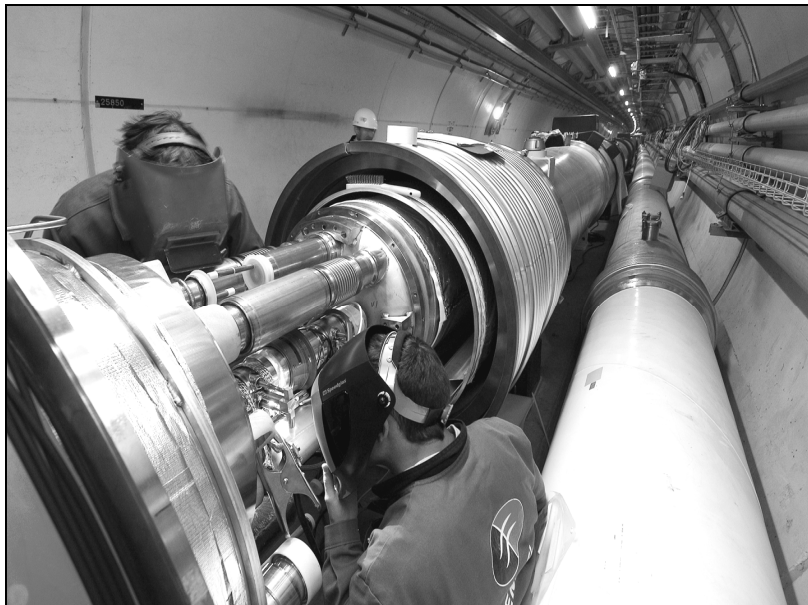
1. ábra: Spontán szimmetriasértés. A Higgs-tér potenciálját ábrázoló sombrero tökéletes hengerszimmetriája elromlik, amikor golyót helyezünk a csúcsára, mert a golyó stabil állapota valahol a völgyben van és legurul, de véletlenszerű, hogy hova esik.

A részecskefizika egyik alapkérdése, hogy igaz-e a spontán szimmetriasértés, és egyáltalán létezik-e a Higgs-részecske. A Higgs-bozonnak nincsenek kvantumszámai (vagy ha úgy tetszik, valamennyi jellemző kvantumszáma zérus), és pusztán létevel kiküszöböli azokat a végtelen tagokat, amelyek egyébként lehetetlenné teszik a gyenge kölcsönhatás folyamatai (például az atommagok bomlása) valószínűségeinek kiszámítását. Megfigyelni ugyan eddig nem sikerült, de tekintve a részecskefizika elmélete, a Standard Modell fantasztikus, immár négy évtizedes sikerét az összes eddig megfigyelt részecskefizikai folyamat pontos leírásában, kevesen kételkednek a létezésében. Leon Lederman méltán híres könyvében (*Az isteni a-tom, avagy mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem*, Typotex, Budapest, 2010) *isten-részecskének* hívja, de ez, szerencsére, a szakirodalomban nem terjedt el. Állítólag Lederman eredetileg *istenverte részecskének* akarta hívni, de a kiadó ehhez nem járult hozzá.

A CERN Nagy Hadronütköztetője

A Higgs-részecske kivételével a Standard Modell valamennyi elemi részecskéjét sikerült kísérletileg azonosítani és tanulmányozni. Ha szabad kvarkok nem is létezhetnek, a kvarkokat mégis észleljük kísérletileg, a nagy energiájú részecskeütközések során keletkező, közel egy irányba kirepülő részecskenyalábok – *hadronzáporok* – formájában.

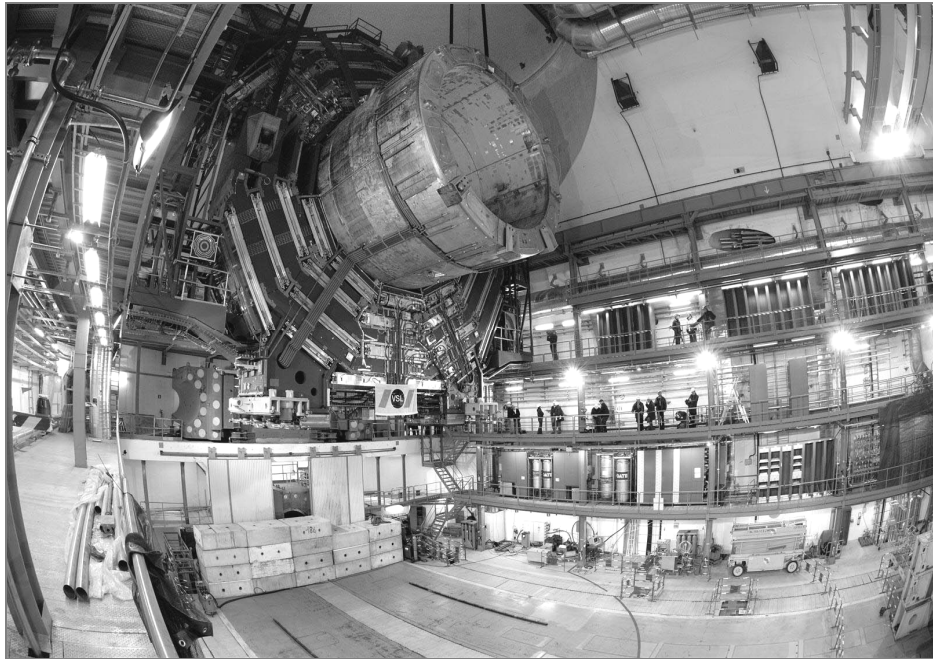
Elektron-pozitron ütközésnél például keletkezhetnek kvark-antikvark párok, és a megmaradási törvények miatt – tömegközépponti rendszerben – ezeknek 180° alatt kell kirepülniük. Ahogy egymástól távolodnak, az állandóan növekvő térerő addig kelt gluonokat és újabb kvark-antikvark párokat, amíg valamennyi részecske színtelen nem lesz. Nagyobb energiákon ez akkora részecskesokaságot jelent (10–20 részecskét egy hadronzáporban), amely semmilyen más fizikai folyamattal nem értelmezhető. A gluonok létezését a 3 hadronzáporos események észlelése bizonyította, ezek ugyanis csak úgy jöhetnek létre, ha egy kvark-antikvark pár egyik tagja kibocsát egy gluont, minden más folyamatot tiltanak a megmaradási törvények. A kvarkbezárás következményeként az erős kölcsönhatás hatótávolsága gyakorlatilag igencsak véges; mintegy 1 fm, azaz 10^{-15} m, az atommag méretéhez közeli. Az atommagot tehát az erős kölcsönhatásnak a nukleonokból *kilógó* része tartja össze, hasonlóan a kémiai kötéshez, amely valamilyen értelemben a semleges atomokból kitüremkedő elektromágneses potenciál hatására jön létre.



2. ábra: Szerelik az LHC mágneseit. Az ábrán látszik, ahogy a kör alakú alagút kanyarodik.

A CERN, amely eredetileg az európai országok közös részecskefizikai kutatólaboratóriumának alakult, ma már világlaboratórium: 2011-ben 2800 alkalmazottja a világ 10500 kutatóját és 440 PhD-hallgatóját szolgálta. A Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) 2008-ban indult el, de igazán csak 2009 végén kezdett működni. A Genfi tó és a Jura hegység között, 100 m-rel a föld alatt húzódó 27 km-es gyorsítóalagút 9300 szupravezető mágnes segítségével gyorsítja és tereli egymással szemben az óriási energiájú protonnyalábokat, amelyek az alagút négy pontjában elhelyezkedő hatalmas mérőrendszerek középpontjában ütköznek össze. A gyorsítót szolgáló mérnöki technika kolosszális: 2010 folyamán a protonok ütközési gyakoriságát, a *luminositást*

lépésről lépésre 8 nagyságrenddel sikerült növelni, és a cikk megírása idején, 2012 májusában az LHC két-három óra alatt annyi adatot szolgáltat, mint a teljes 2010-es évben. Ezért aztán 2011-ben végleg leállították az előző hasonló óriási gyorsítót, az amerikai Tevatront, és jelenleg az LHC kísérleteiben az amerikai fizikusok csoportja az egyik legnagyobb résztvevő.



3. ábra: A CMS-detektor szupravezető mágnesének beillesztése

A Nagy Hadronütköztető (LHC) egyik fő célja a Higgs-részecske megfigyelése. Elsősorban erre épült az egymással versengő és egymást remekül kiegészítő két óriási, egyenként több ezer fizikus részvételével épített észlelőrendszer, az ATLAS- (A Toroidal LHC ApparatuS) és a CMS- (Compact Muon Solenoid) detektor. A CMS-együttműködésben alapító tagok vagyunk, az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont Részecske- és Magfizikai Intézete (MTA Wigner FK RMI), az MTA Atommagkutató Intézete (ATOMKI), a Debreceni Egyetem és az Eötvös Loránd Tudományegyetem kutatói és hallgatói vesznek részt benne. Érdekesen különbözik a két rendszer: a CMS egyetlen szolenoid mágneset tartalmaz, a világon a legnagyobbat, 6 méter belső átmérővel, körülötte kétszer annyi vas van, mint a párizsi Eiffel-toronyban. Az ATLAS viszonylag kis szolenoidját viszont óriási toroidmágnes veszi körül, és azt töltik meg az észlelőegységek. A CMS csupa hagyományos egységből áll, az ATLAS viszont mindenütt a legújabb detektortechnológiát alkalmazta. A CMS moduláris szerkezetű, már nagyrészt a felszínen összerakták, és egy évig tesztelték, majd 2000 tonnás darabokban engedték le az LHC földalatti barlangjába (3. ábra), az ATLAS-t viszont eleve a föld alatt építették fel.

Ez azt jelenti, hogy nagyjavítás céljából a CMS-t teljesen szét lehet nyitni, az ATLAS-t viszont nem.

A Higgs-bozon

Szimulációk elemzésével tíz éve készülünk a Higgs-bozon megfigyelésére. Mivel a Standard Modell alapján a Higgs-bozon bármely feltételezett tömegére valamennyi keletkezési és bomlási reakció valószínűsége pontosan kiszámítható, a különböző lehetséges tömegeire különböző adatelemzéseket készítettünk. Amióta Einstein kimutatta a tömeg és energia egyenértékűségét híres $E = mc^2$ formulájával (ahol E az energia, m a tömeg és c a fénysebesség), a tömeget a mikrofizika energiaegységben méri. Kedvenc energiaegységünk az elektron-volt: 1 eV energiát nyer egy elektron, amikor átszel 1 volt feszültséget. Ez persze nagyon kis energia: a részecskefizikusok általában giga-elektronvoltban ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$) gondolkodnak, amely igen közeli a proton $0,938 \text{ GeV}/c^2$ -es tömegéhez. Már a CERN előző óriási gyorsítója, a Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető (LEP), meglehetősen behatárolta a Higgs-részecske lehetséges tömegét, kizárva a $114,4 \text{ GeV}/c^2$ (a hidrogénatom tömegének mintegy 122-szerese) alatti tartományt, ugyanakkor a kísérleti adatokkal a legjobb egyezést 90 - 100 GeV/c^2 tömegű Higgs-bozon feltételezésével kapjuk. Mivel a proton eleve összetett részecske, két proton nagyenergiájú ütközése sokféle reakciót kiválthat, és az LHC protoncsomagjai ütközésekor 10–20 proton–proton ütközés is végbemehet, egy könnyű Higgs-bozont igen nehéz megfigyelni. Már több évtizede felhívták elméleti fizikusok (köztük Trócsányi Zoltán akadémikus) a figyelmet arra, hogy ilyen részecske megfigyelésére annak két nagy energiájú fotonra való bomlása nyújt kiváló megfigyelési lehetőséget, a folyamat igen kis valószínűsége ellenére. A CMS-detektor erre optimalizálta a fotonok észlelésére szánt részét, az elektromágneses kalorimétert, amely közel 80000 ólomwolframát kristályból áll (4. ábra).

2009 óta működik az LHC, kezdetben 7000, majd 2012-ben 8000 GeV energián ütköztetve protonokat, egyre növekvő nyalábintenzitás mellett: az indulása óta mintegy tíz nagyságrendet növeltek rajta, és 2011 végére az eredetileg tervezett adatmennyiség csaknem hatszorosát szolgáltatva. Vele párhuzamosan 2011-ig tovább működött a Chicago melletti Fermilab Tevatron gyorsítója is, habár alacsonyabb energián és jóval kisebb intenzitással.

Minden kísérleti adatnak van természetes statisztikus bizonytalansága, hibahatára. A bizonytalanságnak sok forrása van: a megfigyelt események száma, a szimulációk által jósolt jel és háttér bizonytalansága, a detektorelemek és a gyorsító adatainak kalibrációja. Egy kísérleti értéket általában $m \pm \sigma$ alakban írunk fel, ahol m a mért érték és σ annak bizonytalansága. A statisztika törvénye szerint annak valószínűsége, hogy a tényleges fizikai érték az $m - \sigma$ és $m + \sigma$ között található, 68%, ez a mérésünk egyszerez bizonytalansághoz tartozó *konfidenciája*. Mivel a bizonytalanságot nagyon nehéz pontosan megbecsülni, a gyorsítós fizikában a következő megállapodás született: elmondhatjuk, *megfigyeltünk* (új jelenség esetén *felfedeztünk*) valamit, ha azt az adatok vagy szimulációk segítségével számított háttér fölött látjuk, legalább a kísérleti és elméleti bizonytalanság ötszörösével. Tehát ha például egy m_0 háttéren ülő jel esetén $m - m_0 > 5\sigma$ mennyiséget észlelünk, akkor a jelet megfigyeltük. Ugyancsak a megállapodás szerint a jelet kizár-



4. ábra: $PbWO_4$ egykristály szcintillátorok előkészítése a CMS-detektor elektromágneses kalorimétere számára.

tuk, ha 95% konfidencia mellett nem látjuk, bár meg szoktuk adni a 99%-os konfidenciának megfelelő kizárási tartományokat is. Miközben a Higgs-bozont kerestük, 2011 folyamán valamennyi kísérlet észlelt az 5σ küszöböt el nem érő többleteseményt a Higgs-bozon $140 \text{ GeV}/c^2$ körüli tömegének megfelelő tartományban, sőt, ezt némelyek meg is szellőztették blogokban, illetve magánjellegű sajtónyilatkozatokban, az együttműködések őszinte bosszankodására. 2011 júliusában ez a többlet csaknem elérte a 3σ -t, de azután az augusztusban gyűjtött adatok hatására lecsökkent, ősszel pedig gyakorlatilag eltűnt.

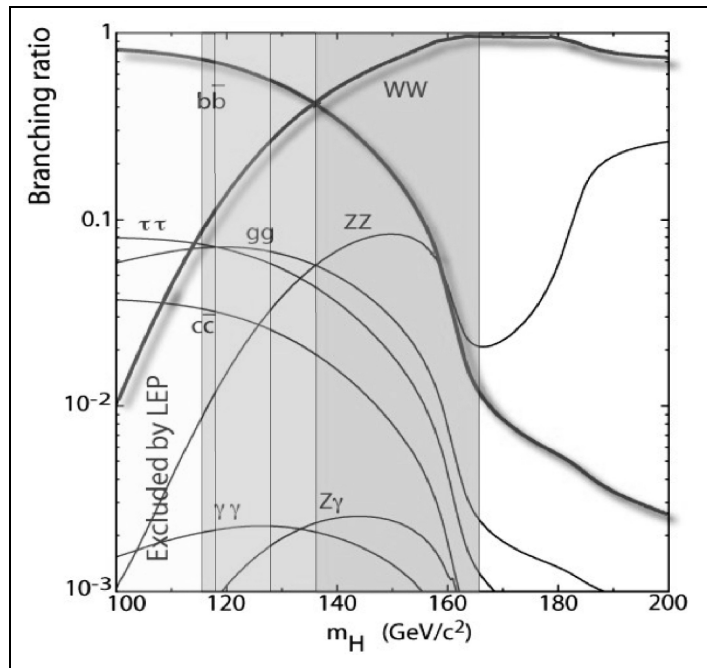
A Higgs-bozon keresése az LHC-nál

A Higgs-bozon keresése komolyan foglalkoztatja a nagyközönséget is. Ez nem véletlen: ha egy részecske keresésére a világ adófizetői dollár-tízmilliárdokat költenek, az a részecske biztosan nagyon érdekes. Számtalan Higgs-bozonos viccet látunk a Világhálón is. Két példa:

- Bemegy a kocsmába egy Higgs-bozon. Csapos: *Vigyázzon, magát többen is keresik!*
- Bemegy a templomba egy Higgs-bozon. Pap: *Magát itt nem látjuk szívesen.* Higgs-bozon: *De hiszen itt nélkülem soha nem lesz tömeg!* (Angolul még jobb: *But how can you have mass without me?* Mass: tehetetlen tömeg, embertömeg és mise)

Az LHC 2011 októberében leállt a protonütköztetéssel és egy hónapig a nehézion-program keretében ólomionokat ütköztetett. 2011 decemberére a CMS-nek és az ATLAS-nak sikerült analizálnia az addig gyűjtött LHC-adatokat, és 2011 decemberében előzetes, 2012 februárjában pedig már véglegesnek tekintett² eredményeket hoztak nyilvánosságra. Akkorra már külön-külön mindkét kísérlet körülhatárolta a Higgs-részecske egybefüggő tömegtartományát; habár ez a nyáron külön-külön még nem sikerült, csak a kettőnek együtt. Az 5. ábrán jól látszik, hogy a LEP, az LHC és a Tevatron adatai alapján a Higgs-bozon lehetséges tömegét, ha nem is sikerült megfigyelni, de mára már erősen behatárolták, és mivel az adatok egyezése az elmélettel a Higgs-bozon 100 GeV/c² körüli tömegénél a legjobb, legnagyobb valószínűséggel a 116 - 125 GeV/c² tartományban található, ahol egymással versengő részecskereakciók vannak.

A CERN-ben működő nagy kísérletek, az ATLAS és a CMS megállapodtak egymással, hogy ha úgy érzik, hogy felfedeztek valami újat, felkeresik vele a főigazgatót, aki azonnal szól a másik kísérletnek, hogy az ellenőrizze. Ezzel természetesen megőrzi az első kísérlet prioritását, de elkerülik azt a másutt (például a Tevatronnál is) időnként fellépő kínos szituációt, amikor az egyik kísérlet felfedezést jelent be, majd egy idő múlva a másik megcáfolja azt.



5. ábra: A Higgs-részecske feltételezett bomlási csatornái

Jól látható, hogy éppen a kísérleti adatok által szabadon hagyott, 116 és 127 GeV/c² közötti tartományt a legnehezebb tanulmányozni az egymással versengő reakciók miatt.

² Véglegesnek tekintünk egy eredményt, ha már nincs időnk, lehetőségünk vagy energiánk tovább finomítani.

Az már 2012 tavaszán látszott, hogy év végére elegendő adatunk gyűlik össze, hogy megtaláljuk a Higgs-bozont vagy kizárjuk a létezését, bármekkora legyen is a tömege. Valamennyi lehetséges végállapot tanulmányozásakor a kritikus tömegtartományban minden kísérlet látott a 2011-es adatokban némi többletet a Higgs-bozon nélkül számolt adatmennyiséghez képest: a CMS-kísérlet 2,8-szor bizonytalanságnak megfelelő (2,8 σ -t) 125 GeV/c²-nél, az ATLAS 2,5 σ -t 126 GeV/c² körül, a Tevatron-kísérletek együttesen pedig 2,2 σ -t 115 és 145 GeV/c² között. Az ATLAS és a CMS külön közölte a Higgs-részecske kétfotonos bomlására vonatkozó eredményét, amely mindkét esetben még a fentieknél is nagyobb többletbe vezetett. Mindez annyira felajzotta a CERN fizikusainak reményeit, hogy a CERN vezetői közölték: addig fogják 2012-ben 8000 GeV ütközési energián működtetni az LHC-t, amíg mindkét nagy kísérlet, az ATLAS és a CMS külön-külön meg nem találja a Higgs-bozont, ha kell, meghosszabbítják az adatgyűjtést 2013-ban, a nagy leállítás előtt.

A megfigyelést már a Melbourne-ben megtartott nagyenergiás világkongresszusra bejelentették. 2012. július 4-én, óriási érdeklődés mellett, a CERN óriási gyorsítója, a Nagy Hadronütköztető (LHC) melletti két óriási, egyenként több ezer fizikus és mérnök (köztük 50 magyar) részvételével működő együttműködés, az ATLAS és a CMS bejelentette, hogy sikerült kimutatniuk a Higgs-bozonhoz hasonló tulajdonságokkal rendelkező részecskét. A két előadást interneten a világ minden táján közvetítették, többek között a budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpontban és a debreceni ATOMKI-ban is. Az eredményt az együttműködések résztvevői már hetekkel előbb tudták, hiszen azt az együttműködések egészének jóvá kellett hagyniuk, tehát – ahogy ez már megszokott – az ki is szivárgott, és a Nature folyóirat egy nappal a hivatalos bejelentés előtt részletesen nyilvánosságra is hozta. Az új részecske megjelenése igen meggyőző: két független kísérlet, két különböző gyorsítóenergián, több különböző módon, de ugyanazokkal a tulajdonságokkal, 126 GeV/c² körüli tömegnél mutatta ki. Az például, hogy az új részecske Higgs-szerű bozon, abból látszik, hogy két fotonra tud bomlani, hiszen ahhoz a perdületének zérusnak vagy 2-nek kell lennie. Annak egyértelmű eldöntéséhez azonban, hogy az valóban a Peter Higgs által megjósolt részecske, további vizsgálatok szükségesek. Meg kell mutatnunk például, hogy a bomlási módusai valóban a Standard Modell előrejelzéseit követik, és ahhoz a jelenleginél sokkal több adatra lesz szükségünk.

Gyakori kérdés, hogy ki kaphat Nobel-díjat a Higgs-bozon felfedezése esetén. A szokványos válasz az, hogy valószínűleg Peter Higgs, esetleg együtt azok közül kettővel, akik a szimmetriasértési mechanizmust tőle függetlenül ugyancsak javasolták, például François Englert és Robert Brout. Az is felmerült, hogy esetleg megváltoztatják a Nobel-díj alapszabályát, hogy intézetek vagy együttműködések is megkaphassák, de ez nem igen fog egyhamar végbemenni.

A Standard Modell problémái

A Standard Modell – hihetetlen eredményessége mellett, hiszen alig 19 paraméter segítségével leírja a fizikát a mikrovilágtól a csillagokig – számos nehézséggel küszködik, bár azok elvi, elméleti jellegűek. Nem tudja származtatni például a gravitációs kölcsönhatást, nem ad számot a világegyetem tömegének negyedrészt kitevő, rejtélyes sötét anyagról és nem magyarázza világunk furcsa aszimmetriáit: miért nincsenek antianyag-galaxisok, és a gyenge kölcsönhatás miért éppen a balra polarizált részecskéket kedveli.

Van egy súlyos matematikai problémája is: a Higgs-bozon tömegét meghatározó egyenleteket nehezen eltávolítható óriási tagok teszik tönkre. Ráadásul a három alapvető részecskefizikai kölcsönhatás erőssége egészen nagy energiákon közeledni látszik, de nem találkozik, mintha valami hiányozna onnan.

A fenti problémákat nagyrészt megoldani lászik a *szuperszimmetria* elmélete, amely feltételezi, hogy minden fermionunknak és bozonunknak létezik azonos tulajdonságokkal rendelkező párja a másik csoportban, tehát például az elektronhoz rendelhető egy hasonló tömegű és töltésű skalár bozon. Ez az új szimmetria alacsony energián biztosan sérül, hiszen ezeket a részecskéket hiába kerestük a gyorsító kísérletekben, nem sikerült megfigyelniük őket; ha léteznek, tömegük a hidrogénatoménak legalább százszorosa. Maga a modell viszont rendkívül vonzó, valósággal rabul ejtette a részecskefizikusokat, mert pontos számításokat tesz lehetővé, nem mond ellent az eddigi megfigyeléseknek és megoldja a Standard Modell problémáit. A sötét anyag például kitűnően magyarázható a legkönnyebb szuperszimmetrikus részecskével. A modell szerint ugyanis nagyenergiás részecskeütközésekben keletkezhetnek szuperszimmetrikus részecske-antirészecske párok, de azok szétrepülve – a megmaradási törvények miatt – csak újabb szuperszimmetrikus részecske kibocsátásával tudnak bomlani, a legkönnyebb ilyen részecske tehát stabil lesz, de elektromosan semleges lévén nem észlelhető, csak a gravitációs hatásán keresztül. Nehéz részecske lévén viszonylag lassan mozog, hasonlóan a sötét anyag megfigyelt mozgásához. A szuperszimmetria által bevezetett rengeteg új részecske kiküszöböli a kellemetlen óriási tagokat a Higgs-bozon egyenleteiből és összehozza a három kölcsönhatás erősségét egészen nagy energiákon. Sajnos, az antianyag hiányát a Világegyetemben még a szuperszimmetria sem tudja megmagyarázni.

Óriási erőfeszítések történtek és történnek a szuperszimmetria felfedezése felé is. Az LHC kísérletei, ahogy korábban említettük, rendkívül keveset tudnak elemezni a másodpercenkénti sokmilliárd eseményből; azt, hogy melyeket, az *eseménytrigger* határozza meg. 2012-ben, például, a CMS kísérlet triggera a protonütközésekből egy-egy harmadrészt szentel a Higgs-bozon keresésének, a szuperszimmetria és más egzotikumok keresésének és a Standard Modell pontos vizsgálatának. Bár az utóbbi is nagyon érdekes és fontos, az *új fizika* keresőinek inkább azért érdekes, hogy a *régi fizikát* pontosan leírva ki tudják mutatni rajta az új fizikát.

Hangsúlyoznunk kell, hogy valamennyi LHC-eredmény óriási kollektív erőfeszítés eredménye, valamennyi résztvevő, a sokezer fizikus, mérnök és technikus több évtizedes munkájára volt hozzá szükség. A CMS esetében magyar csoportunk, például, az adatellenőrző és -minősítő és adatelemzési munkán kívül a műondetektorok helyzet-meghatározó rendszerének és a hadron-kaloriméter megépítésében, valamint a műonrendszer, a pixel-detektor és a nyomkövető rendszer üzemeltetésében vett részt.

Köszönetnyilvánítás

Ezt a cikket Berényi Dénes professzor úr kérte a szerzőtől, de megjelenését már nem érthette meg; szeretném tehát azt az ő emlékének szentelni. Köszönettel tartozunk továbbá a magyar CMS-csoport nevében a Magyar Tudományos Akademiának, a Nemzeti Innovációs Hivatalnak, a CERN-nek és partnerintézeteinknek, valamint az Országos Tudományos Kutatási Alapprogramoknak számos támogatott pályázatunkért.