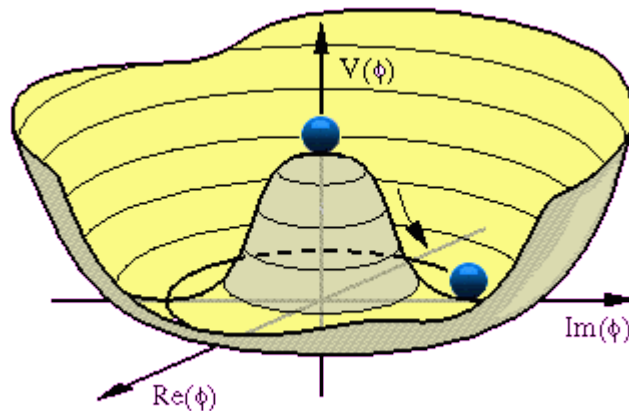


Meglesz-e a Higgs-bozon az LHC-nál?

Horváth Dezső, MTA KFKI RMKI és ATOMKI

A Peter Higgs (és vele egyidejűleg, de tőle függetlenül mások által is) javasolt spontán szimmetriasértési (vagy Higgs-) mechanizmus a részecskefizika elméletének, a Standard modellnek számos problémáját megoldja. Biztosítja, többek között, a gyenge kölcsönhatást létrehozó lokális (helyről helyre meghatározott módon változó) szimmetria 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.

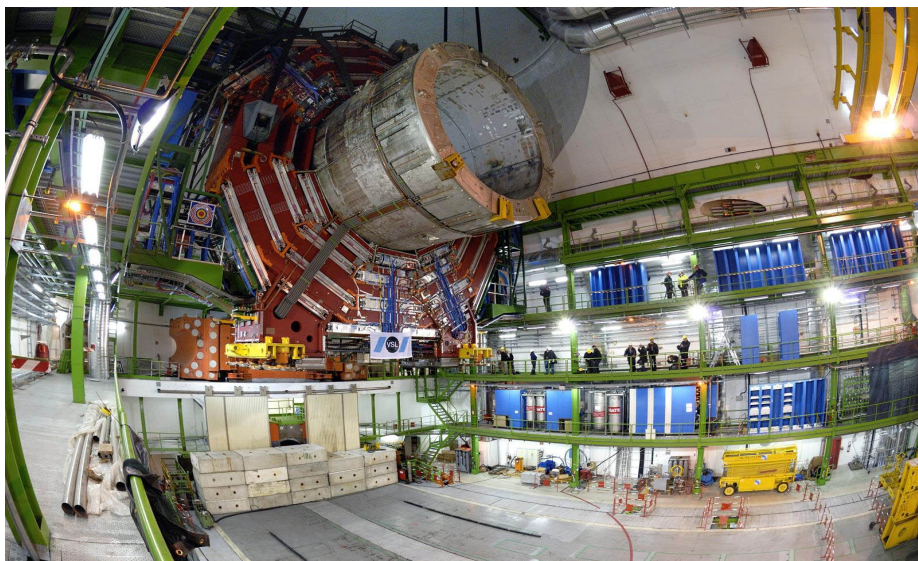


1. ábra. Spontán szimmetriasértés. A sombrero hengerszimmetriája elromlik, amikor golyót helyezünk a csúcsára. A golyó stabil állapota valahol a völgyben van, de véletlenszerű, hova esik.

A spontán szimmetriasértést legegyszerűbb a mexikói kalappal illusztrálnunk (1. ábra). Az tökéletesen hengerszimmetrikus, ha azonban a középpontjára helyezünk egy golyót, az stabil állapotot csak a völgyben talál, de véletlenszerű, konkrétan hol. Ezzel a szimmetria spontán sérül. Hasonló helyzet áll elő, ha egy kötőtűt hosszában megnyomunk: valamerre elhajlik és azzal megbontja az eredeti szimmetriáját. A fizika nyelvén ezt úgy fejezzük ki, hogy a rendszernek nem stabil a zérus potenciálú állapota, tehát nem zérus a vákuumbeli várható értéke. Az elmélet szerint az elemi részecskék a Higgs-térben mozogva, azzal kölcsönhatásban nyernek tömeget. Makroszkópikus világunk tömege azonban nem ennek köszönhető, hiszen a proton és a neutron tömegében az őket alkotó elemi részecskéké, a kvarkoké, igen kicsiny, néhány százaléknyi, a legnagyobb része a kvarkok energiájának tulajdonítható.

A részecskefizika egyik alapkérdése, igaz-e a spontán szimmetriasértés, amelyet némileg igazságtalanul Higgs-mechanizmusnak is hívnak, holott Peter Higgs-szel egyidejűleg két másik kutatócsoport is javasolta, és létezik-e a Higgs-részecske. A Higgs-bozonnak nincsenek kvantumszámjai (vagy ha úgy tetszik, valamennyi jellemző kvantumszáma zérus), és pusztán létevel kiküszöböli azokat a végtelen tagokat, amelyek egyébként lehetetlenné teszik a gyenge kölcsönhatás folyamatait, mint amilyen, például, az atommagok bomlása, valószínűségeinek kiszámítását. Megfigyelünk ugyan eddig nem sikerült, de tekintve a részecskefizika elmélete, a Standard modell fantasztikus, immár négy évtizedes sikerét az összes eddig megfigyelt részecskefizikai folyamat pontos kiszámításában, kevesen kételkednek a létezésében. Lederman híres könyvében (*Az isteni a-tom vagy mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem?*, Typotex, Budapest) *isten-részecskének* hívja, de ez, szerencsére, a szakirodalomban

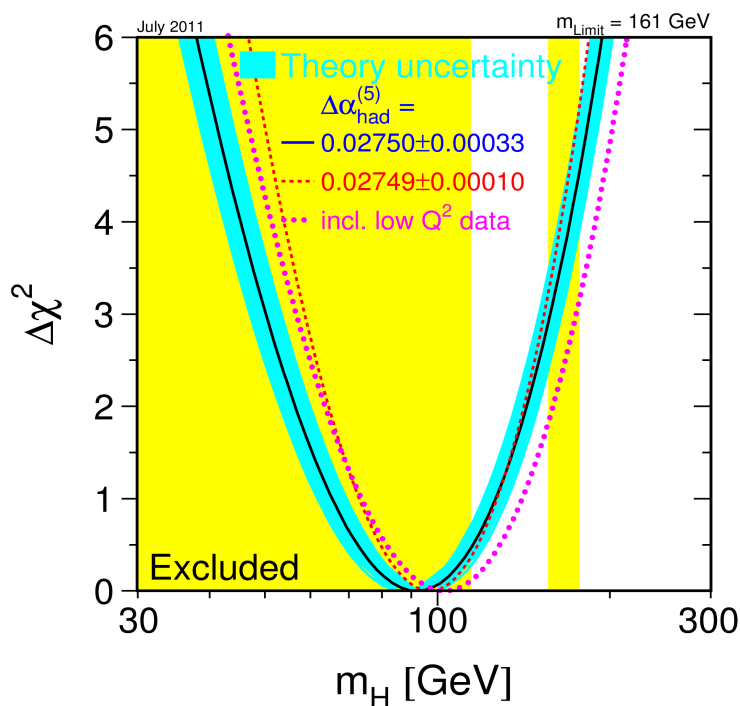
nem terjedt el. Állítólag Lederman eredetileg *istenverte részecskének* akarta hívni, de a kiadó ahhoz nem járult hozzá.



2. ábra. A CMS-detektor szupravezető mágnesének beillesztése.

A CERN óriási gyorsítója, a Nagy hadronütköztető, az 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 és a CMS detektor. A CMS együttműködésben alapító tagok vagyunk, a KFKI RMKI, az 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 m belső átmérővel, körülötte kétszerannyi 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 ketyegtették, majd 2000 tonnás darabokban engedték le az LHC földalatti barlangjába (2. ábra), az ATLAS-t viszont eleve a föld alatt építették fel.

Szimulációk segítségével tíz éve készülünk a Higgs-bozon megfigyelésére. Mivel a Standard modell alapján a Higgs-bozon minden feltételezett tömegére valamennyi keletkezési és bomlási reakció pontosan kiszámítható, a különböző tömegtartományokra különböző adatelemzéseket készítettünk. Már a CERN előző óriási gyorsítója, a Nagy elektron-pozitron ütköztető (LEP), meglehetősen behatárolta a Higgs-részecske lehetséges tömegét, kizárta a $114.4 \text{ GeV}/c^2$ (a hidrogénatom tömegének mintegy 122-szerese) alatti tartományt, de ugyanakkor a kísérleti adatokkal a legjobb egyezést egy $100 \text{ GeV}/c^2$ tömegű Higgs-bozon feltételezésével kapjuk (3. ábra). Mivel a proton eleve összetett részecske, számtalanféle reakciót kivált két proton nagyenergiájú ütközése, és az LHC protoncsomagjai ütközésekor 10-20 proton-proton ütközés is végbemehet, egy könnyű Higgs-bozont igen nehéz megfigyelni (4. ábra). Már több évtizede felhívták elméleti fizikusok (köztük Trócsányi Zoltán akadémikus) a figyelmet arra, hogy ilyen részecske megfigyelésére annak két nagyenergiájú fotonra való bomlása nyújt kiváló megfigyelési lehetőséget, a folyamat igen kicsi valószínűsége ellenére. A CMS-detektor erre optimalizálta a fotonok észlelésére szánt részét, az elektromágneses kalorimétert, amely 80000 PbWO_4 kristályból áll.



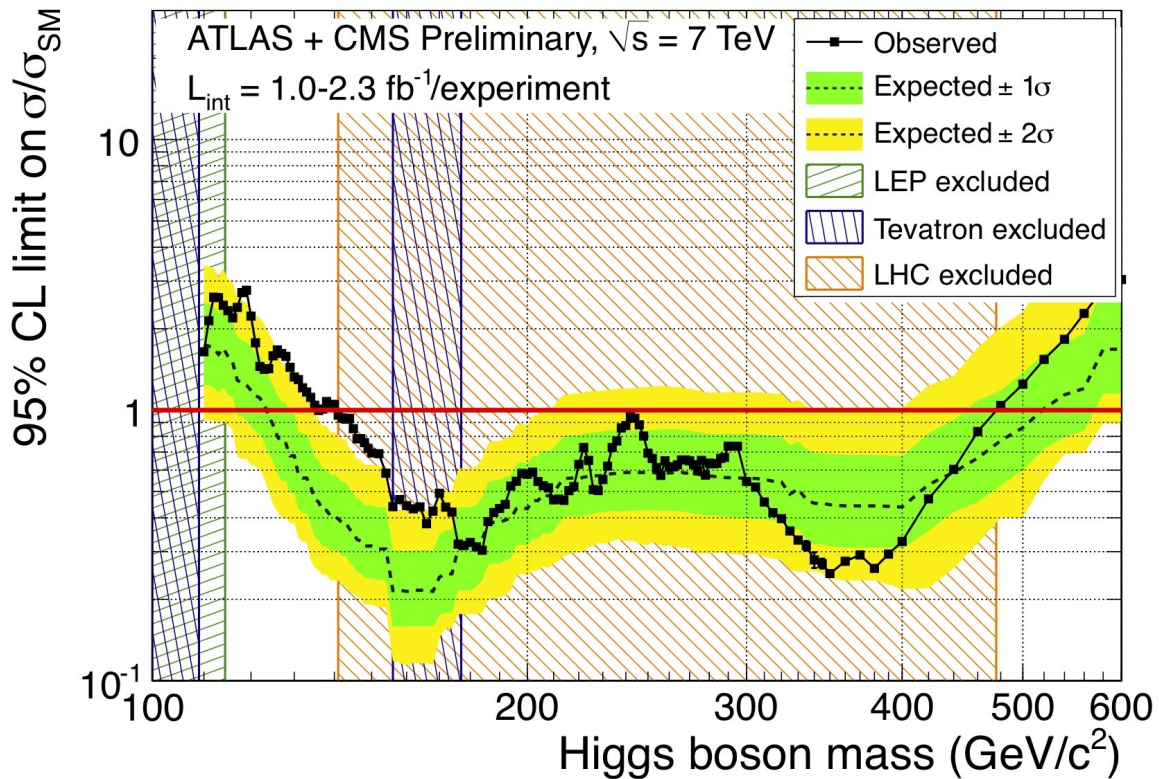
3. ábra. A Standard modell paramétereinek illeszkedése a kísérletekhez, a Higgs-bozon hipotetikus tömegének (energia-egységben) függvényében. A folytonos vonal az elmélet illesztési jósága., a körülötte levő sáv annak egyszeres szórása, azaz 68%-os bizonytalansági környezete. Az árnyékolt területeket 95% konfidenciával kizárják a korábbi kísérleti adatok, 114 GeV/c² alatt a CERN LEP, 165 GeV/c² környékén pedig a Fermilab Tevatronjának kísérletei. Az LHC kísérletei a Tevatron által kizárt tartományt erősen kiszélesítették.

2010 óta működik az LHC, 7000 GeV energián ütköztetve protonokat, egyre növekvő nyalábintenzitással: az indulása óta mintegy 10 nagyságrendet növeltek rajta és 2011 végére az eredetileg tervezett adatmennyiség csaknem hatszorosát szolgáltatotta. Vele párhuzamosan 2011-ig tovább működött a Chicago melletti Fermilab Tevatron gyorsítója is, habár alacsonyabb energián és jóval kisebb intenzitással.

Minden kísérleti adat rendelkezik természetes statisztikus bizonytalansággal, tudományos zsargonban hibahatárral vagy hibával. 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. Mivel a bizonytalanságot nagyon nehéz pontosan megbecsülni, a gyorsító fizikában a következő megállapodás született: elmondhatjuk, felfedeztünk valamit, ha azt legalább a bizonytalanság ötszöröse fölött látjuk, tehát ha, például, egy m_0 háttéren ülő jel esetén $m - m_0 > 5\sigma$ mennyiséget észlelünk, ugyanakkor pedig kizártuk, ha 95% konfidencia mellett nem látjuk. Miközben a Higgs-bozont kerestük, valamennyi kísérlet észlelt az 5σ küszöböt el nem érő többleteseményt a Higgs-bozon 140 GeV/c² körüli tömegének megfelelő tartományban, sőt, ezt némelyek meg is szellőztették blogokban, illetve magánjellegű sajtónyilatkozatokban, az együttműködések szinte bosszankodására. Július folyamán ez a többlet csaknem elérte a 3σ -t, de azután az augusztusban gyűjtött adatok hatására lecsökkent, ősszel pedig gyakorlatilag eltűnt, pedig igencsak reménykedtünk benne, hátha tovább fejlődik.

A 2011 novemberében lezajlott párizsi tematikus konferenciára a CMS-nek és az ATLAS-nak sikerült analizálnia a nyáron gyűjtött LHC-adatokat. Habár külön-külön egyik kísérlet sem zárja ki a Higgs-részecske egybefüggő tömegtartományát, a kettő együtt már igen. A 4. ábrán jól látszik, hogy a LEP, az LHC és a Tevatron adatai a Higgs-bozon lehetséges tömegét, ha nem is sikerült megfigyelnie, de mára már erősen behatárolta, és mivel az adatok egyezése az elmélettel a Higgs-bozon 100 GeV/c² körüli

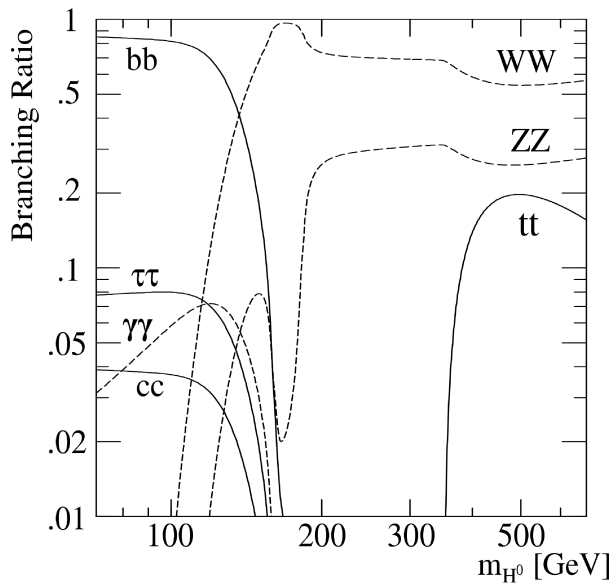
tömegénél a legjobb (3. ábra), legnagyobb valószínűséggel a 114 és 141 GeV/c² közötti tartományban található.



4. ábra. A LEP, a TEVATRON és az LHC kísérleti adatainak (2011 nyaráig gyűjtve) együttes analízise 95%-os konfidencia mellett kizárja a Standard modell Higgs-részecskéjének lehetséges tömegét 114 GeV/c² alatt, valamint 141 és 476 GeV/c² között. A vízszintes tengelyen a Higgs-bozon feltételezett tömegét, a függőlegesen pedig a megfigyelt és számított valószínűségek a szimulációk alapján várt és a mérési adatokból következő aránya látható. A Higgs-bozont tehát az ábra baloldalán fekvő *fehér* tartományban várjuk.

A CERN-ben működő nagy kísérletek, az ATLAS és a CMS megállapodtak egymással, hogy ha úgy érzik, felfedeztek valami újat, felkeresik vele a főigazgatót, aki azonnal szól a másik kísérletnek, ellenőrizze. Ezzel, természetesen, megőrzi az első kísérlet prioritását, de elkerüli 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.

Az előzetes becslések szerint 2012 végére elegendő adatunk gyűlik össze, hogy megtaláljuk a Higgs-bozont vagy kizárjuk a létezését, bármekkora legyen is a tömege. Habár a sajtóvisszhangja sokkal kevésbé lenne pozitív, a részecskefizika számára a Higgs-bozon kizárása érdekesebb volna, mint felfedezése, hiszen a Higgs-részecske nélkül összeomlik a mikrovilág jelenlegi elmélete és valami radikálisan újat kellene találnunk helyette.



5. ábra. A Higgs-részecske feltételezett bomlási csatornáit. Jól látható, hogy éppen a kísérleti adatok által szabadon hagyott, 114 és 141 GeV/c² közötti tartományt a legnehezebb tanulmányozni az egymással versengő reakciók miatt.

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