ANYAGVIZSGÁLÓK LAPJA
Elektronikus folyóirat
MINŐSÉGBIZTOSÍTÁS * ÁLLAPOTELLENŐRZÉS
2013/1-2

AZ LHC ÚJ RÉSZECSKÉJE - EREDMÉNYEK ÉS FELADATOK

SIKLÉR FERENC

***Kulcsszavak**: atomok, elektronfelhő, kvark, bozon, LHC, Higgs-mező, Higgs-bozon*

A körülöttünk levő világ alapvető építőkövei az atomok, melyek egy parányi atommagból, valamint az őket körülvevő elektronfelhőből állnak. Az atommagok erősen kötött protonok és neutronok alkotják, melyek maguk is összetett objektumok: két u kvark és egy d kvark egy protont, egy u és két d kvark pedig egy neutront eredményez. Jelenleg úgy gondoljuk, hogy a tört töltésű (+2/3 illetve -1/3 elektrontöltés) kvarkok és az elektronok már tényleg elemi, pontszerű részecskék.

A részecskefizika "periódusos rendszere" 18 részecskét és 12 antirészecskét tartalmaz. Az anyagi világot a feles sajátperdületű (spin) leptonok és kvarkok építik fel. A legkönnyebb töltött lepton az elektron, de van még két, nagyobb töltésű testvére is (a müon és a tau-lepton). Mindegyik leptonhoz tartozik egy-egy nagyon kis tömegű neutrínó. A fent említett u és d kvarkon kívül még négy, nagyobb tömegű kvarkot is találunk: s, c, b, t. Ez utóbbi top-kvark tömege a proton tömegének mintegy 190-szerese.

A részecskék közötti kölcsönhatásokat egész sajátperdületű részecskék (bozonok) közvetítik. Ilyenek az elektromágneses kölcsönhatás fotonja, a gyenge kölcsönhatás nehéz W^+, W^- és Z^0 részecskéi (tömegük a protonénak 85- illetve 95-szerese), valamint az erős kölcsönhatásért felelős gluon. A feltételezett Higgs-mező (valamint a Higgs-bozon) szerepe kettős: egyrészt teljessé teszi az elektromágneses- és gyenge kölcsönhatások egységét, valamint gondoskodik a fent említett elemi részecskék tömegéről. Ebbe a képbe a sokkalta gyengébb, de sokkal nagyobb hatótávolságú tömegvonzás egyelőre nem illik bele, feltételezett közvetítő részecskéjét, illetve a gravitációs hullámokat még nem sikerült kísérletekkel kimutatni. Szabad kvarkot nem figyelhetünk meg: csak kötött állapotban hármasával (barionok), valamint kvark-antikvark formában (mezonok) fordulnak elő. Antianyagot akkor kapunk, ha a barionok kvarkjait antikvarkokra cseréljük.

A környezetünkben csak stabil részecskéket látunk, a nagyobb tömegű vagy rövid élettartamú társaik megfigyelése érdekében részecskegyorsítókra van szükségünk: a nagy energiájú ütközések során a kezdeti mozgási energia egy része új részecskék keltésére fordítódik ($E=mc^2$). Sokunknak van részecskegyorsítója otthon: a katódsugárcsöves televíziókban a katódról kilépő elektronok az elektromos tér hatására gyorsulnak, a mágneses térben megfelelően eltérülnek, majd a fluoreszcens ernyőn képet hoznak létre. Egy részecskegyorsító működése nagyon hasonló, azzal a különbséggel, hogy az alkalmazott tér nem 10 kilovolt, hanem a gigavolt nagyságrendjébe esik, valamint a gyorsítandó részecske lehet proton, vagy nehéz atommag is.

Egy kör alakú gyorsító viszonylag rövid szakaszán találjuk a gyorsító üregeket. Bennük a teret üregről üregre az áthaladó részecskecsomagok sebességéhez kell hangolnunk, így végeredményben egy pontosan beállított rádiófrekvenciás térre van szükségünk. Minden egyes lefutott kör után kicsit gyorsítunk a részecskéken, maga a körgyűrű csak arra szolgál, hogy a részecskecsomagokat ismét visszahozza a gyorsítás helyére. A körpályán tartáshoz nagy mágneses terű dipólmágnesekre van szükség, a Lorentz-erőt használjuk. Az egymással szembe haladó nyalábok akár ezer milliárd részecskét is tartalmazhatnak, de ahhoz, hogy több ütközést is láthassunk, a nyalábokat nagyon kicsire (akár 10 mikron átmérőjűre) kell összenyomnunk. Ezt a feladatot a több helyen beiktatott fókuszáló hatású kvadrupólmágnesekkel végezzük el.

A Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) a Genf melletti Európai Részecskefizikai Laboratóriumban (CERN) található, a svájci-francia határon. Magyarország 1992 óta tagja a CERN-nek, ennek az óriási nemzetközi szervezetnek. Az LHC kerülete 27 km, a föld alatt átlagosan 100 m mélyen fut egy 4 m átmérőjű alagútban. A protonnyalábok végenergiája jelenleg 4 teraelektronvolt (TeV), más szóval mozgási energiájuk a tömegüknek több, mint 4000-szerese. A fénysebességtől alig eltérő sebességű nyalábok élettartama 10-20 óra. A gyorsító üregek (nyalábonként 8) 400 MHz-en működnek, gyorsító terük méterenként 5 MV. Az LHC-t nagyrészt az 1232 darab, egyenként 15 m hosszú, 35 tonnás szupravezető dipólmágnes alkotja. Teljes mágneses tér (mintegy 5 Tesla) esetén mindegyikük 1,3 GJ energiát tárol. A nyalábcsőben a mágneses teret nióbium-titán tekercsekkel állítjuk elő, melyeket nem-mágneses ausztenit tart a helyén. A mágnesek 1,8 K hőmérsékleten működnek, így az LHC nyalábcsövében még a világűrnél (2,7 K) is hidegebb van. A gyűrű hatalmas térfogatát kell hűteni

MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont RMI, Budapest-
A VIII. RAKK-on előadás rövidített változata

(több ezer kW hűtőteljesítmény), melyre a kezdeti nitrogénes előhűtés után folyékony héliumot használunk. A nyalábcsőben nagy vákuumra van szükség (10^{-10} Torr), amely megfelel a Föld felszínétől 1000 km magasban uralkodó viszonyoknak. Különös feladatot jelentett a 3 MA áram – felszíni forrásokból szupravezető mágnesekbe való – több lépcsős levezetése is. Teljes betöltöttség mellett a gyűrűben 2800 protoncsomag fér el, nyalábonként. A vékony nyalábcsomagok 25 ns-onként találkoznak, amikor több tíz, de akár 80 proton-proton ütközés is létrejöhet. Fontos megjegyeznünk, hogy LHC egy hosszú gyorsítási folyamat utolsó lépcsője, melyet több előgyorsító előz meg (Linac, PS Booster, PS, SPS), mindig többszörösére növelve a belőtt nyalábok energiáját.

A nyalábok a gyűrű négy pontján vihetők ütközésbe, melyek köré négy nagy (ALICE, ATLAS, CMS, LHCb) és két kisebb detektorrendszert (Totem, LHCf) építettek. A CMS (Compact Muon Solenoid) detektor célja a Higgs-bozon megtalálása, valamint új, eddig nem ismert fizika felfedezése. A kölcsönhatási pontot több rétegben nagyon jó helyfelbontású, szilícium alapú félvezető detektorok veszik körül, ezek rögzítik az ütközésben keletkező töltött részecskék pályáját. Ezek a vékony, mintegy 300 mikron vastagságú rétegek p-n átmenettel rendelkező diódák inverz kapcsolásban. A töltött részecske áthaladása során elektron-lyuk párokat kelt, melyeket elektromos térrel olvasunk ki. A detektor 3,8 T mágneses térben található, a pályák görbületének iránya és mértéke egyértelműen megadja a részecskék elektromos töltését, valamint impulzusát. A kijjebb elhelyezkedő kaloriméterek javarészt ólom-wolframát kristályokból állnak. A töltött és semleges részecskéket lelassítják, elnyelik, energiájukat – párkeltéssel és fékezési sugárzás során – fényjelekké alakítják, így megmérik teljes energiájukat. A szolenoid mágnesen kívül találhatók a müonok érzékelésére szolgáló kamrák.

Magyarországról a budapesti Wigner Fizikai Kutatóközpont, a debreceni ATOMKI és a Debreceni Egyetem kutatói vettek és vesznek részt a kísérlet detektorainak megépítésében és működtetésében, az adatok kiértékelésében és publikálásában. Csoportunk végzi a belső félvezető detektor időbeállítását, kalibrációját, a szenzorok és a kiolvasó chip hatásfokának nyomon követését. Hasonlóan fontos a detektor, valamint a müon kamrák helyének figyelése, a megfelelő paraméterek igazítása, melyet nagy pontosságú LED-es mérésekkel, majd szoftveres optimalizálással, a felvett pályák ismételt kiértékelésével végzünk el. Az adatfeldolgozás számítástechnikai hátterét az LHC Computing Grid szolgáltatja, amely az egyes intézetekben működő, egymással összekapcsolt számítógép-klaszterek együttesét jelenti. Ez év júniusában adták át a Wignerben működő új adatközpontot, mely kiemelt szerepet fog játszani az LHC-ből ömlő adatok feldolgozásában és kezelésében. Csoportunk vezető szerepet játszott az első adatok feldolgozásában: feladatunk a keltett töltött részecskék szög- és impulzuseloszlásának meghatározása volt. Jelenleg is aktívan részt veszünk az erős kölcsönhatás, és a forró maganyag tanulmányozásában.

A fizikusokat mindig vonzotta a világban megfigyelt erők egyesítése, annak megmutatása, hogy a látszólag nagyon eltérő kölcsönhatások egy közös őstől eredhetnek. Az elektromágneses és gyenge kölcsönhatások egyesítése a feltételezett, négykomponensű Higgs-mezővel lehetséges. A mező értéke kezdetben nulla volt, egy metastabil állapotban nyugodott, majd az Ősrobbanás után egy kicsivel "elvándorolt", legurult a sokkal kedvezőbb potenciális energiájú völgybe (mexikói kalap alja), ahol nagysága a ma ismert értéket vette fel (spontán szimmetriasértés). A Higgs-mező négy komponenséből pedig létrejött a tömeg nélküli foton, az 1983-ban kimutatott gyenge W^+, W^- és Z^0 bozonok. Ha a fenti elmélet igaz, akkor maradnia kellett még egy komponensnek (skalár), amely a Higgs-bozon. A mezőt Kibble, Guralnik, Hagen, Englert és Brout javasolták közel egy időben (1964), a bozont Peter Higgs ugyanakkor. Az elektrogyenge egyesítést 1968-ban fogalmazta meg Glashow, Salam és Weinberg, melyért 1979-ben Nobel-díjat kaptak.

A Higgs-bozon tömegére csak következtethettünk, meghatározásához mindenképpen mérésekre volt szükség. A kisebb energiás mérésekkel (a Tevatron Amerikában, a LEP a CERN-ben) egyre nagyobb tömegtartományokat tudtunk kizárni: abban biztosak lehettünk, hogy ha létezik, tömege 114 GeV-nél biztosan nagyobb. Proton-proton ütközésekben LHC energiákon leginkább két gluon egyesülése, valamint az ütközésben keltett W és Z bozonok fúziója során kelthetünk Higgset. A bozon nagyon gyorsan elbomlik, a sokféle bomlási csatorna közül a két fotonos, valamint a ZZ*-on keresztül négy leptonra való bomlások megfigyelése ígérkezett legegyszerűbbnek. A végállapoti részecskék energiáinak és impulzusainak megfelelő összegzésével a kezdeti részecske tömege meghatározható. Ha a megfigyelt részecskék valóban ugyanannak a bozonnak a bomlásából származtak, a tömeg oszlopdiagramjában egy csúcsot kell kapnunk. Ha nem, akkor egy lapos, vagy legalábbis sima hátteret várunk.

Mind a két fotonos, mind a négy leptonos bomlási csatornában egy-egy meggyőző csúcsot kaptunk egyaránt 125 GeV-nél, a kombinatorikus háttér felett. Az ATLAS és CMS adatai egymást

megerősítve vezettek el a 2012. július 4-i genfi bejelentéshez: egy új bozon találtunk, melynek jellemzői egyelőre jó egyezést mutatnak a feltételezett Higgs-bozonnal. A részecske a protonnál mintegy 130-szor nehezebb, vagyis hasonló a xenon vagy cézium magjának tömegéhez.

A Higgs-bozon illetve a -mező megléte sok kérdést tisztáz. Megmutatja, hogy a részecskefizikai elképzeléseink (Standard Modell) alapvetően helyesek, a többi elmélet megbukott. Az ismert elemi részecskék tömegüket a mezőhöz való kapcsolódástól nyerik. A Higgs-bozon az első nulla sajátperdületű közvetítő részecske. Egyesek feltételezik, hogy a mező kapcsolatban lehet a világegyetem kezdeti felfúvódásával (infláció). Sőt, akár az is elképzelhető, hogy a mező kezünkbe adhatja a kulcsot a többi, még nem egyesített kölcsönhatás (erős, tömegvonzás) közös kezeléséhez is.

A munka azonban közel sem ért véget. Bár a Higgs-bozon sajátperdülete nagy valószínűséggel 0 és nem 2, egy másik belső jellemzője, a paritása még nem dönthető el teljes bizonyossággal. Kissé gyakrabban bomlik két fotonra, de ez az eltérés akár statisztikus fluktuációkkal is magyarázható. Összefoglalva, ahhoz, hogy teljes bizonyossággal nyilatkozhassunk, még több adatra, mérésekre van szükségünk.

A sikerek mellett maradt még jó pár megoldatlan probléma is: a mikrovilágot leíró kvantumelmélet és a tömegvonzás összeegyeztetése; a világunk nagyobb részét alkotó sötét anyag mibenléte; a világ gyorsuló tágulását eredményező sötét energia megértése; az ismert kölcsönhatások nagy egyesítése. Az LHC a két éves nagyjavítás után 2015 elején indul újra, duplázott nyalábenergiával és nagyobb nyalábintenzitással.

AZ ELŐADÁS ÁBRÁI