

# ÚJ FELFEDEZÉSEK A CERN NAGY HADRONÜTKÖZTETŐJÉNÉL: FURCSA RÉSZECSKÉK

Horváth Dezső  
MTA Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest  
és MTA Atommagkutató Intézet, Debrecen

## Új fizika jelei az LHC-nál?

A részecskefizika mindig az érdeklődés élvonalában van, és jelentősebb eredményeiért gyakorlatilag kijár a Nobel-díj. Ezért szinte évente felsejlik valamilyen új felfedezés benne, és nem okvetlenül mérési hiba következtében, mint a fénynél gyorsabb neutrínók esetében. Amint korábban megírtuk, a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél (1. ábra) az ATLAS és a CMS kísérlet 2015-ben az addigi adatoknak ellentmondani látszó új jelenséget látott kialakulni: Higgs-bozon-szerű részecske jelét  $750 \text{ GeV}/c^2$ -es tömegnek megfelelő energiánál, amely azonban nem egyezett a Higgs-bozon tulajdonságaival. Az új jel a két kísérlet 2016-ban gyűjtött adataiban fokozatosan elenyészett, beleolvadt a háttérbe. Ugyanakkor viszont az antianyag vizsgálatára szakosodott LHCb együttműködés egész sor olyan új részecske megfigyelését jelentette be, amelyeket több korábbi kísérlet már látni vélt, más kísérletek pedig megcáfoltak. A továbbiakban néhány furcsa és eddig más kísérlet által sem megérősített, sem pedig megcáfolt részecskefizikai megfigyelést írunk le.

## A mindenható standard modell

A részecskefizika jelenlegi elmélete, amelyet történeti okokból standard modellnek hívunk, a világot anyagi és kölcsönhatást közvetítő részecskék segítségével írja le, az előbbieket *Enrico Fermi* olasz fizikus nevé-



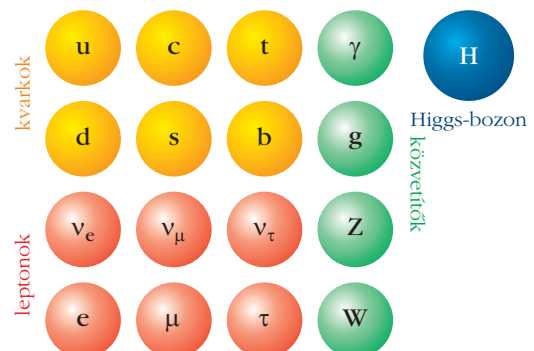
Horváth Dezső Széchenyi-díjas kísérleti részecskefizikus. 1970-ben végzett az ELTE-n, vizsgálatait Dubnában és Leningrádban kezdte, a kanadai TRIUMF-ban, az amerikai BNL-ben, a svájci Paul-Scherrer Intézetben, az olasz INFN-ben, majd a CERN-ben folytatta. Budapest–Debrecen kutatócsoportokat szervezett CERN-kísérletekre. 2006 óta koordinálja a magyar fizikatanárok részecskefizikai oktatását a CERN-ben. Emeritus professzor, magántanárként részecskefizikát oktat a Debreceni Egyetemen.



1. ábra. A svájci–francia határon (keresztekkel jelölve) fekvő CERN és környéke a Szuper-protonszinkrotron (SPS) és az LHC gyűrűivel, valamint háttérben az Alpokkal. Jelentős magyar csoport az ATLAS, ALICE, NA61 és TOTEM kísérleteknél dolgozik, de most az LHCb-ről lesz inkább szó.

ből fermionoknak, az utóbbiakat *Satyendra Bose* indiai fizikus neve után bozonoknak hívjuk. A fizika jelenlegi állása szerint a 2. ábra valamennyi alapvető elemi részecskét tartalmaz, mindegyiket meg is figyeltük, utójára, 2012-ben a Higgs-bozont. A fermionok háromfélék lehetnek: hat kvarkból állnak össze a magerőkben részt vevő összetett részecskék, a *hadronok*, amelyek közül a legismertebbek az atommagot alkotó neutron és proton. Az ugyancsak hat lepton fele töltött részecske, közöttük a legkönnyebb az atomok elektronja, és mindegyikhez tartozik egy-egy elektromosan semleges neutrínó. A bozonok közül a  $\gamma$ -foton közvetíti az elektromágneses kölcsönhatást, a

2. ábra. A standard modell részecskéi: fermionok (kvarkok és leptonok) és bozonok, a kölcsönhatások közvetítői.



8 g-gluon a magerőket és a W- és Z-bozon pedig az atommagok bomlását vezérlő gyenge kölcsönhatást. A Higgs-bozon szerepe sajátos: ő maga nem közvetít kölcsönhatást, de szerepe van az elemi részecskék tömegének létrejöttében.

A standard modellt eddig valamennyi mérési adatunk igazolni látszik, a segítségével végzett számítások eredményét az adatok igazolják. Ugyanakkor jó néhány megfigyelésről, mint például a neutrínók tömege, a Világegyetem sötét anyaga, vagy az antianyag eltűnése az Ősrobbanás után nem ad számot. Van okunk rá, hogy egyre pontosabb részecskefizikai kísérletekkel tapogassuk, keressük a standard modell érvényességi határait. A Higgs-bozon felfedezése óta jelenleg ez az LHC, a CERN Nagy Hadronütköztetőjének egyik fő feladata.

## Felfedezés és kizárás

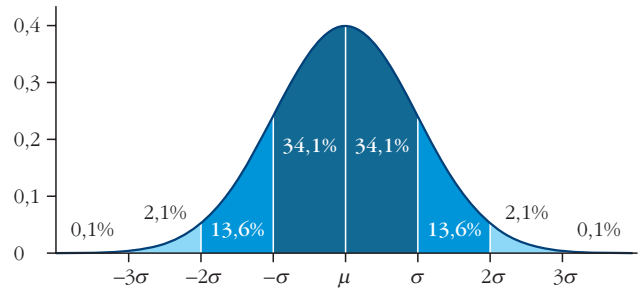
A kísérleti eredményekhez matematikai *bizonytalanságot* és *megbízhatóságot* rendelünk, ezek jellemzik azok minőségét.

### Felfedezés

A bizonytalanság sokféle forrásból tevődik össze: az észlelt események számából ered a *statisztikus*, a jel mögötti zaj vagy háttér, valamint a mérőberendezés és az adatelemzéshez felhasznált információ a *szisztematikus* bizonytalanság forrása. Mindezeket némileg félrevezető kifejezéssel *mérési hibának* is hívják, habár egyáltalán nem hiba következménye. A különböző bizonytalansági források járulékat matematikailag összegezve (ez egyébként igencsak bonyolult eljárás) kapjuk mérési eredményünk teljes bizonytalanságát, amelyet hagyományosan a szigma ( $\sigma$ ) görög betűvel jelölünk. Megállapodás szerint a részecskefizikában akkor fedezünk fel valami újat, ha (1) az legalább a teljes kísérleti bizonytalanság ötszörösével,  $5\sigma$ -val emelkedik ki a mögötte található háttérből, az ismert folyamatok tengeréből, azaz megbízhatósága a bizonytalanság legalább ötszöröse; (2) azt másik független kísérlet megerősíti és (3) az eredményt más kísérlet nem cáfolja meg. Az eddigi tapasztalat szerint, amikor az első két feltétel teljesült, azt általában a többi kísérlet is megerősítette.

### Kizárás

A megbízhatóság matematikai fogalmára elsősorban akkor van szükségünk, ha nem kapunk a keresett új jelenségre utaló, meggyőző jelet, és azt akarjuk tudni, mit jelent az eredmény a feltételezett modell érvényességére vonatkozóan. A gyorsító részecskefizikában – megállapodás szerint – azt a jelenséget zárjuk ki, amelyre a kizárás megbízhatósága (idegen szóval *konfidenciája*) 95%-os, vagyis annak valószínűsége, hogy a jel mégis létezik, csak nem vettük észre, kevesebb, mint 5% (3. ábra). A statisztika tu-



3. ábra. A  $\sigma$  bizonytalanságú normális valószínűségeloszlás megbízhatósági fokozatai.

dománya azt mondja, hogy ha például egyszerű számlálásnál nem észleltünk semmit, azaz 0 eseményt láttunk, akkor 95%-os megbízhatóság mellett csak azt állíthatjuk, hogy az észlelt események száma 3-nál kevesebb volt.

Nagyon bonyolult feladat a szisztematikus bizonytalanság megállapítása, hiszen a különböző eltérések forrásai összefüggenek, az egyik változása a többit is megváltoztathatja, és igyekeznünk kell mindezt a legpontosabban figyelembe venni. Ugyanakkor a fizikus is gyarló emberi lény: vigyáznunk kell, nehogy felfedezési vágyunk befolyásolja adataink elemzését. Ennek elkerülésére két módszert is alkalmazunk:

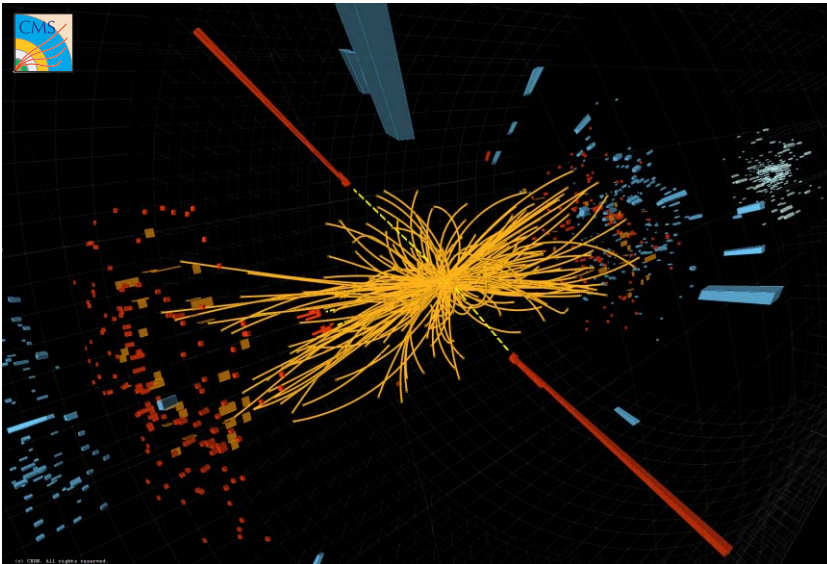
- Az adatelemzést szimulációk segítségével optimalizáljuk, publikáljuk, és jóvá hagyatjuk az egész együttműködéssel, mielőtt alkalmaznánk. Tekintettel arra, hogy az adatokat sok csoport elemzi és végeredményképpen a legjobb elemzés kerül nyilvánosságra, az elemzési módszerek a versengő csoportok igen alapos kritikájának vannak kitéve.

- Az adatgyűjtés közben, ha már valamilyen új jelenséget sejtünk, az oda várható adatokat kizárjuk az előzetes elemzésből, és egy előre meghatározott pillanatban, rendszerint nagyobb konferencia előtt szabadítjuk fel, valamennyi hasonló elemzésen dolgozó csoportnak egyidejűleg, nehogy egymást befolyásolják. Ezt a módszert vak analízisnek hívjuk és az orvostudományból kölcsönöztük.

*Összefoglalva tehát:* a megfigyelés nálunk  $5\sigma$  többlet, a kizárás pedig 95%-os hiány. A (részecske)fizikának azonban vannak területei, ahol a gyorsító mérésnél kevesebb az észlelés. A neutrínófizikában és az asztrofizikában 90%-os kizárást is meg szoktak adni.

## Elfogadott felfedezés: a Higgs-bozon

Az  $5\sigma$  többlettel kapcsolatos pozitív tapasztalat ellenére azonban a részecskefizikában akkor fogadunk el egy felfedezést, amikor azt egy másik kísérlet hasonló megbízhatósággal megerősíti. A Higgs-bozon megfigyelését akkor merte a CERN hivatalosan bejelenteni, amikor mind az ATLAS, mind pedig a CMS kísérlet  $5\sigma$  eseménytöbblettel látott ugyanolyan tömegű és a Higgs-bozonhoz hasonló tulajdonságú részecskét (4. ábra). Ugyanakkor a néhai LEP elektron-positron ütköztető négy kísérlete közül az ALEPH csaknem meggyőzően látott Higgs-bozont 10 GeV-vel kisebb tö-



4. ábra. A sok egyéb részecske mellett keletkező Higgs-bozon bomlása két nagy energiájú fotonra (pirossal jelölve) a CMS-detektorban.

megnél, mint ahol később felfedezték, de a másik három (DELPHI, L3 és OPAL) ugyanott semmi többletet nem észlelt; emiatt komoly viták voltak a közös cikk megfogalmazásáról. A LEP-nél több hasonló eset is volt, amikor az egyik kísérlet észlelt valami újat, de a többi nem látta: ez a statisztika gonosz tréfája a kísérletezőkkel.

Hasonló eset volt az is, ami a frissen észlelt Higgs-bozon tanulmányozása alatt történt 2012-ben. Az adatok negyede már meggyőzően mutatta az új részecskét, de mindkét kísérlet esetén valamivel nagyobb valószínűséggel jelentkezett, mint az elméleti jóslat. Azután az ATLAS adataiban kezdetben nőtt a jel, a CMS adataiban viszont csökkent, állandóan a kísérleti bizonytalanság határán tartva a különbséget. Az év végére minden adat szépen belesimult a standard modellel számított értékekbe. A Higgs-bozonos adatelemzés fejlődése is érdekes volt: kezdetben a kísérletek elemzői a statisztikus bizonytalanságot igyekeztek csökkenteni, emiatt viszont az adatmennyiség növelésével a szisztematikus bizonytalanság nagyobb lett a statisztikusénál. 2013-ban mindkét kísérlet új elemzési módszert készített, amellyel a szisztematikus bizonytalanságot a statisztikus alá sikerült csökkenteni, a különbség az ATLAS esetében volt igazán feltűnő. Vegyük

észre, hogy egy kísérlet adatgyűjtését nem érdemes folytatni, amikor a statisztikus bizonytalanság már a szisztematikus alatt van.

## Összetett kvarkállapotok

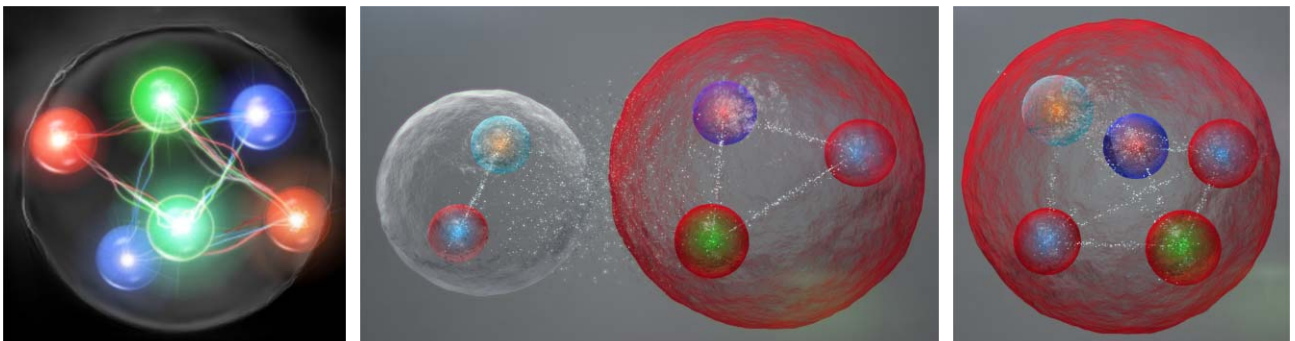
A standard modell feltételezi, hogy a kvarkok közötti erős kölcsönhatás töltése három állapotú, és azt a színlátással való kiváló analógia alapján *színtöltésnek* hívjuk. A természet csak színtelen állapot létezését engedi, ezért csak a kétféle legegyszerűbb színtelen kötött kvarkállapot létezik: a három kvarkból álló *barionok* ( $[qqq]$ ), mint az  $[udd]$  neutron és az  $[uud]$  proton, illetve a kvark + antikvark kötött állapotok, a *mezonok*. Három antikvark természetesen

antibariont alkot, olyan például az  $[\bar{u}\bar{u}\bar{d}]$  *antiproton*. Elvben semmi sem gátolja háromnál több kvarkból álló hadronok kialakulását, amíg a színtelenség követelménye kielégül. Ilyenek lehetnek a *tetrakvark* vagy *dimezon*,  $[q\bar{q}q\bar{q}]$ , a *pentakvark*  $[qqq\bar{q}q]$  és a *hexakvark* vagy *dibarion*  $[qqqqqq]$  vagy  $[qqq\bar{q}\bar{q}\bar{q}]$ , bennük a  $q$  akármelyik kvarkot jelölheti, vegyesen. Ezek az állapotok lehetnek két hadron molekulaszerűen kötött állapotai, vagy kvarkanyagyszerű erősen kötött állapotok. Még egzotikusabb a sok gluon kötött állapota, a *gluonlabda*. Mindegyik kielégítheti a színtelenség követelményét.

## Dibarionok vagy hexakvarkok

Egy hexakvark (5. ábra, balra) biztosan létezik, a deuteron, a proton és neutron kötött állapota, és az valóban molekulaszerű, hiszen a neutron és a proton külön-külön van benne, viszonylag gyenge kötésben. Elméletileg megjósolták a H dibarion létezését, amely  $[uds][uds]$  vagy  $[udsuds]$  alakú, és azt többen felfedezték, majd létezését még többen megcáfolták. A 80-as évek végén egy konferencián tanúja voltam, hogy a dibarionokkal foglalkozó ülést a konferencia elnöke a következő mondattal jellemezte: „A dibarionok ér-

5. ábra. Balra a hexakvark (dibarion), középen a mezon+barion molekula és jobbra a pentakvark.

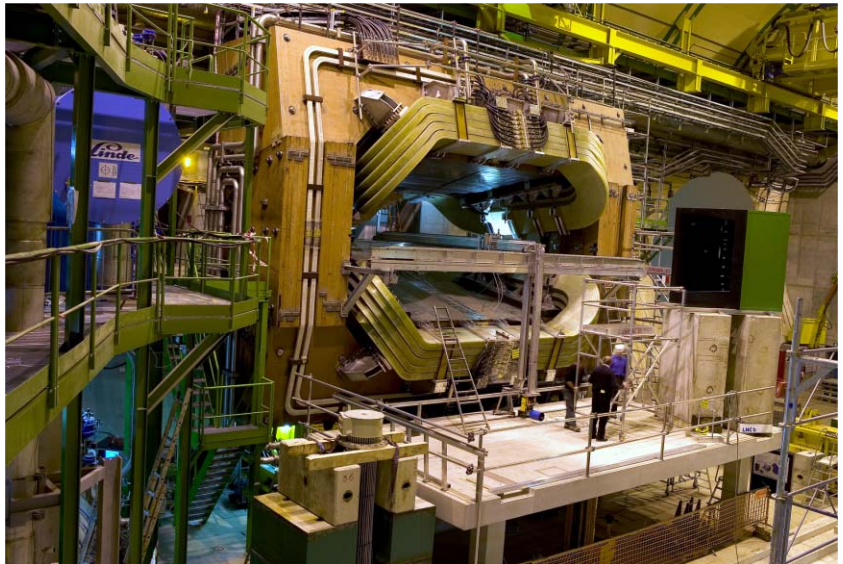


dekes tulajdonsága, hogy a mérések pontosításával hajlamosak eltűnni.” A dibarionokat azóta is érdeklődés övezi: az InSpire publikációs adatbázis 1980 előtt 50, 1980 és 1990 között 350, 1991 és 2000 között 260, 2001 és 2010 között 120, 2011 óta pedig 120 dibarionokkal foglalkozó publikációt tart nyilván.

### Pentakvarkok

Az elhíresült  $\Theta^+ = [u u d d \bar{s}]$  pentakvark, az első ötkvarkos állapot (5. ábra, középen és 5. ábra, jobbra) létezését szovjet elméleti fizikusok várták (jósolták meg elméleti számítás alapján, ahogy mondani szoktuk) 1540 MeV/c<sup>2</sup> tömeg környékén. *Einstein*  $E = mc^2$  formulája alapján, amely összefüggésbe hozza az energiát és a tömeget, a részecskék tömegét energiaegységekben, általában millió elektronvoltban (1 eV energiát nyer egy elektron 1 V feszültség hatására), MeV-ben mérjük és a részecske jele után írjuk. Ennek megfelelően ez a pentakvark a  $\Theta^+(1540)$  nevet kapta. A javaslat nagy publicitást kapott, nyolc kísérlet korábbi adatok elemzése alapján azonnal felfedezni is vélte (a részecskefizika eseményeket tárol, amelyekhez később vissza lehet térni és újabb szempontokból elemezni), majd még többen megcáfolták. Sokan utána számoltak, például *Csikor Ferenc* és társai (Eötvös Egyetem) számításai 2006-ban a  $\Theta^+(1540)$  létezését kétségbe vonták. Ez a pentakvark le is került a napirendről.

Annál meglepőbb volt, amikor az antianyag kutatására alakult LHCb együttműködés (6. ábra) 2015-ben közölte, hogy két pentakvarkállapotot (7. ábra, balra) fedeztek fel a b-kvarkot tartalmazó  $\Lambda_b^0$  barion bomlás-termékeiben (7. ábra, jobbra). Az LHC nagy energiájú proton-proton ütközéseiben keletkező b-kvarkok a protonokból kiszabaduló u és d kvarkokkal  $\Lambda_b^0 = [b u d]$  bariont keltenek, amely nagyon sokféleképpen bomlik. A bomlástermékekből azonosították a  $J/\Psi = [c \bar{c}]$  mezon (két Nobel-díjas felfedezője, *Ting* és *Richter* különböző betűvel jelölte, ezért maradt rajta a ket-tős szimbólum) igen jellegzetes, hegyes csúcsot adó  $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  müonpárra bomlását, és ennek segítségével a  $J/\Psi$  + proton energiaspektrumában megjelenő ren-



6. ábra. Az LHCb észlelőrendszer szerelése a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél. A kísérletet az antianyag hiányának tisztázására és ritka jelenségek észlelésére építették, főleg b-kvarkot tartalmazó hadronállapotok tanulmányozásával. A képen a detektor óriási dipólusmágnese látszik, azt ma már eltakarja az észlelőrendszer.

geteg ismert  $\Lambda_b^0 \rightarrow K^- + J/\Psi + p$  bomlás mellett, 4380 és 4450 MeV energiánál két új tömegcsúcsot figyeltek meg. A 8. ábrán látható mért energiaspektrumban a  $P_c$  pentakvark 4450 MeV energiánál keskeny, 4380 MeV-nél széles csúcsot ad a standard modell által számított, már ismert bomlások járulékaik mellé. Mindkét megfigyelés megbízhatósága igen nagy, a  $P_c(4380)$  konfidenciája  $9\sigma$ , a  $P_c(4450)$ -é  $12\sigma$ .

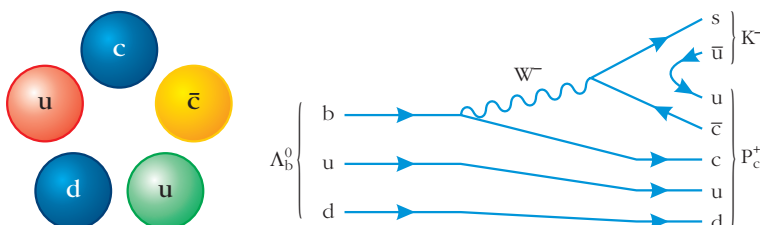
Az LHCb együttműködés a fenti megfigyelést egy olyan cikkben közölte, amelynek – a nagyenergiás kutatásokban szokásos módon – rengeteg szerzője van; az abc-sorrendben felírt 725 szerző listája Aaij névvel kezdődik – mint például a *PRL* 115, 072001 is, amelyből jó pár ábra származik – (az ATLAS-cikkek első szerzője Aad, a CMS-cikkek szerzői az országok szerinti abc-ben szerepelnek, jelenleg az örményekkel [Armenia] kezdve, amíg például Albánia vagy Argentína nem csatlakozik).

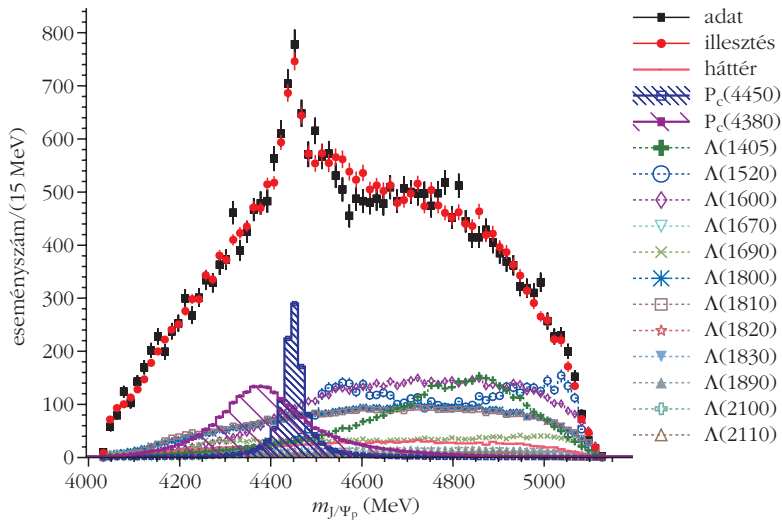
### Tetrakvarkok

2016 nyarán közzétették az LHCb kísérlet másik érdekes, tetrakvarkokra vonatkozó megfigyelését. Tetrakvark egyszerűen két mezon enyhén kötött állapota is lehet, tehát a nagy energiájú protonütközések óriási szét-szórt részecskemennyiségében szinte lehetetlen meg-

figyelni, ha csak nem tartalmaz több nehéz kvarkot. Mivel a proton u és d kvarkot tartalmaz, olyan állapotokat célszerű keresnünk, amelyek kizárólag náluk nehezebb kvarkokból állnak. Egy ilyen állapotot már a Chicago melletti Fermilab Tevatron ütköztetőjénél sikerült kimutatni. Ezt is a  $J/\Psi \rightarrow \mu^+ \mu^-$  bomlással ismerték fel (további nyelven azt mondjuk, *címkézték*), de ezúttal a  $B^+ = [\bar{b} u]$  mezon bomlásakor  $J/\Psi = [c \bar{c}]$ ,  $K^+ = [\bar{s} u]$  és  $\Phi = [\bar{s} s]$  mezonokra. A mért

7. ábra. Balra a  $P_c$  pentakvark feltételezett szerkezete, jobbra a  $P_c$  pentakvark keletkezése  $\Lambda_b^0$  barion bomlásakor.





8. ábra. Pentakvarkok megjelenése a  $\Lambda_b^0$  barion bomlásában 4380 és 4450 MeV/ $c^2$  tömegnél. A két pentakvark satírozott lila és kék csúcsa illesztett, a többi folyamat járuléka szimuláció eredménye. A folyamatok összege jól lefedi a mért energiaspektrumot.

energiaspektrum a  $J/\Psi + \Phi$  rendszer tömegére vonatkozott, és a két Tevatron-kísérlet 4140 MeV-nél látott  $5\sigma$  feletti konfidenciával [ccss] tetrakvarkcsúcsot. Az LHCb kísérlet ezt a megfigyelést igazolta, sőt elképesztő mennyiségű adatukban még három hasonló állapotot találtak.

Az LHCb kísérlet tehát 2016-ban sikeresen megfigyelt több kötött tetrakvark-állapotot. Amint azt a 9. ábra illusztrálja, a mért energiaspektrum nem igazán írható le a standard modell ismert folyamataival, de négy tetrakvark-állapot beillesztése a szimulációba az elméleti görbe és a mért adatok illeszkedését jelentősen megjavítja. A négy tetrakvarkcsúcs 4140, 4274, 4500 és 4700 MeV tömegenergiánál található  $5\sigma$  feletti megbízhatósággal.

## Gluonlabdák

Tudvalevő, a protonok és neutronok tömegének mintegy fele gluonok formájában van jelen, a három alapvető kvark tömege (*vegyértékkvarknak* is hívják) néhány százalékkal járul csak hozzá, a többi tiszta energia. Az erős kölcsönhatás elmélete, a *kvantum-szindinamika* megengedne tisztán gluonokból álló részecskét, azaz kötött állapotot, ezt gluonlabdának (angolul glueball) hívják. A mezonok részletes tanulmányozása lehetőséget nyújt ezek megfigyelésére, mivel a kvarkok egyesülésére vonatkozó szabályok csak bizonyos kvantumszámokat engednek meg a kvark + antikvark állapotokra. Anomális kvantumszámok megfigyelése esetén mezonok kötött állapotára vagy gluonlabdára is gyanakodhatunk. Elméleti fizikusok meg

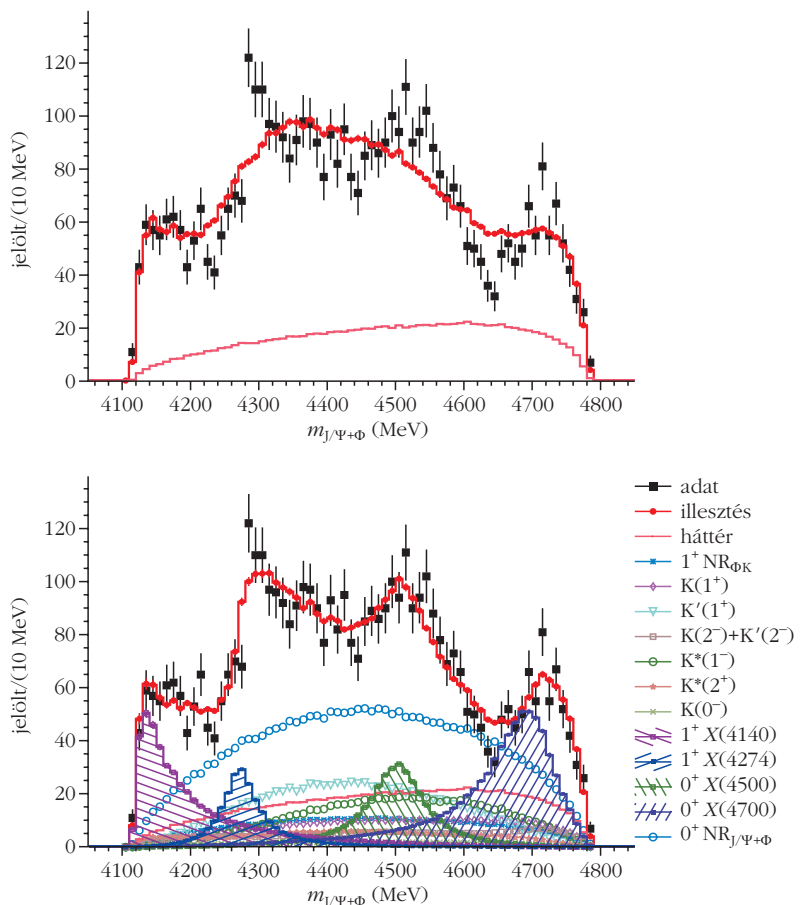
vannak győződve róla, hogy az enyhén rejtélyes és emiatt alaposan tanulmányozott  $f(1710)$  részecske valójában tiszta gluonlabda és nem csak egyszerűen mezon gluoncsomóval vagy mezon-mezon kötött állapot.

## Megmagyarázatlan és nem igazolt jelenségek

### CDF-esemény

A részecskefizikai kísérletek hoztak néhány igazán elképesztő és máig sem nem igazolt, sem nem megmagyarázott jelenséget. Számomra a legérdekesebb az az esemény volt, amelyet a Tevatron CDF kísérlete észlelt 20 évvel ezelőtt: egy 1960 GeV energiával ütköző proton és antiproton teljes tartalma eltűnt és oldalra csak egy elektron, egy pozitron és két foton repült ki viszonylag gömbszimmetrikusan, nagy energiával. Jó kérdés, hova lett a 3-3 kvark és antikvark meg a rengeteg gluon, tehát a sok színes részecske: a fizika jelenlegi tudása szerint ez az esemény egyszer-

9. ábra. A  $J/\Psi + \Phi$  rendszer tömegére mért energiaspektrum az LHCb kísérlet adataival. Fölül a tetrakvarkállapotok feltételezése nélkül, alul azok szimulációba illesztésével. Jobb oldalt lent az adatelemzéskor figyelembe vett, ismert folyamatok láthatók, a feltételezett tetrakvark-állapotok járuléka satírozva.



rően nem volt lehetséges, illetve tudományosabban fogalmazva, nagyon-nagyon valószínűtlen volt. Elméleti cikkek valóságos özöne próbálta megmagyarázni, és az észlelést soha nem sikerült megismételni. A CDF-kísérletnek volt egy másik furcsa mérése is: 2011-ben nagy izgalmat váltott ki egy új részecske észlelése, amely W bozonra és két hadronzáporra (azaz kvarkpárra) bomlott. Az észlelés ellent mondott a standard modellnek, a megbízhatósága  $3,2\sigma$  volt, amely a későbbi adatok felhasználásával  $4,8\sigma$ -ra nőtt. Ugyanakkor viszont a Tevatron másik fő kísérlete, a DZero közölte, hogy nincs ott semmi, ami eltemette az egészet.

## Negyedik neutrínó

A Los Alamosi LSND kísérlet 2001-ben elektron-anti-neutrínók megjelenését észlelte olyan folyamatban, ahol azok nem keletkezhettek. Közepes energiájú protonokat lőttek réztömbbe, ahol azok pozitív és negatív  $\pi$ -mezonokat, pionokat keltettek. A negatív pionok elnyelődtek az atommagokban, a pozitívak pedig továbbrepülve elbomlottak müonra és müon-neutrínóra  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$ . A gyors müon is elbomlott pozitronra, elektron-neutrínóra és müon-antineutrínóra, a végállapotban tehát háromféle neutrínó jelenhetett csak meg, elektron-antineutrínók nem. A megjelenésüket meg lehet magyarázni egy negyedik neutrínó létezésével, de az meg ellentmond az eddigi kísérleti tapasztalatnak. Ráadásul az a negyedik neutrínó *steril* kell hogy legyen, nem lehet párja a töltött leptonok között, hiszen az a standard modell kísérleti ellenőrzésénél régen megjelent volna. Az észlelés megbízhatósága  $3,3\sigma$  volt, tehát jóval a bűvös  $5\sigma$  alatt maradt. Új kísérletet szerveztek MiniBooNE néven a jelenség ellenőrzésére, amelyet hasonló feltételek mellett, de egy nagyságrenddel nagyobb energián és neutrínóröptetési távolságon végeztek a Fermilabban. Az eredmény igen érdekesen alakult: 2007-ben azt jelentették, hogy

nem látják a jelenséget, 2009-ben pedig azt, hogy talán mégis, 2012-ben pedig már észlelték  $3,8\sigma$  többlettel, tehát még mindig a kritikus  $5\sigma$  alatt. Már szervezik a következő kísérletet a dolog ellenőrzésére.

## A 750 GeV-es LHC-részecske

Erről korábban cikkeztünk, hiszen óriási izgalmat váltott ki, amikor az ATLAS és a CMS olyan Higgs-bozon jellegű részecskét észlelt az LHC-nál, amely ellentmondani látszott a standard modellnek. 2015-ben mindkét kísérlet észlelte jelét  $3,4\sigma$  megbízhatósággal, de a 2016-os adatokban már nem, tehát véletlen statisztikus ingadozás volt.

## Tanulság

A részecskefizikától felfedezéseket várunk, különösen, mivel van jó pár rejtély, amelyet elmélete, a standard modell nem képes megmagyarázni (például a neutrínóíz-rezgés, vagy a sötét anyag léte és az anti-anyag hiánya a Világegyetemben), ha a kísérletileg mért adatokat remekül le is írja. Azonban nagyon óvatosan kell kezelnünk minden új jelenség észlelését: fontos az eredmény megfelelő matematikai-fizikai megbízhatósága és a másik, független mérés megerősítése. Több példát is hoztunk, amelyből kiderül, milyen fontos, hogy több kísérlet működjék párhuzamosan; legutóbb a gravitációs hullámok felfedezése is megmutatta, mennyire lényeges volt, hogy az amerikai LIGO kísérlet két egyforma berendezést működtetett egymástól 3000 km-re. A tervezés alatt álló következő óriási részecskegyorsító, az ILC lineáris elektron-pozitron ütköztető nyalábjai csak egyetlen pontban fognak találkozni, ezért a malomjáték csiki-csuki módszerének megfelelően – hogy meglegyen az eredmények megfelelő ellenőrzése – két mérőberendezést fognak felváltva ki-be tologatni az ütközési pontba.

## ILC, a jövő esetleges tiszta ütköztetője

A nagyenergiás részecskefizika kétféle gyorsítóberendezéssel dolgozik. A protonütköztetés felfedezési potenciálja két okból óriási. Egyrészt a proton (és párja, az antiproton) stabil részecske, nagy mennyiségben tárolható, és nagy tömege miatt kis sugárzási veszteség mellett óriási energiára gyorsítható. Másrészt összetett rendszer, ahol az alkatrészek a legkülönbözőbb energiával ütközhetnek egymással, igen széles energiaeloszlást tapogathatva le. Ugyanakkor, ahogy valamennyi LHC-kísérlet észlelésénél látjuk, az érdekes folyamat más folyamatok óriási hátterén ül, tehát igen nehéz azonosítani. Ezért az új felfedezéseket célszerű az új jelenség keletkezési energiájára beállított elektron-pozitron ütköztetőnél részleteiben tanulmányozni. A LEP (Nagy elektron-pozitron) ütköztető a maximális elérhető energiájú elektronokat és pozitronokat ütköztetett, és – bár a Higgs-bozon nem szolgáltatja – valóságos kincsesbányája lett a standard modell ellenőrzésének. A körkörös gyorsítók elektronenergiáját a szinkrotronsugárzás korlátozza, a  $125 \text{ GeV}/c^2$  tömegű Higgs-bozon részletes tanulmányozásához tehát már egymással szemben épített, lineáris gyorsítót kell építeni.

Ilyen terv a Nemzetközi lineáris ütköztető (International Linear Collider, ILC), amelyet már viszonylag régen megterveztek, a helyszínére is több jelentkező van, csak a pénz gyűlik nehezen össze. Az *ábrán* látható a két egymással szembe kapcsolt lineáris részecskegyorsító és az ütközési pontnál a két ki-be tologatható észlelőrendszer. Így az egyik által esetlegesen felfedezett új jelenség később, a másik kísérlettel megerősíthető vagy cáfolható.

Az ILC sematikus terve. A nyalábok találkozási pontjában két detektort terveznek, amelyeket az ütközési pont körül ki-be csúsztatással lehet cserélni. A rendszer teljes hosszát 31 km-re tervezik.

