

SÉTA A HIGGS-BOZON KÖRÜL: AZ ADATELEMZÉS REJTELMEI – 2. rész: a Higgs-bozon megfigyelése

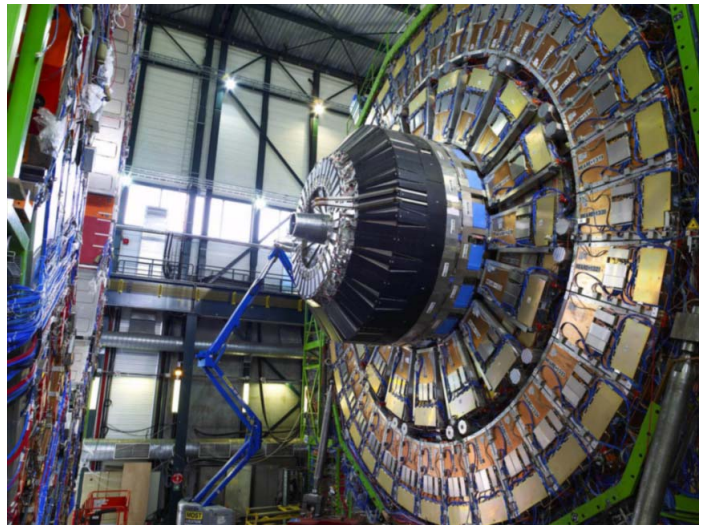
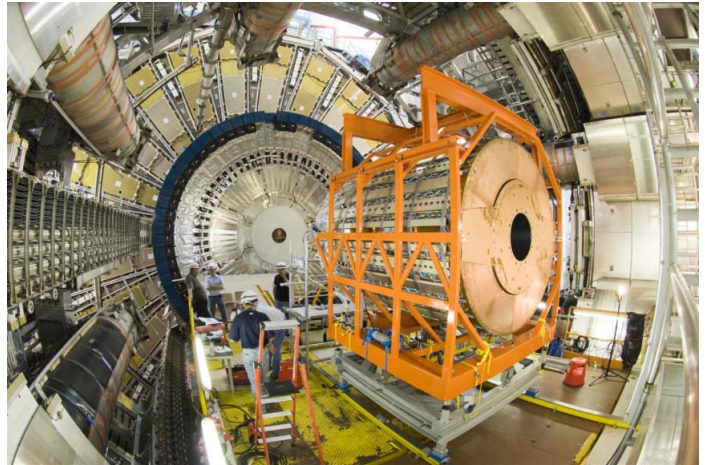
Horváth Dezső
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

Cikkem első részében érzékeltetem a nagyenergiás fizika laza hozzáállását a matematikai statisztika fogalmihoz, viszont a statisztikus módszerek annál szigorúbb alkalmazását a mérések értékelésében, valamint összefoglaltam a Higgs-bozon keresésének és meg nem találásának eredményeit a CERN LEP elektron-pozitron ütköztetőjénél. E második részben már a Higgs-bozon megfigyeléséről és tanulmányozásáról lesz szó, ahogyan azt a CERN Nagy Hadronütköztetőjénél, az LHC-nál végeztük.

LHC, ATLAS és CMS

A Nagy Hadronütköztető, az LHC 2009-ben indult el és 2010-től óriási adatmennyiséget szolgáltatott. 2011 végére már a Higgs-bozon lehetséges tömegét a két-két nagy Tevatron- és LHC-kísérlet beszorította 114 és 127 GeV közé a szokásos 95%-os megbízhatósággal. Ez egyébként a megfigyelés szempontjából meglehetősen kellemetlen tömegkörnyék (lásd az első rész 4. ábráját), hiszen ott még a $H \rightarrow b\bar{b}$ bomlás dominál, amelyet az óriási hadronhátter miatt hadronütköztetőnél igen nehéz megfigyelni. Elméleti számítások két igen kis hozamú bomlási csatornát mutattak ígéretesnek, a Higgs-bozon két fotonra és négy töltött leptonra történő bomlását. Az ATLAS- és CMS-kísérlet detektorait ezek észlelésére optimalizálták, és valóban, 2012 júliusára azokon sikerült is kimutatni.

Az LHC érdekessége, hogy amíg a négy LEP-kísérlet meglehetősen hasonló felépítésű volt tökéletesen azonos célokkal, az LHC kísérletei igencsak különböznek egymástól. Az ALICE-



7. ábra. A két nagy LHC-detektor szétszedve, szerelés alatt. Fölül az ATLAS-kísérlet belső detektora, körülötte az óriási toroidmágnes csöveivel, alul a CMS-detektor lezáró része (végdugója).

Szeretném köszönetemet kifejezni a leírt kutatásokban részt vett több ezer kollégának a közös munkáért, a CERN-nek és az NKFIH-nak (számos jogelődjével együtt) tevékenységünk anyagi támogatásáért, valamint Pásztor Gabriellának és Trócsányi Zoltánnak közreműködéséért és rengeteg javító javaslatukért.



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.

kísérlet a nehézionfizikára, az LHCb pedig a b-kvarok és az antirészecskék fizikájára koncentrál. Az ATLAS-nak és a CMS-nek azonosak a céljai (Higgs-bozon, a standard modell ellenőrzése és az azon túli fizika keresése), de azt rendkívül különböző mérőberendezéssel érik el. Ez már a felépítésükből is nyilvánvaló (7. ábra), és alapvető tulajdonságaikat az 1. táblázatban foglaljuk össze. Ez a különbség csak megerősíti hasonló eredményeik megbízhatóságát.

Amikor komolyan működésbe lépett az LHC, a Fermilab Tevatronját azonnal leállították: az LHC ugyanis egy nagyságrenddel nagyobb ütközési intenzitást szolgáltatott, ráadásul sokkal magasabb energián. Fermilabos kollégáink nem estek emiatt kétségbe, hiszen addigra már csaknem mind az

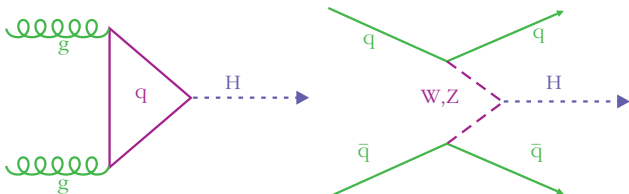
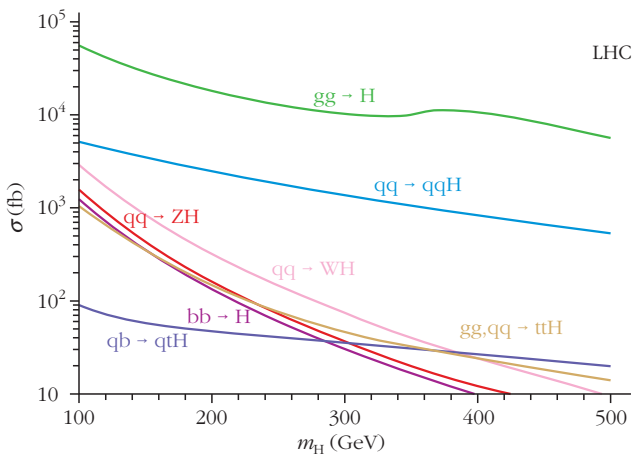
1. táblázat

Az ATLAS és a CMS észlelőrendszereinek összehasonlítása		
detektor	ATLAS	CMS
felépítés	jórészt innovatív	inkább hagyományos
mágnes és tere	toroid + <i>kis(?)</i> 2 T szolenoid	nagy 3,8 T szolenoid
nyomkövető	félvezető + TRD	félvezető
e-m. kal.-m.	LAr + acél + Pb	PbWO ₄ szcintillátor
hadron kal.-m.	acél + szcint. lapok	s.-rész + szcint. lapok
előreszórt hadron-kal.-m.	LAr + Cu és W	acél + kvarc Cserenkov
műonészlelés	4-féle kamra	3-féle kamra
méret	Ø 25 m × 46 m (23 000 m ³)	Ø 15 m × 21,6 m (3800 m ³)
trigger	3 → 2-szintű	2-szintű
súly	7000 t	14 000 t
kutató résztvevő	3000	2300

TRD: átmeneti-sugárzási detektor, e-m.: elektromágneses, kal.-m: kaloriméter, LAr: folyékony argon. Az ATLAS térfogata hatszorosa, súlya fele a CMS-ének.

LHC-nál dolgozott. Az USA a legnagyobb létszámmal résztvevő ország az LHC-kísérletekben, az ATLAS kutatóinak 20%-a, a CMS 30%-a az USA hét nemzeti laboratóriumából és 94 egyeteméről vesz részt. Tanulságos tény ugyanakkor, hogy azoknak csak mintegy fele amerikai állampolgár, hiszen más nemzetek ifjú fizikusai boldogan dolgoznak doktoranduszként vagy posztdokként a CERN-ben amerikai egyetemek képviselőjében.

8. ábra. A Higgs-bozon számított keltési hatáskeresztmetszete proton-proton ütközésben a Higgs-bozon feltételezett tömegének függvényében. Az ATLAS és a CMS kezdetben a két legnagyobb valószínűségű reakcióra összpontosított: a leggyakoribb gluon-fúzióra (folyamatábrája alul balra), és a második vektorbozon-fúzióra (alul jobbra). Azóta már valamennyi reakciót megvizsgálták.

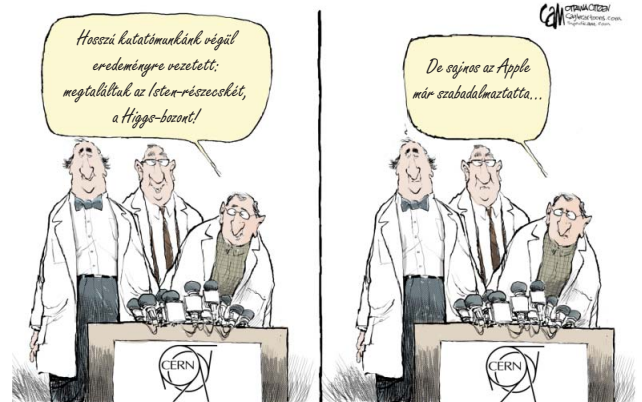


Megvan a Higgs-bozon!

Érdekes volt, ahogyan közvetlenül azelőtt, hogy az ATLAS- és CMS-kísérlet bejelentette a Higgs-bozon megfigyelését, a két Tevatron-kísérlet, a CDF és a D0 adatainak együttes elemzéséből sikerült kimutatni egy 3σ feletti, jelentős (de megfigyelésnek nem számító) eseménytöbbletet a már behatárolt tömegtartományban, 110 és 130 GeV között, bár tömegsúcs nélkül.

A Higgs-bozon felfedezése a rossz viccek ősröbbanásához vezetett

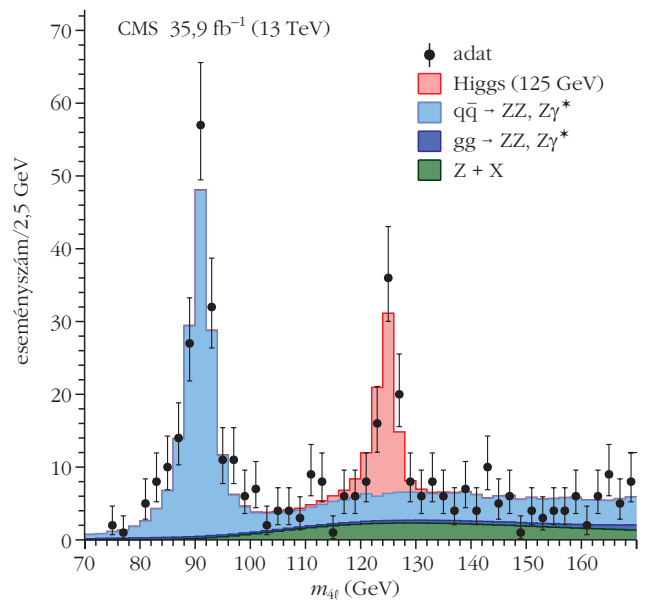
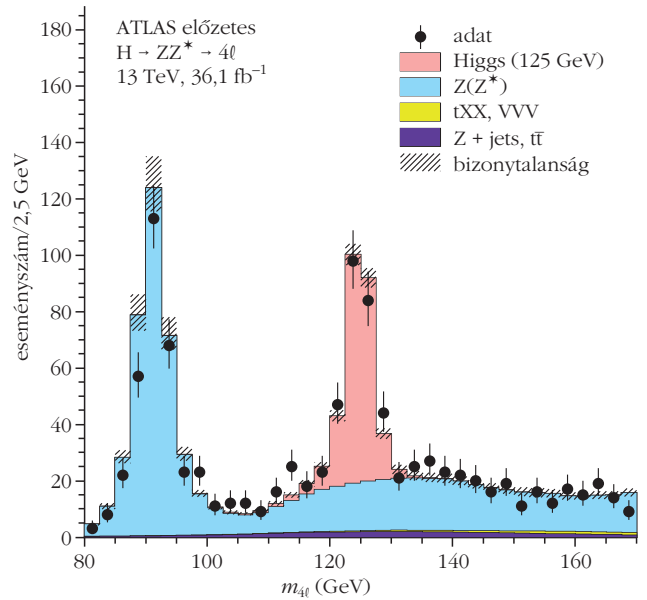
- A bárba besétál egy Higgs-bozon.
- Csapos: – Mi van? Mire ő: – Hát én!!
- A Higgs-bozon felfedezését a fizikusok *tömegesen* ünnepelték.
- A Higgs-mező szabályozása valóban lehetővé tenné a tömegpusztító fegyvereket.
- Nem tudom, mi a csuda az, de klassz, hogy felfedezték!
- Összeeszt a top-kvark a Higgs-bozonnal. A kvark elrohant, mert a bozon csak a súlyát emlegette, semmi mást nem mondott magáról.
- Jó, hogy megvagy, Isten-részecske. Én csak egy átlagember vagyok, aki nem ért téged.





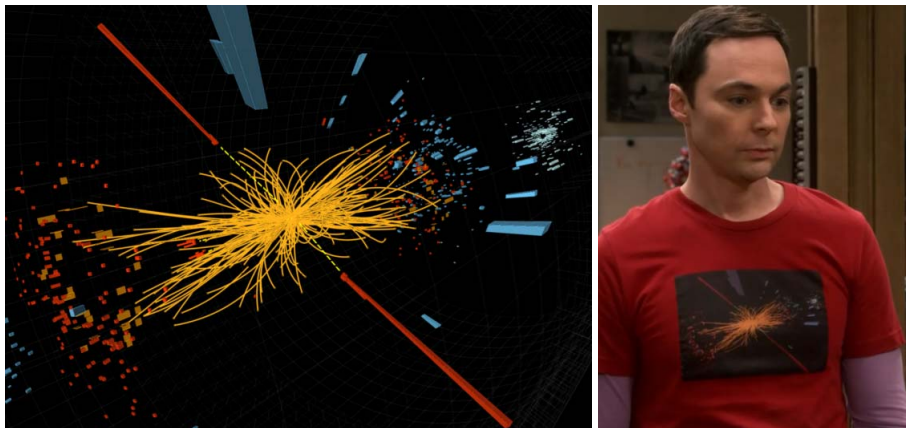
Az LHC-megfigyelés bejelentését 2012. július 4-re, a nagyenergiájú fizika melbourne-i óriáskonferenciájára időzítették (amerikai kollégáink kicsit morcosak is voltak, hogy legnagyobb nemzeti ünnepükre esett). Addigra persze már mindenki tudta az eredményt, hiszen azon többszáz fizikus dolgozott, és a két nagy együttműködés több ezer fizikusának előzetesen jóvá kellett hagynia. Az eredményt abból is *sejteni* lehetett, hogy a *Nature-online* internetes folyóirat két nappal előtte már közölte. A CERN rengeteg újságíróval együtt a legnevesebb fizikusokat (természetesen *François Englert* és *Peter Higgst* is) meghívta a nevezetes eseményre, a lelkes CERN-es nemfőnökök közül azok jutottak be a nagy előadóterembe, akik éjszaka ott aludtak előtte. A CERN persze gondoskodott róla, hogy az előadásokat ne csak Melbourneben lássák, interneten be lehetett kapcsolódni, Magyarország is három előadóteremben néztük.

A Higgs-bozon kimutatása igen meggyőző volt, hiszen két független kísérlet, több bomlási csatornánál



9. ábra. Az ATLAS- (fent) és CMS-kísérlet (lent) mért tömegeloszlása 4 töltött lepton észlelésekor [7]. A Higgs-bozon csúcsa szépen kiemelkedik 125 GeV-nél, 91 GeV-nél pedig a Z-bozon tömegcsúcsa dominál (Z $\rightarrow 4l$, a Z-bozon két töltött leptonra bomlik, és az egyik kibocsát egy foton, amely leptonpárt kelt).

ban, azonos (125 GeV-es) tömegnél figyelte meg az előírt 5σ konfidenciával. A két együttműködés kísérletezői természetesen betartották a vak adatelemzés szabályát: a 110 és 130 GeV közötti energiatartomány új adatait egyidejűleg nyitották meg az előzetesen leírt és jóváhagyott eljárások alkalmazására a különböző folyamatok elemzői előtt, nehogy egymást befolyásolják. Azóta természetesen az ATLAS és a CMS már a Higgs-bozon valamennyi elérhető keltési és bomlási csatornáját azonosította és tanulmányozta. Itt elsősorban CMS-eredményeket mutatunk be, de az ATLAS is teljesen hasonlókat kapott, és a két kísérlet valamennyi eredménye a kísérleti bizonytalanságokon belül igen jól egyezik [5].



Fizikusok a Higgs-bozonról

– Igazából 1972-ben kezdődött az életem, mint bozon – *Peter Higgs*.

„Hogy miért isten-részecske? A kiadó nem engedte, hogy istenverte részecskének hívjam a könyv címében, pedig az jobban illett volna rá, tekintettel gonosz természetére és a rengeteg pénzre és erőfeszítésre, amelyet kihívtam. Amellett ezzel két csoportot is megbántottam: (1) azokat, akik hisznek Istenben és (2) azokat, akik nem.” – *Leon Lederman* a Higgs-bozonról *Az isteni a-tom* című könyve kapcsán.

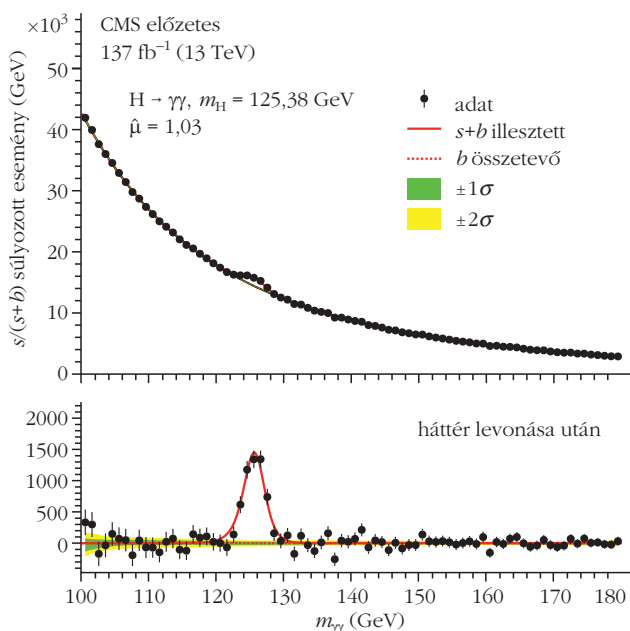
„Ez a Nobel-díj 100 dolláromba került” – *Stephen Hawking*, aki fogadott *Gordon Kane*-nel, hogy soha nem találják meg a Higgs-bozont.

10. ábra. A CMS-kísélet Higgs-szerű eseménye: proton-proton ütközésben egy bozon keletkezik, amely két nagyenergiás foton kibocsátásával elbomlik. A láthatatlan fotonpályák végén a vörös téglalapok mérete az elektromágneses kaloriméterben hagyott fotonenergiával arányos. Vicces volt viszontlátnom nevezetes eseményünket az *Agymenők* filmsorozatban Sheldon Cooper, a kissé habókos részecskefizikus trikóján.

A négyleptonos bomlás

A rettenetes hadronhátér fölött $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell^+ \ell^-$ a legkönnyebben azonosítható folyamat, ahol ℓ elektron vagy müon (a harmadik töltött lepton, a nehéz τ^\pm nagyon gyorsan elbomlik könnyebb leptonokra vagy mezonokra). Az egyik Z-bozontól megköveteljük, hogy „valódi” legyen, tömeghéjon, azaz 91 GeV tömeggel rendelkezzen, de a másik attól igen messze, mélyen virtuális lesz (azt jelzi a felső indexbeli $*$). A leptonos bomlás gyakorisága rendkívül kicsi, $1,24 \cdot 10^{-4}$. Ennek ellenére a négy leptonra bomló részecske tömegéhez rendelhető spektrumból megfelelő eseményválogatás után a 125 GeV-es csúcs gyönyörűen kiemelkedik (9. ábra).

11. ábra. A CMS-kísélet 13 TeV-es p-p ütközésekben mért tömegeloszlása a Higgs-bozon kétfotonos bomlására [6]. A Higgs-bozon csúcsa 125 GeV-nél jól látszik a háttér levonása után.



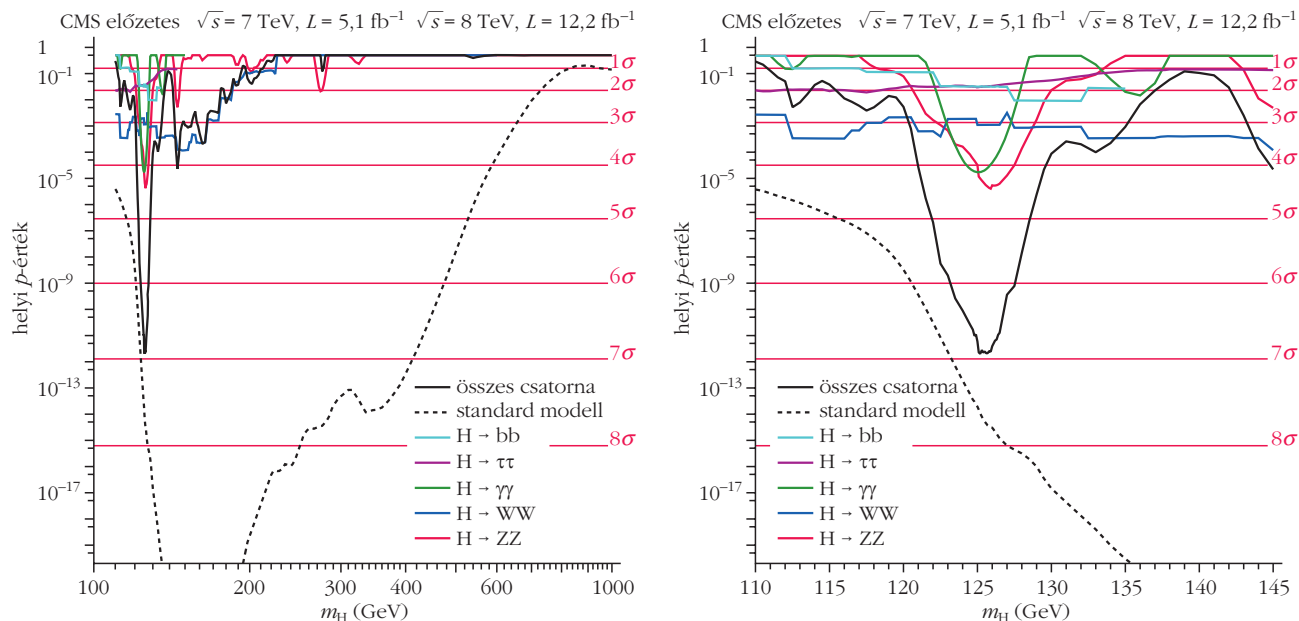
Ez a két ábra a 2016-os adatokból származik, azóta azt megháromszorozták, de elemzésük még nem zárult le. A CERN nagyon vigyáz arra, hogy a két nagy kísérlet azonos feltételek mellett működjék, tehát közel azonos ütközési számot kapjon: ezt *luminozításban*, az ütközési hatáskeresztmetszet reciprokában mérjük, hogy azután egy reakcióból várható eseményszámot a begyűjtött luminozitás és a hatáskeresztmetszet szorzata adja. 2016-ban az ATLAS $36,1 \text{ fb}^{-1}$, a CMS $35,9 \text{ fb}^{-1}$ luminozitást gyűjtött ($1 \text{ fb} = 10^{-43} \text{ m}^2$). Az ábrák összehasonlításából az is kiderül, hogy az adatelemzés némileg különbözött, hiszen az ATLAS összességében több Higgs-jelet kapott közel ugyanannyi adatból, viszont szignifikanciájuk azonos lett.

A kétfotonos bomlás

A Higgs-bozon bomlása két fotonra egy nagyságrenddel gyakoribb, mint a négyleptonos, előfordulási valószínűsége $2,27 \cdot 10^{-3}$, de a háttérből csak éppenhogy kiemelkedik (10. és 11. ábra). A négy töltött leptonnál ugyanis sokkal kisebb a háttér, és ráadásul jól meghatározható a rengeteg egyidejű protonütközésből az, ahol a részecskék nyomai összefutnak, a fotonok esetében azonban erre igencsak korlátozott a lehetőség.

A négyleptonos bomlás alacsony eseményszámmal is láthatóan működött, a kétfotonos Higgs-csúcs viszont csak az óriási háttér levonása után válik igazán láthatóvá. Maga az adatelemzés ennél sokkal bonyolultabb (visszatérünk rá), de jó mutatni valamilyen tömegeloszlást.

Mára az együttműködéseknek nagyrészt sikerült elemezniük a 2016–2018 folyamán, 13 TeV-es proton-proton ütközésekben gyűjtött adatokat. A CMS 2020. július végén közölte a teljes 13 TeV-es évad kétfotonos eredményét egy 63 oldalas (és ezen még nem szerepel a 2300 szerző!) cikkben [6]. A 11. ábrán a CMS-kísélet legújabb kétfotonos tömegeloszlása látható, amelyen nem az észlelt események számát ábrá-



12. ábra. A CMS-kísérlet mért p -eloszlása 2012 végén, bal oldalt 100 és 1000 GeV, jobbra 110 és 145 GeV tartományban. A Higgs-bozon mindegyik bomlási csatornája minimumot mutat 125 GeV körül és máshol nincs jelentős minimuma. Az összes csatorna együttes megbízhatósága 125 GeV-nél $6,9\sigma$, bár valamivel a standard modell számítása (pontvonal) alatt van.

zoljuk, hanem azok Higgs-bozonos súlyát, tehát annak a szimulációk alapján meghatározott valószínűségét, hogy az esemény Higgs-bozontól származik. Az ábra felső részén a teljes, jel + háttér ($s+b$), alul pedig csak a jel a háttér levonása után szerepel. A mérés óriási pontosságát mutatják a háttérhez rendelt 1σ és 2σ konfidenciának megfelelő sávok összehasonlítása a mért pontok felrajzolt bizonytalanságaival. Mindez csak az alsó ábrán kivethető.

A Higgs-bozon tömege

Sarkalatos feltétel, hogy adott mennyiség mért értéke nem függhet a mérés módszerétől. A Higgs-bozon mért tömege tehát nemcsak a két kísérlet között, de a legkülönbözőbb feltételek mellett végzett adatelemzés eredményeképpen is azonos kell legyen. Nagyon érdekes, ahogyan az adatok egyre nagyobb mennyiségével és egyre fejlettebb elemzési eszközök alkalmazásával a Higgs-bozon mért tömege változott. A felfedezés bejelentésekor mindkét kísérlet 125 GeV körüli tömeget publikált, elég nagy bizonytalansággal. Ez később közelebb került a 126 GeV-hez, majd visszamászott közvetlenül 125 GeV fölé, bár mindig hibahatáron belül. A tömeg meghatározásához nemcsak a korábbi ábrákhoz használt eseményeloszlásokat használtuk, de alkalmaztuk az úgynevezett p -értéket is: annak kísérletileg meghatározott valószínűségét, hogy a megfigyelt eseménytöbblet a mért háttér véletlen fluktuációjából ered. Ez persze mennél kisebb, annál jobb. A p -érték óriási előnye, hogy könnyen összegezhető azonos jelenség különböző módon történő megfigyelésére még különböző kísérletek által is, természetesen a korrelációk figyelembe vételével.

A felfedezés bejelentésekor az ATLAS- és CMS-kísérlet a két legfontosabb Higgs-bozonos bomlás elemzésével egyaránt 5σ szignifikanciát kapott. Az adatok gyűlésével ez folyamatosan nőtt, 2012 végére a CMS adatai megkétszereződtek, hatféle bomlást elemeztek, és – ahogyan a statisztika alapján várnánk is – a jel már elérte a $6,9\sigma$ -t. A 12. ábrán az ehhez tartozó p -eloszlás látható. Akkor a Higgs-bozon mért képződési valószínűsége a CMS-nél még valamivel a standard modellel számított alatt volt, az ATLAS esetén pedig felette: a két érték a statisztika növekedésével egyre pontosabban egyezett egymással és a modellszámítással.

A Higgs-bozon tömege a részecskefizika egyik legfontosabb paramétere. Mérésének történetét a 2. táblázatban foglaltuk össze. Jól látszik, ahogy az idő haladtával folyamatosan sikerült javítani az adatelemzést, és pontosítani tömeget. Valamennyi tömegérték, csatornától és kísérlettől függetlenül igen jól egyezik egymással. A CMS 2014-ben külön is publikálta a háromféle leptonos bomlásra kapott értékeket és statisztikus bizonytalanságukat; szisztematikusukat csak az összesítésre számították, mivel az nagyrészt közös forrású. Figyelemre méltó, ahogyan az ATLAS 2013 és 2014 között mekkorát változtatott az adatelemzésén: a statisztika csökkenése árán a szisztematikus bizonytalanságot sikerült jelentősen csökkenteniük és azzal javítani a teljes bizonytalanságon.

A Particle Data Group [9] 2020-as átlagértéke a Higgs-bozon tömegére $125,10 \pm 0,14$ GeV, nagyon közeli a 6 éve publikált ATLAS+CMS átlaghoz, amely $125,09 \pm 0,24$ GeV volt. A tömegmérés bizonytalansága sokkal nagyobb, mint a Higgs-bozon élettartamához tartozó vonalszélesség, az ugyanis a kísérletek adatai alapján 13 MeV alatti, amíg az elméletileg számolt érték 4 MeV.

2. táblázat

A Higgs-bozon tömegének mérése az LHC 7 és 8 TeV-es üzeme alatt és a legújabb idei eredmény már 13 TeV-nél [5–8].

év	kísérlet	bomlási módus	tömeg (GeV)	bizonytalanság (stat.)	bizonytalanság (szisz.)	
2013	ATLAS	$H \rightarrow \gamma\gamma+4\ell$	125,5	$\pm 0,2$	$+0,5; -0,6$	
	CMS	$H \rightarrow \gamma\gamma+4\ell$	125,7	$\pm 0,3$	$\pm 0,3$	
2014	CMS	ATLAS	$H \rightarrow \gamma\gamma+4\ell$	125,36	$\pm 0,37$	$\pm 0,18$
		$H \rightarrow \gamma\gamma$	124,70	$\pm 0,31$	$\pm 0,15$	
		$H \rightarrow 4e$	126,2	$+1,5; -1,8$		
		$H \rightarrow 2\mu 2e$	126,3	$+0,9; -0,7$		
		$H \rightarrow 4\mu$	125,1	$+0,6; -0,9$		
		$H \rightarrow 4\ell$	125,6	$\pm 0,4$	$\pm 0,2$	
		$H \rightarrow 6$ csatorna	125,02	$+0,26; -0,27$	$+0,14; -0,15$	
2015	ATLAS + CMS	$H \rightarrow \gamma\gamma$	125,07	$\pm 0,25$	$\pm 0,14$	
		$H \rightarrow 4\ell$	125,15	$\pm 0,37$	$\pm 0,15$	
		$H \rightarrow \gamma\gamma+4\ell$	125,09	$\pm 0,21$	$\pm 0,11$	
2020	ATLAS	$H \rightarrow 4\ell$	124,92	$\pm 0,19$	$+0,09; -0,06$	
	CMS	$H \rightarrow \gamma\gamma+4\ell$	125,38	$\pm 0,11$	$\pm 0,08$	
	PDG átlag	minden	125,10	$\pm 0,14$		

A 2013 és 2015 közötti értékek a finomodó adatelemzés következtében változtak, de inkább csak a bizonytalanságuk csökkent. Az aszimmetrikus bizonytalanságokat külön jelöltük.

Ez a bozon az a bozon?

Mint említettük, a standard modellnek igen sok kiterjesztése van, és gyakorlatilag mindegyik egynél több Higgs-szerű bozont jósol. Amióta megvan a 125 GeV-es, a modellek kötelesek számot adni egy ilyen bozonnól is. Mindjárt a kezdetekben felmerült a kérdés, vajon amit látunk, tényleg a standard modell Higgs-bozonja, vagy esetleg valami más. Erre azt szoktuk mondani, hogy az adatelemzés módszerét teljesen kihegyeztük a standard modell Higgs-bozonjára, tehát aligha találhattunk valami nagyon különbözőt. Ugyanakkor persze kis különbségek nem kizártak, láthatunk más bomlási csatornákat, illetve a számításoktól kicsit eltérő mért értékeket. Azóta a kérdést nagyon alaposan körbejártuk. Ellenőriztük, például, nem látunk-e több Higgs-bozont: az egyik népszerű modell, például ötöt jósol, közöttük két töltött Higgs-bozont, de az LHC-n belátható tömegtartományban, egészen TeV tömegekig nem látunk mást, habár az egészen kis tömegeket nem tudjuk teljesen kizárni. A standard modellel egészen pontosan kiszámítható a Higgs-bozonnal kapcsolatos, keltési, kölcsönhatási és bomlási reakciók valószínűsége (hatáskeresztmetszete): méréseink szerint azok mind hibahatáron belül egyeznek a számításokkal. Őszinte bánatunkra, ez idáig semmiféle eltérést nem sikerült felfedeznünk a Higgs-bozon körül a standard modellel.

Láttuk, hogy kezdetben a Higgs-bozonnak más bozonokra ($\gamma\gamma$, ZZ és kicsit később W^+W^-) történő



Nem tudtad? Ez a 2012-es frizuradivat!

bomlását sikerült megfigyelünk. A standard modell pontos jóslatot ad valamennyi bomlási valószínűsége, tehát a fermionpárra történőre is. A Higgs-bozon a tömegekhez kötődik, tehát kisebb tömeghez kisebb valószínűség tartozik. Egy m_f tömegű elemi fermionra (kvarkra vagy leptonra) történő bomlás valószínűsége:

$$\Gamma(H \rightarrow f\bar{f}) = \frac{N_c g^2 m_f^2}{32 \pi m_W^2} \beta^3 m_H.$$

Itt N_c színtöltések száma (leptonokra 1, kvarkokra 3), $g^2 \sim 0,425$, a kölcsönhatási állandó, m_W és m_H a W- és Higgs-bozon tömege,

$$\beta = \sqrt{1 - 4 \frac{m_f^2}{m_H^2}}$$

pedig a fermion sebessége. Elsőnek a b-kvarkpárra történő bomlást figyeltük meg, utána a tau-leptonosat ($\tau^+\tau^-$). 2020 nyarán sikerült a 13 TeV-es adatokban a τ -leptonnál nagyságrenddel könnyebb müonokra való bomlás jelét kimutatni. Valamennyi megfigyelés a kísérleti és számítási pontosságon belül egyezik a standard modell által számítottal.

Rendkívül sok egészen alapvető felfedezés született mérések pontosításával, nem szabad tehát feladnunk a Higgs-bozon egyre pontosabb vizsgálatát. Tudjuk, hogy kell lennie valamilyen új fizikának a standard modellel túl, hiszen a sötét anyag és a neutrínó-ízrezgés *kilóg* mögüle: a Higgs-szektor gondos tanulmányozása remélhetőleg segít majd annak feltárásában. Sok modell szerint kicsi az eltérés az általunk vizsgált energiatartományban a standard modellel, és jósnak Higgs-bozont a megfigyeléssel azonos tulajdonságokkal. Sokat várunk a HL-LHC (nagy-luminózitású LHC) működésbe lépésétől is, nem is beszélve a