

fizikai szemle

2020/4

A HIGGS-BOZON KUTATÁSA: BEFEJEZETT VAGY CSAK MOST KEZDŐDIK?

Veszprémi Viktor

Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest

A részecskefizikában az anyagot felépítő részecskék tulajdonságait és viselkedését a standard modell (röviden SM) segítségével írjuk le. A részecskék spinjük szerint két csoportra oszthatók: a feles spinűeké, amelyekre az anyag tégláiként és az egész spinű részecskéké, amelyekre az azokat összekötő malterként gondolhatunk. A feles spinű részecskék – fermionok – között az egész spinű bozonok közvetítik a kölcsönhatásokat. Négy alapvető kölcsönhatást különböztethetünk meg: az elektromágnesest (EM), a gyengét, az erőt és a gravitációt. Ezeket rendre a foton (jele γ), a gyenge bozonok ($W^\pm$ és Z^0), a gluon (g) és az egyelőre hipotetikus graviton nevű részecskék közvetítik.

Általános törekvés, hogy e kölcsönhatásokat egyazon hatás különböző megjelenési formáiként tudjuk felfogni. Az elektromágneses kölcsönhatás, amelyet *Maxwell* 1865-ös munkájában foglalt össze, már az első konzisztens leírásakor, bizonyos értelemben, egyesített elmélet volt, hiszen egyesített formában kezelte a korábban más-más úton megfigyelt elektrosztatikus és mágneses kölcsönhatásokat.

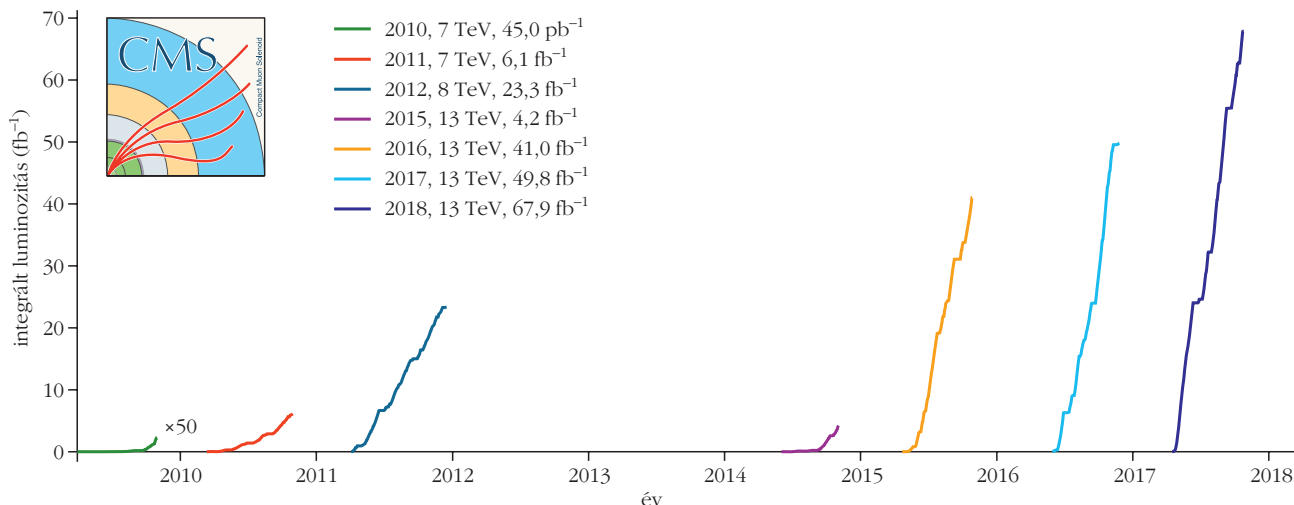
Készült a 30. Magyar Fizikus Vándorgyűlésen (Sopron, 2019. augusztus 21–24.) elhangzott előadás alapján.



Veszprémi Viktor a Wigner Fizikai Kutatóintézet főmunkatársa, a Standard Modell Ellenőrzése és Új Fizika Keresése kutatócsoport vezetője. Fő kutatási területe új részecskefizikai folyamatok, mint például a szuperszimmetria kísérleti kutatása, valamint félvezető-alapú nyomkövető detektorok építése, beüzemelése és adatrekonstrukciója. Jelenleg a CMS kísérlet nyomkövető detektorai projektjének vezetőhelyettese.

Az SM elméleti keretei között lehetőség van a gyenge kölcsönhatás leírására is az EM-hez hasonló képletekkel, az explicit tömegtagok azonban sértik az elmélet konzisztenciáját. Ez nem meglepő, hiszen a foton nem rendelkezik nyugalmi tömeggel. A gyenge bozonokról viszont ismert, hogy nehezek, hiszen például a W-bozon által közvetített béta-bomlás tulajdonságait, a kölcsönhatás rövid hatótávolságát és gyengeségét, valamint a közvetítő részecske rövid élettartamát ezzel magyarázhatjuk.

A Higgs-mechanizmus, vagy ahogy mostanában pontosabban hivatkozunk rá, az Brout–Englert–Higgs-mechanizmus úgy oldja meg az egyesítés problémáját, hogy a gyenge bozonoknak – az azonos formalizmus megtartása mellett – tömegük is lesz. Ehhez szükséges bevezetni egy új négykomponensű részecsketeret, amely komponenseiből három – beolvadva a gyenge bozonokba – a tömegeket generálja. A negyedik komponens egy tömeggel rendelkező skalár részecskét ír le, a Higgs-bozont, amelynek tömegét az elméletből nem lehet kikövetkeztetni. Nem csak a gyenge bozonok tömegére adódik magyarázat. A fermionok tömegét is leírhatjuk az új részecskével való kölcsönhatásuk eredményeként. A Higgs-bozon ugyanis pontosan a tömeggel rendelkező részecskékhez csatolódik, fermionok esetében a tömeg nagyságával arányos mértékben. A részecske közvetlen kísérleti bizonyíthatóságának bonyolultságát tanúsítja, hogy a megoldást jelentő elméleti alapok publikációja és a részecske felfedezése között közel fél évszázadnak kellett eltelnie. A közvetlen megfigyeléshez vezető utolsó évtizedben az SM összes többi részecskéjének tulajdonságait egyre pontosabban sikerült megmérni, és azokkal az elmélet jóslatait egyre pontosabban bizonyítani.



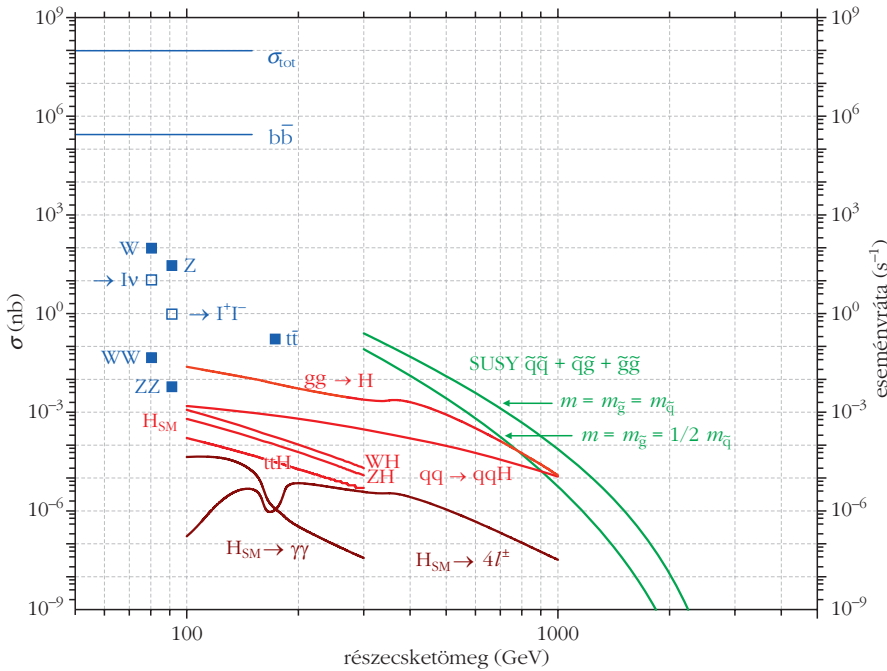
1. ábra. Az LHC beindulása óta a CMS által rögzített adat az idő függvényében (a CMS publikus weboldaláról).

Mint ismeretes, a Higgs-bozon 2012-ben mutatta ki közvetlenül a Nagy Hadronütköztető (Large Hadron Collider, LHC) két nagy, általános célú kísérlete, a CMS és az ATLAS. Magyarország hivatalosan az előbbi kooperáció tagja egészen annak megszületése óta, bár magyar kutatók egyénileg az utóbbi kísérlethez is jelentősen hozzájárultak. Jelenleg az LHC az egyetlen olyan berendezés a Földön, ahol a Higgs-bozon tulajdonságait tanulmányozni lehet. Miért olyan fontos ezt megtenni? Az SM-et önmagában konzisztens elméletnek tartjuk, és az eddig elvégzett kísérletek nem kérdőjelezték meg érvényességét. Azonban számos olyan kérdés létezik a részecskefizika határain belül, amelyekre az SM nem ad magyarázatot. Mi határozza meg az elméletben található paramétereket, például a részecskék tömegeit és kölcsönhatási erősségeit? Vajon az összes kölcsönhatás egyesíthető, illetve a gravitáció is beépíthető az elméletbe? Mi adja a Világegyetem tömegének és energiájának nagy részét? A válaszok kiderítését kétféle stratégiával közelíthetjük meg. Az egyik, hogy új részecskéket vagy kölcsönhatásokat – amelyek segítségével az SM kibővíthető – próbálunk megfigyelni. Ilyen potenciálisan minimális kibővítés lehet a szuperszimmetria elmélete. A másik lehetőség a már ismert részecskék tulajdonságainak pontos megmérése abban a reményben, hogy azok eltérést fognak mutatni az elméletből kikövetkeztethetőkhöz képest. A CMS keretein belül az ATOMKI, a Debreceni Egyetem, az ELTE és a Wigner FK kutatói mindkét lehetséges stratégiát egyszerre követve végzik e feladatokat. Mi sem bizonyítja jobban a Higgs-bozon precíziós méréseinek jelentőségét, mint az, hogy a CMS az elmúlt hét évben több, mint 120 publikációt közölt a témában.

Egy részecskét akkor tekintünk felfedezettnek, ha annak létét közvetlenül sikerül megfigyelni. A felfedezésre váró részecskékkel az a baj, hogy kicsi valószínűséggel jönnek létre, hétköznapiabb társaikhoz képest – általában – nagy tömeggel rendelkeznek, ami miatt keletkezésük még nehezebben történik meg, illetve ami miatt általában azonnal kisebb tömegű,

stabil részecskékre bomlanak. A bomlástermékek megméréséhez nagyon fejlett berendezések szükségesek, amelyek továbbfejlesztésén is fáradhatatlanul dolgozunk. Valahogy azt is el kell érni, hogy a bomlások e mérőberendezések belsejében jöjjenek létre. A jelenleg ismert egyetlen módszer, ha nagy energiára gyorsított részecskéket rendkívül sokszor ütköztetünk egy jól meghatározott pontban, és az így generált kölcsönhatásokból kiválogatjuk azokat, amelyekben a minket érdeklő részecske is megjelenik. Az LHC két 27 km-es kerületű gyűrűjében egymással szemben 6,5 TeV-es protonokból álló csomagok keringenek, csomagonként 10^{11} darab protonnal. Egy teljes körben körülbelül 2800 csomag fér el, ezek pályái a mérési pontokban keresztezik egymást. Amikor a szemből érkező protoncsomagok áthaladnak egymáson, akár 60 proton-proton kölcsönhatás is történhet, ezt nevezzük *eseménynek*. Az LHC másodpercenként 40 millió eseményt hoz létre, így detektoraink közepén másodpercenként körülbelül 2,4 milliárd proton-proton kölcsönhatás történik, habár periodikus szünetekkel megszakítva.

Az 1. ábra mutatja az LHC-ben beindulása óta keletkezett proton-proton ütközések mennyiségét, az integrált luminozitást. Ennek mérőszáma az fb^{-1} (femtobarn reciproka), amit nehéz egyszerűen definiálni, de jelentését szemléltetni a következőképpen lehet. A 2. ábra mutatja a Higgs-bozonkeletkezés különféle módjainak hatáskeresztmetszetét pirossal, az SM egyéb részecskéinek hatáskeresztmetszetét kékkel és bónuszképpen valamely feltételezett szuperszimmetrikus (SUSY) részecskék hatáskeresztmetszetét zölddel. A hatáskeresztmetszet mértékegysége az ábrán az nb, amelynek milliommód része az fb. Ezt a luminozitással szorozva az adott mennyiségű adatban a kérdéses folyamat várható előfordulásainak számát kapjuk. Az ábra jobb oldalán látható skála a folyamat másodpercenkénti számát mutatja, amikor az LHC másodpercenként 1 nb^{-1} ütközést hoz létre. Megállapíthatjuk tehát, hogy a 2012 közepéig felvett körülbelül 10 fb^{-1} adatban, amelyben sikerült megfigyelni a körülbelül 125 GeV-es Higgs-



2. ábra. Az SM és SUSY részecskék keletkezésének hatáskeresztmetszete 7 TeV-es proton-proton ütközésekben a részecskék feltételezett tömegeinek függvényében (az LHC Higgs Cross Section munkacsoport publikus weboldaláról).

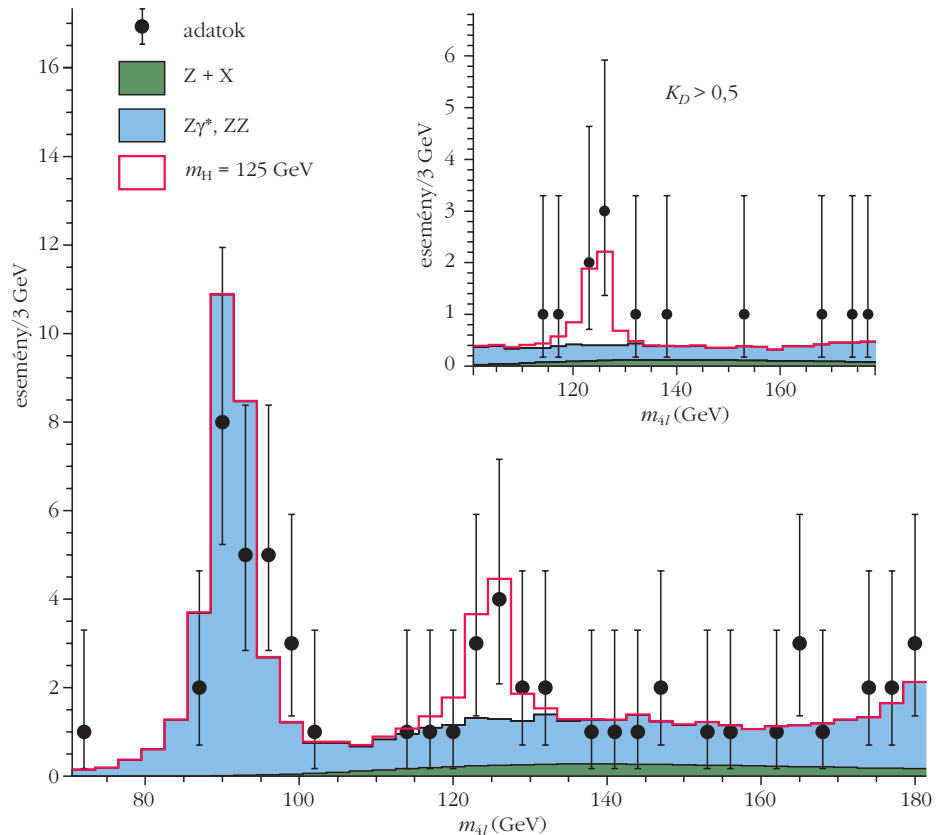
bozont, nagyságrendileg összesen százezer ilyen részecske keletkezett. Ehhez körülbelül tízmilliárdszor ennyi, 10^{15} darab proton-proton ütközést kellett létrehozni (a 2. ábrán σ_{tot} -tal jelölt, teljes hatáskeresztmetszet alapján számolva).

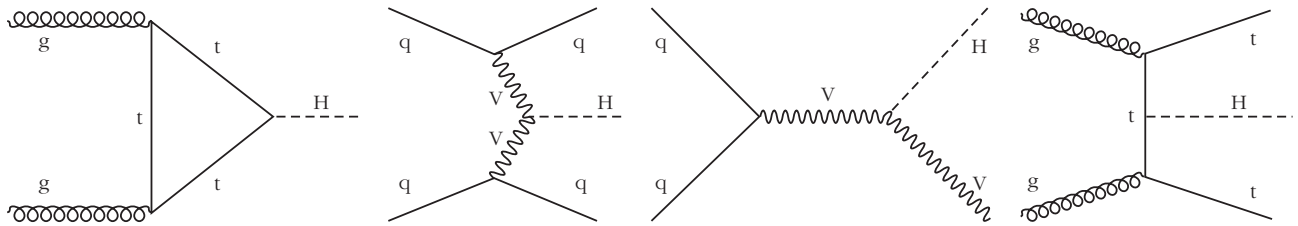
A Higgs-bozon – a gyenge bozonokhoz hasonlóan – gyorsan elbomlik. Nem lehet minden végtermékét pontosan megmérni, már emiatt sem tudjuk minden eseményről egyenként megmondani, hogy Higgs-bomlásban keletkezett-e. A detektorban felismert stabil részecskék energiájának és lendületének ismeretében azonban a legvalószínűbb keletkezési és bomlási folyamat visszakövetkeztethető a megmaradó mennyiségekre (össztöltés, összenergia stb.) vonatkozó képletek használatával. Minden részecskét egyértelműen meghatároz a nyugalmi tömege, amelyet a részecske energiájából és lendületéből, vagy bomlástermékeinek összenergiájából és teljes lendületéből kapunk. Az így rekonstruált folyamatok számára már statisztikailag nagy valószínűségű állításokat tudunk tenni.

Az olyan folyamat például, amikor két elektron- vagy müonpár keletkezik, viszonylag ritka az SM-ben (a 2. ábrán a ZZ-vel jelzett folyamat erre a tipikus példa). A 3. ábra vízszintes tengelyén az ilyen eseményekben az ellentétes töltésű elektron- vagy müonpárokból számított invariáns tömeg értékét ábrázoljuk, a függőleges tengelyén pedig számláljuk, hogy a mintánkban hány ilyen esemény fordult elő. A Z-bozontól tudjuk, hogy néha ellentétes töltésű leptonpárra bomlik, és tömege 91,2 GeV. Ez okozza a gyakoribb előfordulást jelentő csúcsot. Van egy második, kevésbé kiugró gyakoriságú érték is a 125 GeV környékén, ezt csak a Higgs-bozon ottlétével tudjuk magyarázni. Konkrétabban, a legvalószínűbb feltételezés, hogy az két Z-bozonra bomlott, leutánozva

ezzel az SM más úton végbemenő Z-párkeltési folyamatát. Az ábráról leolvasható, hogy mire sikerül lecsökkenteni a mérést zavaró 10^{15} darab háttérese-

3. ábra. Négy töltött leptonot tartalmazó események száma a négy leptonból számolt invariáns tömegek különböző értékeinél (CMS Collaboration, *Phys. Lett. B* 716 (2012) 30).





4. ábra. A Higgs-bozon főbb keletkezési módjai (balról jobbra): gluonfúzióval, vektorbozon-fúzióval, V - ($V = W$ vagy Z) és toppár együttes keltésével (CMS Collaboration, *Eur. Phys. J. C* 79 (2019) 421).

ményt – várhatóan körülbelül – három darabra, addigra a százezer Higgs-bozon is mindössze körülbelül ötre olvad.

Bár ez a felfedezéshez már elég, tulajdonságainak, mint például pontos tömegének megmérésére önmagában kevés volt. A felfedezés évében – a CMS mérései alapján – a Higgs-bozon tömegére $125,3 \pm 0,6$ GeV adódott. Ez a – 3. ábrával összehasonlítva – meglepő pontosság abból ered, hogy nemcsak az itt szemléltetett Higgs-bozonkeletkezés került kiértékelésre, hanem az összes elképzelhető olyan mód, ami várhatóan elég érzékenységet mutatott a felfedezésre. Közöttük legérzékenyebb az a folyamat volt, amikor a Higgs-bozon két fotonra bomlik (az egyik barna vonal a 2. ábrán). A korábban elmondottak alapján felmerülhet a kérdés, ez hogyan lehetséges, hiszen a csatolás tömeg nélküli részecskével nem jön létre. Egy lehetséges válasz, hogy a Higgs-bozon – ahogy a bomlási módok tárgyalásakor az 5. ábrán fogjuk látni – ekkor közvetlenül virtuális top kvarkok (egy) párjára bomlik, majd ezen kvarkok egymással rögtön annihilálódnak. Azért gondolhatunk a top kvarkokra, mert az összes közül ez a legnehezebb részecske (173 GeV), így a legerősebben csatolódik a Higgs-szel. Az

ilyen csatolások legnagyobb részében a top virtuális marad, mivel már egy teljes értékű top kvark is sokkal nehezebb, mint a Higgs-bozon, így kettő jelenléte időszakosan megmaradási törvényeket sért. A Higgs-bozon azonban végül nem olvad el a semmibe: a top kvarkok, az általunk megcélzott esetben, úgy bocsátanak ki két fotont, hogy azok megfeleljenek a megmaradási törvényeknek. A két foton négyesimpulzusából visszaszámolható a Higgs-bozon tömege. E keresésben a háttér az invariáns tömeg nagyságával exponenciálisan csökkenő számú kétfotonesemények adják, amelyek statisztikailag viszonylag egyszerűen levonhatók.

Jóval ritkábban az is elképzelhető, hogy a Higgs-bozonhoz csatoló top pár tagjai külön-külön bomlanak tovább. Ebben az esetben közvetlenül meg lehet figyelni a bozon topokhoz való csatolását, míg az előbbi esetben csak közvetve látjuk a hatást. A felfedezésen túl fontos, hogy az új részecske SM-ből megállapítható összes tulajdonságát pontosan meg tudjuk mérni, hiszen ha ezekben az SM-től való eltérést találunk, az utat mutathat elméletünk továbbfejlesztése felé. A felfedezés ténye magában hordoz néhány fontos mérési eredményt is. Ilyen például, hogy a Higgs-bozon ténylegesen skalár részecske, vagyis spinje nulla, illetve semleges töltésű, vagyis bomlástermékeinek töltése nullára összegződik. Mindkettő a megfigyelt bozonok keletkezésének és tovább-bomlásainak folyamatából ellenőrizhető.

A Higgs-bozon keletkezésének leggyakoribb módjai a 4. ábrán láthatók. A diagramok balról jobbra olvasva mutatják, hogy a kölcsönható protonok alapvető alkatrészeiből, a kvarkokból vagy gluonokból, milyen úton jön létre a Higgs-bozon és a vele esetleg együttesen keletkező egyéb részecske vagy részecskék. Azon eseményekben, amelyekben ezek közül valamelyik folyamat bekövetkezik, szinte mindig más részecskék is keletkeznek. Ezek jöhetnek a többi proton-proton kölcsönhatásból, vagy kisugárzódhatnak a fő ütközés folyamán is. Az első keletkezés, a ggH gluonfúzió ($gg \rightarrow H$ a 2. ábrán) reprezentálja a leggyakoribb folyamatot, aminek segítségével sikerült felfedezni a részecskét. A ggH -t tartalmazó eseményekben megjelenő minden más mérhető objektum nagyrészt független a Higgs-bozontól, és jobbára kezelhetetlenül nagy háttérrel hoz létre. Ehhez képest tized olyan gyakran jön létre Higgs-bozon keletkezése egy kvarkpár társaságában – 2. Feynman-gráf: qqH , vektorbozon-fúzió – ($qq \rightarrow qqH$ a 2. ábrán). Az ilyen eseményeket valamivel könnyebb felismerni, mert a két kvark –

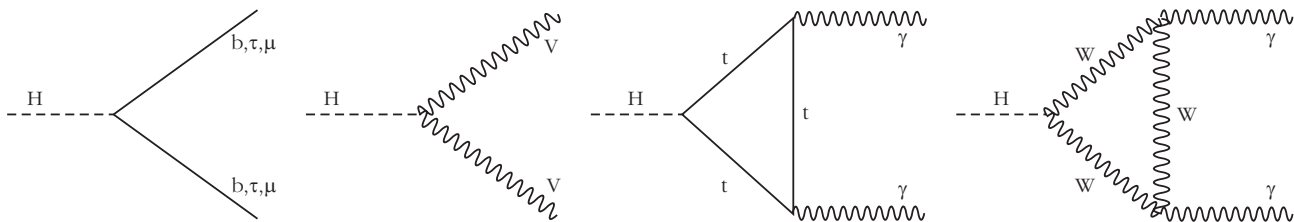
Művészet és a CMS

Az Art@CMS a CMS együttműködés ismeretterjesztést elősegítő kezdeményezése, amelynek célja a közvélemény – különösen a fiatalság – bevezetése a tudományos kutatások élvezetes világába. Egy hosszútávú dialógus létrehozására tesz kísérletet az LHC tudományos közössége, valamint művészek és tanárok között annak érdekében, hogy a hagyományostól eltérő módon is érthetővé és érzékelhetővé tegye a részecskefizikai kutatások hozzájárulását társadalmunk értékeihez.

E törekvés részeként a CERN 2013. évi „CMS Hete” tudományos konferenciáját – a 300 érdeklődő tudós részvételével – előadóművészeti programmal is kiegészítették.

Erre az alkalomra készült *Xavier Cortada* (Pete Markowitz fizikai útmutatásait felhasználva) öt digitális festménye, amelyek a CMS-kísérletet reprezentálják. Az öt méter hosszú szalagokon egy-egy Higgs-részecskebomlás látható, mégpedig két fotonra, Z - és W -vektorbozonpárba, két b -kvarkra vagy τ -párba. A festmények háttérre a kísérlet bonyolultságát, a széleskörű tudományos összefogást jelképezi. A CMS együttműködés tudományos cikkeiből kiválasztott oldalak a több mint 4000 tudós és mérnök munkája előtt tisztelg, egyben szemlélteti azt a kihívást, hogy a rengeteg eseményből kiválasszuk a Higgs-bozont létrehozókat. Az alkotás kettős célt szolgál: inspirálja a tudósok jövőbeli generációját és tisztelg azon tudósok, mérnökök, technikusok és mások előtt, akiknek Világegyetemünk egyre mélyebb megértését köszönhetjük.

A borítón látható alkotásokat bemutató előadásról és még sok más eseményről érdekes cikkeket olvashat az angolul értő a *Symmetria* folyóirat <https://www.symmetrymagazine.org/collection/physics-art> oldalán.



5. ábra. A Higgs-bozon főbb bomlási módjai (balról jobbra): b-kvarkok, τ leptonok vagy müonok párjaiba; vektorbozonokba (W vagy Z); és fotonokba top kvark vagy W-bozonhurkokon keresztül (CMS Collaboration, *Eur. Phys. J. C* 79 (2019) 421).

a két protonnyalábbal egyenként kis szöveget alkotva – nagy energiájú részecskezáport eredményez. A qqH-hoz képest kicsit több, mint feleannyiszor gyenge bozonok (3. gráf a 4. ábrán, illetve WH, ZH a 2. ábrán), és ahhoz képest negyed olyan gyakran top kvarkok társaságában (4. gráf a 4. ábrán, megfelelője ttH a 2. ábrán) jön létre Higgs-bozon. Az ilyen események ritkaságáért kárpótolnak az együttesen keletkező nehéz részecskék, a top kvarkok, a W- és Z-bozonok. A közvetlen top-csatolás megfigyelésére alkalmas események létrejöttének gyakorisága tehát körülbelül két nagyságrenddel kisebb, mint a leggyakoribb keletkezés. Megfigyelésükre mégis van remény, ha megpróbáljuk kiválogatni a Higgs-bozon és kísérő részecskéinek megfelelő bomlási módjait.

Az 5. ábra a leggyakoribb bomlási módokat mutatja. Az esetek 58,2%-ban két b-kvark keletkezik (Hbb, az 1. gráf). A b-kvarkok tovább-bomlásakor gyakran keletkeznek neutrínók, amelyeket nem lehet megmérni, ezért a belőlük számított Higgs-tömeg felbontása csak közepesen jó. A második legjelentősebb bomlás W-bozonpárba történik (2. gráf) 21,4%-ban. A W-k jól mérhetőek, ha elektronba vagy müonba bomlanak tovább, de a bomlásukkor kibocsátott neutrínók miatt szintén rossz tömegfelbontáshoz vezetnek. Annak ellenére, hogy a Z-párokba történő bomlás (HZZ, szintén a 2. gráf) gyakorisága csak 2,6%, ha azok leptonokba bomlanak tovább, a tömegfelbontásuk nagyon jó lesz. Az egyik legfontosabb keresési mód így a ggH+HZZ folyamat lesz ($H_{SM} \rightarrow 4l^\pm$ barna vonal a 2. ábrán). További megemlítendő bomlási módok a τ -párba történő bomlás (H $\tau\tau$) 6,3%-kal, a müonpárba bomlás (H $\mu\mu$) 0,02%-kal (mindkettőt az 1. Feynman-gráf szemlélteti) és a fotonpárba történő bomlás (H $\gamma\gamma$, 3. és 4. Feynman-gráf) 0,23%-kal. Bár az utóbbi érték nem tűnik biztatónak, mégis a ggH+H $\gamma\gamma$ ($H_{SM} \rightarrow \gamma\gamma$ barna vonal a 2. ábrán) a másik fontos keresési mód azért, mert az SM viszonylag ritkán produkál olyan nagy energiájú fotonokat, mint amilyenek a végtermékként keletkező fotonpárban vannak, és mert a fotonmérés energiefelbontása nagyon jó.

A részecske egyik legfontosabb jellemzője a nyugalmi tömeg, amely a részecske energiája és a lendülete közötti kapcsolatot rögzíti. A Higgs-bozon tömegére a CMS és ATLAS együttműködések kombinált méréseiből $125,09 \pm 0,24$ GeV adódik (ATLAS Collaboration, CMS Collaboration, *Phys. Rev. Lett.* 114 (2015) 191803). Fontos megállapítás, hogy jelenleg csak egy skalárbozont látunk. Az SM bizonyos kiterjesztései-

ben, mint például a már említett SUSY, további skalárbozonok megjelenése is várható. A precíziós tömegmérés egyelőre a ggH+HZZ folyamatokban lehetséges, amikor mindkét Z-bozon ellentétes töltésű leptonpárra bomlik. Ezek közül az egyik átmeneti Z a nyugalmi tömegéhez közel található, a másik viszont virtuális. Az események felismerését azzal lehet pontosítani, hogy az egyik leptonpár invariáns tömegét a Z környékén követeljük meg. A másik Z várható tömegeloszlására szimuláció alapján megbecsült, laza feltételeket szabunk ki, amely szimuláció a Higgs-bozon tömegére már tartalmaz egy közelítő feltételezést. A mérés hibáját a még mindig viszonylag alacsony eseményszámból fakadó statisztikai hiba, illetve a leptonok megmérésekor fellépő szisztematikus mérési hiba közösen adják.

Egy elbomló részecske másik fontos jellemzője a tömegeloszlásának szélessége. A Higgs-bozon egy bizonyos keletkezési és bomlási módjának hatáskeresztmetszete arányos a keltő részecskékhez és a bomlástermékekhez vett csatolási erősségeinek négyzetével és fordítottn arányos a tömegspektrum Γ_H szélességével. A hatáskeresztmetszetet – az adott folyamatot reprezentáló események számlálásával kapjuk meg. Ennek értelmezése azonban nem nyilvánvaló, ugyanis a csatolási állandók és Γ_H egyszerre beszorozhatók egy konstanssal úgy, hogy a mért hatáskeresztmetszet értéke nem változik. A részecske kölcsönhatásainak tökéletes leírásához vagy az összes részecskéhez történő csatolás pontos meghatározása, vagy a Γ_H független megmérése szükséges. Az utóbbi közvetlen méréséhez egy jövőbeli elektron- vagy müonütköztetőre lesz szükség, amelyben az ütközési energia hangolható lesz. Közvetve azonban lehetséges modellfüggetlen módon elvégezni a mérést olyan ggH+HZZ folyamatokban, ahol a bozon a tömegrezonanciától eléggé távol keletkezik (bővebben itt: arxiv: 1307.4935), ekkor ugyanis a hatáskeresztmetszetet nyújtó képlet nevezőjében a Γ_H -t tartalmazó tag elhanyagolhatóvá válik, és csak a csatolási állandóktól való függés marad benne. Összehasonlítva ezt az átlagos Higgs-tömeg körüli eseményekből mért értékkel, a Γ_H felső korlátjára – 95%-os megbízhatósági határt feltételezve – 8 MeV adódik, ami összhangban van az SM által jósolt 4 MeV-es értékkel.

A különböző keltési és bomlási kölcsönhatások csatolásának meghatározása a megfelelő folyamatok hatáskeresztmetszeteinek kimérésével nemcsak a teljes bomlási hatáskeresztmetszet kiszámítása miatt fontos,

hanem azért is, mert ezek valamelyikében várhatunk közvetlen eltérést az SM-től. A 2012-es felfedezés, mint a fentiekből látszik, csak a harmadik generációs top kvark és a gyenge bozonok csatolásaira szolgáltat közvetett, de erős bizonyítékot. 2013-ban a HZZ csatolást ezen bomlási folyamaton keresztül az összes keletkezési folyamat kombinálásával (*Phys. Rev. D* 89 (2014) 092007) – illetve hasonló módon 2014-ben a $H\gamma\gamma$ bomlást is (*Eur. Phys. J. C* 74 (2014) 3076) – sikerült közvetlenül kimérni. Ekkorra már az összes 2012-ig gyűjtött adat (Run 1) egységesen feldolgozásra került, és a különböző keletkezési és bomlási módok közös, pontos analizisével lehetővé vált a Higgs-bozon tulajdonságainak mérése. A kétfoton-analizisek a top- és W-hurkon keresztüli $\gamma\gamma$ bomlásra külön-külön is érzékenyeké váltak, így a $t\bar{t}H$ és HWW csatolások (utolsó két folyamat az 5. ábrán) relatív előjele is tesztelhető lett (*Eur. Phys. J. C* 75 (2015) 212).

Az LHC 2013-as továbbfejlesztése után (Run 2) az egységnyi idő alatt létrehozott proton-proton ütközések száma több, mint megduplázódott, illetve az ütközési energia 8 TeV-ről 13 TeV-re növekedett. Mindkét faktor az eseményszám növekedésével járt, utóbbi a hatáskeresztmetszet javulása miatt. 2018-ban a $H\tau\tau$ bomlás megfigyelése (*J. High Energ. Phys.* (2019) 93) szemléltette a precíziós mérések irányát, hiszen a bomlás a $WH+ZH$ és a $ggH+qqH$ keletkezési folyamatokban külön-külön is megmutatkozott. Egyben ezen analiziseknek volt a legjobb érzékenysége a fermionos csatolások közvetlen mérésére. A Hbb folyamatot 2018-ra sikerült megfigyelni (*Phys. Rev. Lett.* 121 (2018) 121801), amelyik egyben a kvarkokra bomlás első példája. Ehhez speciálisan a $WH+ZH$ keletkezéseket kellett használni, ugyanis b-kvarkok háttéreseményként túl gyakran keletkeznek protonütközésekben, de a W vagy Z bomlástermékeinek kiválasztásával ezek elnyomhatók. Végül 2018-ban az összes bomlási mód felhasználásának segítségével sikerült kimutatni a $t\bar{t}H$ keletkezést (*Phys. Rev. Lett.* 120 (2018) 231801), vagyis a top-csatolást is. A $t\bar{t}H$ és ggH folyamatok gyakoriságának összehasonlítása az SM-en túlmutató fizika egyik útja lehet. A minket alkotó anyag

az első generációs fermionokból áll. A Higgs-bozonnak eddig csak a harmadik generációs fermionokhoz való csatolását sikerült megfigyelni, mert a nehezebb részecskék erősebben csatolódnak hozzá. Azonban elmondhatjuk, hogy a Higgs-bozon a harmadik generációs fermionokkal és a gyenge bozonokkal – a jelenlegi mérési pontosságok mellett – az SM-nek megfelelően hat kölcsön. A második generációs fermionokhoz a müoncsatoláson keresztül vezet az út. A folyamat hatáskeresztmetszetéről 95%-os biztonsággal csak annyit tudunk mondani, hogy kevesebb, mint 2,6-szerese az SM-ben vártak, vagyis egyelőre itt sem mutatkozik ellentmondás.

Az eddigi analizisek által feldolgozott adat mennyisége többszöröse annak a 10 fb^{-1} -nak, amennyi a Higgs-bozon felfedezéséhez kellett, de még általában így sem éri el az összesen felvett 159 fb^{-1} -nyi adatmennyiséget. Azt várhatjuk tehát, hogy az elkövetkező egy-két évben az új részecskével kapcsolatos ismereteink ismét jelentősen bővülnek majd. Azonban ennél hosszabb távon is rendelkezünk tervekkel. Az LHC jelenlegi formájában várhatóan 2024-ig fog üzemelni, ami az adat további háromszorozódásához fog vezetni. Ezalatt megépítjük a CMS (és ATLAS) következő generációs detektorait, amelyek a felújított High-Luminosity LHC gyorsító ütközéseit is képesek lesznek hatékonyan megmérni. A végső cél a 3000 fb^{-1} elérése a 2030-as évek végére. Ez az adatmennyiség már elég lehet a Higgs-bozon két Higgs-bozonba – önkölcsönhatás útján – való bomlásának megtalálására is, ami reményeink szerint egyértelműen meg fogja határozni az új részecske helyét és jelentőségét a részecskefizikában.

Irodalom

- C. Patrignani et al. (Particle Data Group): The Review of Particle Physics. *Chin. Phys. C* 40 (2016) 100001., valamint 2017 update; <http://pdg.web.cern.ch/pdg/>
 Horváth Dezső, Trócsányi Zoltán: *Bevezetés az elemi részek fizikájába*. Typotex kiadó, Budapest (2017) 10. fejezet.
 ATLAS and CMS Collaborations (Georges Aad et al.): Measurements of the Higgs boson production and decay rates and constraints on its couplings from a combined ATLAS and CMS analysis of the LHC pp collision data at $\sqrt{s} = 7$ and 8 TeV. *J. High Energ. Phys.* 1608 (2016) 045.

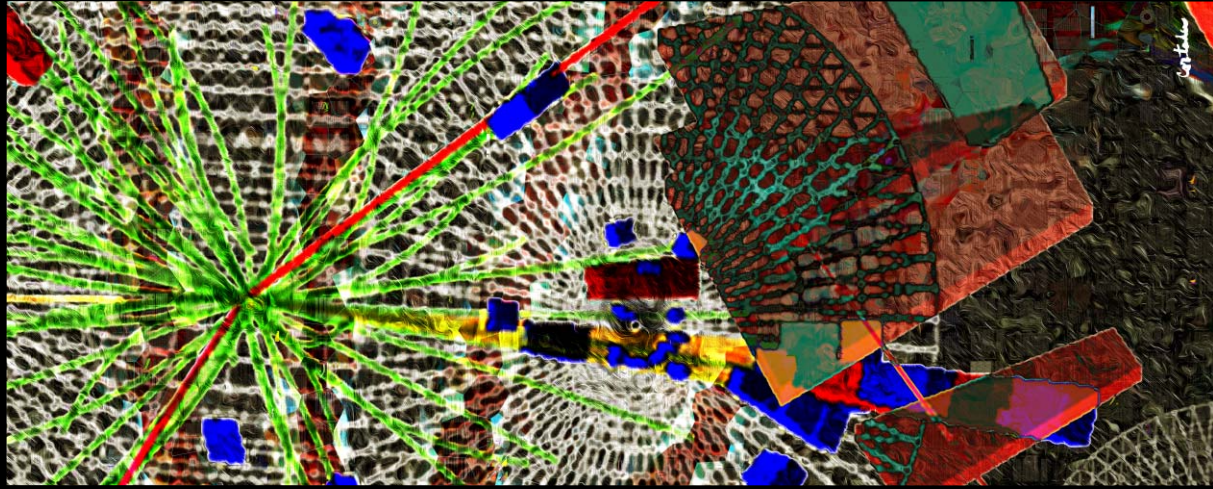
SZÁMÍTUNK RÁD, LÉGY



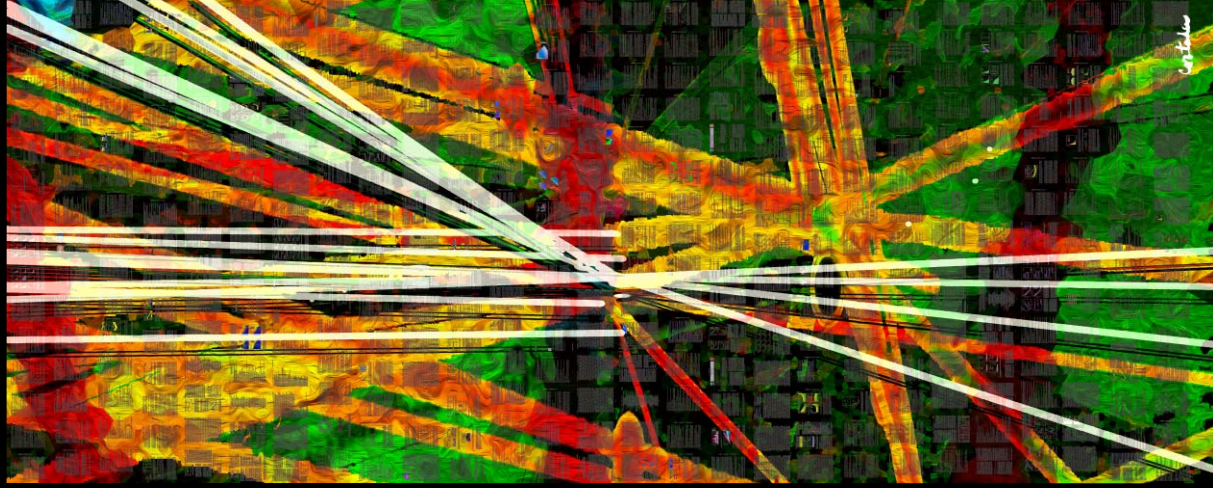
A FIZIKA BARÁTJA!

**Támogasd jövedelemadód 1%-ával
az Eötvös Loránd Fizikai Társulatot!**

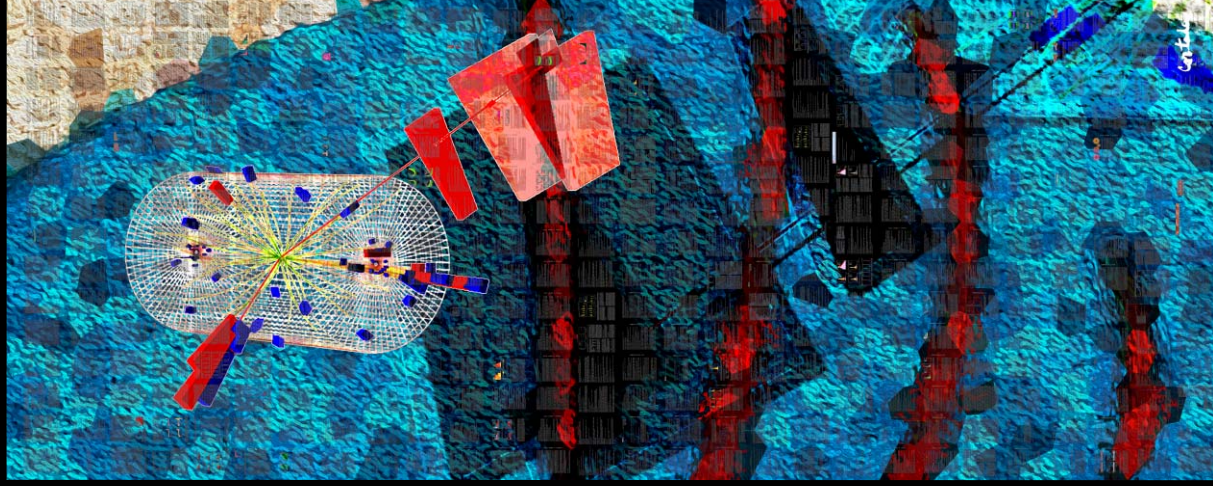
Adószámunk: 19815644-2-43



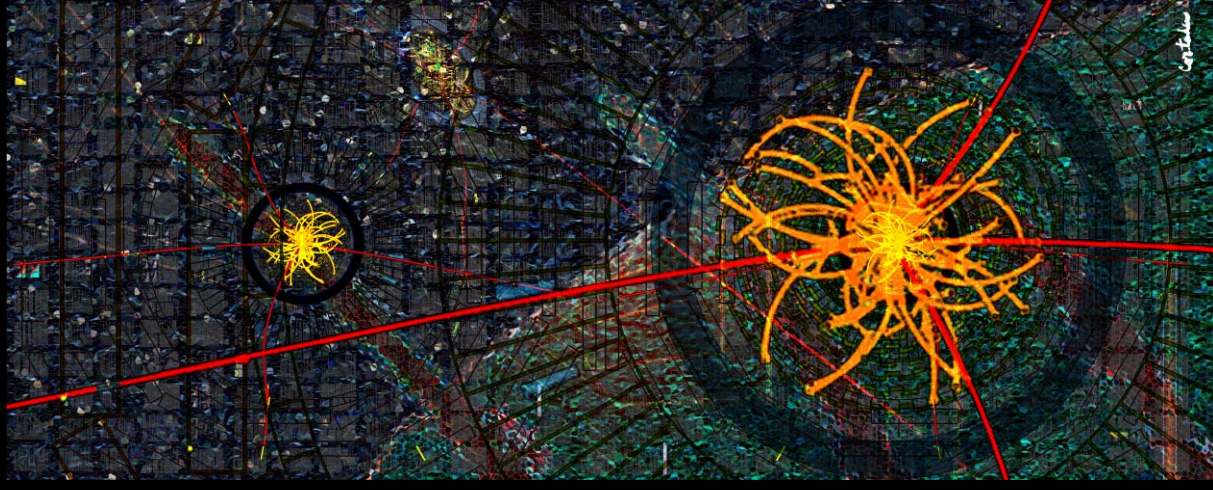
$H \rightarrow \gamma\gamma$



$H \rightarrow b\bar{b}$



$H \rightarrow \tau\tau$



$H \rightarrow ZZ$

Xavier Cortada (Pete Markowitz fizikus részvételével): A Higgs-bozon nyomában