

Az első lépések

Kapcsolatom a CERN-nel az Eötvös Egyetem folyosóján kezdődött, ahol egy szerény A4-es papír hirdette 1992–93 telén, hogy az Európai Részecskefizikai Kutatóintézet (CERN) nyári diákokat keres. *Csilling Ákos*-sal, akkori barátommal és mai férjemmel, rögtön kaptunk az alkalmon és jelentkeztünk.

A két hónap gyorsan elrepült a CERN-ben, ahol nem csak a részecskefizikába kaptunk betekintést, de megismerkedtünk a CERN-es magyarokkal is. Ákos a CMS-kísérlet müon-triggerének szimulációján dolgozott egy lengyel fizikus irányításával, aki – talán nem véletlenül – *Bencze Györggyel* osztotta meg irodáját. Hamarosan megismertük *Vesztergombi Györgyöt* (Gyurit) is, aki felajánlotta, hogy csatlakozzunk a magyar CMS-csoporthoz. A CERN könyvtárához vezető folyosón futottunk össze először *Horváth Dezső*vel, akkor még nem sejtve, hogy hamarosan újra találkozunk az OPAL-együttműködésben.

Hazatérve még haboztunk, elfogadjuk-e *Vesztergombi Gyuri* ajánlatát, és írjuk-e a diplomamunkánkat CMS-fizikából, vagy inkább forduljunk az elméleti kutatások felé. A döntésben azután akadt egy kis segítségünk. *Horváth Zalán* professzor úr, amikor érdeklődtünk dolgozhatnánk-e vele, elég nyomatékosan tanácsolta: „Amennyiben tetszett maguknak a kísérleti fizika a CERN-ben és éreznek hozzá affinitást, menjenek *Vesztergombi* tanár úrhoz diplomázni – szükség van fiatal kísérleti fizikusokra!” Így néhány hónap múlva ismét a CERN-ben találtuk magunkat (az utazás viszontagságait *Veres Gábor* írása hitelesen tolmácsolja).

Mint oly sok mindenhez az életben, a jó témaválasztáshoz is kell szerencse: jó helyen lenni a megfelelő időpontban. Éppen akkoriban merült fel Magyarország csatlakozása az OPAL-kísérlethez (amit diákként én természetesen nem tudtam). *Vesztergombi Gyuri* a CERN kávézójában bemutatott minket *Igó-Kemenes Péter*nek, a Heidelbergi Egyetem magyar származású kutatójának. Péter lelkesen ecsetelte a Higgs-bozon keresés kilátásait, és felajánlotta egyikünk csatlakozzon hozzájuk. Egy percig sem haboztam. A döntés megszületett: én Higgs-részecskék után fogok nyomozni a LEP (Nagy elektron-poziton ütköztető) OPAL-detektorával, Ákos pedig a jövő előkészítésén fog munkálkodni a CMS-együttműködésben. Mivel akkor még nem létezett magyar OPAL-csoport, diploma témavezetőm Péter lett, és *Zimányi József* professzor segített anyagi támogatást találni CERN-es utazásaimra az OTKA forrásaiból.

Mire a befejeztem diplomamunkám, amelyben töltött Higgs-bozonokat kerestem a LEP 91 GeV tömegközépponti energián gyűjtött adataiban, Magyarország hivatalosan is csatlakozott a kísérlethez. *Horváth Dezső* (leendő PhD témavezetőm) lelkesen vezetett be a függvényillesztés rejtelmeibe. Akadémiánk elnö-

ke, *Pálinkás József* professzor úr, aki éppen műszakjait végezte a kísérletben, tanácsaival segített dolgozatom angolságának csiszolásában.

Egy kis kitérő – a Higgs-bozon

Bár az elmúlt hónapokban a sajtó sokat cikkezett a részecskefizika gráljának is nevezett részecskéről, amelynek (vagy egy hasonmásának) nyomaira bukkantunk az LHC (Nagy hadronütköztető) ATLAS- és CMS-detektoraival, talán hasznos egy pár szót szólni róla, úgy is mint történetem egyik főszereplőjéről.

A Higgs-bozon [1] – a legkeresettebb elemi részecske – 1964-ben született. Nevét *Peter Higgs*ről, az Edinburgh-i Egyetem professzoráról kapta. Születésének körülményeiről még vitáznak, de annyit biztosan tudhatunk, hogy többen is segédkeztek (*P. Higgs, F. Englert, R. Brout, G. Guralnik, C. R. Hagen, T. Kibble*). Természetét tekintve bozonunk elektromosan semleges és nulla spinű. Rövid életét más részecskékre bomolva végzi. Jelenlétére csupán ezen részecskék nyomának rekonstrukciójával következtethetünk.

Fő érdeme, amely az események (akarom mondani a részecskefizikai kutatások) középpontjába juttatta, hogy felfedezése bizonyítaná a Higgs-tér létezését, amely a Standard Modell [2] szerint központi szerepet játszik az elektromos szimmetria spontán sértésében [3]. Az elmélet szerint a Higgs-tér, amelynek saját vákuumbeli várható értéke nem nulla, jelen van mindenhol, még az üres térben is. Az elemi részecskék a vele való kölcsönhatástól kapják tömegüket. A Higgs-részecske, a Higgs-tér egy gerjesztése. Skalár (azaz nulla-spinű) volta miatt, fontos szerepet játszik abban, hogy a Standard Modellben bizonyos szórási folyamatok hatáskeresztmetszete (például két W-bozon kölcsönhatása) ne sértse az unitaritást.

A Standard Modell egyes kiterjesztései, például szuperszimmetrikus modellek, nem csupán egyetlen Higgs-részecskét jósolnak. Ezen modellekben legalább öt Higgs-bozon léte szükséges (3 elektromosan semleges és két ellentétes töltésű). A legkönnyebb semleges bozon viselkedésében általában a Standard Modell Higgs-bozonjára hasonlít. Egy töltött skalár részecske felfedezése azonban, a Standard Modellen túli fizika létére utalna.

Kalandok a LEP2-n

Higgs-bozont keresni mindig is kihívásokkal teli és izgalmas volt. Ahogy 1995-ben a LEP-gyorsító energiáját fokozatosan emelni kezdték, a várakozás a tetőfokára hágott, én pedig izgatottan vettem bele magam a munkába. *Igó-Kemenes Péter* igen élvezetesen számol be kalandjainkról: az ALEPH-kísérlet által látni vélt, négy

hadronzáport tartalmazó események lázas, majd hosszan elnyúló kutatásáról; az OPAL-detektor adataiban felbukkanó fluktuációk okozta álmatlan éjszakákról; majd a LEP végnapjaiban megjelenő Higgs-szerű események (színes 1. ábra a hátsó belső borítón) nyomán születő reményekről és belpolitikai vitákról a CERN-ben.

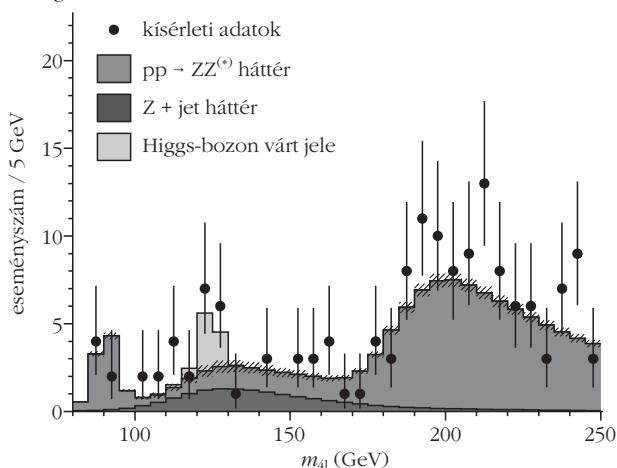
2000 novemberében a LEP-ütköztető sajnos befejezte Higgs-mentes, ám a gyenge Z- és W-bozonok pontos mérésében igen sikeres pályafutását. Az adatok elemzése még sokáig tartott (bármilyen hihetlen még 2012-ben is jelent meg OPAL-publikáció), de a fizikusok figyelme immár az új gyorsító, az LHC építése felé fordult. Mint oly sokan mások, én is megosztottam időm az OPAL-eredmények végső publikációja és a CMS-detektor tervezése és építése között.

Ismét a nyomon

Kalandos utam a CERN-ben (színes 2. ábra a hátsó belső borítón) 2008-ban az ATLAS-együttműködéshez vezetett. 2011 nyarán váratlanul, de nem kis nosztalgiával tértem vissza diákkori kedvencem, a Higgs felkutatásához [4]. Az előző néhány évben – egyebek között – az ATLAS-detektor elektron-rekonstrukciójának fejlesztésén dolgoztam. A 2010-es adatok felhasználásával éppen akkoriban fejeztük be az elektron-rekonstrukció teljesítményét dokumentáló cikk írását, amelynek én voltam a szerkesztője.

A kísérleten belül mindenki a Higgs-keresésben észlelt többletről beszélt, és a CERN folyosóin izgatottan folyt a találgatás, mit lát a rivális kísérlet, a CMS. A gond csak annyi volt, hogy a legjelentősebb többletet éppen a kísérleti szempontból nagy kihívást jelentő $H \rightarrow WW \rightarrow$

5. ábra. Az új bozon megmutatkozik. Az ábra a $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ee$ csatornában kiválasztott eseményekben a négy lepton (elektron vagy müon) invariáns tömegét jeleníti meg. A fekete pontok a kísérleti adatot mutatják, míg a szürke hisztogramok a más folyamatokból várt háttér. A $pp \rightarrow ZZ^{(*)}$ folyamat adja a háttér nagy részét nagy tömegek esetén ($m_{4l} > 160$ GeV). Az $m_{4l} = 100\text{--}160$ GeV-es tartományban a háttér jelentős része Z+jet eseményekből származik. Az $m_{4l} = 125$ GeV tömegnél észlelt eseménytöbblet tulajdonságai megfelelnek a Standard Modell Higgs-bozon keletkezéséből várt jelének. Az itt látható eredmény, együtt a $H \rightarrow \gamma\gamma$ és $H \rightarrow WW$ csatornák eredményeivel, hozzájárult az LHC nagy felfedezéséhez, egy új semleges és nehéz bozon észleléséhez.



lv lv csatornában láttuk (színes 3. ábra a hátsó belső borítón). A fő nehézséget a neutrínók által elvitt energia és az alacsony impulzusú leptonok mérése, valamint a jelentős háttér okozza. Mivel szorított az idő (a nagy nyári konferenciák kezdetéig már alig egy hónap volt), az ATLAS vezetése úgy döntött, hogy egy szakértőkből álló csoport kezébe adja az analízis teljes átvilágítását. Az elektron-csoportból engem szemeltek ki, azonnal figyelmeztetve, hogy amennyiben vállalom a feladatot, az elkövetkező néhány hétben mindent emunkának kell alárendelni. Nem tudtam ellenállni a lehetőségnek. (Családi nyaralás elhalasztva, sürgős telefonhívás a nagyszülőknél, akik hamarosan meg is érkeztek a három apróság nagy öröme...)

A körülmények rengeteget változtak a LEP óta. Míg a LEP idejében általában egy pár fős csoport dolgozott egy-egy Higgs-analízisen, az LHC kísérleteiben még a nem divatos méréseken is 10-20 fős csoportokban dolgozunk. A Higgs-analízisekben pedig csatornánként akár több mint 100 fizikus is részt vehet. Természetesen nemcsak a kollaborációk mérete, de a feladatok bonyolultsága is nőtt, ahogy a LEP tiszta elektron-positron ütközéseinek vizsgálatáról áttértünk az LHC nehezen áttekinthető proton-proton eseményeire [5]. Érdemes összehasonlítani a LEP egyik legzsúfoltabb négyhadron-záport tartalmazó eseményét (1. ábra), az LHC-n észlelt legtisztább két- és négy-leptonos végállapotokkal (3. és színes 4. ábra a hátsó belső borítón).

Néhány hetes megfeszített munka után – beleértve minden reggel 8:00-kor egy bemelegítő megbeszélést, amelyen a Higgs-munkacsoport képviselőin és a szakértőkön kívül a kísérlet vezetője és fizika-koordinátorai is részt vettek, jól érzékeltetve a helyzet kiélezett voltát – készen álltunk az eredmények nyilvánosságra hozatalára. Az új részecske első nyomai a kezünkben voltak. Ekkor persze még remélni is alig mertük, hogy oly sok évnyi munka után végre a részecskefizika egyik legnagyobb felfedezése előtt állunk (és nem csupán ismét egy statisztikus fluktuáció bukkant fel a kísérleti adatokban).

Megízelve újra a Higgs-keresés izgalmát, hamarosan két genfi diákkal együtt csatlakoztam a $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ll ll$ folyamat (4. ábra) kereséséhez. Izgalmakban aztán már nem volt hiány, hiszen nemcsak a kísérletek között, de magukon a kísérleteken belül is nagy a verseny.

Egyik fő feladatunk a háttér mérése volt. A legnehezebben megbecsülhető háttér olyan folyamatokból származik, ahol a proton-proton ütközésben egy Z-bozon mellett hadronzáporok is keletkeznek (Z+jet háttér). Ezekben a hadronzáporokban születhetnek elektronok is (például nehéz kvarkok bomlásaiából vagy fotonok elektron-positron párra való átalakulásából), de néha a hadronok is hagyhatnak olyan nyomot, amely kísértetiesen emlékeztet egy elektronéra. A várt háttér mennyisége, eloszlása és mérésének hibája a keresés egyik kulskérdése. Különösen így volt ez, amikor egyre több eseményt találtunk 120-130 GeV környékén, éppen abban a négy-lepton tömegtartományban, ahol a várt háttér eloszlásának is maximuma van (5. ábra).



6. ábra. A hosszú sor. Várakozás a történelmi Higgs-szemináriumra a CERN folyosóin 2012. július 4-én (fotó: Stephen Sekula, SMU, Texas).

A rengeteg munka, az életteli viták végül meghozták gyümölcsüket. Az ATLAS- és CMS-detektorokkal sok-sok fizikus, mérnök és ki tudja mennyi különböző foglalkozást űző szakember munkáját dicsérve, egymástól függetlenül felfedeztünk egy új részecskét, egy bozont (azaz egész spinű részecskét), amely tulajdonságaiban nagyon hasonlít az oly sokáig keresett Higgs-bozonra. Csak több adat és további gondos analízis döntheti el, vajon tényleg rá vagy egy hasonmására akadtunk.

De álljunk meg egy percre, és térjünk vissza ahhoz a meleg nyári naphoz, amikor a két kísérlet a világ elé tárta a keresés eredményét!

Happy Higgs Day! Boldog Higgs-napot!

Július 4-én, a történelmi Higgs-szeminárium napján, kora hajnalban csörgött az óra. Az olasz diáklányom SMS-e sem késlekedett: „Most hallottam, hogy már 300-an állnak a sorban! Indulok...”

A CERN nagy előadóteremhez vezető folyosón ideoda kígyózó, de igen rendezett sorban ültek, álltak, beszélgettek a várakozók, többnyire fizikusok és diákok (6. ábra). Hirtelen megszólalt egy sziréna. A biztonságiak is azonnal megjelentek és megpróbálták

7. ábra. Az új bozon felfedezését ünnepli az ATLAS-együttműködés (Fénykép © 2012 CERN).



udvariasan kiüríteni az épületet. Senki sem mozdult... Egy perc múlva tűzoltók jöttek, gázmaszkban. Fényképezőgépek villogtak, de a sor rendületlenül állt. Egy idő után egy biztonsági is elővette a fényképezőgépét és többünk multságára immár ő fényképezett minket. A hangulat, különösen a korai órára való tekintettel, kissé szürreális volt. A fülrepszto sziréna végül elhallgatott. A gázmaszkos tűzoltók elmentek. Mi pedig találgattuk: „Talán egy későn érkező próbált (hiábavalóan) kedvezőbb pozícióba kerülni?”

Valami volt a levegőben. Mindannyian éreztük. Egy prominens fizikust kísérő tv-stáb megjelenésekor hangos ovációban tört ki a tömeg... a hangulat egy rockkoncert előtti várakozást idézte.

Persze mi már nem jutottunk be a terembe. Fél órával később érkeztünk, mint az utolsó szerencsés. Az előadásokat az ATLAS-on dolgozó kollégák körében, a CERN egy előadótermében, élő közvetítésben néztük. Megható volt. Azt hiszem nem voltam egyedül, amikor diszkréten egy könnyecseppet törlöttem le a nagy bejelentés után. A tudomány ünnepnapja volt ez. Ahogy az egyik résztvevő mondta: „Boldog vagyok, hogy részt vehettem egy tudományos rendezvényen, amelynek hangulata egy futballmeccsével vetekedik.”

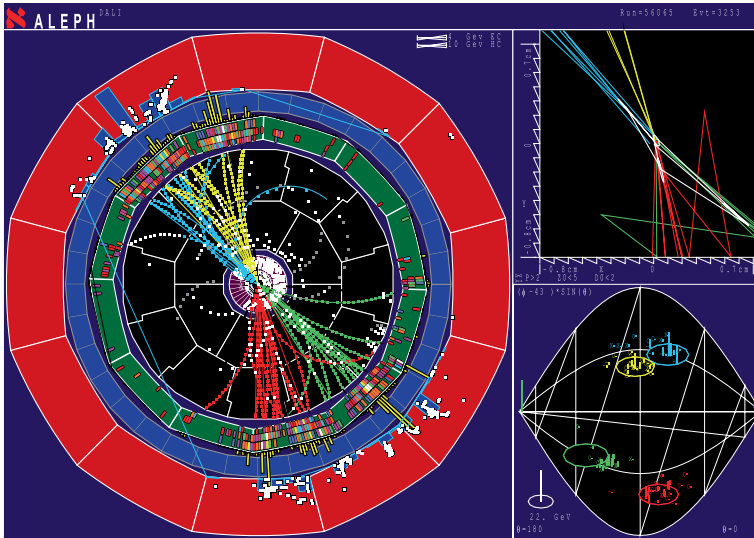
Öröm volt üzeneteket, telefonhívásokat kapni nemfizikus barátoktól, ismerősöktől, akik a rádióban, tv-ben hallottak a felfedezésről, látni a hírt a *Google News*-ban, a BBC-n, a *New York Times* címlapján... Rövid időre, a világ számos táján főszereplő lett a tudomány.

Hogyan tovább?

Az ünnep (7. ábra) véget ért, de a munka oroszlánrésze még csak most következik. Mint említettem, ma még csak annyit tudunk mondani teljes bizonyossággal, hogy egy új részecskét, egy bozont fedeztünk fel. Vajon a Standard Modell Higgs-bozonját? Remélem, nem. Remélem, egy hasonmásához van szerencsénk. Ha így lenne, akkor megnyílna az út az „új fizika” felé, amely remélhetőleg közelebb visz minket nyitott kérdéseink megválaszolásához. Mi az Univerzumunkat betöltő sötét anyag? Egyesíthetők-e a természetben megfigyelt kölcsönhatások? Megannyi kérdés, amelyekre válaszokat keresünk a CERN-ben.

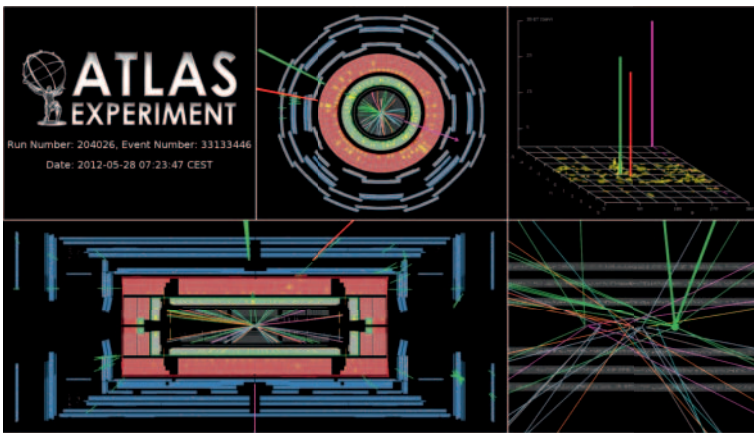
Irodalom

1. Leon Lederman, Dick Teresi: *Az isteni a-tom: Mi a kérdés, ha a válasz a Világegyetem?* TypoTeX Kiadó, Budapest, 2000, ISBN 9637546545
2. Horváth Dezső: A részecskefizika anyagelmélete: a Standard Modell. *Fizikai Szemle* 58/7 (2008) 246, <http://www.kfki.hu/fszemle/77archivum/fsz0807/horvath0807.html>.
3. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában – a 2008.évi fizikai Nobel-díj. *Fizikai Szemle* 58/12 (2008) 417, <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0812/trocsanyi0812.html>.
4. Trócsányi Zoltán: A Standard Modell Higgs-bozonja nyomában az LHC-nál. *Fizikai Szemle* 57/8 (2007) 253, <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0708/trocsanyi0708.html>.
5. Trócsányi Zoltán: A kvantum-szindinamika szerepe nagyenergiájú részecskeütközések értelmezésében. *Fizikai Szemle* 57/3 (2007) 73, <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0703/trocsanyi0703.html>.

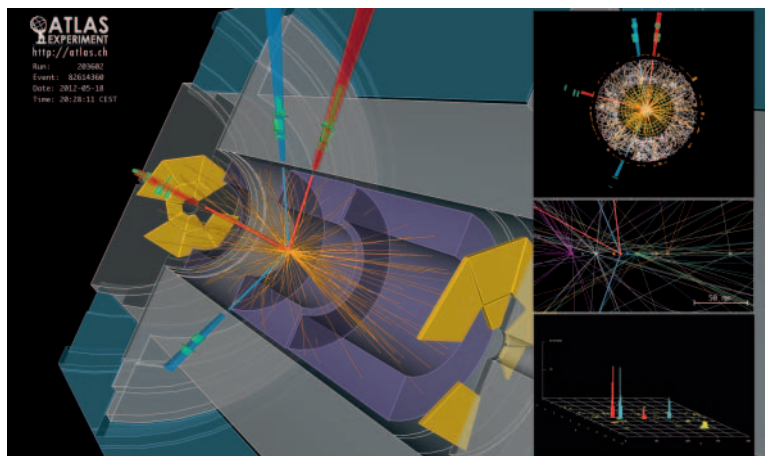


1. ábra. Egyike a nagy izgalmat okozó, 2000-ben észlelt Higgs-jelölt eseményeknek az $e^+e^- \rightarrow HZ \rightarrow bb\bar{b}b$ csatornában az ALEPH-kísérletben a LEP-ütköztetőn.

3. ábra. Egy Higgs-jelölt esemény az ATLAS-kísérlet 2012-ben gyűjtött adataiban a $H \rightarrow WW \rightarrow e\nu\mu\nu$ csatornában, különböző nézetekből. Jól látható a közös pontból induló elektron és müon nyoma, amelyekkel áttelenes irányban nyíl mutatja a hiányzó impulzus irányát. Az ütközésekben több proton-proton kölcsönhatás is történik az LHC nagy pillanatnyi luminozitása miatt. Az ezekben születő részecskék formálják az ábra jobb alsó részén kinagyított kölcsönhatási pontokat. Az elemi kölcsönhatások nagy száma jelenti az egyik fő nehézséget az adatok elemzésében.



4. ábra. Egy Higgs-jelölt esemény az ATLAS-kísérlet 2012-ben gyűjtött adataiban a $H \rightarrow ZZ^* \rightarrow ee\bar{e}e$ csatornában, különböző nézetekből. A jobb alsó sarok ábrája az elektronok – elektromágneses kaloriméterben mért – transzverzális energiáját mutatja. Megfigyelhető, hogy az erősen virtuális Z-bozonból egy alacsony energiájú elektron született. Ezen elektronok rekonstrukciója és felismerése, valamint a hatáskor pontos mérése komoly kísérleti kihívás.



2. ábra. Nagytól az óriásig: a három CERN-kísérlet, OPAL, CMS és ATLAS, amelyekben részt vettem. A CERN nagy gyorsítói (a LEP és az LHC) mellett épült általános célú detektorok mérik az ütközésekben születő részecskék útját és energiáját. A keletkező részecskék nagy energiája egyre nagyobb mérőrendszerek építését igényli. Az ábrákra rajzolt emberek méretarányosak.

