

7. N. D. Mermin, H. Wagner: Absence of ferromagnetism or anti-ferromagnetism in one- or two-dimensional isotropic Heisenberg models. *Physical Review Letters* 17(1966) 1133.
8. J. M. Kosterlitz: The critical properties of the two-dimensional xy model. *Journal of Physics C: Solid State Physics* 7(1974) 1046.
9. D. R. Nelson, J. M. Kosterlitz: Universal jump in the superfluid density of two-dimensional superfluids. *Physical Review Letters* 39(1977) 1201.
10. F. D. M. Haldane: 'Luttinger liquid theory' of one-dimensional quantum fluids. *Journal of Physics C: Solid State Physics* 14 (1981) 2585.
11. I. Affleck, T. Kennedy, E. H. Lieb, H. Tasaki: Rigorous results on valence-bond ground states in antiferromagnets. *Physical Review Letters* 59(1987) 799.
12. M. Z. Hasan, C. L. Kane: Colloquium: Topological insulators. *Review of Modern Physics* 82(2010) 3045.

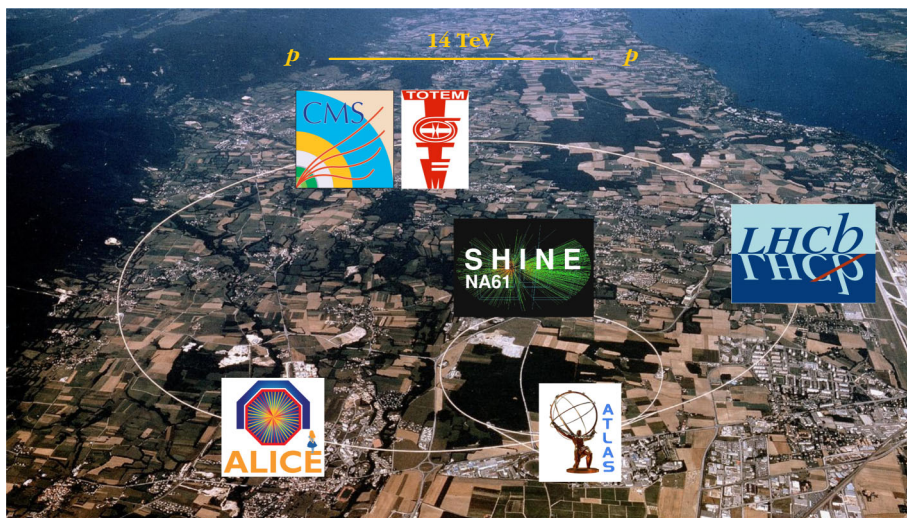
A CERN NAGY HADRONÜTKÖZTETŐJE, 2016

Horváth Dezső
Wigner Fizikai Kutatóközpont, Budapest
és Atomki, Debrecen

A világ legnagyobb részecskegyorsítója, a CERN Nagy hadronütköztetője (hivatalos nevén LHC, Large Hadron Collider) 100 m-re a föld alatt, 27 km kerületű alagútban (1. és 2. ábra), 2000-től 2008-ig épült, és két megszakítással (az első kisebb katasztrófától, a második tervezett továbbfejlesztés miatt) azóta sikeresen működik.

Nagyenergiás részecskegyorsítók

A részecskegyorsító elnevezés némileg félrevezető, hiszen ezeken az energiákon a részecske sebessége nagyon közel van már a fénysebességhez, tovább nemigen gyorsul, csak az energiája növekszik. A gyorsítók teljesítményét az elért energia, valamint a nyaláb intenzitása és minősége határozza meg. A modern nagyenergiájú részecskegyorsítók egymással szemben mozgó részecskecsomagokat ütköztetnek az észlelőrendszerek közepén, ezzel biztosítva a befektetett energia legjobb kihasználását. Az energiát a részecskefizikában elektronvoltban (eV) mérjük, azzal az energiával, amelyre 1 volt feszültség átszelésekor tesz szert egy egységnyi töltésű részecske, például elektron vagy proton. A nagyenergiájú



1. ábra. A CERN és környéke a Szuper-proton-szinkrotron (SPS) és az LHC gyűrűivel, valamint a Genfi-tóval. Jelentős magyar csoportok dolgoznak a CMS-, ALICE-, NA61- és TOTEM-kísérleteknél.

fizika kedvenc egységei a giga- és teraelektronvolt ($1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV}$ és $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$).

Ütköző nyalábok esetén az ütközések gyakoriságát a részecskenyalábok intenzitásán kívül, azok menél kisebb keresztmetszeten történő átfedése, azaz lehető legjobb fókuszlása és pontosabb összeirányítottága határozza meg. A részecskefolyamatok valószínűségét a szóródási kísérletekhez bevezetett *hatáskeresztmetszettel* jellemezzük, amelynek mértékegysége a *barn* ($1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$). Nem véletlenül kapta az angol *csűr* nevet, hiszen nagyon nagy: a jelenleg tanulmányozott részecskefizikai folyamatok hatáskeresztmetszetét általában *picobarnban* ($1 \text{ pb} = 10^{-12} \text{ b}$) vagy *femto-barnban* ($1 \text{ fb} = 10^{-15} \text{ b}$) mérik. Az ütközési gyakoriságot legkönnyebben azzal lehet szemléltetni, mekkora



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.

A szerző köszönettel tartozik kollégáinak, főleg *Siklér Ferencnek* és *Trócsányi Zoltánnak* értékes tanácsaikért, valamint az NKFI Alap kutatási támogatásáért (K-103917 és K-109703. sz. szerződés). Ez a munka a szerző *MTA Hírekben* 2016 tavaszán és kora nyarán megjelent elektronikus cikkei alapján készült. A *Fizikai Szemlében* többször is publikáltunk a témában, de az általános érthetőségre törekedve szükségszerű ismétlésekkel írtuk ezt az cikket, és ezért elnézést kérünk a rendszeres olvasótól.



2. ábra. Az LHC alagútja a mágnesekkel.

mutatja, 2010 és 2011 között a luminozitás 140-szeresére, 2012-ben az energia növelése mellett még négyeszeresére növekedett. Jelenleg ugyanez a folyamat figyelhető meg: 2016-ban, az LHC működésének első hónapja alatt már több adatot gyűjtöttünk, mint 2015 egész évében. Figyelemre méltó, ahogyan a gyorsítófejlesztéssel összefüggő egy-egy hosszabb vízszintes (tehát a kísérleti luminozitást nem növelő, ütközések nélküli) időszak után a luminozitás növekedése felgyorsult.

hatáskeresztmetszet mérésére nyújt lehetőséget, ennek megfelelően a kísérletezők az ütköztető intenzitását, amelyet igencsak szerencsés kifejezéssel *luminozitásnak* hívunk, a hatáskeresztmetszet reciprokában szokták kifejezni, tehát $1/\text{pb}$ (pb^{-1}) vagy nagyobb intenzitásnál $1/\text{fb}$ (fb^{-1}) egységben.

LHC, a Nagy hadronütköztető

Átadása (3. ábra) óta az LHC bámulatos fejlődésen ment keresztül. 2009-ben 3,5 TeV protonenergiával, azaz 7 TeV ütközési energiával indult. 2012-ben a protonütközési energiát 8 TeV-re, majd a másfél éves fejlesztés eredményeképpen 2014-ben 13 TeV-re sikerült növelni. A proton összetett részecske, amelyben hemzsegnek az igazán elemi (mondhatni, eddigi tudásunk szerint legegységesebb) részecskék, főként a magerőket hordozó gluonok. Új jelenségek keresésére a nagyobb protonenergia az alkatrészek közötti nagyobb ütközési energiát jelent, tehát nagyobb felfedezési potenciált, nagyobb tömegű esetleges új részecskék keltését.

Még az energiánál is jelentősebb volt az ütközési intenzitás, a luminozitás fejlődése. Amint azt a 4. ábra

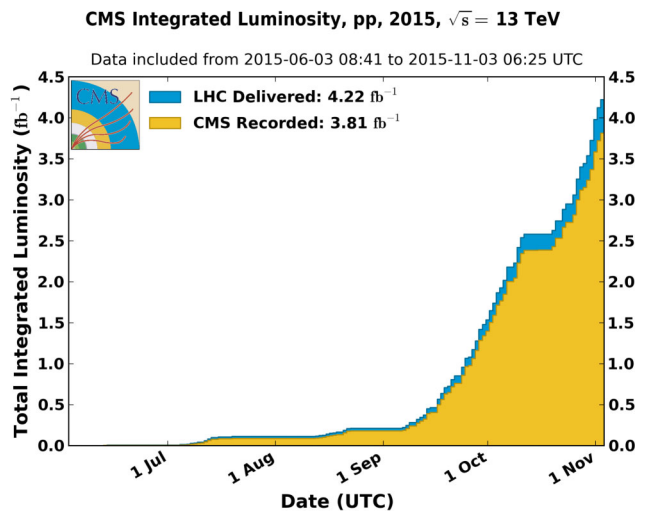
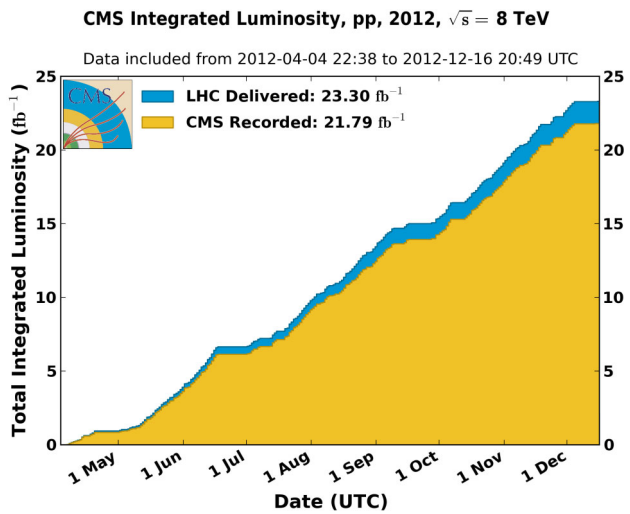
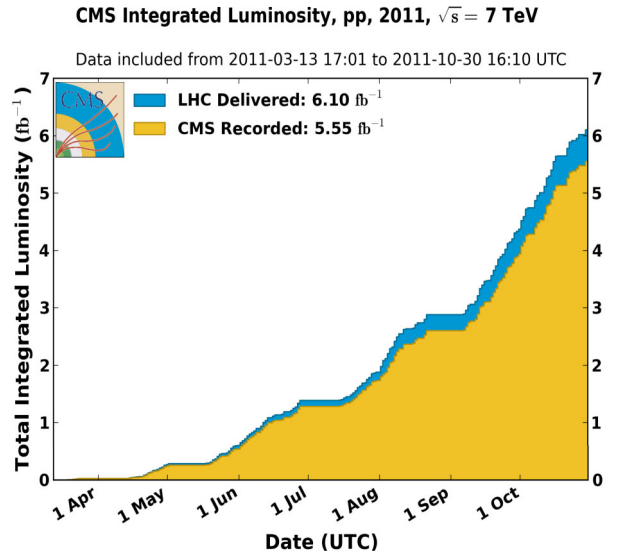
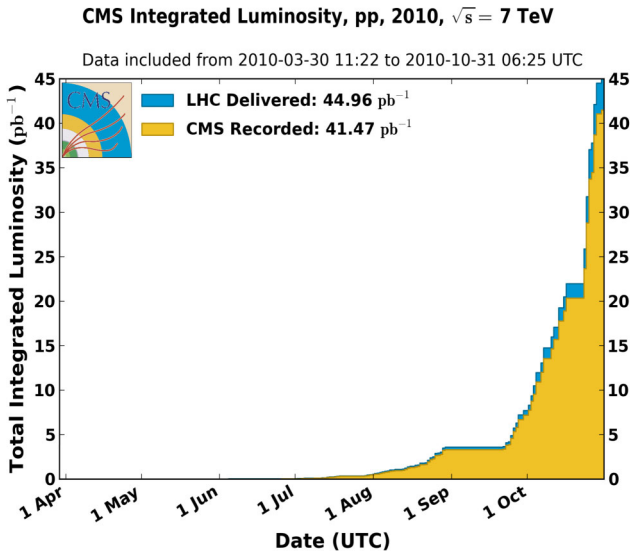
A részecskefizika standard modellje

A részecskefizika matematikai elmélete, amelyet történeti okokból *standard modellnek* hívunk, a világot kétféle elemi részecskéből építi fel, *fermionokból* és *bozonokból* (Enrico Fermi és Satyendra Nath Bose neve után), amelyek szimmetriatulajdonságaikban különböznek. Az elemi fermionok tekinthetők az anyagi részecskéknek, ilyen például az elektron, a bozonok pedig általában a közöttük fellépő kölcsönhatásokat közvetítik: a foton, például, az atomokat összetartó elektromágneses kölcsönhatást. Mindezek a részecskék különböző tulajdonságokkal rendelkeznek, amelyek *kvantumszámokkal* jellemezhetők. Van azonban egy furcsa bozon, a *Peter Higgsről* elnevezett Higgs-bozon, amelynek valamennyi kvantumszáma zérus, a tömege az egyetlen jellegzetes tulajdonsága (a szerzőt kollégái megbírálták, amikor tulajdonságok nélküli részecskének nevezték).

A standard modell a háromféle alapvető részecske-kölcsönhatást, az elektront atomi pályán tartó elektromágneses, az atommagot összetartó erős és a részecskék bomlását vezérlő gyenge kölcsönhatást szimmetriákból származtatja, de azok nem tűrik meg a tömegeket. Az elemi részecskék tömegének bevezetésére ki kellett fejleszteni egy olyan mechanizmust, amely megbontja a vákuum tökéletes szimmetriáját. Ezt a mechanizmust gyakorlatilag egyidejűleg Peter Higgs és két kutatócsoport közölte 1964-ben, az első kettőről Brout–Englert–Higgs (BEH) mechanizmusnak nevezzük (5. ábra). A felfedezés bejelentését követő évben, 2013-ban François Englert és Peter Higgs megkapta a fizikai Nobel-díjat. Robert

3. ábra. Az LHC indulása hatalmas érdeklődés mellett, 2008. szeptember 10-én.





4. ábra. Az LHC ütközési energiájának és luminozításának fejlődése napról napra és évről évre a CMS-kísélet adatai alapján.

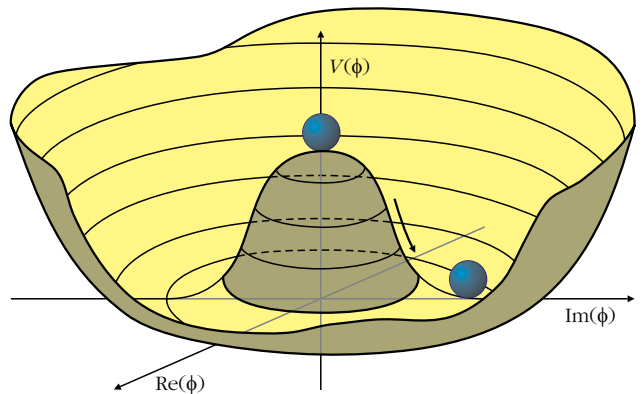
Brout nem érte meg a felfedezést, a második csoport pedig néhány héttel később publikálta a modellt, tehát lekéste a Nobel-díjat.

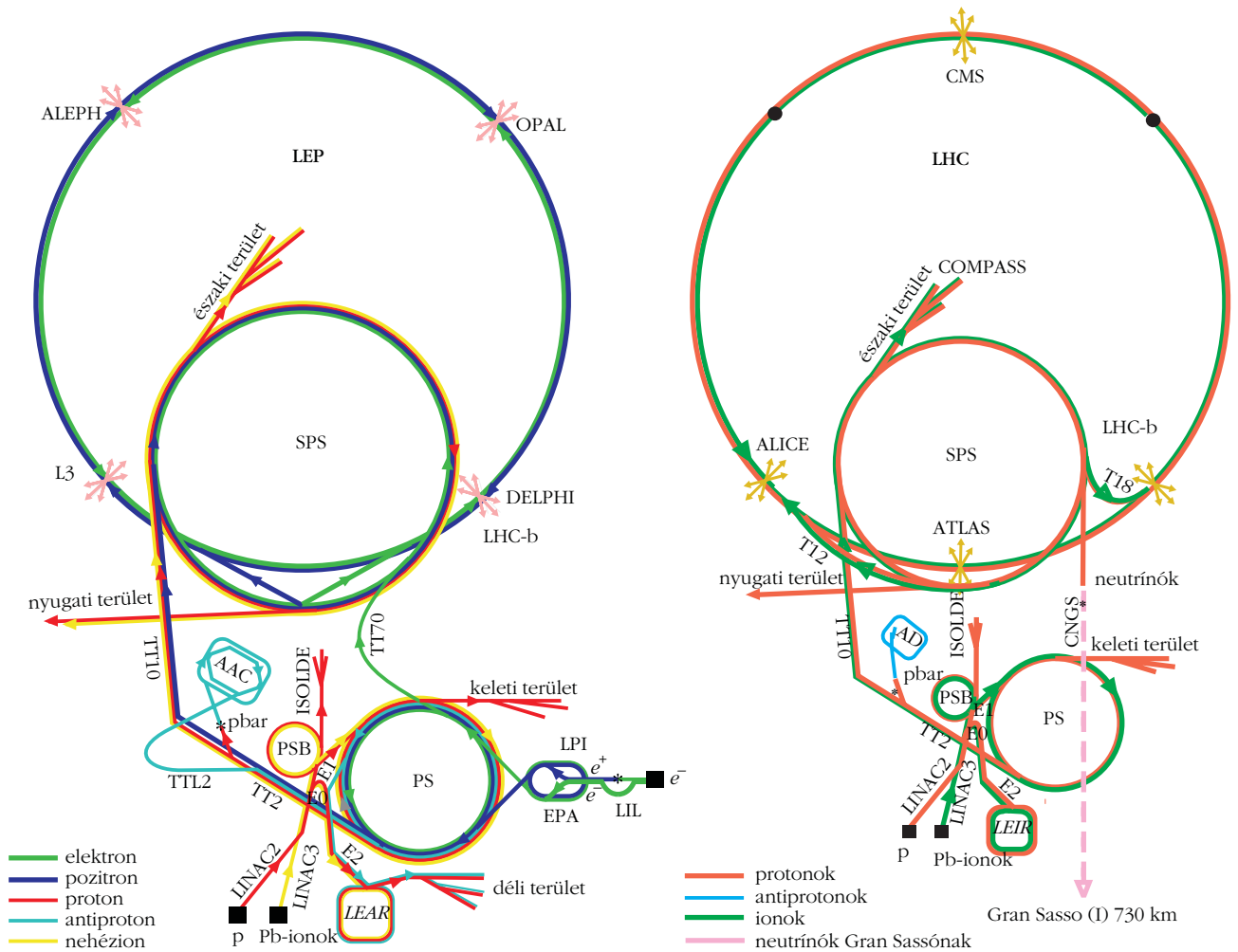
A CERN részecskegyorsítói

Az LHC tervezése már az előző nagy gyorsító, a Nagy elektron-positron ütköztető (LEP) indulása előtt megkezdődött. Amint az a 6. ábrán látható, a gyorsítókomplexum sok részből áll, egyik gyorsítófokozat a másikkal adja át további gyorsításra a részecskéket. A LEP idején a rendszer elektront, pozitront, protont és nehézionokat gyorsított, valamint antiprotonokat lassított antianyag (antihidrogén) előállítására. Az LHC egyszerűsített: csak protont és nehézionokat gyorsít, és az antiprotonprogramra a CERN külön antianyaggyárat (Antimatter Factory) épített. Az 1. ábra mérőberendezései közül a két legnagyobb, az ATLAS (A Toroidal Lhc Apparatus) és a CMS (Compact Muon Solenoid) az LHC áttelnes pontjaiban épült. A szerző

a CMS-kísélet résztvevője, tehát példáit abból idézi, de az ATLAS teljesen hasonló eredményeket kapott; a részecskefizikában – a vizsgálatok rendkívüli bonyolultsága miatt – csak más, független kísérletekkel megerősített eredményeket fogadunk el.

5. ábra. A szimmetriasértő BEH-potenciál. A csúcsra tett golyó legurul és megbontja a tökéletes hengerszimmetriát.

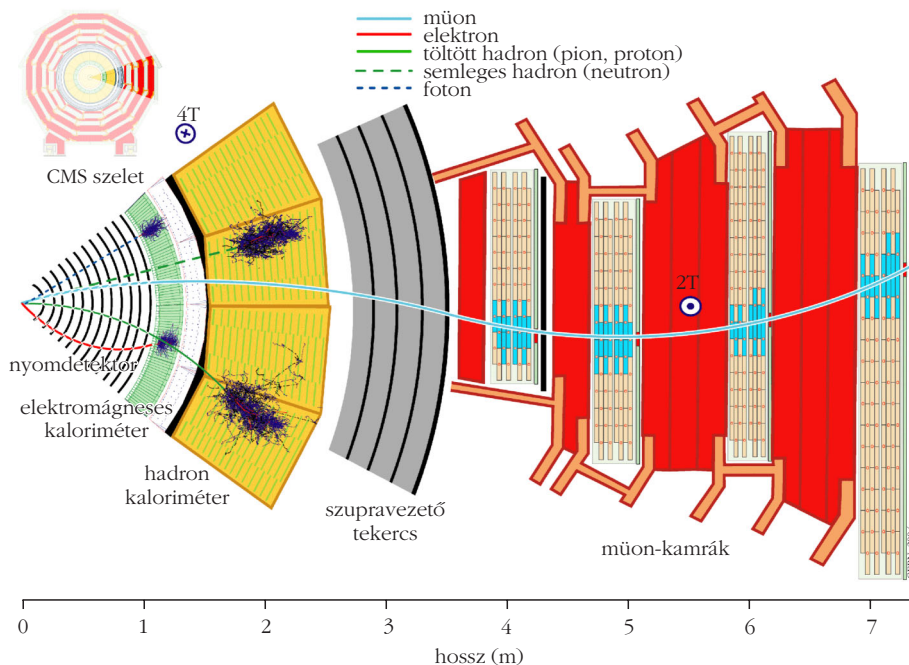




6. ábra. A CERN gyorsítókomplexuma a LEP időszakában (balra) és jelenlegi részecskegyorsítói (jobbra).

A CMS-kísérlet

A CMS-kísérlet észlelőrendszerét a 7. ábrán mutatjuk be. Hagymahéjszerűen egymásra épülő rétegei különböző részecskék azonosítására szolgálnak. Magyar fizikusok és mérnökök a hadron-kaloriméter megépítésében és a müonkamrák helyzetmeghatározó rendszerének tervezésében,



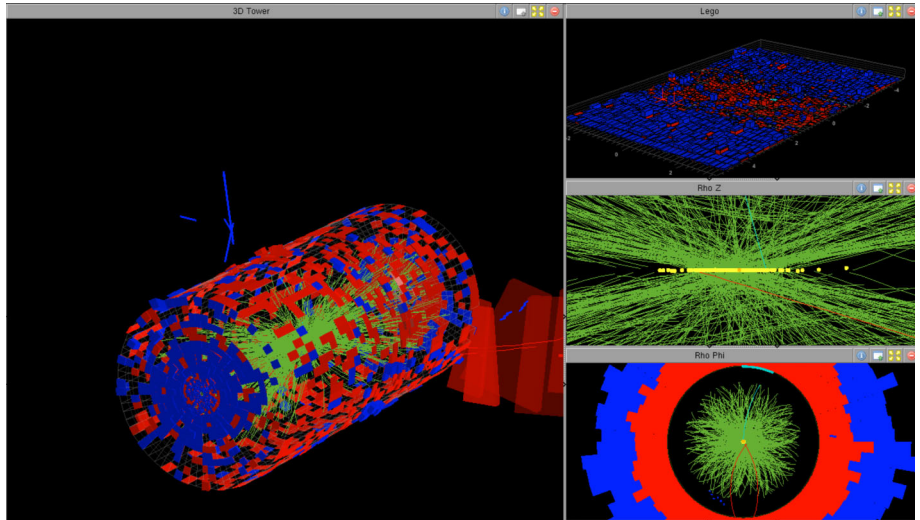
7. ábra. A 14 000 tonnás CMS-detektor keresztmetszetének szelete. A részecskék a bal oldalt látható közép-pontban ütköznek, a kirepülő részecskéket a félvezető alapú nyomkövető rendszer, a 75 848 ólomwolfrámat egykristályból álló foton- és elektrondetektor, valamint a mezonokat és nukleonokat befogó hadronkaloriméter észleli. Mindezt körbeveszi a világ legnagyobb szupravezető szolenoidja, akörül pedig a mágnes vaslemezei vannak a gyors müonokat észlelő kamrákkal.

megépítésében vállaltak feladatokat, és jelenleg a műonkamrákon kívül a legbelső nyomkövető rendszer fejlesztésében és üzemeltetésében vesznek részt.

Az LHC fő célja a Higgs-bozon felfedezése, vagy – rosszabb esetben – létezésének teljes kizárása volt. Ez utóbbiban kevesen hittek, hiszen a rá épülő standard modell – kicsit ad-hoc jellege ellenére – évtizedek óta kiválóan működött, pontosan megjósolva minden addig mért adatot. A méltán világhíres *Stephen Hawking* volt a legnevesebb ellenzéke; a Higgs-bozon felfedezésének bejelentésekor közölte: „Úgy látszik, vesztettem 100 dollárt”. Amint az a 4. ábrán jól látszik, az LHC 2012-ben elérte a 2013–14-re tervezett nagy leállás előtti csúcsteljesítményét. A nagy luminozítás jelentősen növeli a felfedező munka hatékonyságát, de ugyanakkor nehezíti az adatok elemzését. A nagyenergiás fizika *eseményekkel* dolgozik: így hívjuk a detektorban történtek rögzítését, amikor valami érdekesnek gondolt ütközési folyamat történik. Tekintettel arra, hogy az LHC protoncsomagjai másodpercenként 40 milliószer ütköznek, igencsak intelligens módszerekre van szükségünk, hogy kiválasszuk belőlük azt az ezret vagy legfeljebb néhány ezret, amelyet kezelni és tárolni tudunk. A 8. ábrán olyan CMS-esemény látszik, amelyben két protoncsomag ütközésekor 78 egyidejű protonütközés következett be; az eseményt a két nagy energiájú müon megjelenése tette rögzítésre érdemessé, egyébként természetesen nem megy át a szűrőn.

A Higgs-bozon felfedezése

A CERN vezetése 2012 elején közölte, hogy addig nem állítják le az LHC-t, amíg meg nem figyelik a Higgs-bozont, az addig gyűjtött adatokból ugyanis már látszott, hogy az küszöbön áll. A szerző 2012 májusában, nem sokkal az LHC az évi indulása után előadást tartott az Akadémián, amelynek ezt a címet adta: *Higgs-bozon: felfedezésre ítélve?* A felfedezést azonban már a 2012-es adatok egynegyedének elemzése után, 2012. július 4-én bejelentették: mindkét nagy kísérlet, az ATLAS és a CMS észlelt $125 \text{ GeV}/c^2$ tömegnél (az Einstein-féle $E = mc^2$ összefüggés alapján a részecskefizikában a tömegeket energiában mérjük) egy új részecskét a Higgs-bozonnak megfelelő tulajdonságokkal. Mivel a CERN erre az előadásra meghívta a világsajtót és azokat az elméleti tudósokat, akik a Higgs-bozont eredményező mechanizmust 40 évvel korábban megjósolták, a bejelentés nem lepte meg a közvéleményt. *Benjamin Franklin*nak tulajdo-

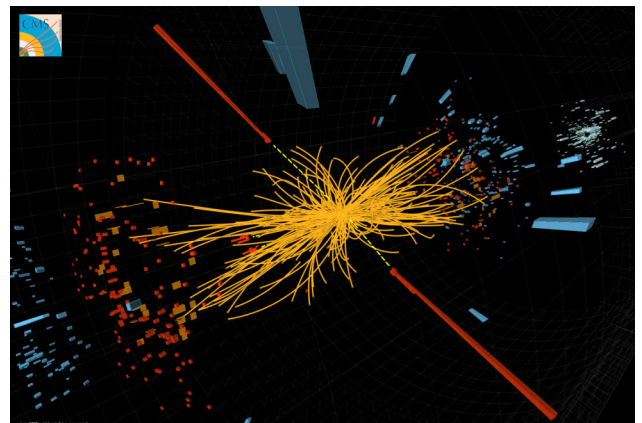


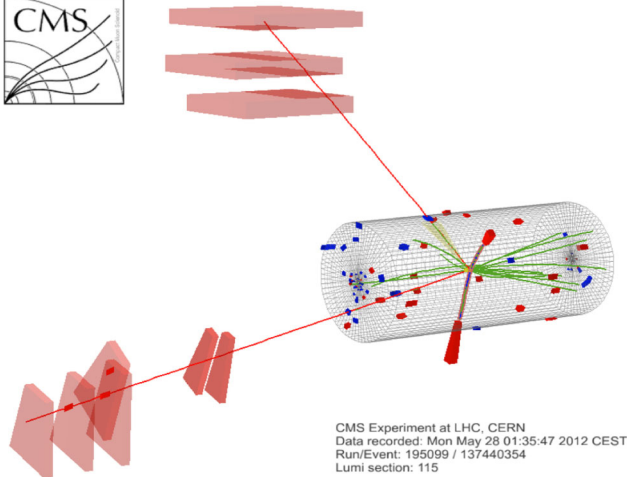
8. ábra. CMS-esemény két protoncsomag ütköztetésével, amely 78 egyidejű proton-proton reakcióhoz vezetett.

nítják azt a mondást, hogy három ember akkor tud titkot tartani, ha közülük kettő halott, a Higgs-bozon megfigyeléséről pedig már 4000 fizikus tudott, ha az ellenőrzés és bejelentés előtt nem is szabadott róla beszélnünk. Ennek megfelelően a *Nature Online* elektronikus folyóirat két nappal az előadások előtt már publikálta a pontos adatokat, és azt a hazai hírközlés is azonnal átvette.

Protonok nagyenergiás ütközésekor rengeteg részecske, főként a legkönnyebb mezon, pion keletkezik, amint az a 8. és 9. ábrán jól látszik. A Higgs-bozont legjobban két jellegzetes bomlási folyamata segítségével tudtuk azonosítani: amikor két fotonra (9. ábra) és 4 töltött leptonra, elektronra vagy müonra (10. ábra) bomlik. 2012. július 4-én ezekben az eseményekben sikerült a két nagy LHC-kísérletnek hitelt érdemlően megmutatnia a Higgs-bozon megfigyelését. Valamennyi 2012-es adat értékelése után ezt messzemenően pontosították: a Higgs-bozon tömege $125 \text{ GeV}/c^2$ -nek bizonyult, és valamennyi keletkezési és bomlási tulajdonsága igazolta a standard modell előrejelzéseit.

9. ábra. Higgs-bozonnak tulajdonítható CMS-esemény. A sok más részecske között keletkező Higgs-bozon két nagy energiájú fotonra bomlik.





10. ábra. Higgs-bozon bomlása egy elektron- és egy müonpárra.

További felfedezések?

Jogos a kérdés, minek tovább működtetni az LHC-t, ha egyszer fő célját, a Higgs-bozon felfedezését már elérte. Egyáltalán, mire jó a részecskefizika, ha egyszer a standard modell olyan csodálatosan leír mindent? Nem csinálhatna az a rengeteg részecskefizikus valami értelmesebb dolgot? A standard modell, nyilvánvaló sikerei ellenére, több sebből vérzik. Nem ad számot a Világegyetem 26 százalékát megtöltő *sötét anyagról* és 68%-át adó *sötét energiáról*. Nem magyarázza meg, hova lett az Ősrobbanás után az antianyag, amelynek az anyaggal azonos mennyiségben kellett keletkeznie. Van benne néhány matematikai bomba is: óriási mennyiségek jelennek meg az egyenletekben, amelyeket csak trükközéssel lehet eltüntetni. A BEH-mechanizmusba – sikere ellenére – nem fér bele a neutrínók nemrégiben felfedezett tömege és egymásba alakulása, az *ízrezgés* (ezért adtak fizikai Nobel-díjat tavaly). Nem tudjuk elhelyezni a gravitációt a szimmetria-generálta három kölcsönhatás rendszerében, hiszen *Einstein* általános relativitáselmélete a tömegvonzást nem bozon közvetítésével, hanem a tér-idő négydimenziós geometriájának változásával írja le. Komoly elméleti munka fekszik a standard modell különböző kiterjesztéseiben, amelyek próbálnak számot adni a fenti hiányosságokra, és azokat a kísérleti adatoknak kell igazolniuk vagy elvetniük (eddig inkább az utóbbi eset állt fenn). A részecskefizikusok kedvenc ilyen kiterjesztése a *szuperszimmetrikus standard modell*, annak ellenőrzésén is dolgoznak magyar fizikusok.

Egy ideig még reménykedtünk benne, hogy találnunk eltéréseket a megfigyelt Higgs-bozon tulajdonságai és a standard modell jóslata között, de a remény hiúnak bizonyult: ahogyan az adatok gyűjtésével a mérések pontosodtak, úgy lett egyre jobb az egyezés. A standard modell elméleti kiterjesztései többféle Higgs-bozont jósolnak, de eddig másmilyen nem találtunk, sem kisebb, sem nagyobb tömegértéknél. Az LHC megfigyelései között egyetlen biztató eltérést

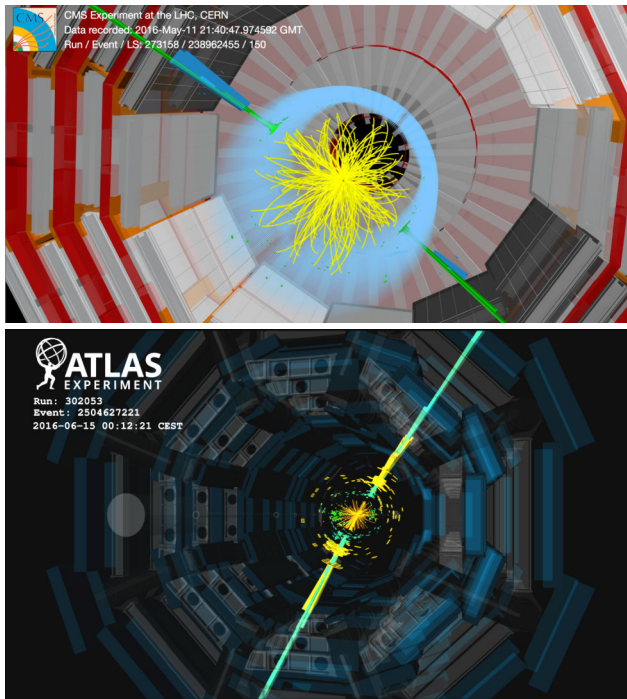
találtunk a standard modelltől: egy olyan új részecske halvány nyomát a Higgs-bozon tömegének hatszorosára, 750 GeV/c² környékén, amely hasonló tulajdonságokkal rendelkezik, mint a Higgs-bozon, de egészen másképpen bomlik. Az LHC 2016-os adatgyűjtésének egyik fő célja e részecske létezésének ellenőrzése volt, és ha tényleg létezik (a 2015-ös észlelések nem voltak teljesen meggyőzőek), további tanulmányozása. A megfigyelés bejelentése óriási izgalmat váltott ki a nagyenergiás közösségben, mert kilépést jelentene a standard modell keretei közül.

X-részecske?

Az új jelenség egy olyan Higgs-bozonhoz hasonló X-részecskére utalt, amely annál sokkal nehezebb. Mindkét nagy kísérlet, az ATLAS és a CMS is megfigyelte a nyomát, de egyik sem teljesen meggyőzően. Ugyanakkor felkeltette a reményt arra, hogy valami újat fedezünk fel, hiszen a megfigyelés erőssége, amelyet azzal fejezünk ki, a σ (szigma) mérési bizonytalanság hányszorosával emelkedik ki az új jelenség a zajból, közel ugyanakkora volt, mint a Higgs-bozon megfigyeléséé 2011 végén (3σ körüli). A Higgs-bozon esetén ezt diadalmas bejelentés követte 2012 nyarán, amikor az újabb adatokkal mindkét kísérletnél elérte a megállapodás szerinti felfedezési küszöböt, az 5σ többitet. Izgatottan vártuk tehát a 2016-os LHC-adatokat, megerősíti-e az X-részecske létezését.

Jogos a kérdés, miért az izgalom, új részecske, na bumm! Csakhogy az X-részecske rettenetesen *kilóg* a standard modell keretei közül. Egy 750 GeV tömegű Higgs-bozonhoz hasonló X-részecske nagyon sokféleképpen elbomolhat. Ez már a sokkal könnyebb Higgs-bozonra is igaz volt, és nagyobb tömegű részecske bomlásánál sokkal több lehetőség nyílik más bomlási módusok megnyilvánulására. A Higgs-bozon megfigyelésére is először három, majd később még több bomlási módozatot vizsgáltunk. Az X-részecske azonban látszólag csak a legvalószínűlenebb, két nagyenergiás gamma-fotonra akart bomlani, a sokkal nagyobb valószínűségű bomlási csatornák nagyobb tömegű részecskékkéül üresen maradtak. Ez tette a 2015-ös halvány megfigyelést annyira izgalmassá, hogy közzététele után néhány hónapon belül többszáz elméleti fizikai publikáció fejtegette, vajon mi lehet.

A vizsgálat módszere a következő. Feltételezünk egy részecsketömeget és bomlási élettartamot, szimuláljuk a különböző lehetséges bomlásokat, a keletkező részecskéket átengedve a detektorszimuláción, és az eredményt összehasonlítjuk az észleléssel. Két gamma-fotonra csak $S = 0$ vagy $S = 2$ -es sajátperdületű (spinű), elektromosan semleges részecske tud bomlani. A 2015-ben gyűjtött teljes adathalmaz elemzése után 2016. június 16-án az ATLAS-kísérlet azt közölte egy 2861 szerzős (!) cikkben, hogy a kétfotonos csatornában 750 GeV körüli tömeggel $3,8\sigma$ többitet lát-

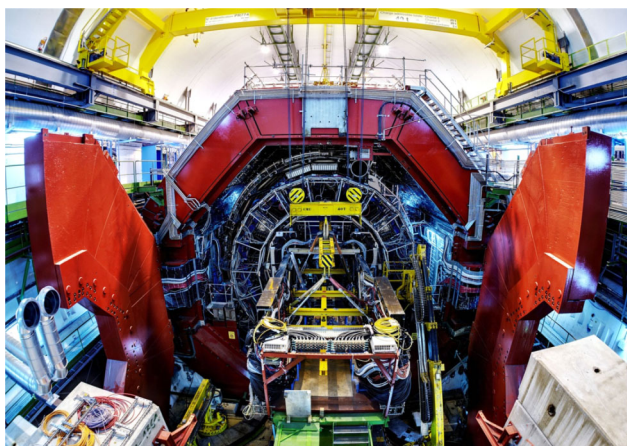


11. ábra. Óriási (6 TeV/c² feletti) tömegű új részecskék jelei a CMS-föül) és ATLAS-detektorban (alul), 2016-ban. A részecskék hatalmas tömege és a belőlük felszabaduló energia mennyisége a bomlásnál létrejövő hadronzárókat nagy mértékben fókuszálja.

nak $S = 0$ és $3,9\sigma$ többletet $S = 2$ feltételezésével. A CMS-kísérlet is látott többletet a 2016-os adatokban (egyesítve az összes korábban mérttel) egészen közel, 760 GeV-nél, de valamivel kisebb jelentőséggel, csak $3,4\sigma$ -val. A megdöbbentő az volt, hogy mint már említettük, a többi lehetséges és sokkal valószínűbb bomlási csatorna semmit nem mutatott.

Nagy izgalommal vártuk tehát az LHC 2016-os indulását, amely a 2015-ösnél sokkal nagyobb adathalmazt ígért, és július végére már a tavalyi adatmennyiség ötszörösével szolgált. Ilyenkor az egymással versengő csoportok adatelemzését a korábbi adatokon és szimulációkon szabad csak finomítani, az új adatokhoz egy bizonyos időpontig nem szabad nyúlni, és csak a már előre elfogadott módszerek eredményeit

12. ábra. Szerelik az ALICE-kísérlet érzékelőrendszerének belsejét.



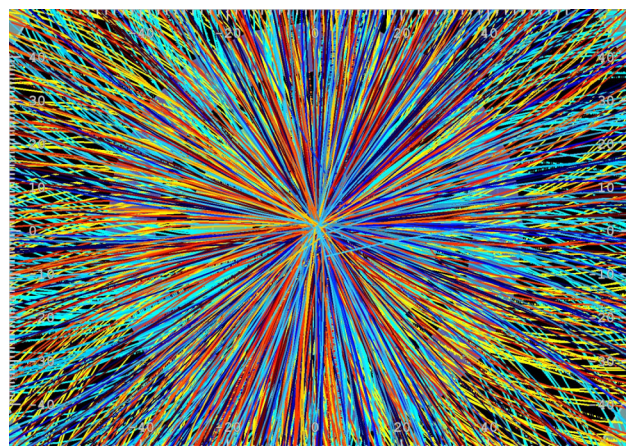
vesszük figyelembe (ezt *vak elemzésnek* hívjuk). Mindkét kísérlet 2016 legnagyobb részecskefizikai konferenciájára, a Chicagóban lezajlott, sokezer résztvevős ICHEP-re időzítette legújabb eredményeit. Azok egyrészt némileg lehangolóak, másrészt igencsak biztatók voltak. Az új CMS-adatok csökkentették az X-részecske megfigyelésének jelentőségét: a 2015-ös adathalmaz sokszorosának analízisével a 750 GeV-es többlet lecsúszott az észlelhetőségi szint alá, 2σ környékére. Ez egyrészt lehangoló, hiszen szinte az évszázad részecskefizikai felfedezése lett volna, ha a standard modellnek ennyire ellentmondó jelenséget találunk. Ugyanakkor megnyugtató, hogy mégis jól ismerjük világunkat, és a standard modell továbbra is időt állónak bizonyult. Az ATLAS-kísérlet teljesen azonos eredményre jutott: statisztikus ingadozás volt a 750 GeV-es többlet, semmi más. Ilyen jelenséget már többször láttunk, és ez egyáltalán nem jelent mérési hibát. Újabb adalék ahhoz, hogy óvatosan kell kezelnünk a megrázó új felfedezéseket.

Az ICHEP konferencia ugyanakkor hihetetlen mennyiségű új adatot közöl: a négy nagy LHC-kísérlet többszáz új eredményt küldött be előadásra. Kedvcsinálónak felvillantunk egy-egy óriási tömegű új részecske eseményét (11. ábra) a 2016-os protonütközésekből a CMS-től és az ATLAS-tól: mindkét esetben 6 TeV feletti a részecskék tömege, amelyek hatalmas energiájú hadronzárókat (kvarkpárra) bomlanak.

Nehézion-fizika és az ALICE-kísérlet

Az LHC nemcsak protonokat ütköztet: minden év végén ólom ionokkal töltik fel, és az észlelőrendszerek nehézion-ütközéseket tanulmányoznak. Erre épült az ALICE (A Large Ion Collider Experiment) kísérlet (12. ábra), de a CMS-nek és az ATLAS-nak is komoly nehézion-programja van. A nehézion-fizika hazánkban igen fontos, egészen jelentős elméleti és kísérleti háttere van Magyarországon, és nemcsak az LHC kísérleteiben vesznek részt hazai nehézion-fizikusok, a Szuper-proton-szinkrotron NA61 jelű kísérle-

13. ábra. Ólomionok ütközése az ALICE detektorban 2,76 TeV/nukleon energián.



sérlet mintegy 400 eseményt tudott másodpercenként rögzíteni, ez azóta 1000-re nőtt. Az adatok kezelésére a CERN létrehozta a Nemzetközi LHC gridhálózatot, amelynek központi egysége (T0 központja) ugyan a CERN-ben van, de annak egy része a Wigner FK-ba költözött. A CMS elsődleges adattároló (T1) helyei a Chicago melletti Fermilabban, Barcelonában, Oxfordban, Lyonban, Karlsruheban, Bolognában és Tajpejben vannak, a T2 adatelemző központok pedig gyakorlatilag minden résztvevő országban. A Wigner FK T2 központjában pillanatnyilag 600 processzor és 250 TB-nyi tároló működik, hatékonysága évek óta az első helyeken található a CMS 55 T2 központja között.

Az LHC tehát áprilisban újra elindult, 2016-os működési terve, amelyet eddig bámulatossággal sikerült tartania, a 15. ábrán látható. Májustól novemberig proton+proton ütközéseket tanulmányoz, utána karácsonyig proton+ólom ütközéseket fog. Általában havonta egyszer egy-egy hétre leáll az adatgyűjtés, és a rendszert fejlesztik. Ezek a fejlesztési időszakok rendkívül fontosak, nemcsak a gyorsítós mérnököknek, hanem a kísérletező fizikusoknak is, olyankor ugyanis gyakran kiderülnek működési rendellenességek és azokat a fejlesztéssel párhuzamosan kijavítják, és utánuk a komplexum megbízhatóbban és hatékonyabban működik.

AZ ATOMERŐMŰVEK MŰKÖDÉSÉRŐL EGYSZERŰEN, TÍPUSAIK ÉS JÖVŐJÜK – 2. RÉSZ

Király Márton – MTA Energiatudományi Kutatóközpont
Radnóti Katalin – ELTE TTK Fizikai Intézet

Írásunk első részében vázlatosan ismertettük az atomerőművek működésének fizikai alapjait. Ebben a részben a termikus reaktorok különböző típusairól adunk áttekintést.

Az atomerőművek „generációi”

Az atomerőművekben is – több erőműhöz hasonlóan – úgy állítják elő az elektromos energiát, hogy a felf szabaduló termikus energiát gőzfejlesztésre fordítják, a gőz megforgatja a turbinákat, majd ezt a mechanikai energiát egy generátor segítségével, az elektromágneses indukciót alkalmazva elektromos energiává alakítják.

Az elektromosenergia-termelés alapelve sok erőmű esetében azonos, az erőművek közötti különbség csupán annyi, hogy a folyamathoz szükséges hőt hogyan állítjuk elő.¹

Egy atomerőmű esetén az atomreaktorban lejátszódó maghasadás az elsődleges energiaátalakulás, a termikus energia a magenergiából származik. Az atomenergia helyett célszerűbb a nukleáris energia kifejezés használata, hiszen a folyamatban nem az atom elektronszerkezetének átrendezéséről van szó, mint a kémiai reakciók esetében, hanem az atommagban történnek a változások. Ez milliószer nagyobb energiaváltozást jelent egy szokványos kémiai reakcióban felszabaduló energiához képest.

Különböző szempontok, elsősorban korok, biztonságos és gazdaságos üzemeltetési lehetőségeik alapján az atomerőműveket a kétezres évektől kezdődően úgynevezett generációkba sorolják. Ezek között nincsenek egyértelmű határvonalak, csak átmeneteket jelentenek az atomerőművek építésének egyes korszakai között [12].

Első generációs atomerőművek közé tartoznak az első erőművek, amelyeket az ötvenes és hatvanas években, illetve a hetvenes évek elején helyeztek üzembe. Ezek a jelenleginél kevésbé szigorú biztonsági előírások figyelembevételével épültek, részben kutatási céllal, és ma már jórészt nem üzemelnek.

A második generációs atomerőművek alkotják a ma üzemelő atomerőművek döntő többségét. Ezek a hetvenes és a kétezres évek között épültek, és már



Király Márton a BME-n végzett vegyészmérnök-ként. Munkahelye az MTA Energiatudományi Kutatóközpont, Fűtőelem és Reaktoranyagok Laboratórium. Kutatási területe a fűtőelem-pálca-burkolatok mechanikai vizsgálata, amelyből a BME Nukleáris Technikai Intézetében készíti PhD dolgozatát. Publikációi az előbbi területen kívül kiterjednek a nukleáris energia történetére és a témával kapcsolatos ismeretterjesztésre.



Radnóti Katalin az ELTE-n végzett kémiafizika szakos tanárként. A budapesti Kölcsey Ferenc Gimnáziumban nyolc éven keresztül tanított. Jelenleg az ELTE Fizikai Intézetében főiskolai tanár. Kutatási területe a fizika és a természettudományok tanításának módszertana. Publikációs tevékenysége is e témához kapcsolódik, tanári segédletek, tanulmányok, könyvek, könyvfejezetek. A Nukleon, a Magyar Nukleáris Társaság internetes folyóirata főszerkesztője.

¹ A fotovoltaikus erőmű, a vízerőmű és a szélerőmű esetében „kimarad” a hővé alakulás, a villamos energiát közvetlenül állítjuk elő (mechanikai energiából (víz- és szélerőmű), illetve fényenergiából (fotovoltaikus).