

igényét alátámasztja, hogy érzékelhető a jelei annak, hogy ahogyan a 20. század műszaki fejlődésének gyökerei Európában voltak, úgy a 21. század fejlődését Ázsiában fogják írni.

Következtetések

Az energiaprobléma megoldása és ezen belül az atomerőművek hosszú távú szerepének megszilárdítása jelentős erőfeszítéseket igényel az emberiségtől. Az erőfeszítéseket több síkon kell kifejteni. Egyrészt az energiaprobléma nem kezelhető más globális problémáktól elszigetelve, másrészt nem szűkíthető le egyszerű műszaki vagy gazdasági kérdésekre. Egyre többször találjuk magunkat szembe a kérdés etikai vonatkozásaival, amelyek kezelése nélkül a megnyugtató megoldás nehezen képzelhető el. Úgyszintén megkerülhetetlenek azok a filozófiai vonatkozások, amelyek a keleti és nyugati kultúra egymástól eltérő gyökerein alapulnak. Az atomenergiától való indokoltan félelem eloszlására előrelépés szükséges az oktatásban és a tárgyilagossá információs szolgáltatásban. A probléma sikeres megoldásához, egyúttal az atomenergia jövőjéhez az egész világra kiterjedő (globális)

együttgondolkodásra van szükség. A globális együttgondolkodás feltétele egy „fejlett” civilizáció, és a fejlett jelzőt itt nem gazdasági vagy ipari, hanem annál lényegesen szélesebb értelemben kell érteni.

Irodalom

1. M. Rees: *Our Final Century*. William Heinemann, London, 2003.
2. A. A. Bartlett: Thoughts on Long-Term Energy Supplies: Scientists and the Silent Lie. *Physics Today*, July 2004, 53–55.
3. <http://hdr.undp.org/en/statistics/>
4. S. G. Benka: The Energy Challenge. *Physics Today*, April 2002, 38–39.
5. *The Economics of Climate Change: The Stern Review*. Cambridge University Press, 2007.
6. A. Maslow: A theory of human motivation. *Psychological Review* (1943) 370–396.
7. C. W. Frei: The Kyoto protocol – a victim of supply security? or: if Maslow were in energy politics. *Energy Policy* 32 (2004) 1253–1256.
8. Vajda Gy.: *Kockázat és biztonság*. Akadémiai Kiadó, Budapest, 1998.
9. Fazekas A. I.: *Villamosenergia-termelési technológiák jellemzői*. Magyar Atomforum Egyesület, Budapest, 2005.
10. Q. Schiermeier, et al: Electricity without Carbon. *Nature*, 14 August 2008, 816–823.
11. W. J. Nuttall: *Nuclear Renaissance: Technologies and Policies for the Future of Nuclear Power*. Institute of Physics Publishing, London, 2005.
12. B. Raj: *Ethics, Equity and Energy*. Presentation to Academia NDT International, Shanghai, China, 26 October 2008.

IGAZÁBÓL MI VAN AZ LHC-VEL?

Horváth Dezső
MTA KFKI RMKI, Budapest
és ATOMKI, Debrecen

Felfedezés és pontosság

A protonütköztetőknek óriási a felfedezési potenciálja. A CERN Nagy hadron-ütköztetője (Large Hadron Collider, LHC) hamarosan protonokat fog ütköztetni 7 TeV¹ energián. A protonban úszó alkatrészek, a kvarkok és a kölcsönhatásukat közvetítő gluonok sokféle energiával ütközhetnek, ezért rengeteg információt adnak az elérhető energiatartományban lehetséges folyamatokról. A gyenge kölcsönhatást közvetítő W[±] és Z⁰ bozont a CERN proton-antiproton ütköztetőjénél fedezték fel 1983-ban, és komoly reményeket fűzünk a Higgs-bozon és egyéb új fizika felfedezéséhez az LHC-nél.²

Habár erről több cikkben is írtam már [1], a továbbiak jobb megértéséhez célszerű felidézni a CERN mostani gyorsítórendszerét (1. ábra).

A Standard modell diadalmenetét a két elektron-pozitron ütköztetőnek köszönhetjük, a CERN LEP és a stanfordi SLC gyorsítóknak. Valamennyi komoly ré-

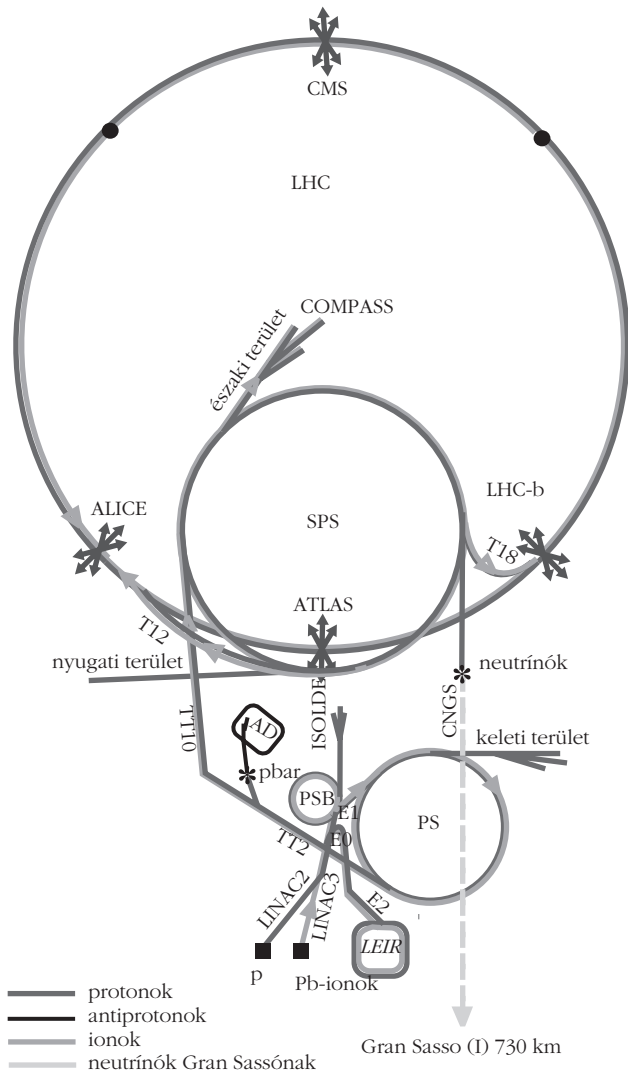
szecskefizikai kísérlet több ezer adata igen jól, statisztikus szóráson belül illeszthető a Standard modell 19 paraméterével (a neutrínók tömegét ilyenkor el szoktuk hanyagolni, annyira kicsik). A modell valamennyi elemi részecskéjét, a leptonokat, kvarkokat és a kölcsönhatásokat közvetítő bozonokat sikerült kísérletileg megfigyelni és azonosítani. A Higgs-bozon az egyetlen még nem megfigyelt alkotóelem, de az is egészen jól behatárolt: a Standard modell legújabb illesztése [2] szerint tömege nagy valószínűséggel 114 és 160 GeV között van.

De miért van szükségünk még nagyobb gyorsítókra (és egyáltalán részecskefizikusokra :-), ha egyszer a Standard modell olyan csodálatosan leírja a Természetet?

Amint azt a Standard modellről szóló cikkemben [3] jómagam és sokan mások leírták, az elméletnek van egy sereg elvi problémája. Hogy csak néhányat említsünk: nincs meg a Higgs-bozon és sokmindent nem értünk: nem tudni, miért van éppen három fermion-család, mi alkotja a Világegyetem sötét anyagát, hova lett az ősrobbanás után az antianyag és mitől van a gyenge kölcsönhatás bal-jobb aszimmetriája [4]. Rendkívül zavaró az úgynevezett hierarchia-probléma: a Higgs-bozon tömegének 100 GeV nagyságrendű értékét természetellenesen nagy, 10 nagyságrenddel nagyobb értékek különbségeként kapjuk meg.

¹ 1 eV (elektron-volt) energiát nyer egy elektron 1 V feszültség hatására. Az atomfizikai folyamatok (röntgensugárzás) energiája kilo-eV (1 keV = 10³ eV) körüli, a részecskefizikusok giga-eV-ban (1 GeV = 10⁹ eV) gondolkodnak, a legújabb nagy részecskegyorsítók (az amerikai Tevatron és a CERN LHC-je) tera-eV (1 TeV = 10¹² eV) energiát érnek el.

² Csoportunk tevékenységét a CMS-kísérletben az NK67947. számú NKTH–OTKA pályázat támogatja.



1. *ábra.* A CERN gyorsítókomplexuma 2008 után. A proton-szinkrotron (PS) protont és nehéz ionokat gyorsít a szuper-proton-szinkrotron (SPS) és a Nagy hadron-ütköztető (LHC), valamint protont az Antiproton-lassító számára. Az SPS saját kísérletein és az LHC táplálásán kívül neutrínónyalábot (CNGS) indít a földkérgen keresztül az Olaszország közepén, a CERN-től 730 km-re található Gran Sasso föld alatti neutrínólaboratórium felé.

A fenti problémákra rendkívül ígéretes megoldást kínál a szuperszimmetria elmélete [5], és sok más alternatív elméletet is felállítottak, de az általuk megjósolt új részecskéket, jelenségeket nem látjuk. Igen csak reménykedünk benne, hogy az LHC-nál sikerül a Higgs-bozont vagy -bozonokat, szuperszimmetrikus részecskéket vagy egyáltalán, valamilyen új jelenséget felfedeznünk.

Az LHC tervezése 1984-ben kezdődött, 5 évvel a LEP indulása előtt. Világos volt ugyanis, hogy a szinkrotronsugárzás miatt, amely áldás az anyagtudományban és – kevés kivétellel – átok a részecskefizikában, a LEP, a Nagy elektron-positron ütköztető lesz a legnagyobb elképzelhető, kör alakú elektrongyorsító. A szinkrotronsugárzási energiavesztés körönként

$$\Delta E = -\frac{4\pi}{3} \frac{Q^2 \beta^2 \gamma^4}{\rho}, \quad (1)$$



2. *ábra.* Az LHC és kísérletei. A két kisebb kísérlet, az ALICE és az LHCb elfért az L3 és DELPHI LEP-kísérletek barlangjában, de a két nagy, a CMS-nek és az ATLAS-nak új gödröt kellett ásni.

ahol a részecske töltése Q , a vákuumbeli fénysebességhez viszonyított sebessége $\beta = v/c$, relativisztikus tényezője $\gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$ és pályasugara ρ . Ez azt jelenti, hogy, például, ugyanazon körülmények között az elektron 13 nagyságrenddel több energiát veszít szinkrotronsugárzás következtében, mint a proton.

Az LHC-t igen csak ambíciózusan tervezték és építették meg. Genf mellett, a svájci-francia határon, a Jura-hegység lábánál 40–100 m mélyen fűrt 27 km hosszú alagutat (2. *ábra*) lényegében megtöltötték szupravezető mágnesekkel. A 7 TeV-es protonokat körpályán tartó 1232 szupravezető mágnes (3. *ábra*) egyenként 15 m hosszú, 35 tonna súlyú és 1,9 K hőmérsékleten 8,3 T teret tud tartani. A gyorsítógyűrűben 40 MHz az ütközési gyakoriság, tehát a detektorokban 25 ns-onként találkoznak a nyalábok és mindegyik találkozáskor 10–20 proton-proton ütközés várható, amikor az LHC eléri teljes intenzitását. Az összesen 9300 mágnes ellenőrzése, levitele és beillesztése (4. *ábra*) 6 évig tartott és 2008 elején fejeződött be. Utána le kellett hűteni a sokezer tonnányi mágnes 1,9 K hőmérsékletre, hidegebbre, mint a világűr (annak a kozmikus háttérsugárzás 2,7 K-es hőmérsékletét tulajdonítjuk).

3. *ábra.* Az LHC eltérítő-mágnesének keresztmetszete a CERN Mikrokosmosz kiállításán. Az egymással szemben keringő és az észlelőrendszerek középpontjában ütköztetett, 7 TeV energiájú protonnyalábot két szupravezető dipólus-mágnes tartja körpályán 8,3 T téréll.





4. ábra. Mágnes beillesztése a gyorsítóba. Technikusok az előtérben végződő dipólusmágnes vákuum- és hűtőrendszerét, csatlakozóit hegesztik.

2008. szeptember 10. volt a nagy nap, amikor óriási felhajtás közepette először vitték körbe a protonokat – egyelőre gyorsítás nélkül, az SPS 450 GeV-es energiáján – az LHC gyűrűjében. Elvben az egész világ egyenes adásban láthatta az LHC indulását a Világhálón keresztül, de a hálózat annyira túl volt terhelve, hogy mi itthon csak *Simon Tamás* origós szerkesztő mobiltelefonon leadott helyszíni tudósításából értesültünk a fejleményekről. Budapesten az RMKI, Debrecenben az Egyetem Kísérleti Fizikai Intézete aznap este előadótulást szervezett, ahol komoly érdeklődés mellett mondtuk el, mi történt és mi nem. Az utóbbi óvatlan kollégáink elejtett megjegyzései alapján keltett rémhír volt arról, hogy az LHC nagyenergiájú ütközéseinél olyan fekete lyukak keletkezhetnek, amelyek aztán elnyelik a Naprendszert, de legalábbis a Földet. Ismét elmondtuk, hogy tekintettel arra, hogy a Holdat évmilliárdok óta bombázzák az LHC-nál sok nagyságrenddel nagyobb energiájú kozmikus sugarak és még megvagyunk, ez nem valószínű (de majd meglátjuk :-).

A nagy napon készült az LHC vezérlőtermében az 5. ábra fényképe. A figyelmes olvasó észreveheti, hogy a jelenlevő többszáz ember közül ketten vagy hárman dolgoznak, a többi tanácsokat ad, nézi vagy szurkol. Mindenesetre az a nap óriási siker volt, délutánig mindkét irányban körbementek a protonok, sőt még a gyorsítás rádiófrekvenciáját is sikerült jól beállítani, úgyhogy a részecskecsomagok sokezerszer körbementek.

A következő lépés a mágnesek áramának fokozatos felvitele volt az első évre tervezett 5+5 TeV energiához szükséges 9000 A-re. Ezt szektoronként csinálták, az LHC gyűrűje ugyanis 8 szektorra van bontva, a 8 lejártnak megfelelően (közülük négyben van ré-

szecskeütközés és érzékelőrendszer). A nyolc szektorból hétnek sikerült az áramát felhozni, de szeptember 19-én elengedett egy illesztés két szupravezető mágnes között. Az illeszték ellenállása az eredeti néhány nanoohmról makroszkopikusra nőtt, a keletkező feszültség ívet húzott és kilyukasztotta a hűtővezetékét. A hűtésre szolgáló szuperfolyékony héliumból több tonna robbanásszerűen kifújt, rakétahatással kilökve helyéről az érintett soktonnás, lebetonozott mágneset úgy, hogy az az alagút faláról pattant vissza.

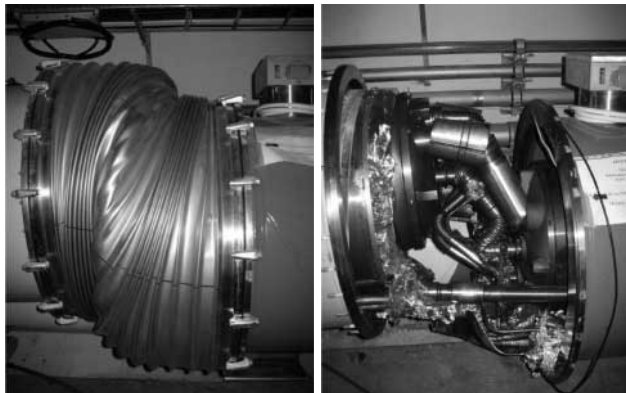
Ez a katasztrófa több mint egy évvel késleltette az LHC igazi indulását. Eleve hetekig tartott, amíg sikerült az érintett szektort annyira felmelegíteni, hogy meg lehessen nyitni (6. ábra). Utána ki kellett szabadítani és a felszínre hozni 39 terelőmágneset és 14 több kisebb mágneset tartalmazó egységet. Szerencsére a tartalékokból sikerült pótolni őket. A felhozott mágnesek nagy részt ki lehet majd javítani, hogy tartalékul szolgáljanak. Ellenőrizték az ohmos kapcsolatot minden mágnes körül és kijavították a gyanúsán viselkedőket. Gondoskodni kellett arról, hogy hasonló bal eset többé ne forduljon elő, ezért az átütések megakadályozására beépítettek sokezer védőellenállást a mágnesek közé. Sokszáz kilométernyi kábelt kellett lefektetni az addigiakon kívül.

Ez a munka mostanra (2009 októbere) gyakorlatilag befejeződött, az LHC-t novemberben újra elindítják. A tervek szerint kezdetben gyorsítás nélkül, a 450 GeV belövési energián fogják a protonokat ütköztetni. Utána, karácsony előtt, vagy új év után, elkezdik a gyorsítást, kezdetben csak 3,5 TeV nyalábenergiára, 7 TeV-es ütközésekre kell tehát készülnünk. A 14 TeV-es végső energia és a tervezett teljes ütközési hozam (*luminozitás*) eléréséhez valószínűleg több év kell. Jövő év végén a nehézionos programot is elindítják, egyelőre kis luminozitás mellett.

Mivel minden jel arra vall, hogy a Higgs-bozon tömege 114 és 160 GeV között van, kimutatása az LHC-nál sokáig eltarthat. Nehezebb Higgs-bozont sokkal könnyebb lenne felfedezni és azt a Tevatron már talán meg is találta volna. Az LHC egyelőre kis energiája és luminozitása miatt a nagyobb felfedezések 2010

5. ábra. Az LHC vezérlőterme az LHC indulásakor, 2008. szeptember 10-én.





6. ábra. LHC-mágnesek tönkrement csatlakozása a 2008. szeptember 19-i baleset után, a mágnesek megnyitása előtt és után.

után várható. Távlatilag az LHC luminozitása sokkal nagyobb energia mellett nagyságrendekkel nagyobb lesz a Tevatronénál. Azt tervezik, hogy az utóbbit leállítják, mielőtt az LHC hozza paramétereit.

Irodalom

1. Horváth D.: Szimmetriák és részecskék. in: *Szemelvények a nukleáris tudomány történetéből.* (Szerk. Vértes Attila), Akadémiai kiadó, Budapest, 2009, 285–328.
2. <http://cern.ch/lepwww> – a LEP Elektroyenge munkacsoportjának honlapja
3. Horváth D.: A részecskefizika anyagelmélete: a Standard modell. *Fizikai Szemle* 58/8 (2008) 246–254.
4. Trócsányi Zoltán: Az eltűnt szimmetria nyomában. *Fizikai Szemle* 58/12 (2008) 417–424.
5. Horváth D.: Szuperszimmetrikus részecskék keresése a CERN-ben. *Magyar Tudomány* (2006/5) 550–554.

A FIZIKA TANÍTÁSA

BLAISE PASCAL, A FRANCIA KÍSÉRLETI FIZIKA MEGTEREMTŐJE

Kovács László

Nyugat-Magyarországi Egyetem, Szombathely

A francia szellem jeles képviselője

Blaise Pascalt (1623–1662, 1. ábra) a szépirodalom és a teológiai irodalom művelői és olvasói sokkal, de sokkal jobban ismerik, mint a fizikusok. „A finom ízlésű elmék... a francia nyelv századának legtökéletesebb írójaként csodálják... Minden tolla alól kikerült sort drágakőként tartanak számon.” (*Joseph Bertrand*) „Amikor őt olvasom, úgy érzem, mintha saját magamat olvasnám.” (*Stendhal*)

„A végtelen tér örök hallgatása megrémít.” – ez Pascal egyik legtöbbször idézett mondata. Ez a mondat túlmutat az irodalmon, ez már a filozófia és a teológia körébe tartozik. Ugyanis első olvasatában csak arra gondolhatunk, hogy a végtelennek és üresnek gondolt tér megijeszti a gondolkodó embert, azonban a *hallgatás* több, mint a *csend*, ahogyan néhány más fordításban olvashatjuk. *Isten* hallgat a végtelen tér mélyén, s azon kell elmélkednünk, hogy Ő miért nem szól hozzánk. (Egyébként nagyon nehéz a lendületes, alig tagolt kézírásat olvasni. Egy-két betűtévésztes teljesen megváltoztathatja a mondat értelmét. Gyakran emlegetett példa: „az ateizmus a szellemi erő *jele* [marque], ez a helyes olvasat, nem pedig a sok helyen szereplő ... *biánya* [mangue].)

Híres mondatának filozófiai értelmezését Ő maga adja meg egy más helyen: „Mert mi végre is az ember? Semmi a végtelenséghez, minden a semmihez viszonyítva, közép a semmi és a minden között.”

A hivatásos teológusokat megszegényítő tudású szakemberré képezte ki magát. A mai napig az egyhá-

zi emberek sokkal többet írnak róla, mint a matematikusok és fizikusok, teológiai tárgyú gondolatait sokkal többször jelentetik meg, mint természettudományos írásait. Szent Ágoston tanait vallotta, a janzeniz-

1. ábra. Pascal dolgozik (*Pierre Lauginie* gyűjtéséből)

