

Kitekintés

Az antianyag a tudományos-fantasztikus művekben is felbukkan, méltán. Valóban érdekes a természetnek ez a kettőssége. *Dan Brown: Angyalok és Démonok*¹¹ című könyvében egy titkos társaság antianyagbombával akarja megsemmisíteni a Vatikánt. Az antianyagot a CERN-ből lopják el. Mint fentebb bemutatjuk, antianyag valóban létezik, és minden szerzőnek joga, hogy igaz tényeket is felhasználjon egy izgalmas és fordulatos műben. Sajnálatos azonban, ha ez a könyvben szereplő néhány valóságos tény az olvasók számára a többi, fiktív dolog igazolásaként szolgál, ha az olvasók természettudományos ismereteiket egy (tévedésektől hemzsező) regényből szerzik. Az igazság és a fikció közötti határvonal meghúzása nagyon fontos, bár nyilvánvalóan nem könnyű feladat azok számára, akik nem járatosak az adott tudományterületen.

Mint korábban említettük, a töltött részecskék csapdázásának az egyik leghatékonyabb módszere a Penning-csapda. Az e téren eddig legeredményesebb ASACUSA-kísérletben 10^6 számú antiprotont tudtak csapdázni az AD gyűrű egy ciklusában. Az AD gyűrű ciklusai körülbelül 2 percig tartanak. Egy antiproton tömegének megfelelő energia 938 MeV. Ezek szerint 10^{11} évi folyamatos üzem kellene ahhoz, hogy a csapdában levő antiprotonok tömege 1 kilotonna TNT robbanási energiájának ($4,184 \cdot 10^{12}$ joule) feleljen meg. Összehasonlításként: a Egyesült Államok által eddig használt legkisebb atomfegyver 0,01–1 kilotonna körüli.

¹¹ Egy könyvnek, írónak (vagy politikusnak) a nyilvánosság előtti emlegetése szükségszerűen reklámként, figyelemfelkeltésként szolgál, akár pozitívan, akár negatívan nyilatkozunk róla. Ez a jelen cikk szerzőjének semmiképpen sem állt szándékában; ennek ellenére fontosnak látta ezt a rövid paragrafusnyi megjegyzést. A könyv és ezen cikk szerzőjének névegybeesése is pusztán a véletlen műve...

Mindez persze csak akkor lenne igaz, ha minden egyes ciklusban újabb és újabb egymillió antiprotont tudnánk elfogni a csapdában az addigiak mellé. Ez elvi okok miatt lehetetlen. Mivel az azonos töltésű részecskék tasztják egymást, egy bizonyos mennyiség után a köztük fellépő tasztító erő legyőzi az őket bezáró elektromágneses erőket. Érintkezésbe kerülnek a csapda falával és megsemmisülnek. Semleges részecskék (például antihidrogén) esetében ez a probléma nem lép fel – csak az, hogy hogyan csapdázzuk őket egyáltalán.

Van egy további nehézség, ami megkeseríti az antianyag csapdázására vágyó kutatókat (vagy terroristákat). Az antiprotonok nemcsak a csapda falával, hanem a csapdában levő gázatomokkal való találkozás során is megsemmisülnek. Huzamosabb tárolásukhoz extrém nagy vákuumra van szükség, ezért ezeket a csapdákat nagyteljesítményű szivattyúk szolgálják ki folyamatosan. Ezenkívül folyékony héliummal való hűtésük is szükséges, egyrészt a szupravezető mágnesek miatt, másrészt a nagy vákuum elérése céljából: a hűtött falakra kifagynak a gázmolekulák. Ez a mechanizmus is szükséges az ilyen nagy vákuumok előállításához. Egy ilyen berendezés ellopása tehát nem könnyű feladat, biztosítani kell a folyamatos (nem csekély) áram- és héliumellátást.

Még egy esetleges téveszme igényel egy megjegyzést: az antianyag mint energiaforrás. Amennyiben természetes formában rendelkezésünkre állna antianyag, az használható lenne energiatermelésre. Elérhető környezetünkben azonban nincs antianyag, ezt igen nagy energiák befektetésével nekünk kell előállítani – például nagyenergiás részecskeütköztetésekben. Az ennek során felhasznált energia sokszorosra annak, ami aztán antianyag formájában ölt testet. Éppen ezért az antianyag nemcsak energiaforrásként, de (drágán előállított) üzemanyagként sem tűnik használhatónak – márcsak a tárolási nehézségek miatt sem.

16 ÉVEM A CERNBEN

Horváth Dezső
MTA KFKI, RMKI

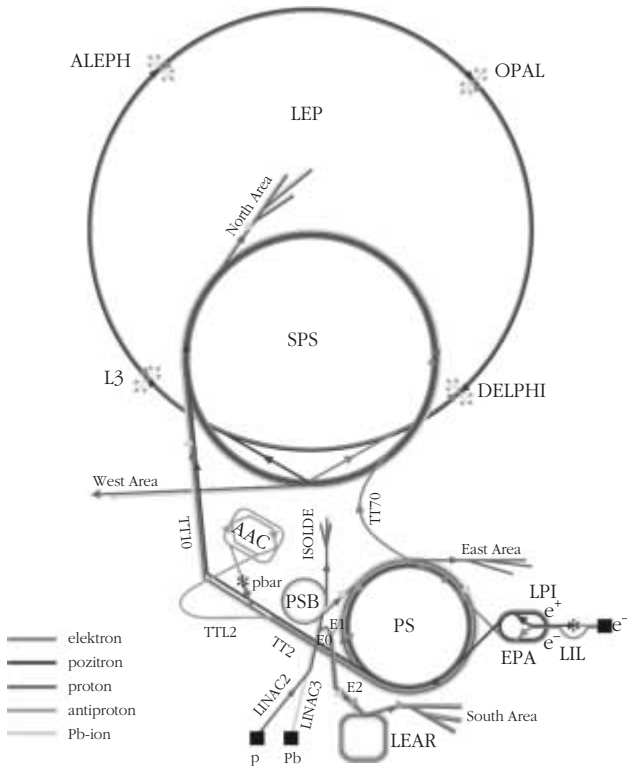
A CERN alapításának ötvenéves évfordulója alkalmából sok minden történt: hatalmas ünnepségsorozat a CERN-ben királyok és államelnökök részvételével, ünnepi ülések a részt vevő országokban, a Magyar Tudományos Akadémián is, valamint megemlékező cikkek sokasága, közöttük egy tőlem is a *Magyar Tudományban*. A jelenlegi írásom ürügye más: éppen 16 éve, hogy a CERN-be járok, és a Főszervező felkért, hogy írjam meg élményeimet.

A CERN gyorsítói

A CERN gyorsító-berendezéseinek egymásra épülő rendszere hihetetlenül bonyolult, és számomra mindig lenyűgöző volt, milyen jól működik. A mai rendszer alapját képező *Proton-Szinkrotron* (PS, az *1. ábrán*), amelyet a brookhaveni Alternating Gradient Synchrotron mintájára

építettek, 1959-ben kezdett működni. A *Szuper Proton-Szinkrotron* (SPS, 1976) volt az első „országhatáron átívelő” gyorsító (addig a CERN eszközei elfértek a svájci oldalon), azon fedezte fel 1983-ban *Carlo Rubbia* csoportja a gyenge kölcsönhatást közvetítő W- és Z-bozonokat. Az SPS számos nagyszerű együttműködést szolgált ki, többek között a jelentős magyar részvétellel kivitelezett NA49 nehézion-kísérletet is. Rá épül majd az a nyalábrendszer is, amely neutrínókat küld Közép-Olaszországba, a Gran Sasso-i neutrínóobszervatóriumba: a távolság megfelelő a neutrínók egymásba alakulásának tanulmányozására.

A *Nagy Elektron-Pozitron Ütköztető* (LEP – Large Electron Positron Collider) 1989-ben kezdett működni a CERN-ben, akkor még a stanfordi (USA) lineáris ütköztetővel azonos energián, a Z-bozon tömegének megfelelő 91 GeV-en. 1995-től kezdve a LEP gyűrűjében a részecskeenergiát fokozatosan a duplájára emelték, utolsó évé-



1. ábra. A CERN gyorsítókomplexuma 1996-ig. A Proton-Szinkrotron (PS) a lineáris gyorsítóktól kapott elektront és pozitront gyorsít a Nagy Elektron–Pozitron Ütköztető (LEP), protont és nehéz ionokat a Proton Booster (PB) közvetítésével a Szuper Proton-Szinkrotron (SPS), és protont az Antiproton Akkumulátor és Kollektor (AAC) számára. Amikor az Alacsonyenergiás Antiproton Gyűrű (LEAR) kifogy az antiprotonokból, az AAC elküld egy adagot a tárolt antiprotonokból a PS-nek, az lelassítja és átküldi a LEAR-be, ahol azokat több lassítási és hűtési periódus után a kísérletekhez juttatják. A PB minden második protoncsomagját az ISOLDE atomnyalábjai használják, főként magspektroszkópiai mérésekre.

ben, 2000-ben, a teljes ütközési energia elérte a 209 GeV-et. A LEP-et 2000 végén detektoraival együtt lebontották, hogy helyet adjon a Nagy Hadron Ütköztetőnek (hadronoknak az erősen kölcsönható, összetett részecskéket hívjuk, mint a proton, a neutron vagy a mezonok), az LHC-nek (Large Hadron Collider), amely 14 TeV (1 TeV = 1000 GeV) együttes energián protonokat, 1148 TeV-en ólomionokat fog ütköztetni (2. ábra).

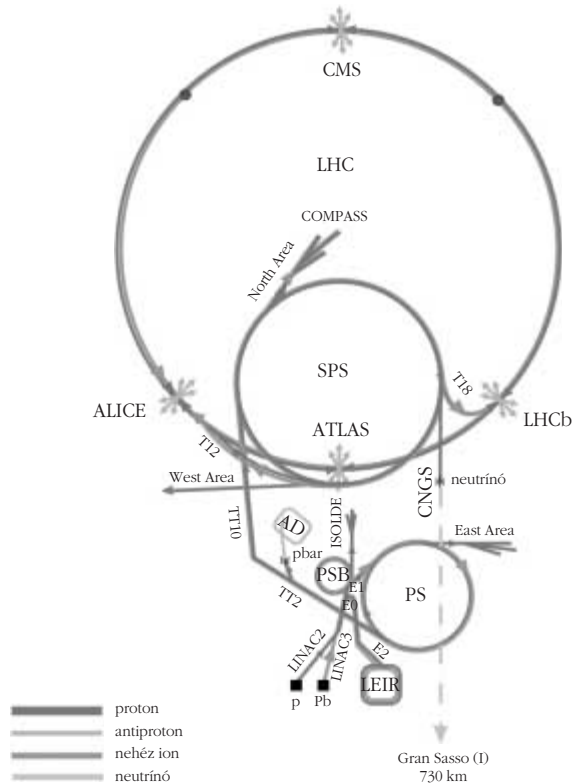
Habár a CERN elsőrendű feladatának a nagyenergiájú kutatást tartja, jelentős szerepet vállal az alacsonyenergiájú fizikában is. A PS egyik előgyorsítója, a Proton Booster, PB, minden második „lövését” az ISOLDE (On-Line Isotope Mass Separator) nevű berendezés atomi nyalábjai számára küldi. 1996-ig működött az Alacsonyenergiás Antiproton Gyűrű (Low Energy Antiproton Ring, LEAR), amelyen az első antihidrogén-atomokat sikerült előállítani (1. ábra). 1999-ben helyezték üzembe utódját, az Antiproton Lassítót (Antiproton Decelerator, AD, 2. ábra), amelyen az anyag–antianyag szimmetriát vizsgálják.

A CERN jelenleg a világ legnagyobb részecskefizikai laboratóriuma: mintegy 2800 főt foglalkoztat, és ezzel több, mint 6000, a kísérletekben résztvevő kutatót szolgál. Részecskefizikai alapkutatásra szakosodott intézmény, jelentősége azonban messze túlnő a részecskefizikán. Georges Charpak 1968-ban itt építette meg az első sokszá-

las proporcionális számlálót, amely azután forradalmasította a részecskeészlelés technikáját (nem csak a részecskefizikában), és Nobel-díjat hozott megalkotójának. Az a technológiai kihívás, amelyet az újabb és újabb gyorsítók és detektorrendszerek kifejlesztése, majd megépítése követel, komoly fejlődést hozott a vákuumtechnikában, az elektronikában és a számítástechnikában egyaránt. A LEP DELPHI (Detector with Lepton, Photon and Hadron Identification) detektorába a világ akkor legnagyobb szupravezető mágnesét építették be 1989-ben. Az LHC CMS (Compact Muon Solenoid) detektora számára már megépült a jelenlegi legnagyobb szupravezető szolenoid: a nyolc méter átmérőjű hengerben 4 T mágneses tér lesz. A CERN körül, a svájci–francia határ mindkét oldalán, technikai parkok jöttek létre fejlesztőcégek tucatjaival.

A CERN talán legszélesebb körben ismert mellékterméke a világháló. 1990-ben Tim Berners-Lee arra a célra fejlesztette ki, hogy a fizikusok az irodáikból (legyen az Genfben vagy Londonban) tudják ellenőrizni a kísérletük állapotát. Az ötlet megvalósítása néhány év alatt robbanásszerűen elterjedt a világban, 1994-ben már a vatikáni könyvtárban barangoltam vele. A CERN a jelenleg igen gyorsan fejlődő Grid-technológia fejlesztésében is az élen jár: egy 2004-ben kezdődött EU-projekt keretében a világ nyolcvan intézményének konzorciumát koordinálja egy egységes Grid-rendszer kifejlesztése érdekében. (Pillanatnyilag minden Grid-alkalmazás különböző, egymáshoz nem illő szoftverrel működik, Magyarországon is öt ilyen rendszert ismerek.)

2. ábra. A CERN gyorsítókomplexuma 2007 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 (AD-AC) számára. Az SPS neutrínónyalábót (CNGS) indít az Olaszország közepén található Gran Sasso neutrínólaboratórium felé.



A CERN-ről sok közérdeklődésre is számot tartó érdekesség olvasható az intézet honlapján (<http://intranet.cern.ch/Public/>) és az ötvenéves évforduló programjában (<http://intranet.cern.ch/Chronological/2004/CERN50/>).

A magyar ismeretterjesztő sajtó mindig komoly figyelmet szentelt a CERN-i kutatások magyar vonatkozásainak. 1994-ben a *Fizikai Szemle* különszámot adott ki a CERN fennállásának 40. évfordulójára, a *Természet Világának* is volt részecskefizikai különszáma (*Mikrovilág*, 2000), amelyben a kísérleti vonatkozású cikkek a CERN-re összpontosultak. Amikor *Zimányi Józseffel* a *Fizikai Szemle* 2003-as CERN-külszámát szerkesztettük csatlakozásunk 10. évfordulója alkalmából, felhívásunkra egy szám terjedelmét messze meghaladó mennyiségű cikk érkezett, ezért a különszám megjelenése után még hónapokig jelentek meg eredetileg oda szánt cikkek.

Azokról a kísérletekről, amelyekben magam is tevékenykedtem, az utóbbi tíz évben bőségesen írtam a *Fizikai Szemlében*, a továbbiakban csak vázlatosan tekintem át őket, de a következő oldalakon természetesen így is lesz olyan rész, mely visszaköszön e korábbi cikkeimre.

Antiprotonfizika a LEAR-nél

Amikor 1989-ben véget ért alacsonyenergiás kaonkísérletünk a brookhaveni AGS-gyorsítónál, és a vancouveri TRIUMF-nál (TRI-University Meson Facility) is vége felé közeledett atomfizikai kísérletsorozatunk, a gyerekeim közölték, többé nem óhajtának külföldre menni (öt év Dubna és összesen három év Észak-Amerika után ez megbocsátható volt). Európai kísérletek után néztem, hogy közelebb legyek, így csatlakoztam egy Pisa–Genova–CERN–Villigen együttműködéshez az antiproton gravitációs tömegének mérésére. Ehhez elsősorban nagy tömegben csapdában tartott és lehűtött antiprotonokra volt szükség, ezek létrehozását egy anticiklotronnal próbáltuk elérni. Ez egyike volt a – szerencsére elenyészően kevés – sikertelen kísérleteimnek.

Négyéves munkával az derült ki, hogy a CERN Alacsonyenergiás Antiproton Gyűrűje, a LEAR, nem volt alkalmas az anticiklotron számára szükséges 72 MeV/c impulzusú nyaláb előállítására. A másik hasonló kísérlethez szánt rádiófrekvenciás utólassítót sem sikerült akkor üzembe helyezni (pedig az nekünk később, az Antiproton Lassítónál sikerült). Ráadásul módszerünk, amellyel az antiproton és a proton gravitációs gyorsulását szándékoztuk mérni, elvérzett a kezdeti feltételeken: a szimulációk szerint a szupravezető fémtiszta felületén elkerülhetetlenül megjelenő kis elektrosztatikus potenciálok hatása teljesen elfedi a gravitációét. Ugyanakkor maga az anticiklotron kiválóan működött, hiszen a villigeni Paul Scherrer Intézetben sikerült vele müonokat lassítanunk, pedig a müonok nyalábkarakterisztikája, rövid élettartamuk miatt, az antiprotonokénál sokkal gyengébb volt.

Az 1. ábra a CERN gyorsító-rendszerét szemlélteti 1996-ban, a LEAR működésének befejezése előtt. Bámulatos volt, ahogy a proton-szinkrotron mágnesei 14,4 másodpercenként végigvonultak a PS működésének valamennyi szakaszán: proton-, nehézion-, elektron-, és po-

zitrongyorsítás, valamint antiproton-lassítás, habár antiproton-lassításra általában félóránként, elektron- és pozitrongyorsításra pedig, a LEP energiájától függően, néhány óránként volt csak szükség.

A fenti kísérlet vége felé kezdett dolgozni a LEAR-nél a Tokiói Egyetem és a Münchener Műszaki Egyetem kutatóiból álló PS205 csoport régi barátom, *Jamazaki Tosimicu* (angol névhasználat szerint *Toshimitsu Yamazaki*, de a japán ugyanúgy gondolkodik, mint a magyar) vezetésével: céljuk a hosszú élettartamú antiprotonos héliumatom (egy antiprotonból, egy elektronból és a héliumatommagból álló kötött állapot) spektroszkópiai tanulmányozása volt.

Előéletem miatt viszonylag könnyű volt bekéredzkednem, bár a két kezemen kívül mást nem tudtam szállítani. Amikor 1993 tavaszán csatlakoztam az előkészületekhez, elképesztő rendtelenséget találtam: óriási meglepetésemre kiderült, amit azóta Tokióban is tapasztaltam, hogy a japán fizikusok nemigen törődnek rendcsinálással. A kísérleti területen mindenfelé kinyitott és esetenként félig kidőlt dobozok heverték csavarokkal és vákuumalkatrészekkel, közöttük ledobva egy-egy szerszám, és, persze, senki semmit nem talált. Úgy látszik, a német szellem némileg befolyásolt bennünket a Monarchiában, mert egyből lett szerepem: szekrényeket és dobozokat vettem, és három hét alatt sikerült mindent szépen elhelyeznem. Azt viszont, hogy vissza is rakják, nehezen sikerült elérnem, úgyhogy a továbbiakban is, ha egy német kolléga vagy én megláttunk egy eldobott szerszámot vagy csavaros dobozt, mi vittük vissza a helyére. Most már tizenkét éve használjuk az akkor feliratozott dobozokat és szekrényeket.

Az első két évben nagyon nehéz munka volt a lézerrezonanciák keresése, mert támpontunk két eléggé pontatlan korai számítás volt. Óriási diadal volt, amikor az első antiprotonos átmenetet sikerült két lézerrendszer két hétig való léptetésével megtalálnunk 1993-ban. Bonyolította a helyzetet a LEAR folyamatos nyalábjá: az antiprotonok egyenként jöttek, megállásuk után vártunk 100 ns-ot, nem fogódnak-e be az atommagban és semmisülnek meg egy rövidéletű állapotból, és ha nem, indítottuk a lézereket. Mivel másodpercenként százát „lőttünk” velük, naponta kellett festéket cserélnünk, és az excimerlézerek tükreit tisztítanunk. A lézereink teljesen el is használódtak négy év alatt.

A fordulat 1995-ben következett be. *Révai Jánossal* közösen szerveztünk egy kis konferenciát Balatonfüreden 1995 januárjában, a befagyott tó mellett, és a PS205-ös kísérlet résztvevőin kívül meghívtuk rá a témakör iránt érdeklődő elméleti kollégákat is. Itt mondta *Dimitar Bakalov* Szófiából azt, hogy van egy zseniális matematikus barátja Dubnában, aki pontosan ki fogja tudni számolni nekünk az átmeneti energiákat. Valóban, a barát, *Vlagyimir Korobov* pár hónap múlva, miután kiszámolt jó néhány átmenetet, küldött egy az eredményeit tartalmazó táblázatot. Számításai két, már megmért értékkel igen jól egyeztek. Ilyenkor persze a kísérleti fizikus illesztésre gyanakszik, ezért megköszöntük, de nem voltunk különösebben oda érte, amíg el nem kezdtünk mérni. Akkor ugyanis kiderült, hogy a számítások mindössze 50 ppm-el különböznek a mért értékektől, mégpedig mindig ugyanabban az irányban. Ettől a mérésünk egy nagyság-

rendet gyorsult, az átmeneteket nem kellett keresnünk, csak tanulmányoznunk. Amikor Korobov megérkezett, hatalmas üdvölgéssel fogadtuk, és nem értettük, miért olyan csalódott a különbség miatt. Azóta megtalálta az okát, és az elmúlt tíz évben négy nagyságrendet javított a számításai pontosságán. A versenytársai (a Tohoku Egyetem egy csoportja kivételével) közben mind feladták.

1999-ben jöttünk rá, hogy ha az általunk meghatározott antiproton-átmenetek frekvenciáit egybevetjük a proton tömegét és töltését feltételező számításokkal, valamint a harvardi *Gerald Gabrielse* ciklotronfrekvenciás antiproton-méréseivel, be tudjuk határolni az antiproton és a proton tömegének és töltésének lehetséges különbségét. Ez az anyag és antianyag szimmetriáját kimondó CPT-invariancia elv fontos kísérleti ellenőrzésének bizonyult. A CPT-invariancia a fizika egyik legfontosabb szimmetriatétele, kimondja, hogy egy mikrorendszer tulajdonságai nem változnak meg, ha egyidejűleg tükrözzük a töltéseket (charge), valamint a térkoordinátákat (parity) és az időt (time). Annyira alapvető tulajdonság, hogy az ettől eltérő modellek kidolgozónak igen lényegesnek tartott alapelveket kell feladniuk még aránylag kis szimmetriasértés érdekében is.

A LEAR-nél végzett munka életem egyik legszebb, bár igen fárasztó élménye volt. A mérési periódusok évente másfél-két hónapig tartottak, ezalatt folyamatos volt a munka. Mivel jó alvó vagyok, általában vállalkozom az éjszakai műszakokra, főleg, mivel olyankor kevés a személyes és telefonos szurkoló, akik nincsenek ugyan műszakon, de azért érdekli őket, mi történik. A PS205-ös kísérlet folyamán állítottam be egyéni rekordomat negyvenhat egymást követő, éjszakai műszakkal.

Az Antiproton Lassító (AD)

A CERN részecskefizikai laboratórium, az atomfizikát inkább csak megtűri a tematikájában. Már a 90-es évek elején tervbe vették a LEAR végleges leállítását, és amikor 1996-ban a LEAR-nél kísérletező három nagy részecskefizikai együttműködés befejezte az adatgyűjtést, az be is következett. Az ott dolgozó atomfizikusok ebbe nem törődtek bele. Még 1992-ben összeállítottunk egy tanulmánytervet az antihidrogén-atom tanulmányozásának lehetőségeiről a CERN tudományos bizottságai számára, majd azt jelentősen kibővítve meg is jelentettük: a cikknek öt szerzője volt öt különböző országból. A gyorsítófizikusok kitartó munkáján és négy ország (Japán, Németország, Olaszország és Dánia) célzott anyagi támogatásán kívül ez a cikk is hozzájárult ahhoz, hogy 1999 végére elkészült az Antiproton Lassító három kísérlettel a CPT-invariancia ellenőrzésére. Magam kettőben is benne voltam: a PS205-ös folytatásaként meghirdetett ASACUSA-ban és az antihidrogén ATHENA-ban, de az utóbbiból később kiváltam.

Az ASACUSA nevet (Tokió legrégebbi negyede után) az együttműködés nem-japán résztvevői találtuk ki, tekintettel a döntő japán hozzájárulásra, az Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons kezdőbetűiből. Három független kísérletet tartalmaz három csoporttal. Az Aarhusi Egyetem csoportja *Helge Knudsen* vezetésé-

vel lassú antiprotonok fékezőképességét méri, a Tokiói Egyetem Komaba-részlegéből *Jamazaki Jaszunori* csoportja pedig egészen lassú antiproton-nyalábot készített elektromágneses csapdában való befogással. A spektroszkópiai témát a Tokiói Egyetem Hongo-részlegéből *Hajano Rjugo* csoportja vezette, részt vett rajtuk kívül két CERN-i munkatárs és két-három magyar is. A kísérlet előkészületei során megszületett két debreceni diplomamunka, majd 2004-ben egy doktori dolgozat. A mérőberendezéshez csoportunk a különböző részegységek precíziós mozgatóállványainak megépítésével járult hozzá, azokat *Zalán Péter* (RMKI) tervezte.

Az AD (Antiproton Decelerator) 1999-es indulása óta folyamatosan javítjuk a spektroszkópiai módszerünket, ebben *Hori Maszaki* játssza a főszerepet. A kétévénként megjelenő *Review of Particle Physics* kiadásaiban ez jól nyomon követhető: az antiproton tömegének és töltésének a protonétól való lehetséges eltérését kizárólag mi mérjük, az 1999-ben publikált eredményünk $5 \cdot 10^{-7}$ -es relatív különbséget engedett meg, a 2001-es $6 \cdot 10^{-8}$ -t, a 2003-as pedig $1,0 \cdot 10^{-8}$ -t.

Volt egy érdekes vitánk a CERN korábbi főigazgatójával, *Luciano Maianival*. 2001-ben meglátogatta a kísérletünket. (Pályafutásom során jó néhány kutatóintézetet megjártam világszerte, és csak három olyan igazgatóval találkoztam, aki látogatta az intézetében folyó kísérleteket.) Maiani közölte, nem érti, minek vessződünk ezzel, hiszen (1) a elektromos töltés kvantált; (2) az anyag semlegességéből következően az elektron és a proton töltése hallatlan pontossággal egyezik; és (3) a töltés/tömeg arány egyenlőségét igen pontosan mérték protonra és antiprotonra. A megbeszélésen mégis sikerült kísérletünk motivációit meggyőzően bemutatni. Ez hozzájárulhatott ahhoz, hogy később főigazgatói beszámolóiban mérésünket a CERN kiemelkedő eredményei között emlegesse.

Az AD másik két kísérletének, az ATHENA-nak és az ATRAP-nak 2003–2004 folyamán sikerült nagymennyiségű antihidrogén-atomot előállítania. Távlati céljuk a 2S–1S átmenet energiájának összehasonlítása kétfotonos spektroszkópiával hidrogénben és antihidrogénben, de addig még hosszú és rögös az út. Ehhez az antiproton és két pozitron hármas ütközéseiben keletkező, magasan gerjesztett atomokat alapállapotra kell hozni és csapdában tartani. A mi ASACUSA-kísérletünk (Tokió–Bécs–Budapest–Debrecen együttműködés) is bekapcsolódik az antihidrogén-kutatásba, de mi röptetni fogjuk az antihidrogén-atomokat, és mágneses térben az alapállapot hiperfinom szerkezetét vizsgálni. Ettől azt várjuk, hogy a semleges kaonokon mérthez hasonló pontosságú CPT-ellenőrzést nyújt.

Részvételünk az OPAL-együttműködésben

A CERN LEP gyorsítója 1989-től 2000 végéig működött, akkor a világ legnagyobb gyorsítóberendezése volt: 100 méter mélyen a föld felszíne alatt fekvő alagútja 26,7 km hosszú. Négy óriási (10 méter hosszú és 10 méter átmérőjű, hengeres) detektor (ALEPH, DELPHI, L3 és OPAL) figyelte az egymással szemben keringő elektronok és

pozitronok négy ütközési pontjában keletkező részecskéket. A detektorok egymáshoz igen hasonló felépítésűek voltak. Három különböző rendeltetésű részből álltak, körkörösén egymásba építve. A nyalábvezeték körül a töltött részecskék pályáját követte nyomon a belső detektor, ezt a különböző részecskék teljes energiáját elnyelő/mérő kaloriméterek vették körül, majd a műonkamrák következtek, a gyors műonokat ugyanis az összes többi részecskét elnyelő kaloriméterek nem tudják megállítani. Mindegyik detektor mágneses térrel működött, kettő szupravezetővel, a másik kettő hagyományossal. A múlt idő nem véletlen: 2000-ben szétszerelték és részben elszállították, részben megsemmisítették, a felszabadult ócskavas ára fedezte az elektronika megsemmisítésének árát (a nyomtatott áramkör veszélyes hulladék).

Budapesti és debreceni kutatókból álló csoportunk éppen tíz éve csatlakozott az OPAL (Omni-Purpose Apparatus for LEP) együttműködéshez. Négy fővel kezdtük, fénykorunkban tizenegyen voltunk. Kezdetben csak a Higgs-keresésben vettünk részt, 1997-ben azonban témakörünk kibővült a kvantumszindinamika ellenőrzésével, majd 1999-ben a fotonfizikával. A tíz év alatt csoportunkban két PhD-disszertáció és öt diplomamunka született, egy PhD-munka még készül.

Az OPAL volt a legkisebb LEP-együttműködés. Csatlakozásunk idején, 1995-ben, a cikkeinken 330 szerző szerepelt kilenc ország harmincnégy intézményéből, szemben a legnagyobb DELPHI együttműködés 550 szerzőjével. A 330 szerző is soknak tűnhet, de csak a detektor különféle berendezéseinek, alberendezéseinek üzemeltetése 150 kolléga állandó CERN-i jelenlétét igényelte – ezt biztosítani egyébként nem kis nehézséget okozott. Amikor az OPAL csoportvezetőinek előadtam a létrehozandó magyar csoport tervét, az első kérdésük az volt, hány embert tudunk majd a CERN-ben állomásoztatni. A válasz, természetesen, az volt, hogy egyet sem, mert egy ember ott állomásoztatása a járulékokkal együtt mintegy hatmillió forintba került volna évente, annyi pályázati pénzünk pedig még akkoriban sem volt. Nekünk már a detektor közös költségeihez való, fejenként és évente egymillió forintos hozzájárulás is megoldhatatlan terhet jelentett, ezért a ránk eső hányadot a negyedére csökkentették. Ezt a nagyvonalúságot az tette lehetővé, hogy a többi csoport gazdag országokból jött, mi voltunk egyedül kelet-európaiak.

A LEP hat hónapnyit működött évente, ilyenkor általában hárman felügyeltük a mérőrendszert a föld alatt 100 méterre levő mérőszobában. Egyszer éppen ügyeletes voltam, amikor áramkimaradás miatt minden leállt. Harminc telefonszámot kellett felhívunk, hogy az egyes detektorelemek szakemberei megjelenjenek, fel-támasztani az egységüket. Ez, Murphy törvényének megfelelően, szombatról vasárnapra virradóan éjjel kettőkor történt. Amikor az utolsó áldozatokat keltem, az első már befutottak. Senki sem volt morcos, remek hangulatban vártuk az akkumulátoros vészlámpák félsötétjében, hogy visszajöjjen a villany. Egy órával azután, hogy az áramszolgáltatás helyreállt, a rendszer működött. Pedig több egység tönkrement, és cserére szorult. Ez persze csak úgy működhetett, hogy az aley-

ségeknek mobiltelefonjai voltak, amelyeket felváltva hordoztunk. Egyszer éppen én hurcoltam egy ilyen telefont, és hegymászás közben magyaráztam el az ügyeletesnek, hogyan kell az aldetektoromon a nagyfeszültséget visszaállítani.

Higgs-keresés az OPAL-nál

A Higgs-mechanizmus lényege a spontán szimmetriasértés: a szabadon mozgó részecskékhez hozzáteszünk egy több- (de legalább négy-) komponensű teret, mintha abban mozognának a vákuum helyett. Ez a Higgs-tér sérti az üres tér természetes szimmetriáját, mert minimális energiáját nem a tér eltűnésénél éri el, hanem valamilyen véges értékénél. Ettől a gyenge kölcsönhatást közvetítő (a sértetlen szimmetriájú elméletben tömeg nélküli) három gyenge bozon a kísérleti tapasztalattal egyezően tömeget nyer, és a negyedik komponensből lesz az igen sajátos tulajdonságokkal rendelkező, nehéz Higgs-bozon. A Higgs-mechanizmus számos más jótékony hatással rendelkezik: tömeget biztosít anyagi részecskéinknek, mint amikor a töltött részecske folyadékban a polarizáció miatt nagyobb tehetetlenséggel mozog, mint vákuumban, és a nehéz Higgs-bozon jelenléte rendbe hoz olyan elméleti nehézségeket, amelyek egyébként lehetetlenné teszik a gyenge kölcsönhatással kapcsolatos számításokat.

A Higgs-mechanizmus közvetett kísérleti bizonyítéka a Standard Modellel végzett számítások hihetetlenül pontos egyezése a kísérleti adatokkal, ennek ellenére a Standard Modelnek – elméleti jellegű belső nehézségei miatt – számos általánosítása, kiterjesztése született. A legnépszerűbb ilyen kiterjesztés a Szuperszimmetrikus Standard Modell, amely feltételezi, hogy az alapvető részecskék fermion-bozon párokban fordulnak elő, és a szimmetriasértéshez nyolckomponensű Higgs-teret használ. A nyolc térből három megint a gyenge bozonoknak ad tömeget, a maradék pedig öt Higgs-bozont képez, amelyekből kettő töltött, tehát elvileg jobban kimutatható, mint a semlegesek.

Mivel a Standard Modell valamennyi alapvető részecskéjét sikerült már megfigyelni a Higgs-bozonon kívül, a LEP-gyorsító működése utolsó éveiben már túlnyomórészt a Higgs-bozon(ok) keresésére összpontosított. A négy LEP-kollaboráció *Igó-Kemenes Péter* vezetésével közös munkacsoportot alakított a Higgs-keresés eredményeinek összegzésére. Nagy figyelmet keltett 2000-ben, hogy az ALEPH-együttműködés szignifikáns Higgs-jelet látott, amíg a másik három eredménye a Standard Modellel számított háttérhez közeli volt. Az ALEPH Higgs-jele statisztikailag annyira meggyőző volt abban a csatornában, ahol a Higgs-bozon egy Z-vel együtt keletkezik, és mindketten két-két kvarkra, azaz összesen négy hadron-záporra bomlanak, hogy a kísérletezők nagy része azt szerette volna – hiába –, ha a LEP működését a CERN egy évvel meghosszabítja. Személy szerint én szkeptikus voltam, két okból. Egyrészt a látni vélt jel nagyon közel volt a kinematikai határhoz, hiszen a LEP átlagos energiája 2000-ben 206 GeV volt, és ha levonjuk a Z-bozon tömegének megfelelő 91 GeV-et, éppen 115 GeV-et kapunk, ahol az ALEPH Higgs-jele a legerősebb volt. A kinemati-

kai határ környékén pedig az adatelemzés már eléggé bizonytalan. Másrészt az ALEPH-együttműködés 1995-ben már bejelentett egy új részecskét 4-hadronzóporos eseményekben, amelyet a többi kísérlet nem látott, és egy évvel később már maga az ALEPH sem.

A négy kísérlet egyesített eredménye végül rengeteg vita és még több megismételt adatelemzés után az lett, hogy a LEP-vizsgálatok 95%-os konfidencia mellett 114,4 GeV tömegig kizárják a Standard Modell Higgs-bozonjának létezését. Csak háttérrel feltételezve a pusztá szimuláció 115,3 GeV-es határt jelezne.

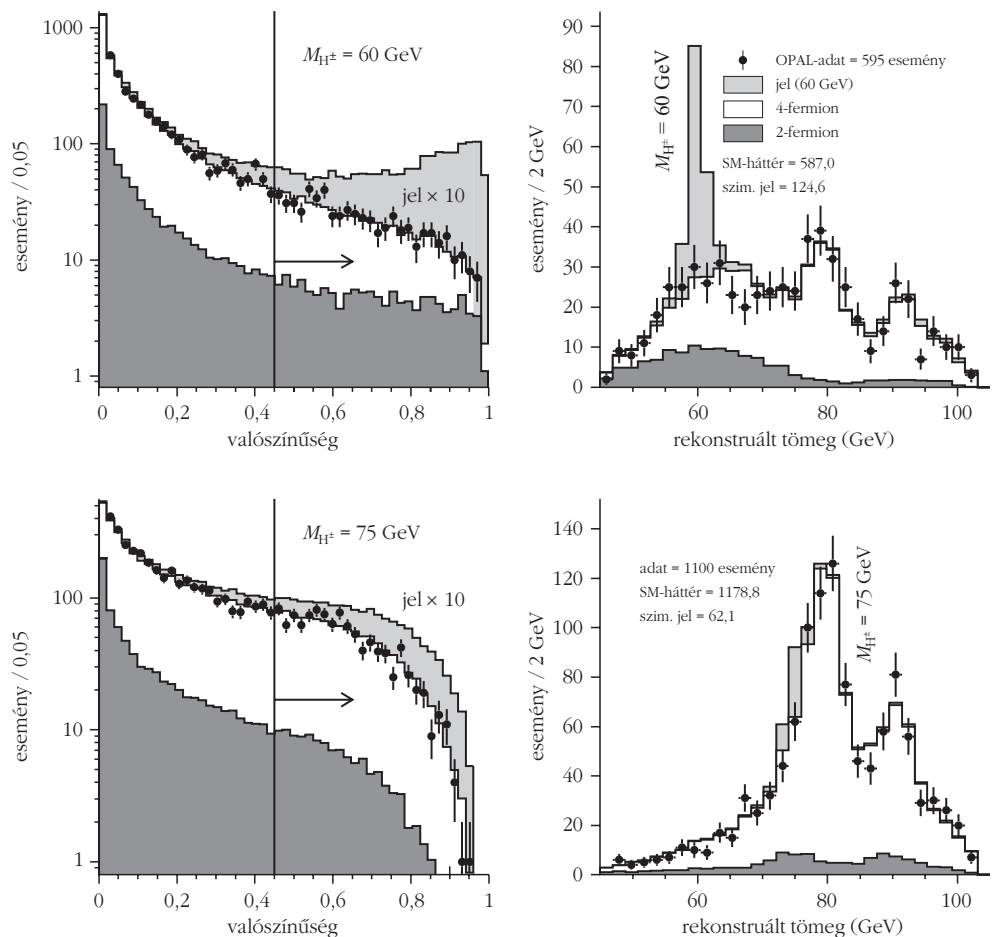
Töltött Higgs-bozon keresése

Mint említettem, a Standard Modell kiterjesztései két Higgs-dublett teret feltételezve öt Higgs-bozont jeleznek, amelyek közül kettő töltött. Az utóbbiak, ha léteznek, LEP-energiáknál párban keletkezhetnek, és egyenként vagy két kvarkra, vagy egy tau-neutrínó párba bomlanak. Ennek megfelelően főként három bomlási csatornában várhatjuk megfigyelését: a négy-kvarkosban, a tiszta leptonosban és a vegyesben, ahol az egyik bozon leptonokra, a másik kvarkokra bomlik.

Az OPAL-együttműködés keretei között a töltött Higgs-bozon keresése csatlakozásunk óta mindig erős magyar részvétellel folyt. A tiszta leptonos csatorna elemzését leszámítva az analízis valamennyi lépését csoportunk végezte, a csatornák statisztikus összegezését is beleértve.

A 3. ábra a töltött Higgs-bozon tömegére tett két különböző feltételezés mellett mutatja az OPAL-adatok analízisét. Vegyük észre, hogy milyen kiválóan egyezik a szimuláció előrejelzése a mért háttérrel. Az utóbbi természetesen tömegről tömegre különböző, hiszen más tömegű keresett részecskére másféle eseményeket fogunk nagyobb jelvalószínűségűnek találni. Az ábrából az is látszik, miért van szükségünk statisztikus módszerekre: a 60 GeV tömegű részecskét nyilvánvalóan kizárják a hadronos kísérleti adatok, a 75 GeV-eset viszont ez a csatorna önmagában nem.

3. ábra. Töltött Higgs-bozon keresése a négykvarkos csatornában (előzetes OPAL-eredmény, D. HORVÁTH – Nucl. Phys. A 721 (2003) 453c–456c). Az analízist valamennyi LEP-energiára és lehetséges Higgs-tömegre elvégeztük, az ábra 60 és 75 GeV tömegűnek feltételezett részecskékre mutatja az események várható és észlelt számát: bal oldalt az adatok jelszerűségét jellemző valószínűség, jobb oldalt pedig a rekonstruált tömeg függvényében.



Várt események észlelésének elmaradása esetén legfőbb eszközünk a statisztikus értékelésből kapható kizárási tömeg- vagy hatáskeresztmetszet-határ. Ezeket egyáltalán nem könnyű meghatározni, mert ha modelfüggetlen eredményt várunk, nem tudjuk előre a csatornák megoszlását, tehát a statisztikus kombinációt az összes lehetséges elágazási arányra és feltételezhető Higgs-tömegre ki kell számítani. A legrosszabb eset adja a csatornafüggetlen határt tömegre és keletkezési valószínűsége. A hadronos és a vegyes csatorna dominanciája környékén a kombinált tömeghatár 75,5 GeV, a tisztán leptonos csatorna járulékának növekedésével felfelé változik és eléri a 90 GeV-et, a mért tömeghatár tehát 75,5 GeV.

Új részecskék keresése az LHC-nál

A Nagy Hadron Ütköztetőnél, az LHC-gyorsítónál is négy ütközési pont lesz négy detektorral (2. ábra). Kettő közülük általános célú: a CMS (Compact Muon Solenoid), amelyben a magyar kísérletezők zöme, csaknem valamennyi részecskefizikus és több nehézion-fizikus dolgozik, és az ATLAS (Toroidal LHC ApparatuS) egy kisebb magyar csoporttal. A másik kettő: a nehézion-fizikai mé-

résekre szánt ALICE (A Large Ion Collider Experiment) szintén jelentős magyar részvétellel, és a b-kvark fizikájára összpontosító LHCb.

A CMS-detektor építésén két magyar csoport is dolgozik. A müon-detektor helyzetmeghatározó rendszerét a Debreceni Egyetem és az ATOMKI közös csoportja fejleszt, az előreszórás kaloriméter építésében pedig az RMKI vesz részt.

Rendkívüli feladatot jelent majd a CMS-események tárolása és elemzése. Az LHC-ban 25 ns-onként ütköznek majd a protoncsomagok, ütközésenként 10–20 p–p kölcsönhatással, és az összetett hadronokból többnyire csak egy-egy kvark ütközéséből várható fizikailag érdekes esemény (remélhetőleg Higgs-bozon keletkezése is!), így óriási „zajból” kell majd kiválogatnunk, amit keresünk. Csak az előzetes eseményszűréshez 500 GB/s sebességre, azaz mintegy 4000 számítógépre lesz szükség. Évente 10 PB (10^{16} bájt) adatot kell majd tárolni és feldolgozni. A CERN ehhez létrehozta az LCG (LHC Computing Grid) rendszert, amelyhez Magyarország is csatlakozott: jelenleg az egyetlen komoly magyar LCG-rendszert az RMKI üzemelteti 100 processzorral és 7 TB

lemezterülettel. 2003 nyarán telepítettük a résztvevő intézmények (jelenleg mintegy nyolcvan) közül hetedikként az LCG szoftvert, és azóta azt néhány fizikus és informatikus működteti. Népes magyar informatikusgárda vesz részt a CERN-i grides fejlesztőmunkában, és a Magyar Grid Kompetencia Központ keretében a SZTAKI, az ELTE, a BME és a NIIFI informatikusai is hozzájárulnak az LCG-rendszer fejlesztéséhez.

Csoportunk a CMS analízis-előkészítő tevékenységébe kapcsolódott be, ebben az Osztrák Tudományos Akadémia bécsi Nagyenergiájú Intézetével működünk együtt. Célunk töltött Higgs-bozonok és a kvarkok szuperszimmetrikus modellek által jósolt partnereinek keresése proton–proton ütközésekben.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönettel tartozik a közös publikációkban szereplő (és nem szereplő) kollégáinak, akik nélkül sem valósult volna meg a leírtakból, a CERN-nek és a Tokiói Egyetemenek, valamint az OPAL és ASACUSA kísérletek résztvevőinek a tiszteves kellemes és eredményes együttműködésért, és amiért a különböző pályázatok (legutóbb az OTKA T042864 és T046095 és FP6 MC-ToK 509252) támogatásával együtt is igen szegény magyarokat befogadták és anyagilag is támogatták.

A FIZIKA TANÍTÁSA

SCIENCE ON STAGE, AVAGY MENTSÜK MEG A TERMÉSZETTUDOMÁNYOK TANÍTÁSÁT!

Lang Ágota

Sopron, Széchenyi Gimnázium

Ezzel a céllal gyűltek össze a természettudományt tanító tanárok (kb. 400-an) Európa 29 országából (és Kanadából) a CERN-ben a 2005. november 21–25. között megrendezett, fenti elnevezésű fesztiválon. Ez az esemény a 2000-ban, 2002-ben és 2003-ban megrendezett *Physics on Stage* folytatása, pontosabban kibővítése volt más természettudományi ágakkal: kémiai és biológiai. A történet az 1990-es években kezdődik, amikor is a fizikatanárok teljesen kétségbe estek a fizika iránti világméretű társadalmi érdektelenség láttán. Később már Európa fizikusokat foglalkoztató nagy kutatóintézetei is észlelték, hogy „hiba van a kréta körül”, amivel a fizikát tanítják. Először a CERN (European Organization for Nuclear Research) az ESA (European Space Agency) és az ESO (European Southern Observatory) ocsúdott fel és talált ki valami okosat: gyűjtsük egybe az európai fizikatanárok „krémjét”, és adjunk nekik lehetőséget tapasztalataik, ötleteik, kicserélésére azért, hogy együtt kidolgozzanak valami stratégiát arra, hogyan tehetnénk a fizikát vonzóbbá a fiatalok számára. Azonban ez a rendezvény más, mint egy hagyományos nagy összeurópai fizikatanári konferencia (Ankét), mert a szervezők műfajául a fesztí-

vált jelölték meg. Bevallom, én a kollégáimnak sosem mondtam ki ezt így, ha szóba került, hova megyek, mert még azt gondolták volna, hogy valami zenés-táncos vigasság az úti cél. És nem is tévedtek volna sokat... A meghirdetett kategóriák, amelyekre valamilyen produkcióval jelentkezni lehet, magukért beszélnek: színjáték előadása, egyéb színpadi attrakció, bemutató, vásár stb., de hagyományos plenáris szakmai előadások, a tanítás megújítását célzó módszertani műhelyek is szerepeltek az előzetes programban.

Az elmúlt öt évben a szervezők csapata megerősödött, mert immáron az EFDA (European Fusion Development Agreement), az EMBL (European Molecular Biology Laboratory), az ESRF (European Synchrotron Radiation Facility) és az ILL (Institut Laue–Langevin) is támogatja az eredeti célokat. Ők heten alkotják az EIRO-fórumot, melynek mottója: „Európa tudományos életét szolgálni”. Jól tudják, hogy ehhez először ki kell termelni az agyukat, akik a célokat meg is valósítják.

Ennek előmozdítására szervezik az „...on Stage” rendezvényeket, ahol a már említett „zenés-táncos megmozdulások” (színpadi produkciók) mellett a résztvevők akti-