

Tanulmány

50 ÉVES A CERN

Horváth Dezső

a fizikai tudomány doktora

RMKI, Budapest és ATOMKI, Debrecen

horvath@rmki.kfki.hu

Az ötvenéves évforduló

A CERN-t, az európai országok közös részecskefizikai laboratóriumát ötven éve alapították, 1954. szeptember 29-én. Az évfordulóról, a CERN-en magán kívül, valamennyi tagország megemlékezett. A Magyar Tudományos Akadémia ünnepi ülést szervezett 2004. szeptember 22-én; az ülésen elhangzott előadásokat a NIIFI megörökítette a világháló <http://vod.niif.hu/cern/lapjan>, és röviden összefoglaltam a *Fizikai Szemlé*ben. Az Akadémia ünnepi ülésén kívül országszerte számos előadásban megemlékeztek a CERN születésnapjáról.

Genf Kanton azzal fejezte ki a CERN iránti tiszteletét, hogy a nemzeti ünnepén, augusztus 1-én, az esti tűzijátékban megjelenítette a hipotetikus Higgs-bozon szimulált bomlását, ahogyan azt a CERN következő nagy gyorsítójánál észlelnék.

A CERN október 16-án nyílt nappal ünnepelte fennállásának 50. évfordulóját. Egész nap kirándulóbuszok, városi különbuszok és természetesen rengeteg személyautó szállította a látogatók ezreit a CERN-be, amely ötven laboratóriumát nyitotta meg az érdeklődők előtt. A látogatóknak kutatók százai magyarázták a látóivalókat a legkülönbözőbb nyelveken, de persze főként franciául. A nyílt

nap, véleményem szerint, túlságosan is jól sikerült: a CERN becslése szerint mintegy 32 ezer látogató volt kíváncsi rá, és az érdekesebb laboratóriumok előtt órákat kellett sorban állni a bejutáshoz. Én hamar fel is adtam a dolgot, mondván, majd megkérek ismerősöket, hogy mutassák meg békeidőben a kísérletüket. Délután több száz sorban állón kellett sűrű bocsánatkérések között átverekednünk magunkat, hogy a saját anti-protonos kísérletünkhöz bejuthassunk.

Október 19-én volt a hivatalos ünnepség: a CERN-ben érdekelt országok (nem csak tagországok) képviselőinek jelenlétében felavatták a CERN új kiállítócsarnokát, „A tudomány és újítás gömbjét” (Globe of Science and Innovation), a Svájci Államszövetség ajándékát. Beszédet mondott, többek között, Jacques Chirac, Franciaország elnöke, és I. János Károly, Spanyolország királya. Jelen volt a svájci államelnök, Hollandia és Japán oktatási minisztere is. Hazánkat Siegler András, a Magyar CERN Bizottság elnöke képviselte.

A CERN alapítása és fejlődése

A CERN neve eredetileg francia betűszó, a Nukleáris Kutatások Európai Tanácsa (Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire) rövidítése volt, azóta viszont van két hivatalos neve is: az angol alapokmány szerinti

European Organization for Nuclear Research, ugyanakkor a publikációkon általában a European Laboratory for Particle Physics szerepel. Két hivatalos nyelve van, az angol és a francia; a kutatás nyelve, természetesen, angol, az adminisztrációs és technikai személyzet viszont jórészt francia, velük tehát inkább csak franciául lehet kommunikálni. A hivatalos dokumentumokat mindkét nyelven elkészítik.

Alapítása a véres világháború utáni megbékélés egyik nagy tette volt, szimbolizálta az általános európai összefogást egy olyan kutatási területen, amely kimondottan alap-kutatási, mindenféle hadicélú felhasználás lehetősége nélkül, azzal az előrelátással, hogy a kísérleti részecskefizika mint *big science*, túl fogja nőni egy-egy ország lehetőségeit. Külön érdekesség, hogy az alapító atyák között az első helyen egy amerikai, Isidore I. Rabi Nobel-díjas fizikust szokták megnevezni, aki 1950-ben, a UNESCO firenzei ülésén javasolta az amerikai nemzeti laboratóriumokhoz hasonló, közös európai kutatócentrumok létrehozását (Krige, 2004).

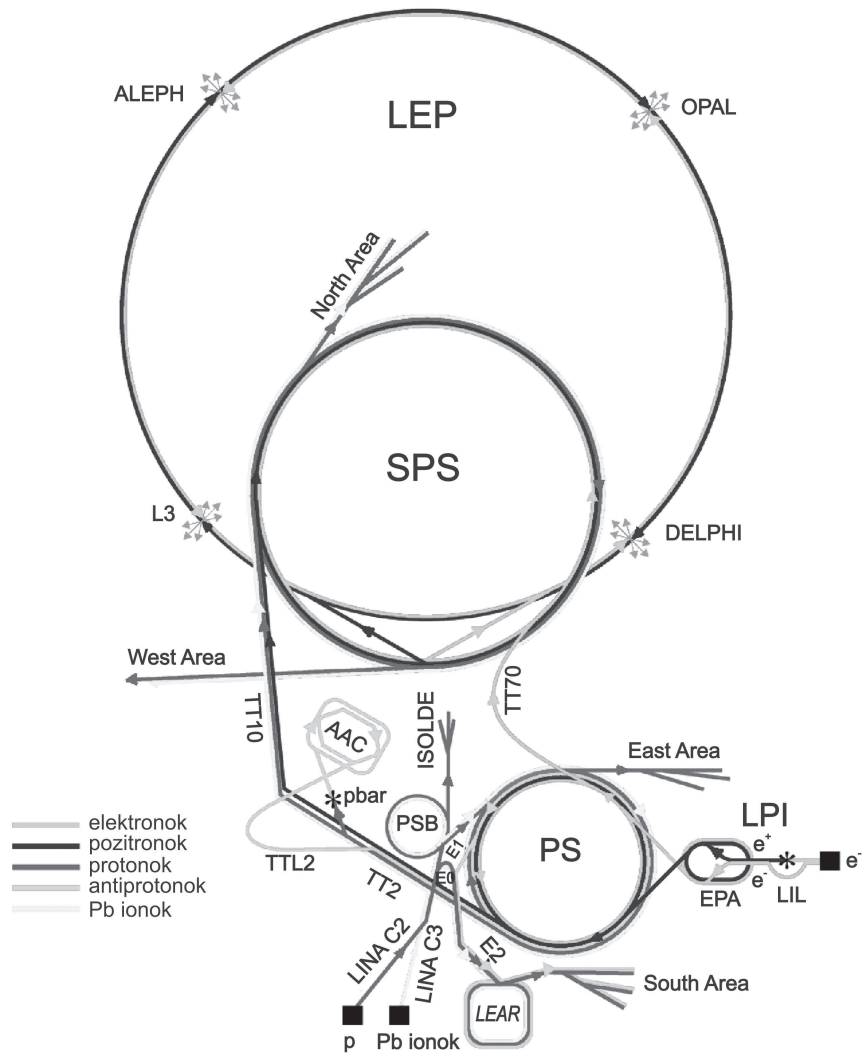
1952-ben választotta az ideiglenes tanács Genfét a leendő intézmény helyszínéül, 1953-ban Genf Kanton népszavazásán a javaslatot kétharmados többséggel jóváhagyta, és 1954-ben kezdték ásni az első CERN-i épület helyét a svájci-francia határnál. Az első gyorsítót, az 1990-ben felszámolt 600 MeV-es szinkrociklotront, 1957-ben építették, tíz évvel a hasonló energiájú dubnai után. A mai gyorsítókomplexum alapját képező Proton-szinkrotron (PS – Proton-Synchrotron), amelyet a brookhaveni AGS (Alternating Gradient Synchrotron) mintájára építettek, 1959-ben lépett működésbe (1. ábra).

Az első proton-proton ütközőnyalábot, az ISR-t (Intersecting Storage Rings) azonban már a CERN építette 1971-ben, s azon 1973-ban kimutatták a gyenge kölcsönhatás semleges áramait, igazolván az elektromágneses és gyenge kölcsönhatás egyesített elméletét.

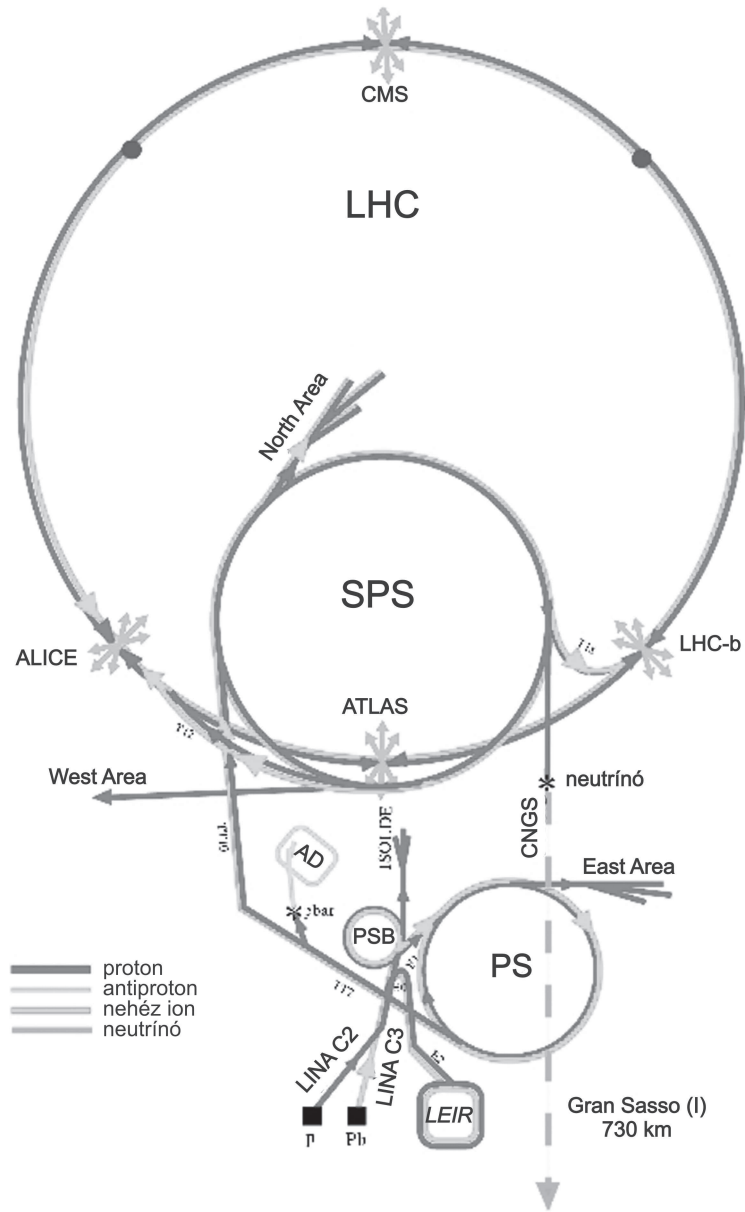
Az igazi tudományos áttörést a Szuperproton-szinkrotron (SPS) 1976-os működésbe lépése hozta meg a CERN-nek. Az volt az első országhatáron átívelő gyorsító (addig a CERN eszközei elfértek a svájci oldalon), és azon fedezte fel 1983-ban Carlo Rubbia csoportja a gyenge kölcsönhatást közvetítő W és Z bozonokat. A Nobel-díjat Rubbia Simon van der Meerrel közösen kapta, van der Meer a sztochasztikus nyalábhűtés kifejlesztéséért (a tárológyűrű egyik pontján megmérjük a nyalábirányra merőleges részecskesebességet, és azt a gyűrű átellenes pontján ellentérrrel kompenzáljuk). Az SPS számos remek együttműködést szolgált, többek között a jelentős magyar részvétellel rendelkező NA-49 nehézion-kísérletet is (Csörgő, 2004). Már épül az a nyalábrendszer, amely neutrínókat fog Közép-Olaszországba, a Gran Sasso neutron-obszervatóriumba küldeni: a távolság megfelelő a neutrínók egymásba alakulásának tanulmányozására.

A Nagy elektron-positron 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 azonban a LEP gyűrűjében a részecskeenergiát fokozatosan a duplájára emelték, és a LEP utolsó évében, 2000-ben, a teljes ütközési energia elérte a 209 GeV-et. A LEP-et 2000 végén detektorai-val együtt lebontották, hogy helyet adjon a Nagy hadronütköztető-nek (hadronoknak az erősen kölcsönható, összetett részecskéket hívjuk, mint a proton, a neutron vagy a mezonok), az LHC-nek (Large Hadron Collider), amely 14 TeV együttes energián fog protonokat és 1148 TeV-en ólomionokat ütköztetni (1 TeV = 1000 GeV).

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-



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), a Proton-booster (PB) közvetítésével protont és nehéz ionokat a super-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 kísérleteknek juttatják. A PB minden második protoncsomagját az ISOLDE atomnyalábjai használják, főként magspektroszkópiai mérésekre.



2. ábra • A CERN gyorsítókomplexuma 2007 után. A proton-szinkrotron (PS) protont és nehéz ionokat gyorsít a super-proton-szinkrotron (SPS) és a Nagy hadron-ütköztető (LHC), valamint protont az Antiproton-lassító (AD) számára. Az SPS neutrínónyalábot (CNGS) indít az Olaszország közepén található Gran Sasso neutrínólaboratórium felé.

Line Isotope Mass Separator) atomi nyalábjai számára küldi. 1996-ig működött az Alacsonyenergiájú antiproton-gyűrű, LEAR (Low Energy Antiproton Ring), amelyen az első antihidrogén-atomokat sikerült előállítani (1. ábra), és 1999-ben üzembe helyezték utódját, az Antiproton-lassítót, amelyen az anyag-antianyag szimmetriát vizsgáljuk.

A CERN jelentősége

Érdekes volt régebben a hármass versenyfutás az USA, a Szovjetunió és Nyugat-Európa között: a CERN szinkrociklotronja hasonló volt a korábbi dubnaihoz, a PS analógia az ugyanakkor épített brookhaveni AGS-gyorsító volt. Az USA-ban Stanford, majd a Fermilab vette át Brookhaventől a nagyenergiájú vezető szerepet, a Szovjetunióban Szerpuhov Dubnától. A Szovjetunió a hetvenes évek óta nem tudott nagy gyorsítót építeni, habár Novoszibirszk továbbra is élen jár a gyorsítótechnológia fejlesztésében, és a texasi SSC építésének leállításával az USA is lemaradt a kilencvenes években, az LHC 2007-től várható üzembe állítása pedig megszilárdította a CERN fölényét. A helyzetet jól jellemzi, hogy pillanatnyilag a CERN-kísérletekben regisztrált kutatók között számban legtöbb az USA-ból érkezik, utána pedig Oroszországból, pedig egyik sem tagország.

A CERN részecskefizikai alap kutatásra szakosodott, de jelentősége messze túlne a részecskefizikán. Georges Charpak 1968-ban építette meg a CERN-ben az első sokszálas proporciónális számlálót, amely azután forradalmasította a részecskeészlelés technikáját (nem csak a részecskefizikában), és Nobel-díjat hozott a felfedezőnek. Az a technológiai kihívás, amelyet az újabb és újabb gyorsítók és detektorrendszerek kifejlesztése és megépítése követel, komoly fejlődést hozott a vákuumtechnikában, az elektronikában és a számítástechnikában egyaránt. A LEP DELPHI (Detector with Lepton, Photon and Hadron Identification)-detektora a világ leg-

nagyobb szupravezető mágnesét tartalmazta 1989-ben, és 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 máig legnagyobb jelentőségű mellékterméke a világháló. 1990-ben Tim Berners-Lee arra fejlesztette ki, hogy a fizikusok az irodáikból (legyen az Genfben vagy Londonban) tudják ellenőrizni a kísérlet állapotát, és 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, egymással nem kompatibilis szoftverrel működik, Magyarországon is öt ilyen rendszert ismerek.

A CERN-ről sok, közérdeklődésre is számot tartó érdekesség olvasható a CERN honlapján (<http://intranet.cern.ch/Public/>) és az 50. évforduló programjában (<http://intranet.cern.ch/Chronological/2004/CERN50/>).

Csatlakozásunk

A CERN-ben szinte megalapítása óta dolgoznak magyar kutatók, habár hazánk csak 1992-ben csatlakozott mint tagország. A kapcsolatot a dubnai Egyesített Atommagkutató Intézet biztosította: nemcsak felnevelt egy teljes magyar részecskefizikus-generációt, de lehetőséget is nyújtott arra, hogy Dubna költségén a CERN-ben dolgozhassunk. Amikor csatlakozásunk első lépéseként Göncz Árpád akkori államelnök a CERN-be látogatott 1991-ben, tizenöt éppen ott dolgozó hazánkfi fogadta a DELPHI-kísérlet előcsarnokában.

Óriási meglepetésünkre meg is kérdezte, hányan dolgoztunk előtte Dubnában, és jó néhányan jelentkeztünk. Igó-Kemenes Péter (Heidelbergi Egyetem), a látogatás helyi szervezője, előtte elektronikus körlevelet írt valamennyi ottani magyarnak, ismertette a programot azzal a megjegyzéssel, hogy rendes utcai ruhában (öltöny, nyakkendő) kérünk megjelenni. Megírtam neki, hogy legszebb farmeromat húzom majd fel, öltönyöm nem lévén (mérőberendezés építésére mentem ki). Válaszában felajánlotta, hogy ad kölcsön egyet, és figyelmeztetésemre, hogy két méter magas vagyok, visszaírta, hogy ő is; így ismerkedtünk meg. Aztán kiderült, hogy a nadrágja túl hosszú, így a zakója alá mégis az a farmer került. Miután a *Fizikai Szemle*-ben megjelent a tudósításom az elnöklátogatásról, Péter megjegyezte, nem gondolta volna, hogy a nadrágja bekerül a magyar tudományos köztudatba.

CERN-tagságunkat, érthető módon, a hazai kutatási körök némi ellenérzéssel fogadták. A részecskefizikai kutatások igen sokba kerülnek, és a magyar CERN-tagdíj, amely összemérhető egy kisebb hazai kutatóintézet teljes költségével, csak az infrastruktúra fenntartását hivatott fedezni, a kísérletekhez külön is hozzá kell a résztvevőknek járulniuk. Az intézet jelenleg a világ legnagyobb részecskefizikai laboratóriuma: mintegy 2800 főt foglalkoztat, és ezzel több mint 6000, a kísérletekben részt vevő kutatót szolgál. Ugyanakkor a CERN jelentősen hozzájárult, például, informatikai kultúránk fejlesztéséhez: belépésünkkel lehetővé tette, hogy a KFKI közvetlen telefonvonalon csatlakozzék a CERN számítógép-hálózatához, és évekig az biztosította Magyarország hálózati kapcsolatát a világgal.

A magyar ismeretterjesztő sajtó mindig komoly figyelmet szentelt a CERN-i kutatások magyar vonatkozásainak. 1994-ben a *Fizikai Szemle* különszámot szentelt a CERN fennállásának 40. évfordulójára (Fizikai

Szemle, 1994), és a *Természet Világának* is volt részecskefizikai különszáma (Mikrovilág, 2003), 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 annyi cikk érkezett, ami messze meghaladta egy szám terjedelmét, ezért a (Fizikai Szemle, 2003) megjelenése után csepegtetve hónapokig jelentek meg eredetileg oda szánt cikkek. A magyar elméleti részecskefizikusok CERN-i munkássága folyamatos és többé-kevésbé állandó szintű a kezdetek óta, kísérleti tevékenységünket azonban a csatlakozás igencsak megnövelte. Kezdetben csak a KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézete volt aktív kísérleti CERN-résztvevő: az RMKI kutatói részt vettek az Európai Műion-kollaborációban, majd a LEP L3-együtműködéséhez csatlakoztak, és abban végig aktívan részt vettek. Az L3-kísérlethez később a debreceni Kísérleti Fizikai Tanszék és az ATOMKI kutatói is csatlakoztak egy másik csoporttal. A magyar nehézionfizikusok kezdetől részt vettek az SPS NA-49 nehézion-kísérletében, és 1994-ben hoztuk létre a LEP OPAL (Omni-Purpose Apparatus at LEP)-kísérletéhez csatlakozó magyar csoportot. A LEAR-nél is működött két kisebb magyar csoport: a PS-197 (Crystal Barrel) és a PS-205 (Heliumtrap) együtműködésben. Jelenleg a legtöbb magyar részecskefizikus a CMS-kísérletben dolgozik, a nehézionfizikusok pedig az ALICE (A Large Ion Collider Experiment)- és CMS-kísérletekben érdekeltek. Kisebb csoportunk vesz részt az Antiproton-lassító ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons)-kísérletében.

A továbbiakban azokról a kísérletekről írok, amelyekben magam is tevékenykedtem. Ezekről az utóbbi tíz évben bőségesen írtam a *Fizikai Szemle*-ben, itt csak egészen kivonatossan említek egy-két dolgot.

1989-1996: Antiprotonfizika a LEAR-nél

Amikor 1989-ben véget ért alacsonyenergiás kaon-kísérletünk a brookhaveni AGS-gyorsítónál, és a vancouveri TRIUMF-ban (TRI-University Meson Facility) is vége felé közeledett atomfizikai kísérletsorozatunk, a gyerekeim közölték, többé nem óhajtanak külföldre menni (öt év Dubna és összesen három év Észak-Amerika után ez megbocsátható). 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, és azt egy anticiklotronnal próbáltuk elérni. Ez egyike volt – szerencsére elenyészően kevés – sikertelen kísérleteimnek. Négyéves munkával a következő derült ki:

- A CERN Alacsonyenergiás antiproton-gyűjtője, a LEAR (Low Energy Antiproton Ring) nem 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).
- A módszerünk, amellyel az antiproton és a proton gravitációs gyorsulását szándékoztuk mérni, elvérzik a kezdeti feltételeken: a szupravezető fémtiszta felületén elkerülhetetlenül megjelenő kis elektrosztatikus potenciálok hatása teljesen elfedi a gravitációt.
- Ugyanakkor maga az anticiklotron kiválóan működik, hiszen a villigeni Paul-Scherrer-Institut-ban sikerült vele műonokat lassítanunk, pedig a nyalábkarakterisztikájuk, rövid élettartamuk miatt az antiprotonokénál sokkal gyengébb volt.

Az *1. ábra* a CERN gyorsítókomplexumát szemlélteti 1996, azaz a LEAR működésének végéig. Bámulatos volt, ahogy a Proton-

szinkrotron mágnesei 14,4 másodpercenként végigvonultak a PS működésének valamennyi stádiumán: proton-, nehézion-, elektron- és pozitrongyorsítás, 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 Müncheneri Műszaki Egyetem kutatóiból álló PS-205 csoport barátom, Jamazaki Tosimitcu¹ 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 bekezdkezdenem, bár a két kezemen kívül mást nem tudtam szállítani. Amikor 1993 tavaszán csatlakoztam az előkészületekhez, elképesztő rendetlenséget 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 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 normálisan elhelyeznem. Azt viszont, hogy vissza is rakják, nemigen sikerült elérnem, úgyhogy a továbbiakban ha egy német vagy én megláttunk egy eldobott szerszámot vagy csavaros dobozt, visszavittük. Most már tizenegy éve használjuk az akkor feliratozott dobozokat és szekrényeket. A műszakok végén a szemét kivétel és a vizespoharak, kávésbögrék elmosását is mi csináltuk, ez – egyébként rendkívül kedves, művelt és dolgozó – ifjú japán kollégáinkban fel sem merült. Egyszer az éjszakai vonattal mentem mérni

¹ Toshimitsu Yamazaki néven publikál

Budapestről Genfbe. Reggel érkeztem a mérőszobába, és észbontó rendetlenséget találtam: mindenfelé félig megevett szendvicsek, összegyűrt papírszalvéták és koszos bögrék heverték az étkezősarokban. Döbönt arckifejezésemre a japán doktoranduszunk elmondta: azt hitték, csak este érkezem, előtte akartak rendet rakni (német éppen nem volt a mérésben). Ekkor jöttem rá, hogy a rendet valami európai mániának tekintik, amivel együtt kell élniük mifelénk.

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 nyalábja: az antiprotonok egyenként jöttek, megállásuk után vártunk 100 ns-ot, nem annihilálnak-e egy rövidéletű állapotból, és ha nem, indítottuk a lézereket. Mivel másodpercenként százat lőttünk velük, naponta kellett festéket cserélnünk, és excimer-tükröket tisztítanunk; a lézereink teljesen el is használódtak három év alatt.

A fordulat 1995-ben következett be. Révai Jánossal közösen szerveztünk egy kis konferenciát Balatonfüreden 1995 januárjában (Horváth, 1995), a befagyott tó mellett, és a PS-205-ös kísérlet résztvevőin kívül meghívtuk rá a témakör iránt érdeklődő elméleti kollégákat is. Ott Dimitar Bakalov Szófiából azt mondta, van egy barátja Dubnában, aki zseniális matematikus, és pontosan ki fogja tudni számolni nekünk az átmeneti energiákat. Valóban, a barát, Vlagyimir Korobov, pár hónap múlva küldött egy táblázatot, amelyben kiszámolt jó néhány átmenetet, és a két, már megmérttel a számításai 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-mel különböznek a mért értékektől, mégpedig mindig ugyanabban az irányban; ettől a mérésünk egy nagyságrendet gyorsult, az átmeneteket nem kellett keresnünk, csak tanulmányoznunk. Amikor Korobov megérkezett, hatalmas üdvölgéssel fogadtuk, és nem értettük, miért olyan csalódott a különbség miatt. Azóta persze megtalálta az okát, és az elmúlt tíz évben négy nagyságrendet javított a számításai pontosságán, a versenytársai (a Tohoku Egyetem egy csoportja kivételével) mind feladták.

1999-ben jöttünk rá arra, hogy ha az általunk meghatározott antiproton-átmenetek frekvenciáit egybevetjük a proton tömegét és töltését feltételező számításokkal, valamint a harvardi Gerald Gabrielse ciklotron-frekvenciás antiproton-méréseivel, be tudjuk határozni az antiproton és a proton tömegének és töltésének lehetséges különbségét. Ez az anyag és antianyag szimmetriáját feltételező CPT-invariancia elvének 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). Ennek következtében egy antirészecske matematikailag térben és időben ellenkező irányban haladó részecskeként írható le. A CPT-szimmetria annyira alapvető, hogy az alternatív modellek kidolgozóinak valóságos elméleti bukásukat kell végeznünk, hogy csak egy kicsit is sértsék.

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 PS-205-ös kísérlet folyamán állítottam be egyéni

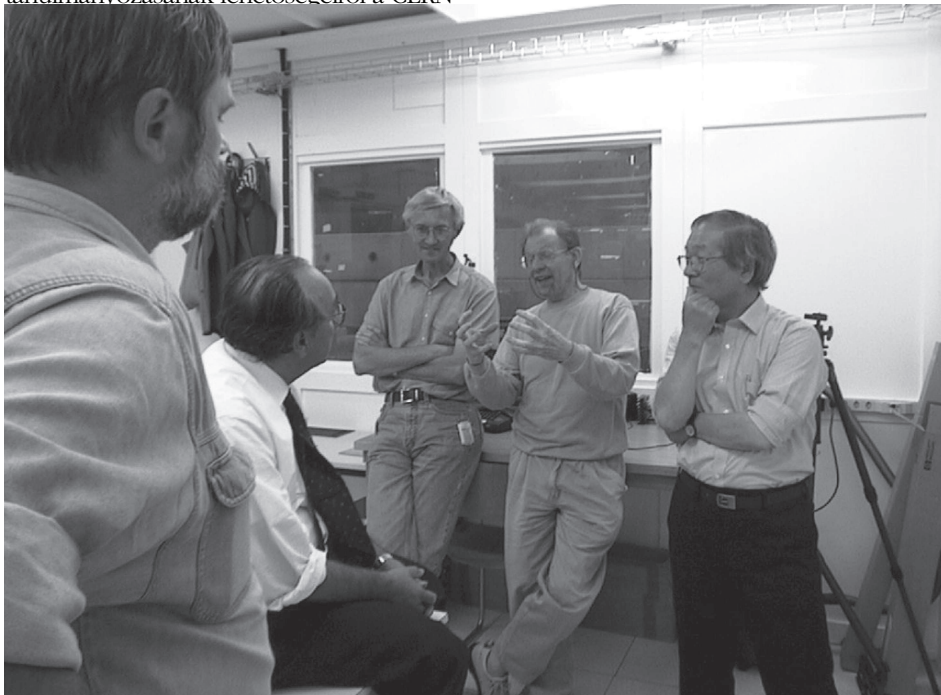
rekordomat negyvenhat egymást követő, éjszakai műszakkal. Azt, hogy milyen kicsi a világ, jól mutatja, hogy a bostoni csoport, amellyel Brookhavenben dolgoztam együtt, a szomszédos CP-LEAR kísérletben vett részt, a Crystal Barrel LEAR-kísérletben pedig a magyar csoporton kívül több vancouveri kollégám is dolgozott.

Az Antiproton-lassító (AD)

A CERN részecskefizikai laboratórium, az atomfizikának elhanyagolható nála a prioritása. A CERN már a 90-es évek elején tervbe vette a LEAR végleges leállítását, és amikor 1996-ban a LEAR-nél működő három nagy részecskefizikai együttműködés befejezte az adatgyűjtést, az be is következett. A LEAR-nél dolgozó atomfizikusok ebbe nem törődtek bele: 1992-ben összeállítottunk egy tanulmánytervet az antihidrogén-atom tanulmányozásának lehetőségeiről a CERN

tudományos bizottságai számára, majd azt jelentősen kibővítve publikáltuk is (Charlton, 1994). A gyorsítófizikusok kitaró munkáján és négy ország (Japán, Németország, Olaszország és Dánia) célzott anyagi támogatásán kívül a cikkünk is hozzájárult ahhoz, hogy 1999 végére elkészült az Antiproton-lassító három kísérlettel a CPT-invariancia ellenőrzésére. Magam kettőben is benne voltam: a PS-205-ös folytatásaként meghirdetett ASACUSA-ban és az antihidrogénes ATHENA-ban, de az utóbbiból később kiszálltam.

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



3. ábra • CPT-vita az ASACUSA-nál. Balról jobbra: Vlagyimir Korobov (Dubna), Luciano Maiani (CERN), Horváth Dezső (RMKI), John Eades (CERN), Jamazaki Tosimitcu (Tokió).

lassú antiprotonok fékezőképességét méri, a Tokiói Egyetem Komaba-kampuszáról Yamazaki Jaszunori² csoportja pedig egészen lassú antiproton-nyalábot készített elektromágneses csapdában való befogással. A spektroszkópiai témában a Tokiói Egyetem Hongo-kampuszáról Hajano Rjugo³ csoportja dominált, részt vett rajtuk kívül két CERN-munkatárs és egyidejűleg általában két-három magyar is. A kísérlet előkészületei során megszületett két debreceni diplomamunka, majd 2004-ben egy doktori dolgozat. A mérőberendezéshez csoportunk a különböző részegységek pozicionáló állványainak megépítésével járult hozzá, azokat Zalán Péter (RMKI) tervezte.

Az AD (Antiproton Decelerator) 1999-es indulása óta folyamatosan javítjuk a spektroszkópiai módszerünket, ebben Hori Maszaki⁴ játssza a főszerepet. Ez jól nyomon követhető a kétévenként megjelenő *Review of Particle Physics* kiadásában: az antiproton tömegének és töltésének a protonétól való lehetséges eltérését kizárólag mi mérjük, az 1999-ben publikált eredményünk 5×10^{-7} -es relatív különbséget engedett meg, a 2001-es 6×10^{-8} -at, a 2003-as pedig $1,0 \times 10^{-8}$ -at.

Érdekes volt vitánk a CERN korábbi főigazgatójával, Luciano Maianival. 2001-ben meglátogatta a kísérletünket,⁵ és közölte, nem érti, minek vessződünk vele, hiszen (1) az elektromos töltés kvantált; (2) az anyag semlegességéből az elektron és a proton töltése 10^{21} pontossággal egyezik; és (3) a $q(p)/m(p) = q(p)/m(p)$ egyenlőségét igen pontosan mérték. A 3. ábrán éppen az ellenkezőjéről próbáljuk meggyőzni; ez hozzájárulhatott ahhoz, hogy később főigazgatói beszámolóiban a 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, természetesen, a $2S-1S$ átmenet energiájának összehasonlítása kétfotonos spektroszkópiával hidrogénben és antihidrogénben, de addig még hosszú és rögzös az út: ahhoz 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-tesztet ad.

Részvételünk az OPAL-együttműködésben

A CERN LEP gyorsítója 1989-től 2000 végéig működött; a világ legnagyobb gyorsítóberendezése volt: 100 méter mélyen a föld felszíne alatt fekvő alagútja 26,7 km hosszú. Négy óriási (tipikusan 10 méter hosszú és 10 méter átmérőjű, hengeres) detektor (ALEPH [Apparatus for LEP Physics], DELPHI, L3 és OPAL) figyelte az egymással szemben keringő elektronok és pozitronok négy ütközési pontjában keletkező részecskéket. A detektorok egymáshoz igen hasonló felépítéssel rendelkeztek, három funkcionálisan megkülönböztetett részük volt, koncentrikusan egymásba építve. A nyalábvezeték körül a töltött részecskék pályáját nyomon követő 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 közönséggel. A múlt idő nem

² Yasunori Yamazaki néven publikál

³ Ryugo Hayano néven publikál

⁴ Masaki Hori néven publikál

⁵ Pályafutásom során jónéhány kutatóintézetet megjár-tam világszerte, és csak három olyan igazgatóval talál-koztam, aki látogatta az intézetében folyó kísérleteket.

véletlen: 2000-ben szétszerelték és részben elszállították, részben megsemmisítették, a felszabadult ócskavas ára fedezte az elektronika megsemmisítésének árát (a nyomtatott áramkör veszélyes hulladék).

Csoportunk éppen tíz éve csatlakozott az OPAL-együtműködéshez, négy fővel kezdtük, és fénykorunkban tizenegyen voltunk. Kezdetben csak a Higgs-keresésben vettünk részt, 1997-ben azonban témakörünk kibővült a kvantumszindinamika ellenőrzésével, majd 1999-ben a fotonfizikával, és azóta az lett egyik fő tevékenységünk. A tíz év alatt a csoportunkban két doktori és három diplomamunka született, további két diploma- és egy PhD-munka még készül.

Az OPAL volt a legkisebb LEP-együtműködés, csatlakozásunk idején, 1995-ben, a cikkeinken 330 szerző szerepelt kilenc ország harmincnégy intézményéből, szemben a legnagyobb DELPHI-együtműködés 550 szerzőjével. A 330 soknak tűnhet szerzőnek, de a detektor üzemeltetése állandó nehézségekkel küszködött, mert annak a 150 kollegának, aki ketyegtetette, a LEP működése alatt állandóan a CERN-ben kellett lennie. Amikor az OPAL csoportvezetőinek előadtam a létrehozandó magyar csoport tervét, az első kérdésük az volt, hány embert tudunk majd a CERN-ben állomásoztatni, ahogyan a többi csoport. A válasz, természetesen, az volt, hogy egyet sem, mert egy ember ott állomásoztatása a járulékokkal együtt mintegy hatmillió forintba került volna évente, annyi pályázati pénze pedig nálunk senkinek nincs. Nekünk már a detektor közös költségeihez való, fejenként és évente egymillió forintos hozzájárulás is megoldhatatlan terhet jelentett, ezért a kvótánkat a negyedére szállították le. Mindezt a nagyvonalúságot az tette lehetővé, hogy a többi csoport gazdag országokból jött, mi voltunk egyedül kelet-európaiak.

A LEP mintegy fél évet működött évente, és ez alatt általában hárman felügyeltük a mérőrendszert a föld alatt száz méterre levő

mérőszobában. Egyszer éppen ügyeletes voltam, amikor áramkimaradás miatt minden leállt. Harminc telefonszámot kellett felhívunk, hogy az egyes detektorelemek szakemberei megjelenjenek, feltámasztani az egységüket. Ez Murphy törvényének megfelelően szombatról vasárnapra virradó éjjel, kettőkor történt, és mire az utolsó áldozatokat keltettem, az elsők már befutottak. Senki sem volt morózus, remek hangulatban vártuk az akkumulátoros vészlámpák félhomályában, hogy visszajöjjen a villany. Egy órával azután, hogy visszakaptuk az elektromos hálózatot, a rendszer működött, pedig több egység tönkrement, és cserére szorult. Ez persze csak úgy működhetett, hogy az alegységeknek mobiltelefonjai voltak, amelyeket felváltva hordoztunk. Egyszer éppen én hurcoltam egy ilyen telefont, és hegymászás közben magyaráztam el az ügyeletesnek, hogyan kell az aldetektorom nagyfeszültségét visszaállítani.

Higgs-keresés az OPAL-nál

A Higgs-mechanizmus lényege a spontán szimmetriasértés: a szabadon mozgó részecskék állapotfüggvényéhez hozzáadunk egy több- (de legalább négy-) komponensű teret, mintha abban mozognának a vákuum helyett. Ez a Higgs-ter sérti a vákuum természetes szimmetriáját, mert a minimális energiája nem zérusban van, hanem valamilyen véges értéknél. Ettől a gyenge kölcsönhatást közvetítő (egyébként elméletileg 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 rendbehoz olyan elméleti nehézségeket, amelyek egyébként lehe-

telenné teszik a gyenge kölcsönhatással kapcsolatos számításokat.

A Higgs-mechanizmus legfontosabb bizonyítéka a Standard Modellel végzett számítások hihetetlenül pontos egyezése a kísérleti adatokkal, de a Standard Modelnek – elméleti jellegű belső nehézségei miatt – számos általánosítása, kiterjesztése született. A legfontosabb ilyen kiterjesztés a Szuperszimmetrikus Standard Modell, amely feltételezi, hogy az alapvető részecskék fermion-bozon párokban fordulnak elő, és ehhez nyolckomponensű Higgs-teret használ. A nyolc térből három megint a gyenge bozonokra fordítódik, 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-kísérlet Igó-Kemenes Péter vezetésével munkacsoportot alakított a Higgs-keresés eredményeinek összegzésére. Megdöbbentő módon 2000 folyamán az ALEPH-együtműködés szignifikáns Higgs-jelét látott, amíg a másik három eredménye a Standard Modellel számított háttérhez közeli volt. Az ALEPH Higgs-jele statisztikailag annyira szignifikáns volt 2000 nyarán abban a csatornában, ahol a Higgs-bozon egy Z-vel együtt keletkezik, és mindketten két-két kvarkra, azaz összesen négy hadronzáporra bomlanak, hogy a kísérletezők nagy része azt szerette volna, ha a LEP működését a CERN egy évvel meghosszabbítja. 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 kinematikai határ környékén pedig az adatanalízis

már eléggé bizonytalan. Másrészt az ALEPH-együtműködés már 1995-ben bejelentett egy új részecskét 4-hadronzáporos eseményekben, amelyet a többi kísérlet nem látott, s 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 konfidencia mellett 114,4 GeV/c tömegig kizárják a Standard Modell Higgs-bozonjának létezését; csak háttérrel feltételezve a pusztaszimuláció 115,3 GeV/c-es határt jelezne.

A töltött Higgs-bozon

Mint említettem, a Standard Modell kiterjesztései két Higgs-dublett teret feltételezve öt Higgs-bozont jeleznek, amelyek közül kettő töltött. A LEP-energiáknál feltételezhetően párban keletkeznek, 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.

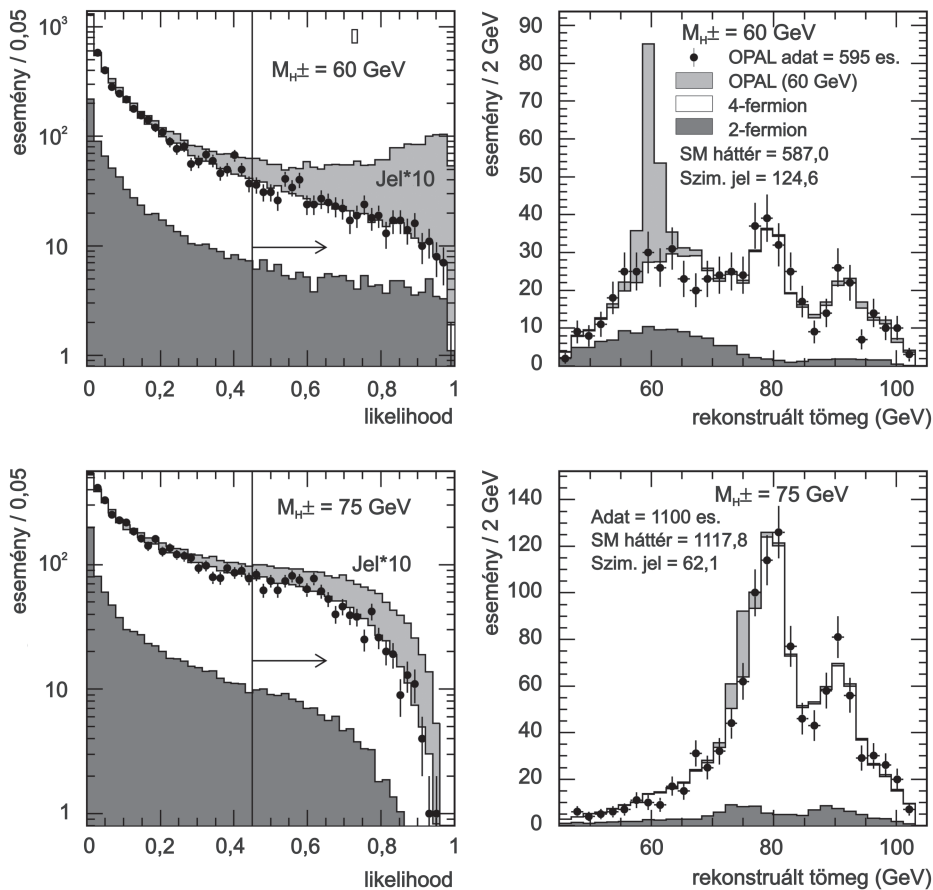
A töltött Higgs-bozon OPAL-keresésében csatlakozásunk óta erős a magyar részvétel, a tiszta leptonos csatorna analízisén kívül valamennyi lépést csoportunk végezte, a csatornák statisztikus kombinációjával egyetemben.

A 4. ábra a töltött Higgs-bozon tömegére tett két különböző feltételezés mellett mutatja az OPAL-adatok analízisét. Vegyük észre, milyen kiválóan egyezik a szimuláció előjelzése a mért háttérrel. Az utóbbi természetesen tömegről tömegre különböző, hiszen más tömegű keresett részecskére másféle eseményeket fogunk nagyobb jel-valószínűségűnek találni. Az ábrából az is látszik, miért van szükségünk statisztikus módszerekre: a 60 GeV/c tömegű részecskét nyilvánvalóan kizárják a hadronos kísérleti adatok, a 75 GeV/c-eset viszont ez a csatorna önmagában nem.

Várt események nem-észlelése esetén legfőbb eszközünk a statisztikus analízisből kapható konfidenciaszint. Az utóbbit egyáltalán nem magától értetődő meghatározni, mert ha modellfüggetlen eredményt várunk, nem tudjuk előre a csatornák megoszlását, tehát a statisztikus kombinációt az összes lehetséges elágazási arányra és feltételezhető Higgs-tömegre ki kell számítani, és azután a legrosszabb eset

adja a csatornafüggetlen határt tömegre és keletkezési valószínűségekre. Az 5. ábrán látható, hogy a hadronos és a vegyes csatorna dominanciája környékén a kombinált tömeghatár 75,5 GeV/c, amíg a leptonos csatorna járulékanak növekedésével eléri a 90 GeV/c/-et, a mért tömeghatár tehát 75,5 GeV/c. Ez az eredményünk még nem végleges, de hamarosan véglegesítjük.

OPAL: $H^+ H^- \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}$, 189 – GeV



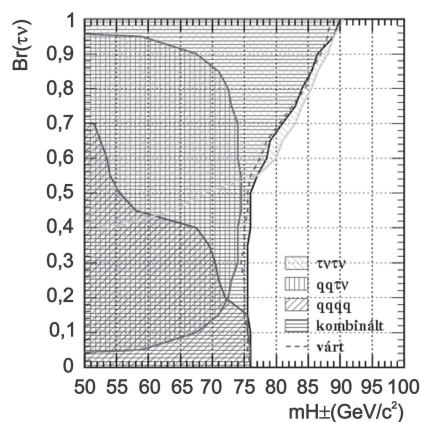
4. ábra • Töltött Higgs-bozon keresése a négykvarkos csatornában (előzetes OPAL-eredmény). Az analízist valamennyi LEP-energiára és lehetséges Higgs-tömegre elvégeztük, az ábra 60 és 75 GeV/c² tömegűnek feltételezett részecskékre mutatja az események várható és észlelt számát: baloldalt az adatok jelszerűségét jellemző valószínűség (likelihood), jobboldalt pedig a rekonstruált tömeg függvényében (Horváth, 2003).

Új részecskék keresése az LHC-nál

A Nagy hadron-ütköztetőnél, az LHC-gyorsítónál is négy ütközési pont lesz négy kaloriméterrel (2. ábra), egy univerzális, a CMS (Compact Muon Solenoid), amelyben a magyar kísérletezők zöme, csaknem valamennyi részecskefizikus és több nehézionfizikus dolgozik, egy nehézionfizikai, az ALICE (A Large Ion Collider Experiment) szintén számos magyar résztvevővel, és két részecskefizikai, az ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus) egy kisebb magyar csoporttal és az LHCb (LHC beauty experiment).

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

Rendkívüli feladatot jelent majd a CMS-események tárolása és analízise. Az LHC-ban 25 ns-onként fognak a protoncsomagok ütközni, ütközésenként 10-15 p-p kölcsönhatást produkálva, és az összetett hadronokból csak egy-egy kvark ütközéséből várható fizikailag érdekes esemény (remélhetőleg Higgs-bozon keletkezése!), 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 tárolni és analizálni majd. 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 üzemelteti. Meg kell jegyezni, hogy népes magyar informatikusgárda vesz részt a CERN-i fejlesztőmunkában. A detektorszimulációs



5. ábra • A töltött Higgs-bozon kizárása: A három keresési csatoma által kizárt tömeg – elágazási arány régió, a kombinált esetre a statisztika alapján várt határ is (Horváth, 2003).

szoftver (GEANT 4) fejlesztése is jelentős nemzetközi együttműködés, abban Urbán László (RMKI) vesz sok éve részt.

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

A szerző köszönettel tartozik a közös publikációkban szereplő (és nem szereplő) kollégáinak, akik nélkül semmi sem valósult volna meg a leírtakból, a CERN-nek és a Tokiói Egyetemnek, valamint az OPAL és ASACUSA kísérletek résztvevőinek a tízéves kellemes és eredményes együttműködésért, és amiért a különböző pályázatok (legutóbb az OTKA T042864 és T046095, TÉT JAP-4/00 és FP6 MC-ToK 509252) támogatásával is igen szegény magyarokat befogadták és anyagilag is támogatták.

Kulcsszavak: CERN, részecskefizika, részecskegyorsító, antiproton, Higgs-bozon, hadron-ütköztető, CPT-invariancia

IRODALOM

- A könnyebb elérés végett, s nem utolsósorban a CERN-bevezette világháló hasznosságát demonstrálandó, megadom irodalmi hivatkozásaim honlapját is, a Fizikai Szemlében megjelentek kivételével, azok egységes honlapja <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fszYYNN/tartYYNN.html> alakú, ahol YY az év utolsó két számjegye, NN pedig a sorszáma
- Charlton, Michael – Eades, J. – Horváth, D. – Hughes, R.J. – Zimmermann C. (1994): Antihydrogen Physics. *Physics Reports*, 241, 65–117. – <http://www.science-direct.com/science/journal/03701573>
- Csőrgő Tamás – Lévai Péter (2004): Egy ősi-új anyag kísérleti előállítása. *Magyar Tudomány*, 5, 619. <http://www.matud.iif.hu/04maj/14.html>
- Fizikai Szemle (1994): CERN-különszám. 4.
- Fizikai Szemle (2003): CERN-különszám. 10.
- Horváth Dezső (1995): Metastable Hadronic States in Helium. *Europhysics News*, 26, 57.
- Horváth Dezső (2003): Higgs-bozonok keresése az OPAL-együttműködésben. *Fizikai Szemle*, 4, 122;
- Search for Charged Higgs Bosons with the OPAL Detector at LEP. *Nuclear Physics A*, 721, 453c–456c.
- Krige, John (2004): I. I. Rabi and the Birth of CERN. *Physics Today*, 57/9 44 – <http://www.physicstoday.org/vol-57/iss-9/p44.html>
- Mikrovilág (2003): A Természet Világa különszáma. Bp., 2000 – <http://www.sulinet.hu/temeszetvilaga/>

