



Határátkelő a CERN-ben.

tunk, továbbmentünk. Így első alkalommal csak fél napot töltöttem a CERN-ben, amit azután csak évekkel később sikerült folytatni.

A vízumokkal továbbra is sok gond volt. Autóval volt a legolcsóbb kiutazni, ami jó 20 óras vezetést jelentett. Kelltek osztrák és nyugat-német átutazó vízum, svájci és francia tartózkodó vízum. Mindezeket vagy az Akadémia Nemzetközi Osztálya szerezte be nagyon lassan, vagy személyesen kellett a sorokat többször is végigállni. A francia vízum volt a legproblémásabb. Egyrészt

meg kellett mondani, hogy hol lép be az ember, s erre Genf közelében csak a ferney-voltaire-i átkelőt lehetett megadni. Ezt persze nem tartottuk be. A munka és a szállás miatt is gyakran át kellett menni Franciaországba. Szerencsére a CERN melletti átkelőnél ebből nem csináltak problémát. A másik gond az volt, hogy csak háromszori belépőt adtak. Ezt már nehezebb volt kijátszani. Egy egy-két hetes kinn tartózkodás esetén sem volt ez elegendő. Igyekeztünk olyankor menni, amikor éppen el voltak foglalva mással a határőrök, vagy kollégák kocsijával utazni. Egyes határátkelőhelyek éjszákára bezártak. Ilyenkor csak a helyiek mehettek volna át, de gyakran megkockáztattuk zárás után az áthaladást. Egyszer, amikor Annecy-ből jöttünk vissza kollégákkal, ahol az L3-együttműködés kapcsán voltunk, igyekeztünk olyankor érkezni, amikor már zárva lesz átkelő. Kicsit korán érkezünk. Már bezártak, de a határőr még a közelben volt. Direkt kinyitott, hogy bepecsételhesse mindenki útlevelébe, hogy egy belépés megtörtént.

A helyzet 1988 után kezdett drasztikusan javulni. Először csak Ausztriába nem kellett vízum, majd NSZK-ba és Svájcba sem, végül Franciaországba sem. Azóta minden alkalommal egy reveláció számomra, hogy útlevél sem kell, hanem személyi igazolvánnyal jöhetnek dolgozni a CERN-be.

AZ ATOMFIZIKÁTÓL A NAGYENERGIÁS FIZIKÁIG

Horváth Dezső
MTA Wigner FK RMI

Azokról a kísérletekről, amelyekben magam is tevékenykedtem, az utóbbi húsz évben bőségesen írtam a *Fizikai Szemlé*ben, a továbbiakban csak vázlatosan említem őket. Sajnos, ilyenkor óhatatlan, hogy ismétlésekbe bocsátkozzam, idősebb és jó emlékezőtehetségű, vagy a *Fizikai Szemle* archívumában turkáló kollégáimtól ezért előre elnézést kérek.

Antiproton-fizika a LEAR-nél

Ahogy annyi más magyar fizikus is, húsz éven át az RMKI áldásos toleranciája mellett külföldi támogatással vettem részt különböző részecskegyorsítóknál nemzetközi együttműködésekben: Dubnában és Gatsinában orosz, a TRIUMF-ban és Brookhavenben kanadai, a PSI-ben svájci és a CERN-ben kezdetben olasz, majd japán színekben.

Amikor 1989-ben véget ért alacsonyenergiás kaon-kísérletünk a brookhaveni AGS-gyorsítónál, és a van-couveri TRIUMF-ban is vége felé közeledett atomfizikai kísérletsorozatunk, a gyerekeim közölték, hogy többé nem óhajtanak külföldre menni (öt év Dubna és összesen három év Észak-Amerika után ez megbocsátható volt). Pár évig röpököttem Budapest és Észak-Amerika

között, majd európai kísérletek után néztem, hogy közelebb legyek, így csatlakoztam olasz támogatással 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, fordított üzemmódu szupravezető mini-gyorsítóval próbáltuk elérni. Ez egyike volt – szerencsére elenyészően kevés – sikertelen kísérleteimnek. Négyéves munkával kiderült, hogy a CERN Alacsonyenergiás antiproton-gyűrűje, a LEAR (Low Energy Antiproton Ring) nem alkalmas az anticiklotron számára szükséges, 72 MeV/c impulzusú nyaláb előállítására. Ráadásul módszerünk, amellyel az antiproton és a proton gravitációs gyorsulását szándékoztuk mérni, elvázelt a kezdeti feltételeken: a szimulációk szerint a szupravezető fémtizta felületén elkerülhetetlenül megjelenő kis elektrosztatikus potenciálok hatása teljesen elfedi a gravitációét. Ugyanakkor maga az anticiklotron azóta is kiválóan működik, hiszen a villigeni Paul-Scherrer-Institutban sikerült vele műonokat lassítanunk, pedig nyalábkarakterisztikájuk – rövid élettartamuk miatt – az antiprotonokénál sokkal gyengébb volt.

Évekig olasz fizikusokkal dolgoztam együtt, közben három évet töltve az olasz magfizikai intézet, az

INFN pisai szekciójában, ami hihetetlenül érdekes volt. Az olasz részecskefizikusok valószínűleg a legjobbak a világon, amit az is mutat, hogy messze többségben vannak a CERN kutatói között. Volt idő, amikor a négy LEP-kísérlet közül háromnak olasz vezetője volt, és egy periódusban mindkét óriási LHC-kísérletet, az ATLAS-t és a CMS-t is olasz fizikus vezette. Az olasz munkatársaimat rendkívül magas képzelőerő, találmányosság és munkabírási jellemzője jellemezte, viszont igencsak beszédesebbek voltak. Az olasz LEAR-kísérletnek én voltam a házmestere. Komoly erőfeszítésembe került, hogy rászoktassam őket a 8-órás műszakok betartására, mert nappal mindenki ott volt, aztán eltűnőztek. Az együttműködés vezetője, például, éjszakai műszakot vállalt, és rendkívül megsértődött, amikor egy este 8-kor közölte, hogy fáradt és hazamegy a szállóba, mire én rámutattam a műszakbeosztásra és mondtam, hogy akkor kezdődik a műszakja, nem mehet sehova. Egy doktoranduszunk meg, aki az adatgyűjtő programért volt felelős, akkor sértődött meg, amikor elküldtem a műszakja végén aludni, mondván, hogy az adatgyűjtés működik, ne nyúljon hozzá.

Rettenetes volt úgy dolgozni, hogy az ember mögött áll hat lelkes kolléga, akik érdeklődve kérdezősködnek, beleszólnak vagy egymással politizálnak. Ezt megakadályozandó, beszereztem egy nagy tárgyalóasztalt jónéhány székkel, kivettem a folyosóra, és az elektronikus barakkunk előtt a kőpadlóra vastag sárga szalagot ragasztottam, amelyre nyilak között angolul ráírtam: ha nem vagy műszakon, maradj ezen az oldalon. Ebből persze sok vicc lett, de a mérőhelyen jelentősen javult a légkör.

Olaszországi tartózkodásom mindennapjai is ropant érdekesek voltak. A tartózkodási engedély meg-



1. ábra. Légifelvétel a CERN környékéről az SPS- és LHC-gyűrűkkel és néhány kísérlettel.

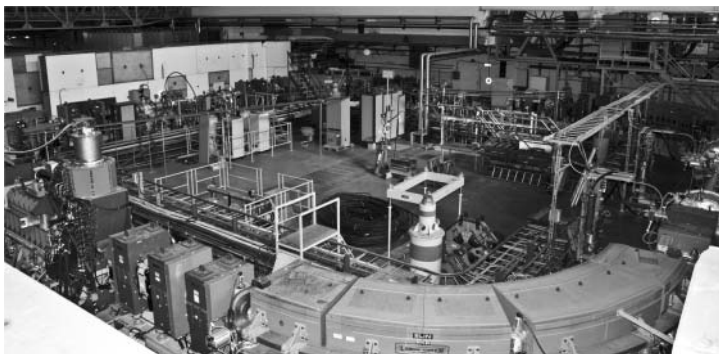
szerezése valamennyi általam ismert ország között ott volt a legbonyolultabb: nekem hat hétig tartott és háromszor kellett hozzá bemennem az idegenrendészeti hivatalba, a feleségemnek pedig egyáltalán nem voltak hajlandók kiadni, mondván, hogy menjen haza három hónaponként, addig meg maradhat vízum nélkül. Amikor én végre megkaptam, a hivatalban hatalmas zúrvar és tülekedés közben két dolog tűnt fel. A mellettem álló nigériai éppen aláírta egy főiskolába szóló diákengedélyét, három négyzetet rajzolva az aláírás helyére, és az ügyintéző hölgynek szemem sem rebbent, nyilván analfabétáknak szentelt főiskolára szólt a vízum. Ugyanakkor meg kinyílt egy addig zárva tartott oldalajtó és besétált rajta egy elegáns fiatalember három igen csinos és rendkívül kihívóan öltözött hölgygel: átvezették őket a tömegben egy másik helyiségbe és percek alatt megkapták az engedélyeket, gondolom, szintén valamilyen oktatási intézményhez.

Amikor lejárt a munkaszerződése, meg szerettem volna tudni, mi lesz a sorsa a nyugdíjjaruléknak, amelyet rendszeresen levontak a keresetemből. Bementem a nyugdíjintézetbe, ahol, miután több menetben megpróbáltam lerázni és máshova küldeni, végül hosszas te-

CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso)

Az SPS protonjai anyagba ütközve nagyenergiás pionnyalábot állítanak elő; a pionokat úgy irányítják, hogy a bomlásukból keletkező neutrínónyaláb a Rómától délre fekvő Gran Sasso föld alatti laboratóriumot vegye célba a földkérgen keresztül. Gran Sassóban több neutrínódetektor tanulmányozza a neutrínók egymásba alakulását. A képen az OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus) kísérlet észlelőrendszere látható Gran Sassóban.





LEAR (Low Energy Antiproton Ring)

A CERN Alacsonyenergiás antiproton-gyűrűje, 1989 és 1996 között működött. Számos kísérletet látott el gyors vagy lassú antiprotonokkal, többek között ott fedezték fel az antiproton és pozitron kötött állapotát, az antihidrogén-atomot. Két LEAR-en végzett kísérletnél dolgozott magyar csoport az MTA Központi Fizikai Kutatóintézetéből: a Crystal Barrel mezonspektroszkópiái, valamint a PS-205 atomfizikai együttműködésnél.

lefonálgatás után előkerítettek valakit, aki bejött a munkaidő alatt egyébként teljesen néptelen hivatalba és tudott válaszolni a kérdéseimre. Megkérdezte, mire számítok, mondtam, hogy Amerikában és Németországban megkapjuk a befizetett összeget. Ezután megkérdezte, mi van Magyarországon, közöltem (1994), hogy beleolvad a nagy közösbe, mire azt mondta: „Na látja, ugyanez történik itt is, de Olaszországban még évente meg is változtatjuk a nyugdíjtörvényt!”

A fenti kísérlet vége felé kezdett dolgozni a LEAR-nél a Tokiói Egyetem és a Münchener Műszaki Egyetem kutatóiból álló PS-205 csoport régi barátom, *Jamazaki Tosimicu* (angolul persze *Toshibitsyu Yamazaki*) vezetésével: céljuk a hosszú élettartamú antiprotonos héliumatom (egy antiprotonból, egy elektrontól és a héliumatommagból álló kötött állapot) spektroszkópiái tanulmányozása volt.

Előéletem miatt viszonylag könnyű volt bekéredzkednem, bár a két kezemen kívül mást nem tudtam szállítani, a költségeimet – és később a magyar diákokét is – a Tokiói Egyetemről *Hajano Rjugo* (*Ryugo Hayano*) csoportja állta. Amikor 1993 tavaszán csatlakoztam az előkészületekhez, elképesztő rendetlenséget találtam: óriási meglepetésemre kiderült, amit azóta Tokióban is tapasztaltam, hogy a japán fizikusok gyakran nemigen törődnek a 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, nehezen sikerült elérnem, úgyhogy a továbbiakban, ha egy német vagy én megláttunk egy eldobott szerszámot vagy csavaros dobozt, visszavittük a helyére. Most már csaknem húsz éve használjuk az akkor feliratozott dobozokat és szekrényeket (igaz, a dobozokban többnyire más dolgok vannak). A műszakok végén a szemét kivitelét és a vizespoharak, kávésbögrék elmosását is mi csináltuk, ez – egyébként rendkívül kedves, művelt és dolgos – ifjú japán kollégáinkban fel sem merült. Egyszer az éjszakai vonattal (akkor éppen az volt a legolcsóbb, most az EasyJet az) mentem mérni Budapestről Genf-

be. Reggel érkeztem a mérőszobába, és észbontó rendetlenséget találtam: mindenfelé félig megevett szendvicsek, összegyűrt papírszalvéták és koszos bögrék heverték az étkezősarokban (nem melleleg egy olyan mérőhelyen, ahol tilos volt étkezni!). Döbönt arckifejezésemre a japán doktoranduszunk elmondta: azt hiték, csak este érkezem, előtte akartak rendet rakni (német éppen nem volt a mérésben). Ekkor jöttem rá, hogy a rendcsinálást valami európai mániának tekintik, amivel együtt kell élniük mifelénk. Évekkel később az új japán diplomamunkásunk vákuumalkatrészeket keresvén az egyik szekrényt kipakolta a padlóra. Amikor néhány órával később szóltam neki, hogy jó lenne visszapakolnia, annyira megdöbönt, hogy elrohant a témavezetőjéhez rákérdezni, hogy ilyenkor mi a teendő. A tájékoztatás után persze visszapakolt.

Akkor értettem meg, amikor Tokióban dolgoztam, hogy a japánok nem nyúlnak más tulajdonához, tehát náluk nem kell semmit elzárni. Ugyanakkor viszont Brookhavenben, Dubnában és a CERN-ben minden mozdíthatót ellopnak. Ebből a szempontból magasan a CERN a legrosszabb: az egyik karácsonyi leállás alatt behatoltak a barakkunkba és minden PC-ből kiszedték a memóriát, eltűnt a leláncolt és egyébként addigra tönkrement csoportbiciklik és az étteremben annyi kabátot loptak el, hogy a CERN egyszerűen megszüntette az étterem melletti ruhatárakat, be kell vinnünk télen a kabátokat és a székünk háttámlájára tennünk.

Antiprotonos héliumatomokon lézerspektroszkópiát végeztünk és így mértük az antiproton tömegét, azóta is ez az egyetlen módja a pontos tömegmérésnek. 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 rövid életű állapotból, és ha nem, indítottuk a lézereket. Mivel másodpercenként százat lőtünk velük, naponta kellett festéket cserélnünk és excimer-tükröket tisztítanunk; lézereink négy év alatt teljesen el is használódtak. A festékcserérettenes munka volt, a lézerekben levő öt liter festék nem fért

el a nekik szánt négy literes tartályban, tehát mind a leeresztés, mind a feltöltés nagyon óvatosan, két menetben történt. Az óvatosság igencsak indokolt volt, ugyanis ahová az a festék rácsöppent, ott eltávolíthatatlan folt lett, a festékcseréhez tehát teljesen át kellett öltöznünk.

A fordulat 1995-ben következett be. *Révai Jánossal* közösen szerveztünk egy kis konferenciát Balatonfüreden 1995 januárjában, 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 tudja majd számolni nekünk az átmeneti energiákat. Valóban, a barát, *Vlagyimir Korobov* pár hónap múlva küldött egy táblázatot, amelyben kiszámolt jó néhány átmenetet, és a számításai a két, már megmérttel jól egyeztek. Ilyenkor persze a kísérleti fizikus illesztésre gyanakszik, ezért megköszöntük, de nem voltunk különösebben oda érte, amíg el nem kezdünk mérni: akkor ugyanis kiderült, hogy a számítások mindössze 50 ppm-mel különböznek a mért értékektől, mégpedig mindig ugyanabban az irányban; ettől 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 számításai pontosságán, versenytársai (a Tohoku Egyetem egy csoportja kivételével) mind feladták.

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 olyan

kor kevés a személyes és telefonos szurkoló, akik nincsenek ugyan műszakon, de azért érdeklő 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

A CERN részecskefizikai laboratórium, az atomfizika prioritása elhanyagolható. 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: a cikknek öt szerzője volt öt különböző országból. A gyorsító-fizikusok kitartó munkáján és négy ország (Japán, Németország, Olaszország és Dánia) célzott anyagi támogatásán kívül e cikkünk is hozzájárult ahhoz, hogy 1999 végére elkészült az Antiproton-lassító (Antiproton Decelerator, AD) 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,

AD (Antiproton Decelerator)

A CERN antiproton-lassító berendezése. A Proton-szinkrotron nyalábjának irídium-céltárgyba ütköztetésével gyors antiprotonokat állítanak elő, és azokat több lépésben lelassítják, hogy elektromágneses csapdában vagy ritka gázban be lehessen fogatni őket. Célja az antiproton tulajdonságainak tanulmányozásával az anyag és antianyag egyenértékűségét kimondó CPT (töltés-, tér- és időtükrözési) szimmetria kísérleti ellenőrzése. Főbb kísérletei az ALPHA (Antimatter Laser Physics Apparatus), az ASACUSA (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons), az ATRAP (Antimatter TRAP) és az AEGIS (Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy). Magyar csoport az ASACUSA-ban működik. A képen az AD mérőcsarnoka látható három kísérlet éppen ott levő résztvevőivel.





2. ábra. Barna Dániel és Sótér Anna az ASACUSA-kísérletben.

tekintettel a domináns japán hozzájárulásra, az Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons kezdőbetűiből. Három független kísérlet tartalmaz három csoporttal. Az Aarhushi Egyetem csoportja *Helge Knudsen* vezetésével lassú antiprotonok fékezőképességét méri, a Tokiói Egyetem Komaba-kampuszáról *Jamazaki Jaszunori* (*Yasunori Yamazaki*) csoportja pedig egészen lassú antiprotonnyalábot készített elektromágneses csapdában való befogással. A spektroszkópiai témában a Tokiói Egyetem Hongo-kampuszáról *Hajano Rjugo* csoportja dominált, részt vett rajtuk kívül két CERN-i munkatárs és egyidejűleg általában két-három magyar is. A kísérlet előkészületei során megszületett két debreceni diplomamunka (*Jubász Bertalan* és *Ujvári Balázs*), 2004-ben Juhász Bertalan doktori dolgozata és 2010-ben *Sótér Anna* (ELTE) diplomamunkája. *Barna Dániel*, miután PhD-t szerzett az NA-49 kísérletnél, az RMKI (most Wigner FK) munkatársaként, de a Tokiói Egyetem támogatásával 8 éve a CERN-ben dolgozik az ASACUSA-kísérletben. A mérőberendezéshez csoportunk a különböző részegységek pozicionáló állványainak megépítésével járult hozzá, azokat *Zalán Péter* (RMKI) tervezte.

Az AD 1999-es indulása óta folyamatosan javítjuk a spektroszkópiai módszerünket, ebben *Hori Maszaki* játssza a főszerepet. Ez jól nyomon követhető a két-évenként megjelenő *Review of Particle Physics* kiadásaiban: az antiproton tömegének és töltésének a protonétól való lehetséges eltérését kizárólag mi mérjük, és két-három évente egy nagyságrendet tudunk javítani a pontosságon; az most már a proton tömegmeghatározásának pontosságát közelíti.

Érdekes volt vitánk a CERN egyik korábbi főigazgatójával, *Luciano Maianival*. 2001-ben meglátogatta 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 a méréssel, hiszen (1) a elektromos töltés kvantált; (2) az anyag semlegességéből az elektron és a proton töltése hallatlan pontossággal egyezik; és (3) a töltés/tömeg arány egyenlőségét igen pontosan mérték protonra és antiprotonra. A 3. ábrán éppen az ellenkezőjéről próbáljuk meggyőzni; ez



3. ábra. Vita a CERN főigazgatójával. Balról jobbra: Vlagyimír Korobov, Luciano Maiani, HD, John Eades és Jamazaki Tosimicu.

hozzájárulhatott ahhoz, hogy később főigazgatói beszámolóiban a mérésünket a CERN kiemelkedő eredményei között emlegesse.

Sok éves munkával nekünk sikerült a legtöbb antiproton csapdáznunk és hidegen csapdában tárolnunk, sőt ki is vezetnünk a csapdából. Ezt a fejlesztő munkát *Jamazaki Jaszunori* csoportja végezte a Tokiói Egyetemről és a Tokió melletti RIKEN intézetből, együttműködésben, természetesen a másik tokiói csoporttal és velünk. Az antiprotonokat először egy utólassítóban az AD 6 MeV-éről 100 keV körüli energiára lassítjuk. Ez egy rádiófrekvenciás mikrohullámú rezonátor, lényegében lineáris gyorsító ellenkező irányban működtetve. Onnan belépnek az elektromágneses csapdába, ahol elektronok hűtik őket, majd kivezetik a kölcsönhatási térfogatba, ahol, például, anti-hidrogén-atomokat formálnak lassú pozitronokkal. Ezt a berendezést *MUSASHI*-nak neveztük el (Mono-

4. ábra. Mijamoto Muszasi, önarckép, 1640 körül.



energetic Ultra Slow Antiproton Source for High-precision Investigations) és mi, magyarok precíziós mozgatóállványok készítésével járultunk hozzá (*Zalán Péter* művei). A *MUSASHI* nevet *Jaszunorival* együtt ketten ötlöttük ki. *Mijamoto Muszasi* Japán történetének leghíresebb samurája volt, ifjú korában sok híres japán kardvívót kihívott és legyőzött párbajban, iskolákat alapított, majd idősebb korában írt két máig híres könyvet a harc filozófiájáról és 61 évesen, betegségben hunyt el. Az életéről szóló öt kötetes könyv magyarul is több kiadást ért meg.

Részvételünk az OPAL-együtműködésben

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, 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 követte nyomon a belső detektor, ezt a különböző részecskék teljes energiáját elnyelő/mérő kaloriméterek vették körül, majd a műonkamrák következtek, a gyors müonokat 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 véletlen: 2000-ben szétszerelték és részben elszállították, részben megsemmisítették, a felszabadult ócskavas ára fedezte a több szobányi elektronika megsemmisítésének árát (a nyomtatott áramkör veszélyes hulladék).

Budapesti és debreceni kutatókból álló csoportunk 1994-ben csatlakozott az OPAL (Omni-Purpose Apparatus for LEP) együtműködéshez; három fővel (*Pálinkás József, Hajdu Csaba* és jómagam) kezdtük és fénykorunkban tizenegyen voltunk. Megalakulásunk történetét *Igó-Kemenes Péter* írja le a *Fizikai Szemle* ugyan ezen számában. Kezdetben csak a Higgs-keresésben vettünk részt, 1997-ben azonban hála *Trócsányi Zoltán*nak témakörünk kibővült a kvantum-szindinamika ellenőrzésével, majd 1999-ben *Csilling Ákos*, aki az L3-ból jött át, hozta hozzánk a fotonfizikát. A tíz év alatt csoportunkban négy PhD-disszertáció és öt diplomamunka született a Debreceni és az Eötvös Egyetemen, valamint a BME-n (*Pásztor Gabriella, Dienes Beatrix, Vértesi Róbert, Hudácskó Attila, Patay Gergely, ifj. Krasznaborkay Attila* és Ujvári Balázs).

Az OPAL volt a legkisebb LEP-együtműködés csatlakozásunk idején, 1995-ben, a cikkeinken 330 szerző szerepelt kilenc ország harmincnégy intézményéből,



5. ábra. Az OPAL-detektor a LEP barlangjában. Az elektronikus barakkok szemben és kétoldalt közvetlenül érintkeznek a detektorrendszerrel, de eltávolíthatók a detektor javításához.

szemben a legnagyobb DELPHI együtműködés 550 szerzőjével. A 330 soknak tűnhet szerzőnek, de a detektor üzemeltetése állandó nehézségekkel küszködött, mert annak a 150 kollégának, 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 nem volt. Nekünk már a detektor közös költségeihez való, fejenként és évente egymillió forintos hozzájárulás is megoldhatatlan terhet jelentett, ezért kvótánkat a negyedére szállították le. Mindezt a nagyvonalúságot az tette lehetővé, hogy a többi csoport gazdag országokból jött, mi voltunk egyedül kelet-európaiak. Az is segített, hogy az OPAL volt a fiatalok között a legnépszerűbb LEP-kísérlet, volt olyan év, hogy a CERN újonnan felvett posztdoktorális ösztöndíjasai közül 80% hozzánk csatlakozott. Még ma is, 12 évvel a detektor leszerelése után, gyakran találunk ürügyet arra, hogy összejöjjünk a CERN-ben.

Mi magyarok, a többi csoportnál kevésbé tudunk részt venni a detektor üzemeltetésében, habár én ma-

NA35, NA49 és NA61

Egymást követő és egymásból kifejlődő nehézion-kísérletek a CERN SPS-gyorsítójánál, jelentős magyar részvétellel, főként az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontjából és az Eötvös Loránd Tudományegyetemről. Magyar kutatók több detektoregységet is építettek az NA49-hez és NA61-hez, és jelentős volt részvételük az adatgyűjtő rendszer megépítésében és üzemeltetésében. Habár közvetlenül megfigyelniük nem sikerült, közel kerültek a kvark-gluon plazma előállításához. A fizikai eredményekből számos magyar PhD-munka született, jelentős magyar kísérleti nehézion-fizikai iskolát nevelt fel.



LHCb (Large Hadron Collider beauty experiment)

Az anyag és antianyag egyenértékűségét vizsgáló LHC-kísérlet, amely főként a b-kvark proton-ütközésekben való keletkezését és más részecskékre történő bomlási folyamatait vizsgálja.



gam benne voltam két aldetektorében, a Presampler Endcap javításában és gondozásában, valamint a Time-of-Flight Endcap szcintillációs fal megépítésében. Ugyanakkor az átlagosnál sokkal aktívabbak voltunk a publikációk írása körül. Valahányszor új cikk kezdett körözni a kollaborációban, csoportunk valamelyik tagja elolvasta és javításokat javasolt rajta (fizikai és szövegszerűt). Ennek az lett a következménye, hogy az OPAL-együttműködés publikációs aktivitása versenyében végig vezettünk, úgyhogy pár év után bejelentettük, hogy a versenyt beszüntetik és a magyar csoportot örökös győztesnek nyilvánítják.

A LEP mintegy fél évet működött évente, és ez alatt általában hárman felügyeltük a mérőrendszert a föld alatt 100 méterre levő mérőszobában. Ügyeletes voltam, amikor egyszer 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 magyaroztam el az ügyeletesnek, hogyan kell az aldetektorom nagyfeszültségét visszaállítani.

Higgs-keresés az OPAL-nál

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-együttműködés szignifikáns Higgs-jelet 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 szeretete volna, de hiába, 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-együttműködés már 1995-ben bejelentett egy új részecskét 4-hadronzáporos 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. Viszszatekintve többen azt gondolják, hogy az ALEPH az LHC-nál most megfigyelt 125 GeV tömegű bozon „farkát” látta. Magam ezt két okból sem hiszem. Egyrészt az LHC-kísérletek még alulról is növelték egy kicsit a LEP kizárási határát, tehát arrafelé semmiféle jelet nem láttak, másrészt a Standard Modell Higgs-bozonja ennél a kis tömegnél sokkal keskenyebb tömegeloszlású, hogy olyan messzire elnyúljon.

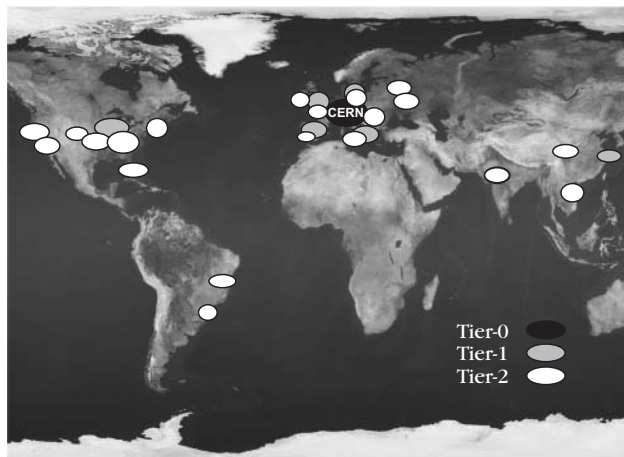
A Standard Modell kiterjesztései két Higgs-dublett teret feltételezve öt Higgs-bozont jeleznek, amelyek közül kettő töltött. A LEP-energiáknál feltételezhetően párban keletkeznek, és egyenként vagy két kvarkra, vagy egy tau-neutrínó párra bomlanak. Ennek megfelelően főként három bomlási csatornában várhatjuk 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 csatlakozásunktól kezdve erős volt a magyar részvétel, a tiszta leptonos csatorna analízisén kívül valamennyi lépést csoportunk végezte, a csatornák statisztikus kombinációjával egyetemben.

Új részecskék keresése az LHC-nál

A Nagy Hadronütköztetőn, az LHC-n is négy ütközési pont van, kettőben a két óriási, általános célú kísérlet, a nagy magyar csoporttal rendelkező CMS és a kisebb magyar részvételű ATLAS működik, a másik kettőben kisebbek, a nehézion-fizikai ALICE (A Large Ion Collider Experiment) szintén jelentős magyar csoporttal és a b-kvark fizikáját tanulmányozó LHCb. A CMS két oldalán helyezkedik el a kis szögben szóródott protonokat vizsgáló TOTEM-berendezés, szintén jelentős magyar csoporttal. A CMS-detektor építésén két magyar csoport is dolgozott. A müon-detektor pozicionáló rendszerének fejlesztésében és építésében jelentős részt vállalt a Debreceni Egyetem és az ATOMKI közös csoportja (erről *Raics Péter* bővebben ír), és ma is részt vesznek az üzemeltetésében, a Very Forward kaloriméter építésében pedig az RMKI vett részt.

Rendkívüli feladatot jelent az LHC-események tárolása és analízise. Az LHC-ban jelenleg 50 ns-onként ütköznek (és a nagy leállás után 25 ns-onként fognak) a protoncsomagok, ütközésenként 20-25 p-p kölcsönhatást produkálva, és az összetett hadronokból csak egy-egy kvark ütközéséből várható fizikailag érdekes esemény (például Higgs-bozon keletkezése!), így óriási zajból kell kiválogatnunk, amit keresünk. Évente 10 PB (10^{16} bájt) adatot kell tárolni és analizálni majd. A CERN ehhez létrehozta az WLCG (Worldwide LHC Computing Grid) rendszert, amelyhez Magyarország is csatlakozott: jelenleg az egyetlen komoly magyar LCG-rendszert az RMKI üzemelteti 500 processzonnal és 260 TB lemezterülettel. 2003 nyarán telepítettük (*Debreczeni Gergely*, Hajdu Csaba, *Hernáth Szabolcs* és *Kadlecsek József*) a résztvevő intézmények (jelenleg mintegy nyolcvan) közül hetedikként a WLCG szoftvert, és azóta azt néhány fizikus és informatikus üzemelteti. Népes magyar informatikusgárda vett részt a CERN-i grides fejlesztőmunkában, de a fejlesztés befejezése után jórészt elhagyták a CERN-t.

A CERN életében igazán pozitív változásokat hozott, amikor az OPAL egykori vezetője, *Rolf-Dieter Heuer* lett a CERN főigazgatója. Amikor az OPAL-nál

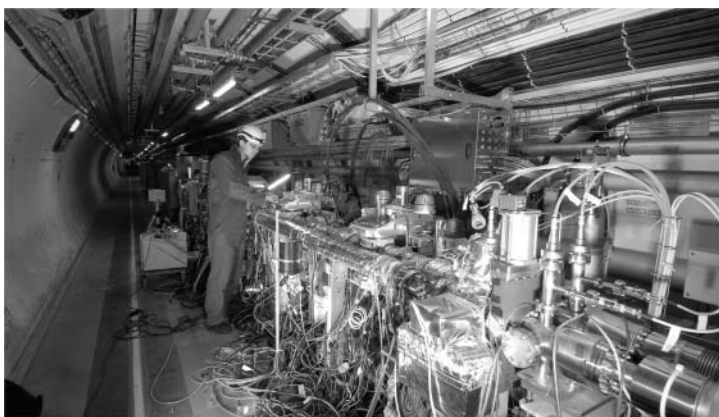


6. ábra. A CMS-kísérlet főbb grid-állomásai. A Tier-0 a CERN-ben van, az adattároló Tier-1 központok a Fermilabban, Oxfordban, Barcelonában, Lyonban, Karlsruheban, Bolognában és Tajpejben vannak, a budapesti Tier-2 Bolognához kapcsolódik.

mértünk, valamelyikünknek muszáj volt kocsival mennie a CERN-be, mert másképpen a mérőhelyhez igencsak nehéz volt eljutni (a CERN tűzoltói elszállították az embert, ha szépen megkérte őket). Rolf számozott, menetrend szerint közlekedő minibusz-járatokat vezetett be, amelyek munkanapokon hoznak-visznek bennünket a CERN területei között, még a repülőtérré is kivisznek, és minden nap reggel hétre, délután háromra és este 11-re kivisznek a CMS-hez és a műszakváltást kivárva visszavisznek a CERN-be, útbajtva az LHCb-t is. Régebben, amikor munkaidő után érkeztünk, a kapuórségtől kellett felvennünk a vendégszobák kulcsát; Rolf bevezette, hogy a vendégszobák fogadóirodája reggel 8-tól éjjel 1-ig tart nyitva.

Köszönetnyilvánítás

A szerző köszönettel tartozik a közös publikációkban szereplő (és nem szereplő) kollégáinak, akik nélkül semmi sem valósult volna meg a leírtakból, az INFN-nek, a CERN-nek és a Tokiói Egyetemnek, valamint a PS-205, OPAL- és ASACUSA-kísérletek résztvevőinek a húsz éves kellemes és eredményes együttműködésért, és amiért a különböző OTKA-, NKTH- és EU-pályázatok támogatásával együtt is igen szegény magyarokat befogadták és anyagilag is támogatták.



TOTEM

Az LHC-ben kis szögben szóródott protonok és más ott keletkezett részecskék azonosítására alakult együttműködés. Észlelőrendszere a CMS-detektor két oldalán helyezkedik el a nyalábvezetékben, illetve annak közvetlen közelében, a CMS közvetlen szomszédságából egészen többszáz méterre elnyúlva. Jelentős magyar csoport működik benne, főként az MTA Wigner Fizikai Kutatóközpontjából és az Eötvös Loránd Tudományegyetemről, amely komoly részt vállalt a detektor ellenőrző rendszerének megépítésében.