

Alapvető szimmetriák vizsgálata antiprotonokkal

A K72172 jelű OTKA-pályázat lezáró beszámolója

1. Cél: a CPT-invariancia ellenőrzése

Kutatómunkánk alapvető motivációja a CPT-szimmetria kísérleti ellenőrzése. A CPT-szimmetria, részecske és antirészecskéje ekvivalenciája, annyira alapvető a térelméletben, hogy sokak szerint nem is lehet kísérletileg vizsgálni; látszólagos kis eltérések megfigyelése esetén inkább hihetünk valamelyik megmaradási törvény sérülésében, mint a CPT-szimmetriáiban. Habár a részecskefizika Standard Modellje, amelynek diadalútja napjainkig töretlen, és amelyre utolsó, még nem azonosított alkatrésze, a Higgs-bozon valószínű ideji megfigyelése felteszi a koronát, teljes egészében a CPT-invarianciát feltételező térelméleten alapul, mégis olyan mély elméleti csapdákat rejt magában, hogy azok eltűntetésére számtalan kiterjesztése született, egyebek között olyanok is, amelyek megengedik a CPT- és Lorentz-invariancia bizonyos mértékű sértését. A CPT-szimmetria, ráadásul, *világ* és *antivilág* egyenrangúságát sugallja, az Univerzum mégsem mutatja antigalaxisok nyomait; ennek magyarázatára vannak ugyan CPT-invarianciát feltételező elméletek, mégis annak rigorózus kísérleti ellenőrzésére sarkall.

Az utóbbi években tehát komoly kísérleti erőfeszítés irányul a CPT-szimmetria ellenőrzésére. Általában egy részecske és antirészecskéje tulajdonságait hasonlítjuk össze a lehetséges különbség mérésével. Az antiproton legvonzóbb tulajdonsága a fizikai kísérletezésre az, hogy az egyetlen stabil, nehéz antirészecske, valóságos mikroszkópikus laboratórium a CPT-invariancia ellenőrzésére. A fenti témákban érdekelt kutatók (és nem utolsósorban a mi antihidrogén tanulmánytervünk) hatására a CERN adminisztrációja úgy döntött, hogy elsősorban japán pénzből ugyan, de komoly olasz, német és amerikai hozzájárulással, megépíti az Antiproton-lassítót (Antiproton Decelerator, AD), amely 2000 nyarán üzembe állt és azóta egyre javuló minőségű antiproton-nyalábot szolgáltat. Jelentőségét a CERN számára növelte az a tény, hogy 2000 végén leállt a LEP részecskegyorsító, és a Nagy hadronütköztető, az LHC csak 2009-ben indult el: a két időpont között az SPS-en és az ISOLDE-n kívül csak az AD-n lehetett fizikai kísérleteket végezni a CERN-ben. Ezt a tényt igazolta, hogy Rolf-Dieter Heuer, a CERN jelenlegi főigazgatója, a CERN anyagi nehézségei ellenére, komolyan támogatja az AD működtetését, és nem utolsósorban a mi ASACUSA kísérletünk világra szóló eredményeinek hatására a CERN igazgatótanácsa 2012-ben jóváhagyta az ELENA (Extreme Low ENergy Antiproton) gyűrű megépítését. Az ASACUSA különleges eredményessége ugyanis jórészt az általunk épített RFQ (rádiofrekvenciás kvadrupólus) utógyorsítónak köszönhető, amely nagyságrendekkel több lassú, csapdázható antiprotonot szolgáltat, mint a hagyományos, ütköztetési lassítási módszerek.

A CERN eredetileg három AD-kísérletet hagyott jóvá: két antihidrogén-spektroszkópiát és a japán-magyar ASACUSA-t (Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons). A név Tokió Asakusa-negyedére utal, a kísérlet nem-japán résztvevői javasolták, kifejezendő az együttműködés domináns japán hozzájárulását. A jelen pályázat fő tudományos témája, a T033079 és T046095 sz. OTKA-projektek szerves és közvetlen folytatásaként, a hosszú-élettartamú hadron- (antiproton-) atomok vizsgálata volt az ASACUSA-együttműködés keretében, nagyfelbontású

lézerspektroszkópia módszerével. A különböző kísérleti fázisok előkészületi munkáit a Tokiói Egyetemen, a bácsi Stefan Meyer Intézetben, az Aarhusi Egyetemen, a müncheni Kvantumoptikai Max-Planck Intézetben és Magyarországon, a Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetben (jelenleg Wigner Fizikai Kutatóközpont), illetve a debreceni ATOMKI-ban végeztük, a tényleges adatgyűjtést pedig a CERN-ben, az Antiproton-lassító mellett. Fő célunk a CPT-szimmetria ellenőrzése volt az antiproton tulajdonságainak az eddiginél pontosabb mérésével. Korábban sikerült az antiproton tömegének és töltésének meghatározását egy nagyságrenddel megjavítanunk; ezt az értéket évről évre tovább pontosítottuk, és sikeres úttörő kísérletet végeztünk az antiproton orbitális mágneses momentumának közvetlen mérésére. Jelentős újabb eredményeket értünk el a MUSASHI lassú antiproton-forrás fejlesztésében is, az komoly felhasználói berendezéssé nőtte ki magát. Pályázatunk tematikáját, a munkatervünknek megfelelően, jelentősen bővítettük: az antiproton tömegének és mágneses momentumának mérése mellett prototípust építettünk az antihidrogén spektroszkópiájára tervezett kéttónusú Paul-csapda elkészítéséhez a hozzávaló detektorrendszerrel együtt, és lassú töltött részecskék ütközési folyamatait tanulmányoztuk elméleti és kísérleti módszerekkel.

Oktatási célunkat is teljesítettük: Sótér Anna (Eötvös Egyetem) a pályázat keretében készítette diplomamunkáját, majd ugyancsak az ASACUSA-együttműködés keretében a Münchener Egyetemen kezdett doktori tanulmányokat. Pályázatunk utolsó évében csatlakozott hozzánk Teheránból Ghasemloo Mahdi Ghidari a Debreceni Egyetem doktori ösztöndíjasaként, aki ugyan a nemzetközi helyzet miatt megszakította itteni tartózkodását, de remélhetőleg lehetősége nyílik majd a távoli együttműködésre. Ugyancsak a Debreceni Egyetem doktori ösztöndíjasaként csatlakozott témánkhoz az ukrainai Balog Róbert, de ő már csak a következő periódusban vesz majd részt.

2. Fő tudományos eredmények

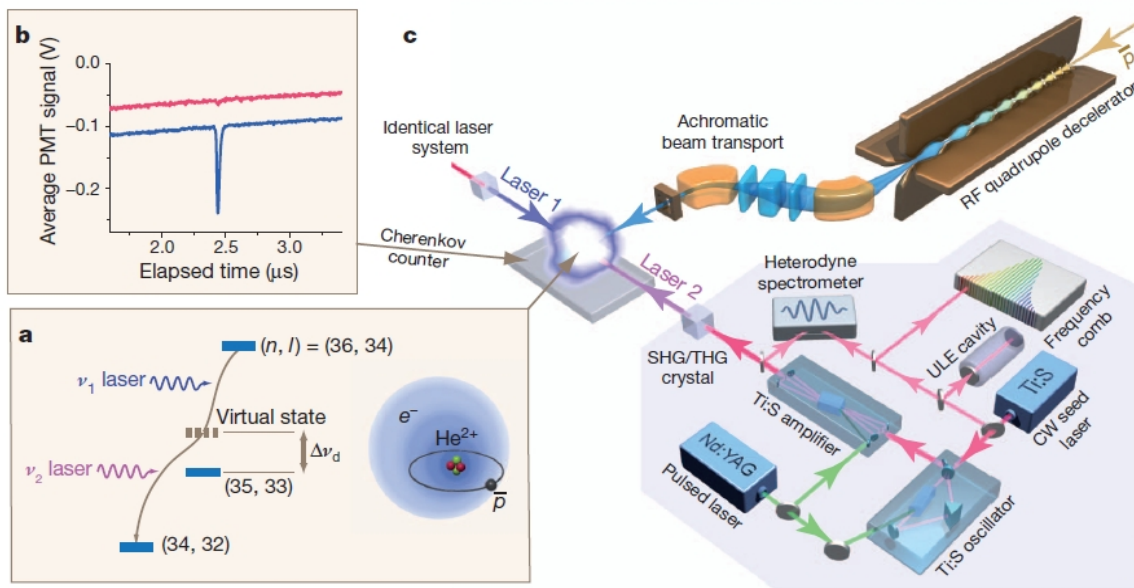
A pályázat beszámolója, tevékenységünknek megfelelően, négy részre tagolódik:

- Az antiproton (1) tömegének és (2) mágneses momentumának mérése lézerspektroszkópia segítségével.
- (3) Előkészületek az antihidrogén-atom hiperfinom felhasadásának méréséhez.
- (4) Antihidrogén-csapda és annihilációs detektorrendszer építése
- (5) Ütközési folyamatok elméleti és kísérleti vizsgálata.

Az első négy témában magyar részről Barna Dániel, Juhász Bertalan, Sótér Anna és Horváth Dezső vett részt a Tokiói Egyetemen, a Müncheni Egyetemen és a bácsi Stefan Meyer Intézettel együttműködésben. Az 5. téma Tőkési Károly (ATOMKI) munkája együttműködésben az Aarhusi Egyetemen és a japán RIKEN-nel, valamint elméleti kutatókkal különböző intézményekből.

2.1. Az antiproton tömege: kétfotonos spektroszkópia

A pályázat legnagyobb tudományos eredménye az antiproton tömegének a korábbinál sokkal pontosabb meghatározása antiprotonos héliumatomon. Miután sikerült a méréseinket egészen ritka ($T=5$ K körüli hőmérsékleten 2 mbar nyomású) gázban végeznünk az ütközések hatásának csökkentésére, és a lézerfrekvenciát frekvenciafésű segítségével stabilizáltuk, a beszámolási időszakban a Doppler-hatás ellen próbáltunk küzdeni különböző módszerekkel, amelyek közül a négyéves munkával kifejlesztett kétfotonos lézerspektroszkópia bizonyult a legeredményesebbnek (1. ábra).



1. **ábra:** Kétfotonos lézerspektroszkópia antiprotonos héliumatomon [1]. (a) A két foton közötti virtuális állapot nem fedhet át egy tényleges kötött állapottal, de közel kell legyen hozzá. (b) A rezonanciát annihilációs csúcs jelzi a két lézeremisszió időpontjában. (c) A lassú antiprotonok az RFQ utólassítót elhagyva nyalábtisztítás után érkeznek a gázba, ahol héliumatomokba fogódnak be, azokat két oldalról besugározzuk hangolható lézerrel, és az annihilációt Cserenkov-számlálóval észleljük.

Az utólassító a bemenő nyaláb mintegy 30%-át lassítja le, a maradéktól kétszeres nyalábhajlítással szabadulunk meg. Az egymással szemben propagáló lézernyalábok kiegyenlítik a longitudinális Doppler-hatás legnagyobb részét, a teljes kiküszöbölést nem lehet elérni a két frekvencia különbözősége miatt. A gerjesztési valószínűség maximalizálásához a lézerefrekvenciákat úgy kell beállítani, hogy a kettő közötti virtuális állapot a lehető legközelebb legyen egy valódi kötött állapothoz, de azzal ne fedjen át, akkor ugyanis egymást követő két egyfotonos átmenetünk lesz.

A kétfotonos spektroszkópiával az antiproton/elektron tömegarány kísérleti bizonytalanságát $1,3 \cdot 10^{-9}$ -re szorítottuk le. Az eredményünk két $p\text{He}^4$ és egy $p\text{He}^3$ átmenet vizsgálatából $m(p)/m(e) = 1836,1526736(23)$, és eza pontosság már összemérhető a sok kísérletből átlagolt proton-tömegével, amely $1836,15267245(75)$. A proton adataival végzett elméleti számításokkal összehasonlítva a lehetséges CPT-sértés értékét $7 \cdot 10^{-10}$ -re korlátozzuk. Mivel kevesen kételkednek a CPT-invariancia érvényében, eredményünket felhasználták a proton tömegének pontosításához. Ezt a mérést a **Nature** folyóiratban publikáltuk [1], a 12 szerző közül 4 pályázatunk résztvevője.

2.2. Az antiproton mágneses momentuma

Antiprotonos héliumatomok hiperfinom szerkezetéből meg tudjuk határozni az antiproton mágneses momentumát. A kísérlet lényege lézer-mikrohullám-lézer hármas rezonancia: az első lézerrel kiürítjük a kiszemelt állapotot, hangolt mikrohullámmal stimulálva egy HF átmenetet megpróbáljuk visszapopulálni, majd a második lézervéssel ellenőrizzük a populációt. Ezt a mérést tovább pontosítottuk 2008-2009-ben, született belőle három publikáció és egy PhD-dolgozat (Thomas Pask, Bécsi Egyetem), részben Horváth Dezső témavezetésével. Az antiproton mágneses momen-

tumára minden esetben a Standard Modell által várt értékeket kaptuk, 0,29% pontossággal [2]. 2010-ben további méréseket végeztünk, amelyekben sikerült megmutatnunk, hogy a hármas rezonancia módszere a sokkal bonyolultabb hiperfinom szerkezetű $\bar{p}\text{He}^3$ rendszeren is működik. A komoly adatgyűjtés 2011 második felében folyt, abból született Susanne Friedreich PhD-dolgozata és egy publikáció [3].

A fenti két munkában részünkről Barna Dániel, Horváth Dezső, Juhász Bertalan és Sótér Anna vett részt. Valamennyien részt vettünk az adatgyűjtésben és a cikkek írásában. Barna Dániel írta és gondozza az adatgyűjtő programot, amely lehetővé teszi az ASACUSA-kísérlet különböző mérési elrendezéseivel felvett adatok on-line analízisét. Egy parancsfile-ből konfigurálható, hogy milyen feladatokat hajtson végre, minden kutatócsoport a saját igényei szerint tudja használni. Sótér Anna a lézertudomány munkájában vett részt, fejlesztette és a mérések idején kezelte a spektroszkópiához használt különféle lézereket. Horváth Dezső a bécsi Stefan Meyer Intézetben részt vett a $\bar{p}\text{He}^3$ és $\bar{p}\text{He}^4$ hiperfinom szerkezetének vizsgálatához szükséges üregrezonátorok hangolásában. Barna Dániel és Sótér Anna építettek egy vákuumos gázhűtő-rendszert, amellyel sikerült a ritka héliumgázt 1,9 K hőmérsékletre hűteni.

2.3. Az antihidrogén atom hiperfinom felhasadása (HFS)

A HFS mérése az egyik legérzékenyebb teszt a Lorentz-invariancia esetleges sértésére. Mágneses csapdából kivezetett antihidrogén-atomok polarizációját próbáljuk megfordítani mikrohullámú rezonanciával és a polarizációt szextupólus-mágnessel ellenőrizni. Erre az ASACUSA együttműködés MUSHI csoportja által épített cusp-csapda kiválóan alkalmas, mert eleve polarizált antihidrogént produkál, és azokat már sikerült is kivezetni a csapdából, percenként mintegy 1000-et [4]. Elkészült a RF-rezonátor és a szextupólus-mágnes, de a kivezetett antihidrogén-atomok számát jelentősen növelni kell a sikeres kísérlet érdekében. Ebben a munkában részünkről Juhász Bertalan vett részt.

2.4. Antihidrogén-csapda és detektorrendszer építése

Elkészült az antihidrogén előállítására régóta tervezett két-tónusú Paul-csapda prototípusa, ebben közülünk Barna Dánielnek van a legnagyobb szerepe. Elkészült és kiszállítottuk a csapda állványát, amelyet Zalán Péter (RMKI) tervezett Horváth Dezső közreműködésével. A rádiófrekvenciás csapda legtöbb alkatrészének a tervezése befejeződött. A Paul-csapdához tartozó detektorrendszer tervezése és szimulációja Sótér Anna diplomamunkája volt, a detektorokat Sótér Anna és Zalán Péter tervezte. 2011 június-júliusában valamennyi antihidrogén-detektorunk mechanikája elkészült az RMKI mechanikai műhelyében. A fenti fejlesztésekről több konferencia-előadás is született, az 2011 végén tartott PBAR11 konferencia előadásai [5] jó áttekintést nyújtanak a munka állásáról.

2.5. Ütközési folyamatok vizsgálata

Az ASACUSA kísérlet keretében atomi ionizációs jelenségeket vizsgáló Aarhus-Tokió-Debrecen együttműködés egyszeres és többszörös ütközéseket vizsgál lassú antiprotonokkal. Részünkről Tőkési Károly részt vett a mérésekben és sokféle elméleti számítást is végzett. A munkából, több konferencia-előadás mellett született számos kísérleti és elméleti publikáció [6-9]. Kiemeljük a következő eredményeket:

Igen kis energiás antiprotonok és hidrogén molekulák, valamint hélium és argon atomok

ütközésében elsőnek sikerült kísérletileg meghatároznunk az egyszeres ionizációs hatáskeresztmetszeteket [6-7]. Egyszeresen és kétszeresen differenciális hatáskeresztmetszeteket határoztunk meg antiproton és hélium atomok ütközésében, a részecskék klasszikus pályájának Monte Carlo módszerrel történő analizálásával (CTMC) valamint torzított terű hullámfüggvény-módszer alkalmazásával. Hidrogénatom és vízmolekula ionizációját vizsgáltuk klasszikus, lineárisan polarizált lézertérben klasszikus (CTMC) és kvantummechanikai (Coulomb-Volkov) közelítésben [8-9]. A fenti témához kapcsolódva megmértük az ionvezetés (ion guiding) hőmérsékletfüggését kapillárisokban, és megmutattuk, hogy a boroszilikát üveg vezetőképesége több nagyságrendet változik a hőmérséklet függvényében. Az elektronok áthatolnak a mikrokapilláris üvegen, habár energiát veszítenek a fallal ütközve. Az elektronok és ionok viselkedése nagyon különbözik. A megfigyelések arra vallanak, hogy kis energián rugalmas ütközés, nagyobbakon a Coulomb-taszítás dominál.

Irodalom

- [1] M. Hori, A. Sótér, D. Barna, A. Dax, R.S. Hayano, S. Friedreich, B. Juhász, T. Pask, E. Widmann, D. Horváth, L. Venturelli, N. Zurlo: *Two-photon laser spectroscopy of $p\bar{b}ar$ -He $^{++}$ and the antiproton-to-electron mass ratio*, **Nature** 475 (2011) 484-488.
- [2] T. Pask, D. Barna, A. Dax, R.S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, S. Friedreich, B. Juhász, O. Massiczek, N. Ono, A. Sótér, E. Widmann: *Antiproton magnetic moment determined from the HFS of pHe^+* , **Physics Letters B** 678 (2009) 55-59.
- [3] S. Friedreich, D. Barna, F. Caspers, A. Dax, R.S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, B. Juhász, T. Kobayashi, O. Massiczek, A. Sótér, K. Todoroki, E. Widmann, J. Zmeskal: *First observation of two hyperfine transitions in antiprotonic 3He* , **Physics Letters B** 700 (2011) 1-6.
- [4] Y. Enomoto, N. Kuroda, K. Michishio, C. H. Kim, H. Higaki, Y. Nagata, Y. Kanai, H. A. Torii, M. Corradini, M. Leali, E. Lodi-Rizzini, V. Mascagna, L. Venturelli, N. Zurlo, K. Fujii, M. Ohtsuka, K. Tanaka, H. Imao, Y. Nagashima, Y. Matsuda, B. Juhász, A. Mohri, and Y. Yamazaki: *Synthesis of Cold Antihydrogen in a Cusp Trap*, **Phys. Rev. Lett.** 105 (2010) 243401.
- [5] PBAR-11, International Conference on Cold Antimatter and High Precision Physics, Nov. 28-30, 2011, Matsue, Shimane, JAPAN, 2011. <http://radphys4.c.u-tokyo.ac.jp/pbar11/programme.html> (Barna Dániel, Juhász Bertalan és Sótér Anna előadásainak anyaga)
- [6] H. Knudsen, H.-P. E. Kristiansen, H.D. Thomsen, U. I. Uggerhøj, T. Ichioka, S. P. Møller, C. A. Hunniford, R. W. McCullough, M. Charlton, N. Kuroda, Y. Nagata, H. A. Torii, Y. Yamazaki, H. Imao, H. H. Andersen and, K. Tókési: *Ionization of helium and argon by very slow antiproton impact*, **Phys. Rev. Letters** 101 (2008) 043201.
- [7] H. Knudsen, H.A. Torii, M. Charlton, Y. Enomoto, I. Georgescu, C.A. Hunniford, C.H. Kim, Y. Kanai, H.-P.E. Kristiansen, N. Kuroda, M.D. Lund, R.W. McCullough, K. Tókési, U.I. Uggerhoj, and Y. Yamazaki: *Target Structure Induced Suppression of the Ionization Cross Section for Very Low Energy Antiproton-Hydrogen Collisions*, **Phys. Rev. Lett.** 105 (2010) 213201.
- [8] S. Borbély, K. Tókési, L. Nagy: *Ionization of the hydrogen atom by intense ultrashort laser pulses*, **Phys. Rev. A** 77 (2008) 033412.
- [9] D.G. Arbó, M.S. Gravielle, K.I. Dimitriou, K. Tókési, S. Borbély, and J.E. Miraglia: *Ionization of the hydrogen atom by short half-cycle pulses: dependence on the pulse duration*, **Eur. Phys. J. D**, 59 (2010) 193–200.
- [10] K. Tókési, I. Rajta, R.J. Bereczky, K. Vad: *Investigation of MeV proton microbeam transmission between two flat plates – The cases of metallic and insulator plates*, **Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B** 279 (2012) 173–176.