

A CPT-szimmetria kísérleti ellenőrzése lassú antiprotonokkal

A T046095. sz. OTKA-pályázat szakmai lezáró beszámolója

1. A kutatás célja, motivációja

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-szimmetriában. Habár a részecskefizika Standard Modellje, amelynek diadalútja napjainkig töretlen, teljes egészében a CPT-invarianciát feltételező térelméleten alapul, mégis olyan mély elméleti buktatókat rejt magában, hogy azok eltüntetésére 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; habár ennek magyarázatára vannak CPT-invarianciát feltételező elméletek, mégis annak rigorózus kísérleti ellenőrzésére sarkall.

Az utóbbi években komoly kísérleti erőfeszítés irányul a CPT-szimmetria ellenőrzésére. Általában egy részecske és antirészecskéje bizonyos tulajdonságát hasonlítjuk össze a relatív 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 [1]) hatására a CERN adminisztrációja úgy döntött, a LEAR utódként, elsősorban japán pénzből, 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. Szerepét alapvetővé teszi az a tény, hogy 2000 végén leállt a LEP és az LHC legelőbb 2008-ban indul majd: a két időpont között az SPS-en és az ISOLDE-n kívül csak az AD-n lehetett fizikai kísérleteket végezni a CERN-ben.

A CERN eredetileg három AD-kísérletet hagyott jóvá: két antihidrogén-spektroszkópiát és a japán-dán-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 a T033079. sz. OTKA-projekt szerves és közvetlen folytatása, és ennek megfelelően fő tudományos témája a hosszú-élettartamú hadron- (antiproton-) atomok vizsgálata volt az ASACUSA-együttműködés keretében, nagyfelbontású lézerspektroszkópia módszerével. A kísérlet előkészületi munkáit részben a Tokiói Egyetemen, részben pedig Magyarországon, a Részecske- és Magfizikai Kutatóintézetben illetve a Debreceni Egyetem Kísérleti Fizikai Tanszékén 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:

előkészítettük az antihidrogén mágneses momentumának mérését és lassú töltött részecskék ütközési folyamatait tanulmányoztuk elméleti és kísérleti módszerekkel.

Oktatási célunkat csak részben sikerült teljesítenünk, mert a pályázat időszaka alatt új diplomamunkást nem kaptunk. Juhász Bertalan a Debreceni Egyetem doktoranduszaként sikeresen megvédte e témában PhD-dolgozatát és a bécsi Stefan Meyer Intézet posztdoktori ösztöndíjasaként az együttműködésünkben maradt, és sikerült Barna Dánielt megnyernünk, aki az RMKI kutatójaként, de a Tokiói Egyetem posztdoktori ösztöndíjával vesz részt a CERN-i munkánkban. Ifjú részecskefizikusaink számára, hazai bázis híján, igen nehéz a kísérletezők számára oly fontos mérés technikai tapasztalatok megszerzése; erre az antiprotonos kísérletben való részvétel kitűnő lehetőséget nyújtott. Pályázatunk utolsó évében, 2007-ben viszont már sikerült egy diplomamunkást, Sótér Annát (ELTE) megnyernünk ennek a témának.

2. Fő tudományos eredmények

A pályázat beszámolója, tevékenységünknek megfelelően, négy részre tagolódik:

- Az antiproton tömegének, töltésének és mágneses momentumának mérése lézerspektroszkópia segítségével.
- Előkészületek az antihidrogén-atom hiperfinom felhasadásának méréséhez.
- Ütközési folyamatok elméleti és kísérleti vizsgálata.
- Lassú antiproton-nyaláb fejlesztése (MUSASHI-berendezés).

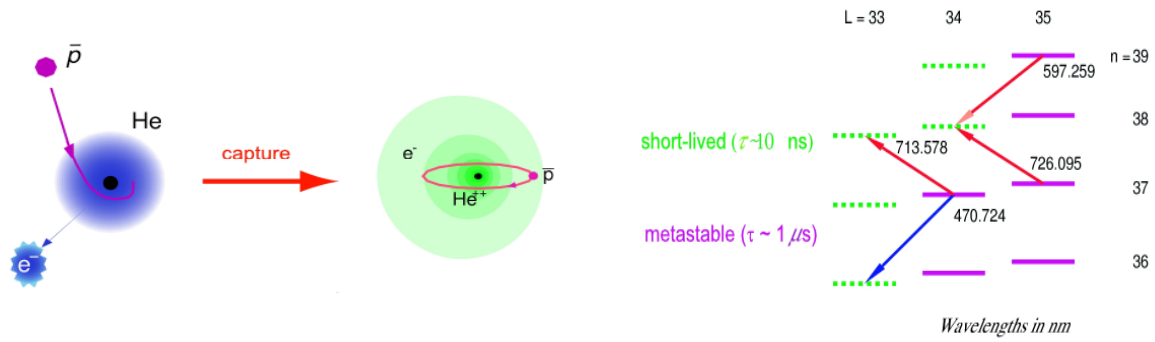
Az első három témában magyar részről Barna Dániel, Juhász Bertalan és Horváth Dezső vett részt a Tokiói Egyetemen és a bécsi Stefan Meyer Intézettel együttműködésben, a negyedik Tőkési Károly tevékenységére épült. A korábbiakhoz hasonlóan a pozícionáló állványokat a MUSASHI-berendezés és az antihidrogén-csapda számára Zalán Péter (RMKI) tervezte Horváth Dezső közreműködésével.

2.1. Lézerspektroszkópia antiprotonos hélium-atomokon

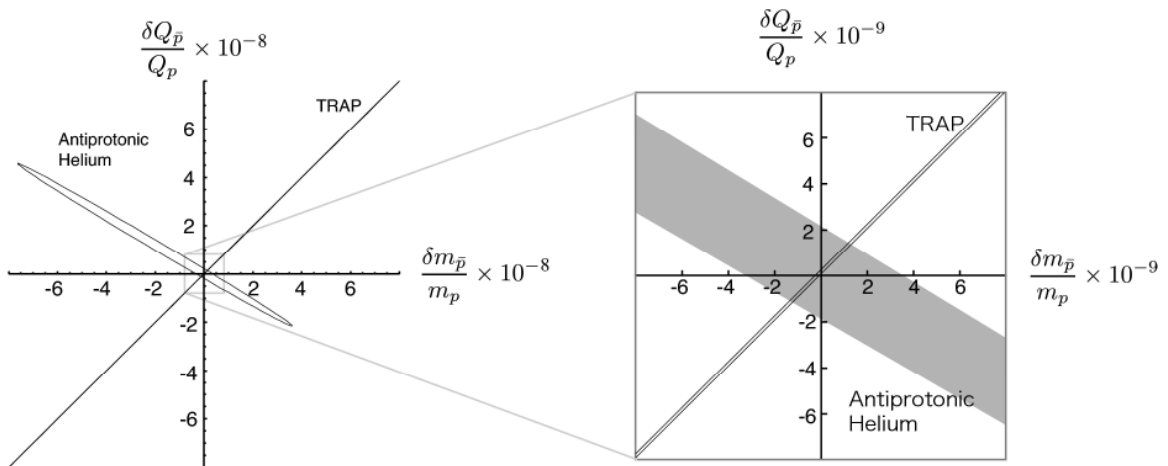
Ez a vizsgálatsorozat pályázatunk fő témája. 1993 óta tart, és mostanában minőségi változáson megy át. Ez indította a téma négy meghatározó kutatóját, hogy elfogadja a Reports on Progress in Physics áttekintő folyóirat felkérését nagylélegzetű összefoglaló cikk megírására [2]. A cikk megírását Horváth Dezső koordinálta, mint *corresponding author*, ő írta a CPT-szimmetriával foglalkozó elméleti bevezetést és az atomi befogással foglalkozó fejezet nagyobbik részét, valamint ő rendezte sajtó alá a cikket. Ryugo Hayano írta le az antiproton tömegének és töltésének meghatározását, Masaki Hori a lézerspektroszkópia módszertanát és Eberhard Widmann a mágneses momentum meghatározását lézermikrohullám-lézer hármass rezonanciával. Ez a munka csaknem egy évig tartott és 2007 nyarán zárult.

2.1. 1. Az antiproton tömege és töltése

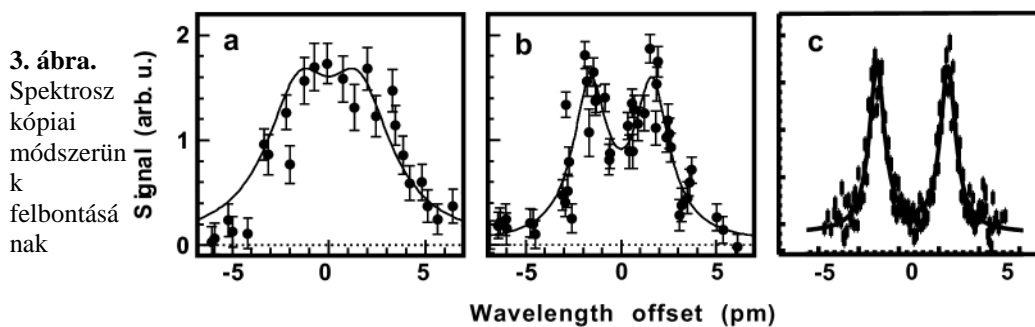
A héliumgázban lelassult antiprotonok néhány százaléka egy hélium-mag + antiproton + elektron metastabil állapotba kerül és több mikroszekundumig is él, amíg a túlnyomó többség pár nanosec alatt annihilál az atommagokon. Ilyen metastabilitást csak héliumban figyeltünk meg. Ezek után, ha megfelelően hangolt lézerrel átmenetet stimulálunk egy hosszú-



1. ábra. Az antiprotonos héliumatom keletkezése (baloldalt) és a lézerspektroszkópia elve (jobbaldalt). Az antiprotonátmenet energiájának megfelelő frekvenciájú lézertény átmenetet stimulál egy hosszú-élettartamú (folytonos vonal) és egy rövidéletű (szaggatott vonal) állapot között, ami gyors annihilációhoz vezet a lézertény belövésének pillanatában. Az átmeneteknél a rezonancia hullámhossza szerepel nanométerben.



2. ábra. Az antiproton tömegének és töltésének meghatározása lézerspektroszkópia [2,3] és ciklotron-frekvencia [4] segítségével: a proton és antiproton relatív tömegkülönbsége a relatív töltéskülönbség függvényében. A TRAP kísérlet Q/M régiója és a $p\text{-bar-He}^+$ régió átfedése limitálja az antiproton tulajdonságainak eltérését a protonéitól, amely az ábrából leolvashatóan $2 \cdot 10^{-9}$.



3. ábra. Spektroszkópiai módszerű felbontásnak

javulása: az $(n=37, l=35) - (38, 34)$ felhasadt átmenet $726,1$ nm hullámhossznál, ahogyan azt (a) 2000-ben, (b) 2002-ben és (c) 2004-ben mértük. A folytonos vonal illesztett függvényalak. Ezt az átmenetet használtuk fel az antiproton mágneses momentumának mérésére.

és egy rövid-élettartamú állapot között, gyors annihilációt kapunk, amely éles csúcsként jelentkezik az antiprotonok élettartam-spektrumában a lézer elsütésének megfelelő időpillanatban: ez jelzi, hogy a lézer éppen az átmenetre hangolódott.

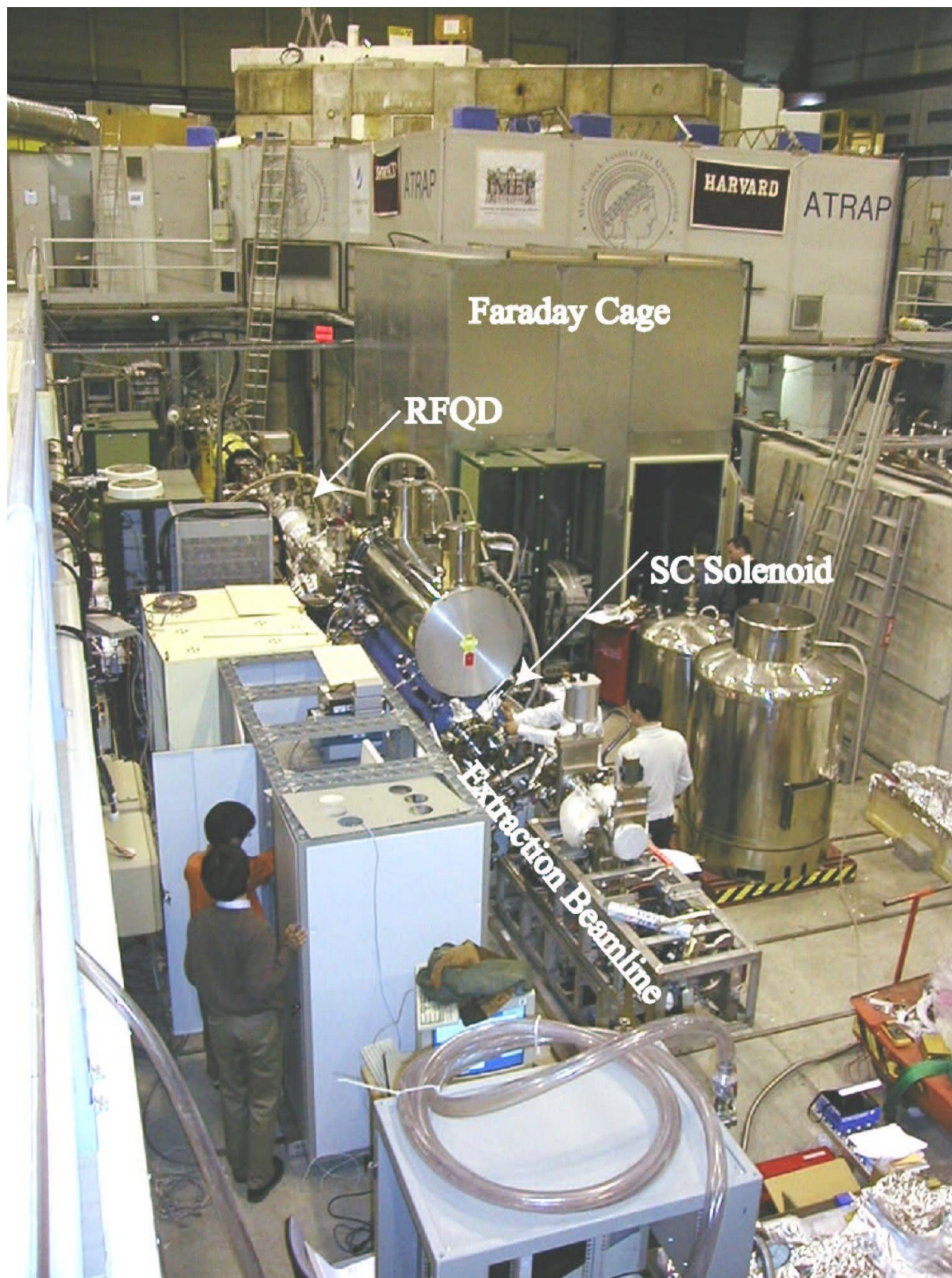
Az antiproton tömegét és töltését az 2. ábrán vázolt módszerrel hasonlítjuk össze a protonéval. Mivel az antiprotonok átmeneti energiája atomban $M \times Q^2$ -tel arányos, a ciklotron-rezonancia segítségével meghatározott Q/M -értékkel [4] egybevetve a Q töltés és az M tömeg szeparálható. Mivel különbséget nem látunk, ezért azt statisztikusan limitáljuk; a mérési módszer állandó javításával a határok évről évre csökkennek. Mivel jelenleg nincs a módszerünkkel összehasonlítható pontosságú technika ennek a becslésnek az elvégzésére, a *Particle Physics Review* referenciagyűjtemény szerint a miénk az antiproton tömegének és töltésének egyetlen mérése (<http://pdg.lbl.gov/2007/listings/s016.pdf>).

Amint a 3. ábra is mutatja, 2000 óta kétévenként egy-egy nagyságrendet sikerült javítanunk a spektroszkópiai módszerünk felbontásán. Habár a néhai LEAR (Low Energy Antiproton Ring, alacsonyenergiás antiproton-gyűrű) antiproton-intenzitása az AD-nál sokkal nagyobb volt, a javított mérőberendezés (főként a lézer-rendszer jelentős javítása, amely teljes egészében Masaki Hori érdeme) és a csaknem korlátlan mérési idő tette lehetővé a 2001-es eredményt. A következő lépéshez már az antiproton-nyalábot kellett lassítanunk és hűtenünk, a korlátozó tényező ugyanis az lett, hogy a nagy energia-szórás miatt az AD 5 MeV-es antiprotonjait igencsak sűrű gázban (800 mbar nyomás 6 K hőmérsékleten!) kellett megállítanunk, és utána a mért átmeneti energiákat zérus sűrűségegre extrapolálnunk.

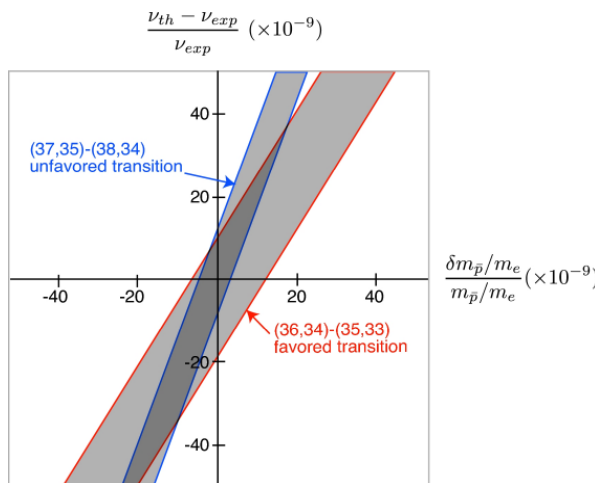
Többek között ezért építettük meg a rádiófrekvenciás utólassítót (RFQD, 4. ábra), amely az antiprotonokat 20-120 keV energiára lassítja le mintegy 30%-os hatásokkal, szemben a passzív lassítás (fóliában vagy gázban) legalább 95%-os veszteségével. Az RFQD belseje elektrosztatikusan lebeg, feszültségével szabályozható a földpotenciálra kilépő antiprotonok energiája. Az így lelassított antiprotonokat 1 mbar alatti nyomású, azaz a korábbinál 4-6 nagyságrenddel kisebb sűrűségű héliumgázban be tudtuk fogatni, és ez tett lehetővé egy újabb nagyságrendi javítást a tömeg- és töltésmeghatározásban: mivel az ütközési kiszélesedés kisebb lett a természetes vonalszélességnél, a vizsgált atomok gyakorlatilag izoláltak voltak tekinthetők.

A következő lépés a lézerrendszer újabb javítása volt, Masaki Hori és Andreas Dax munkája. Ennek következtében (folytonos üzemmódú lézerek, frekvenciafésű beiktatása, chirp-korrekció) újabb nagyságrendet sikerült nyernünk felbontásban és stabilitásban. A lézerrendszer részletes leírása megtalálható a [2] összefoglaló cikkünkben.

Spektroszkópiai módszerünk, a CPT-szimmetria ellenőrzésén kívül, lehetővé teszi a antiproton és az elektron tömegarányának kísérleti meghatározását. Mindegyik tanulmányozott átmenetre meghatározhatjuk, milyen tartományokat enged meg mérésünk, ahogyan azt az 5. ábra illusztrálja. Ha feltételezzük a CPT-invariancia teljesülését, eredményünket felhasználhatjuk a proton/elektron tömegarány pontosítására. Az elméleti számításban variáltuk az antiproton tömegét, és megvizsgáltuk, mekkora eltérést visel el a mért érték szórásának megfelelő 90%-os konfidencia-limit. A CODATA adatgyűjtemény 2006-os kiadásában már számításba vették, és ez csaknem 10%-os javulást eredményezett: 46 ppb ($46 \cdot 10^{-9}$)-ról 43 ppb-re javult a pontosság [2].



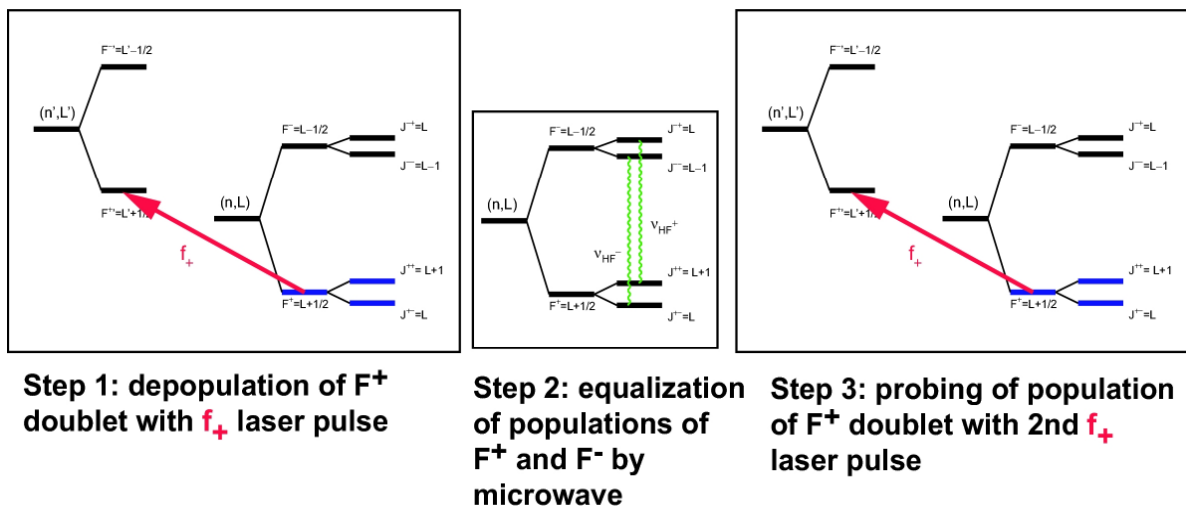
4. ábra: Az ASACUSA-kísérlet nyalábterülete a rádiófrekvenciás utólassítóval (RFQD), az antiproton-csapda szupravezető szolenoidjával és a lassú antiprotonok nyalábvezetékével, amelyek a MUSASHI-berendezés (Monoenergetic Ultra-Slow Antiproton Source for High-precision Investigations) elemei. A csapda, a nyalábkezelő rendszer és a hozzájuk tartozó elektronika szekrényei az RMKI-ban tervezett és gyártott mozgatóállványokon állnak.



5. ábra. Az antiproton és az elektron tömegarányának meghatározása antiprotonos héliumatomon végzett lézerspektroszkópia segítségével [2]: az elméletileg számolt és kísérletileg mért rezonanciafrekvenciák relatív különbsége az antiprotonon és protonon mért érték relatív eltéréseinek függvényében két átmenetre.

2.1.2. Az antiproton mágneses momentuma

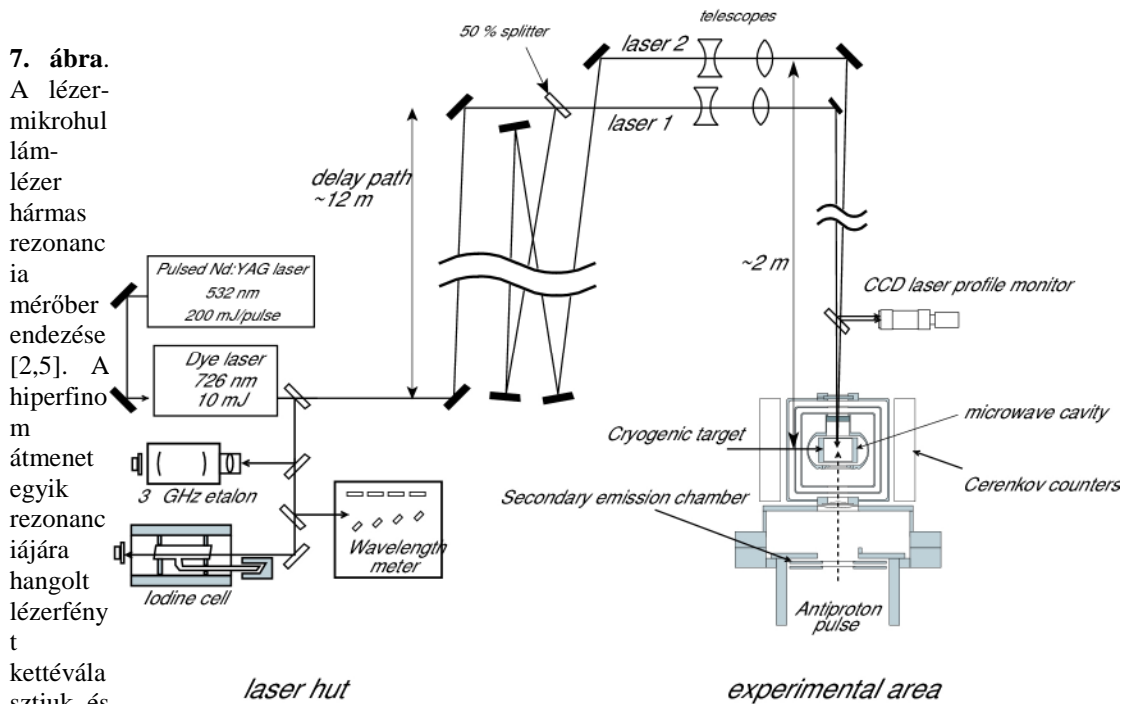
Másik fontos CPT-teszt az antiproton mágneses momentumának meghatározása, hiszen annak is a protonéval kell egyeznie. Ezt lézer-mikrohullám-lézer hármas rezonancia segítségével csináltuk: a mágneses momentumok kölcsönhatása miatt felhasadt állapotot az egyik átmenetre hangolt lézerrel két egymás utáni lövéssel kétszer depopulálunk, a kettő között a mintát a felhasadásnak megfelelő frekvenciára hangolható mikrohullámmal sugározzuk be. Az első lövés az állapotot jórészt kiüríti, a rezonanciára hangolt mikrohullám viszont újratáplálja, a felhasadás a rezonancia-frekvenciával egyenlő (6. ábra).



6. ábra. Az antiproton mágneses momentumának mérésének elve héliumatomban, lézer-mikrohullám-lézer hármas rezonanciával [2].

A mérőberendezést még korábban, az előző pályázat (T033079) keretében megépítettük, ahhoz hozzájárulásunk akkor az állványzat tervezése és megépítése (Zalán Péter és Horváth Dezső, RMKI), valamint a kriosztát kalibrációja (Juhász Bertalan) volt. A mostani méréshez a lézerrendszert korszerűsítettük, ehhez Barna Dániel járult hozzá. Amint azt a 7. ábra mutatja, egyetlen lézer fényét osztottuk ketté és az egyik ágat késleltettük mintegy 160 ns-mal többször oda-vissza küldve egymástól 12 m-re elhelyezett tükrök között. Ez nem rontotta

számottevően a lézertény profilját. A két sugarat összeterve vittük a mikrohullámú rezonancia-üregbe, amelyet minden második lövésnél hangolt mikrohullámú sugárással telítettünk. Így kerestük meg a két mikrohullámú átmenet helyét.

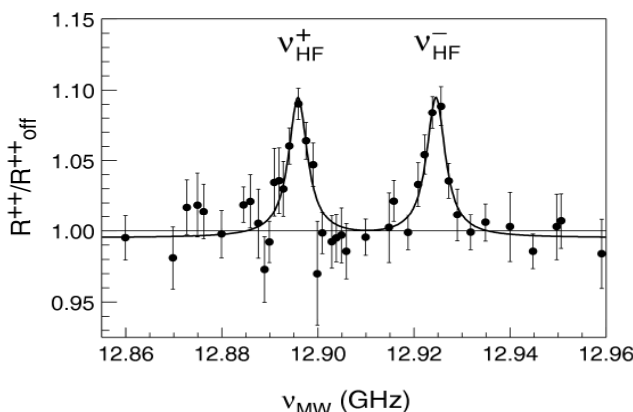


7. ábra.

A lézermikrohullámú lézer hármas rezonancia mérőberendezése [2,5]. A hiperfinom átmenet egyik rezonanciájára hangolt lézertény

t kettéváltjuk és egymáshoz képest 160 ns-mal késleltetve visszük a céltárgyra. Minden második lövésnél a két lézerbesugárzás között hangolt mikrohullámmal próbáljuk a kiürített hiperfinom állapotot visszapopulálni és így keressük meg a rezonancia-frekvenciát.

Tipikus mikrohullámú mért spektrum látható a 8. ábrán. A beszámolási időszak alatt publikáltuk a mérőberendezés elvét [5] és az előzetes eredményeket [2,6]. Mivel a nagysztatistikájú adatgyűjtés csak 2007-ben fejeződött be, a végleges analízis befejezés alatt van, hamarosan publikáljuk.



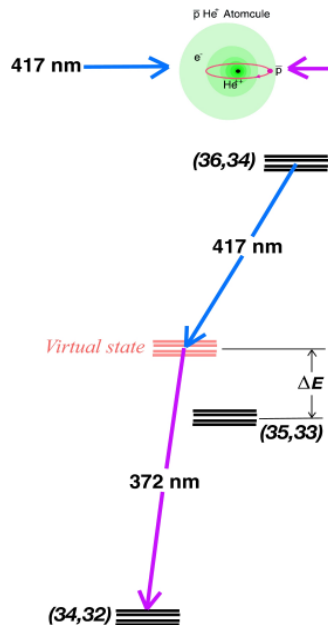
8. ábra. A mért mikrohullámú rezonanciaspektrum: a két egymásutáni lézerezonancia aránya mikrohullámmal és anélkül [2,6].

A hiperfinom¹ átmenet frekvenciájára négy elméleti számítást publikáltak, eredményük elég jól egyezik a mérésünk előzetes eredményeivel [2,6], körbeszórva azt mintegy 100 ppm távolságban. Ez a szórás tehát nagyságrendekkel nagyobb, mint az energiaátmenetek számításáé (cca. 1 ppm), amelyet

1 Az antiproton nagy tömege teszi hiperfinommá, egyébként a finomszerkezet analógja.

ugyanazok végeztek, ami a hiperfinom csatolású tagok nagyobb érzékenységét mutatja a számításokhoz használt hullámfüggvények konkrét alakjára [2]. Az előzetes kísérleti értékek szórása mintegy 30 ppm, valamivel nagyobb, mint a legújabb elméletieké, de a végleges analízisünkben ennél sokkal jobbat várunk. Mindenesetre ezen szóráson belül az elmélet és kísérlet jól egyezik, ami a CPT-szimmetria érvényességét mutatja.

2.1.3 Kétfotonos spektroszkópia



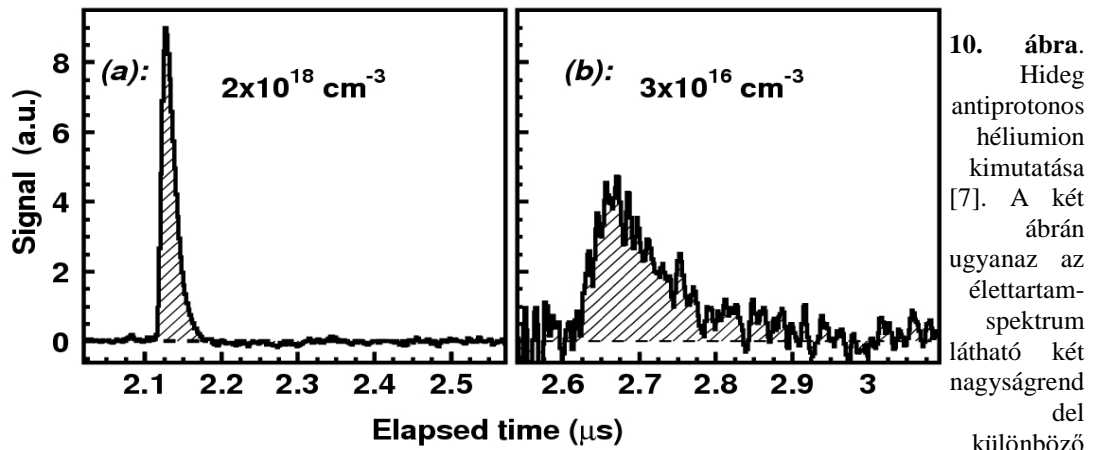
Legnagyobb előrelépésünket a kétfotonos spektroszkópia megvalósítása jelentette. Végleges eredményt ugyan még nem produkált, de 2007 folyamán sikeresen megvalósítottuk; ez lesz a jövőbeni legfontosabb módszerünk. Elve azon alapszik, hogy ha egy kétfotonos átmenetet két egymással szemben haladó, azonos frekvenciájú fotonnal gerjesztünk, akkor az atomok longitudinális mozgásából eredő Doppler-kiszélesedés teljes egészében eltűnik. Sajnos, ezt megvalósítani antiprotonos atomok esetén nem lehet, mert a kis átmeneti valószínűség túlságosan nagy lézertenzitásokat követelne. Ezért a 9. ábrán vázolt módszerrel élünk [2].

9. ábra. Kétfotonos spektroszkópia [2]

Az antiprotonok megállási térfogatát két különböző frekvenciájú lézerral sugározzuk be, ahol az egyiket hangoljuk, a másikat pedig rögzítjük egészen közel egy valódi átmenethez. Ekkor az átmeneti mátrixelem durván $(\Delta E)^{-3}$ -mal lesz arányos, a Doppler-kiszélesedés viszont a két frekvencia közelségének arányában, $|(v_1-v_2)/(v_1+v_2)|$ szerint a gyakorlatban mintegy 20-adrészére csökken [2].

2.1.4 Izolált antiprotonos héliumionok megfigyelése

Az antiprotonos hélium-ion jelentősége igen nagy a CPT-ellenőrzés szemszögéből, hiszen kvantummechanikai kéttest-rendszer, tehát sokkal könnyebben számolható, mint a hagyományos háromrészecskés antiprotonos héliumatom. Ráadásul az antiproton igen nehéz lévén, a korrekciói is kisebbek, mint a hagyományos atomoké. Igen magasan gerjesztett, cirkuláris állapota ($N = 30$, $L = N - 1$) viszonylag sokáig él, párszáz ns-ig, tehát alkalmas spektroszkópiai vizsgálatokra. Ütközésekben igen gyorsan lebomlik és annihilál, tehát a lehető legritkább közegben kell létrehozni. Ezt sikerült is elérnünk és kimutatnunk a hosszúélettartamú ionokat [7]. Antiprotonos héliumatomok élettartamát mértük extrém kis héliumsűrűségeknél, rezonanciára hangolva. Elegendően kis sűrűségnél megjelenik az izolált ionra jellemző hosszú élettartamú lecsengés (9. ábra). Komoly reményeket fűzünk az ionok távlati alkalmazásához CPT-tesztekhez [2].



10. ábra. Hideg antiprotonos héliumion kimutatása [7]. A két ábrán ugyanaz az élettartam-spektrum látható két nagyságrenddel különböző

gázsűrűség mellett: a kisebbik sűrűségnél jelentősen megnő a gyors lebomlású állapot élettartama, ami távlatilag lehetővé teszi a kettős-spektroszkópiát.

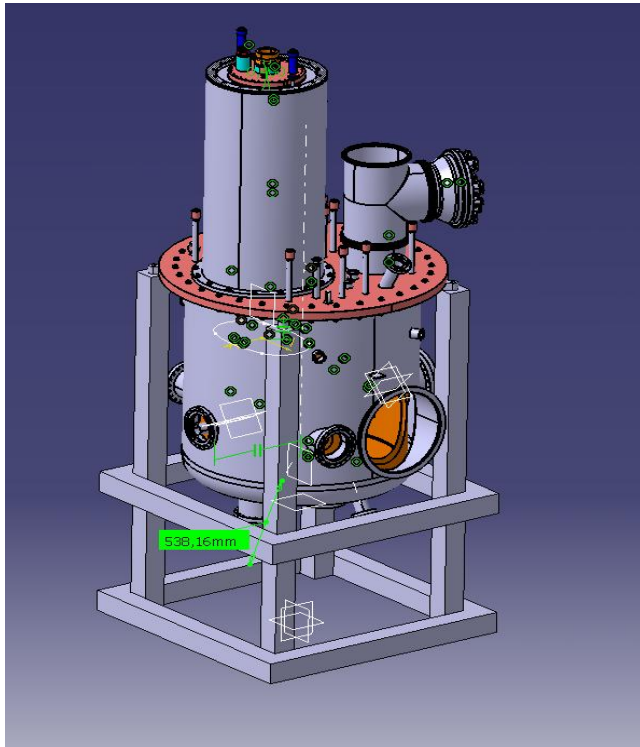
2.1.5 Ütközések hatása a metastabil állapot élettartamára

Korábbi méréseink qanalízisével megvizsgáltuk és összegeztük a metastabil állapotok kezdeti populációit és élettartamait [8]; ennek a CPT-tesztek értelmezésében és az elméleti számításokkal való összevetésben van nagy jelentősége. Szisztematikus vizsgálatnak vetettük alá az eddig azonosított metastabil állapotok élettartamait az elméleti előrejelzésekkel összehasonlításban. Megállapítottuk, hogy az Auger-átmenetek valószínűségének számítása bizonyos esetekben erősen eltér a mért értékektől, és erre megpróbáltunk kvalitatív magyarázatokat adni [9].

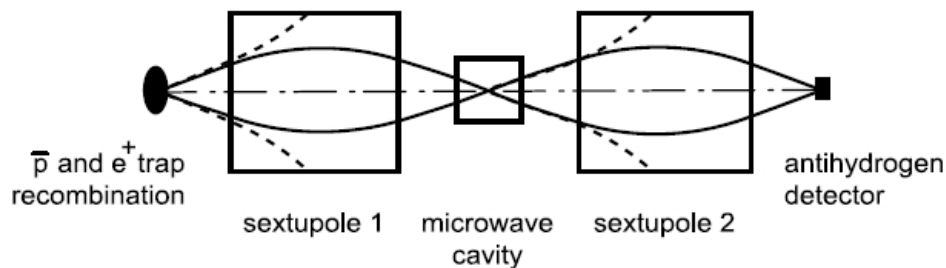
Juhász Bertalan 2004-ben lezárta PhD-munkájának folytatásaként tanulmányoztuk két hosszú-élettartamú antiprotonos állapot élettartamának függését a gáz hőmérsékletétől [10]. Meghatároztuk a metastabil állapotok ütközésekben történő legerjesztésének hatáskeresztmetszetét. Az $(n=37, l=34)$ állapot bomlási hatáskeresztmetszetének hőmérsékletfüggése monoton csökkenő egészen 30 K-ig, ahol állandó lesz; az elméleti előrejelzésekkel egyezésben ez alacsony aktivációs energiájú csatornahatásra vall. Ugyanakkor az $(n=37, l=34)$ állapotra az elmélet nem jelzett aktivációs energiát, és a méréseink azt mutatták, hogy a bomlási hatáskeresztmetszet nő a hőmérséklet csökkenésével. Ez a Wigner-féle $1/v$ küszöbszabályt látszik követni semleges részecskék exoterm reakcióira.

2.2 Az antihidrogén hiperfinom szerkezetének mérése

Ehhez a pályázat időszakában megterveztük az antihidrogén-csapdát és a mágneses analizáló nyalábvezetőket és megépítettük a csapda pozicionáló állványát (11. ábra). A csapda tervezésében, szimulációjában és a prototípus építésében Barna Dániel, a mágneses analizáló rendszer tervezésében Juhász Bertalan, a csapda mozgatóállványának tervezésében és építésében Zalán Péter és Horváth Dezső vett részt. A mérés elve a 12. ábrán látható: a csapdából kirepülő antihidrogén-atomokat egy szextupól-mágnes spin szerint analizálja, egy mikrohullámú rezonanciaüreg átfordítja, majd egy újabb szextupól-mágnes ismét analizálja; a pozícióérzékeny detektorban a három stáción átjutott antihidrogén-atomok annihilálnak [25].



11. ábra. Az antihidrogén-csapda terve a Budapesten épített állvánnyal. Az ultravákuumkamra átmérője 1100 mm. A hűtés felülről, a szívás alulról történik. A lassú antiprotonok jobbról, a pozitronok balról, vízszintesen lépnek be, az antihidrogén analízisére szolgáló első szextupól-mágnes a szemben látszó nagy nyílásba illik majd be. Az oldalt és alul-felül ferdén kialakított kis nyílásokban lézeraljakok lesznek az antihidrogén képződését elősegítő illetve azt legerjesztő lézereknek.



12. ábra. Az antihidrogén mágneses momentumának mérése. A csapdából

kilépő antihidrogén-atomok megfelelően polarizált felét az első szextupól-mágnes a mikrohullámú rezonátorba fókuszálja, ahol a hangolt mikrohullámú sugárzással át-polarizáljuk, majd a második szextupól-mágnessel, ha megfelelő a spinje, az antihidrogén-detektorba fókuszáljuk.

Az antihidrogén-csapda állványát elkészítettük és kiszállítottuk a CERN-be, maga a csapda is csaknem készen van már. A 2008-as nyáladidőben kezdjük az első méréseket, egyelőre csak az antihidrogén-képződés hatásfokát mérve.

2.3 Atomi ütközések vizsgálata

Töltött részecskék energiaveszteségi spektrumának, valamint fékeződésének a mérése fémfelületek környezetében sok érdekes problémát vet fel. Köztük talán az egyik legérdekesebb a felületi és tömbi effektusok szétválasztása. A felületi veszteségi függvény képzetes része írja le az energiaveszteségi és fékeződési folyamatokat. Modellszámításokat végeztünk a felületi veszteségi függvény meghatározására a fémfelületektől nagy távolságokban [11]. A számítások során a klasszikus tükrösszaverődési és a kvantummechanikai elvekre épülő időfüggő sűrűségfüggvény-elméletet alkalmaztuk.

Áttekintő munka keretében elemeztük a klasszikus pályájú Monte Carlo módszer alkalmazhatóságát, különböző típusú atomi ütközési rendszerek esetében.

2.2.1 Elektronszórási folyamatok vizsgálata

A többszörös rugalmas elektronszórás hatását vizsgáltuk a mintából kilépő elektronok energia- eloszlására elektronok és szilárdtestfelületek ütközésében [11]. Fém- és polimerminták esetében összehasonlítottuk a nagy energiafeloldású méréseinket és a Monte Carlo számításainkat, ahol a célatomok hőmozgását is figyelembe vettük. Néhány bombázó elektronenergia esetében megmértük az Ag mintáról visszaszórt elektronok energiaveszteségi spektrumait (REELS) és meghatároztuk az effektív energiaveszteségi függvényeket (EELF). A számítások alapját a kiterjesztett Landau-modell szolgáltatta. Kis energiaveszteségi tartományban az EELF nagyon hasonló a felületi veszteségi függvényhez, nagyobb energiaveszteség esetében az EELF közelít az elméletileg levezethető tömbi veszteségi függvényhez. A meghatározott EELF-t alkalmazva a Monte Carlo számításainkban, a szimulált REELS spektrumok igen jó egyezést mutatnak a kísérleti spektrumokkal.

Klasszikus pályájú Monte Carlo módszer segítségével meghatároztuk a hélium atom kétszeres gerjesztési hatáskeresztmetszeteit az $1s^2 \rightarrow 2s^2$, $1s^2 \rightarrow 2s2p$, $1s^2 \rightarrow 2p^2$ gerjesztések esetében [12]. CTMC számításokat végeztünk ionizációs hatáskeresztmetszetek meghatározására pozitronok és héliumatomok ütközésekor [13]. Számításokat végeztünk az Ar(2p) héj ionizációs hatáskeresztmetszeteinek meghatározására, mint a szórási szög és az ionizált elektron energiájának a függvénye elektron- és antiproton-bombázás esetében [14]. A kapott kétszeresen differenciális hatáskeresztmetszeteket az Ar LMM Auger-vonalak ütközés utáni (PCI) torzításának leírására használtuk fel.

Monte Carlo módszerrel kiszámítottuk a kétkomponensű félvégtelen polietilén mintáról rugalmasan visszaszórt elektronok hozamát és energia eloszlását [15]. A teljes hozamon és a spektrumon kívül meghatároztuk külön az egyszeres, a monoatomos és a vegyes szórások hozamát és spektrumait. Az analitikusan is számolható egyszeres szórásra vonatkozó adatokat felhasználtuk a Monte Carlo program tesztelésére. A kísérletileg megfigyelhető teljes eloszlásra nézve megállapítottuk, hogy a spektrumban jól elkülönülő két csúcs figyelhető meg, amelyek kis intenzitású folytonos résszel vannak összekötve. A csúcsok jól illeszthetők Gauss-típusú csúcsalakkal, de a csúcsok távolsága kisebb, a szélességük nagyobb, mint az egyszeres szórásra számolt értékek. A csúcsok intenzitásának (területének) aránya az E0 energia növekedtével változó (pozitívról negatívra) előjelű eltéréseket mutatott az egyszeres szórások arányától. Az eltéréseket a mintában lévő mindkét atom részvételével lejátszódó "vegyes" szórások okozzák, az eltérések mértéke még egy adott minta és szórási geometria mellett is függ a primer elektron energiától. A számítások azt mutatják, hogy ha viszonylag vastag mintáról rugalmasan visszaszórt elektronok spektrumát nagy felbontással mérjük, akkor a kísérleti spektrumok kiértékelésénél (csúcsok és háttér illesztésénél) és a kapott adatokból levonható következtetéseknél (pl. koncentrációarány, átlagos kinetikus energia) figyelembe kell venni a vegyes szórások adott esetre vonatkozó hatását, amelyet részletes Monte Carlo számításokkal elemezhetünk.

Spin-függő elektronszórási és bolyongási folyamatokat vizsgáltunk [16]. A modellszámításokat kisenergiájú, polarizálatlan elektronok és szilárd, mágneses vask felületek ütközésének leírására végeztük Monte Carlo módszerrel, ahol mind a rugalmas, mind pedig a rugalmatlan folyamatokat figyelembe vettük. A szimuláció során a következő rugalmatlan

folyamatokat vettük figyelembe: elektron-lyuk párkeltés, tömbi és felületi plazmon gerjesztés, Stoner gerjesztés. Számítások igen jó egyezést mutatnak a kísérleti megfigyelésekkel.

2.2.2 Protonok és antiprotonok szóródása és befogása

Differenciális ionizációs hatáskeresztmetszetek meghatározására modellszámításokat végeztünk protonok és He-atomok ütközésekor [17]. Igen jó egyezés mutatkozik a CTMC és a torzított hullámú modellek által szolgáltatott adatok között.

Számításokat végeztünk fő- és mellék-kvantumszám szerinti befogási hatáskeresztmetszetek meghatározására antiprotonok és hélium atomok ütközésekor [18]. A klasszikus pályájú Monte Carlo módszer által szolgáltatott hatáskeresztmetszet-értékeket egybevetettük a kísérleti adatokkal. 50 és 100 keV antiproton és hélium atom ütközésekor meghatároztuk a teljes, az egyszeresen és kétszeresen differenciális ionizációs hatáskeresztmetszeteket. A számításokat klasszikus pályájú Monte Carlo módszer, valamint a kvantummechanikai folytonos torzított hullámú modell segítségével végeztük el. A két modellben kapott teljes hatáskeresztmetszet-értékek igen jó egyezést mutatnak egymással és a kísérleti adatokkal. Nagyobb eltérést mutatnak a lövedék irányában meghatározott kétszeresen differenciális elektronspektrumok. A klasszikus modellben jóval nagyobb az az energia és szög tartomány, ahol a lövedék irányában nem észleltünk elektronokat, azaz az úgynevezett anticusp képződése jóval erősebb klasszikusan, mint kvantummechanikailag. A számításainkat proton-lövedékre végzett számításokkal is összehasonlítottuk.

Teljes és szög szerinti differenciális egyszeres ionizációs hatáskeresztmetszeteket határoztunk meg antiproton és hélium atomok ütközésében [19]. A lövedék energiáját 1 és 1000 keV között változtattuk. Számításainkat időfüggő csatolt-csatornás, torzított hullámú eikonál módszer, valamint klasszikus pályájú Monte Carlo módszerek segítségével végeztük el.

Kiszámítottuk a Si K-héjának egyszeres és kétszeres ionizációs hatáskeresztmetszeteit, mint a bombázó protonenergia függvényét [20]. A hatáskeresztmetszeteket 4-részecske független-elektron, klasszikus pályájú Monte Carlo (CTMC) módszer segítségével határoztuk meg, amikor a célatom két aktív K-héjának elektronjai közötti kölcsönhatástól, az ütközés egésze során eltekintettünk. Az egyszeres ionizációs hatáskeresztmetszetekre vonatkozó jelenlegi számításaink eredményei igen jó egyezést mutatnak a kísérleti értékekkel és a szemi-klasszikus közelítések (SCA) eredményeivel. A kétszeres ionizációs hatáskeresztmetszetekre vonatkozó CTMC-eredményeink viszont túlbecsülik mind a kísérleti, mind pedig az SCA értékeket. Az eltérés részben azzal magyarázható, hogy számításainkban teljes mértékben figyelmen kívül hagytuk a Si külső héjain elhelyezkedő elektronok árnyékoló hatását, valamint a két K-elektron közötti kölcsönhatást. Megmutattuk továbbá, hogy amíg kis lövedék sebességek esetében a kétszeres ionizáció két lépésben, addig nagyobb lövedéksebességek esetében egy lépésben játszódik le.

Klasszikus pályájú Monte Carlo számítások segítségével meghatároztuk a lövedék energiaveszteségét proton és hidrogén atomok ütközésekor [21]. A lövedék teljes, eredő fékeződése mellett meghatároztuk a parciális járulékokat is, vagyis a fékeződést, ami a rendszer gerjesztésből, ionizációjából, vagy kötött állapotokba történő befogásból származnak. A fékeződést a kölcsönhatások típusának (lövedék-elektron, lövedék-célatom) a függvényében is vizsgáltuk. Számításaink megerősítették, hogy a magasabbrendű tagok figyelembevétele elengedhetetlen a fékeződés pontos leírására. Megmutattuk, hogy kis ütközési paramétereknél a mag-mag ütközés szerepe jelentőssé válik.

2.2.3 Nehezebb ionok szóródási folyamatai

Egyszeres és kétszeres teljes ionizációs hatáskeresztmetszeteket határoztunk meg többszörösen töltött ionok és hélium atomok ütközésekor [22]. A számítások során az ab initio csatolt csatornás, valamint a klasszikus pályájú Monte Carlo elméleteket alkalmaztuk. A csupasz lövedékionok töltése 2 és 8, az energiájuk pedig 0.19 és 2.31 MeV/amu között változott. A csatolt-csatornás eredményeink nagyon közel állnak a kísérleti adatokhoz, amíg a klasszikus pályájú Monte Carlo módszerrel kapott eredmények nagyobb eltéréseket mutatnak.

A fékeződést okozó erőkomponenst tanulmányoztuk elméletileg nagy töltésű ionok és szilárdtest-felületek kölcsönhatásakor nagy ion-felület távolságok esetében [11]. A súrlódó erőt (fékeződését) két elméleti módszer segítségével, a klasszikus tükör-visszaszórási modell (*specular-reflection model*, SRM) valamint a kvantummechanikai idő-függő sűrűségfunkcionál-elmélet (*time-dependent density functional theory*, TDDFT) keretében vizsgáltuk. Elemeztük a részecske-lyuk, valamint a plazmon-gerjesztés járulékát a teljes fékeződéshez. Kifejlesztettünk egy egyszerű módszert, amelynek segítségével a TDDFT elmélet keretében képesek vagyunk figyelembe venni a plazmon-gerjesztések véges vonalszélességét még nagy hullámhosszak esetében is. Töltött részecskék energiaveszteségét határoztuk meg mikropilláris felületek belső falaival való kölcsönhatásokat valamint súrló beesési szögeket feltételezve. Eredményeink azt mutatják, hogy korreláció van az ionok által elszenvedett energiaveszteség és a szóródási szögük között, és ez első alkalommal ad lehetőséget a kapilláris anyagának dielektromos tulajdonságainak vizsgálatára nagy távolságok esetében.

2.4 A MUSASHI-berendezés fejlesztése

A 105 MeV/c eredeti AD-impulzusról rádiófrekvenciás kvadрупól-rezonátor (RFQD) segítségével 10-110 keV-re lassítjuk az antiproton-nyalábot, a Tokiói Egyetemen Y. Yamazaki és társai által kifejlesztett Penning-csapdában eV-os energiára hűtjük, majd gyors elektromos impulzussal a csapdából kirántjuk őket. Ez a berendezés a MUSASHI (Monoenergetic Ultra Slow Antiproton Source for High-precision Investigations) nevet kapta Japán egyik leghíresebb szamurájáról. Ebben a munkában szimulációkkal (Barna Dániel és Juhász Bertalan) és a mozgóállványok megépítésével (Zalán Péter és Horváth Dezső) vettünk részt, születtek közös technikai publikációk is [23, 24].

A beszámolási időszakban sikerült nagymennyiségű antiprotonot csapdázni, hűteni és kivonni a berendezésből. Sajnos, a csapda hibája miatt (gyakran eltömődött a hűtőrendszer héliumvezetéke, és akkor napokra leállt a rendszer, amíg kifűtöttük) a rendszer nem érte el a felhasználói berendezés szintjét. Ezért 2006-ban a Komaba-csoport új csapdát csináltatott, amely már zárt hűtőrendszerrel működik és így nem szennyeződnek a vezetékei.

4. Nemzetközi együttműködés

Az ASACUSA-kísérlet a pályázat időszakában négy, egymástól csaknem teljesen független csoportból állt (az olasz csoport csak 2007-ben csatlakozott hozzánk ötödikként). A dán csoport az alacsonyenergiás antiprotonok fékeződését mérte Aarhusban készített berendezésével, később csatlakozott hozzájuk a Tokiói Egyetem Komaba-kampuszáról Yasunori Yamazaki csoportja a MUSASHI-berendezéssel; ezekhez a vizsgálatokhoz csatlakozott Tökési Károly elméleti számolásokkal és az adatgyűjtésben való részvétellel, bár

publikációk még inkább csak a számolásokból és nem-antiprotonos kísérletekből születtek. Barna Dániel, Horváth Dezső és Juhász Bertalan a másik két - egyaránt japán dominanciájú - csoport munkájában vett részt mindjárt a kezdetektől, a Tokiói Egyetem Hongo kampuszán Ryugo Hayano vezetésével működő spektroszkópai és a Yasunori Yamazaki vezette csapdás csoport munkájában. Mindkét csoport berendezéseihez Budapesten készítettük a mozgóállványokat. Juhász Bertalan PhD-dolgozata is a Hongo-csoport spektroszkópai tevékenységének része, de 2005 óta az Eberhard Widmann által vezetett bécsi csoport antihidrogén-mérésében dolgozik. A MUSASHI-berendezés építése lényegében befejeződött, és abból is született mind technikai, mind pedig fizikai közlemény, az antihidrogéné azonban még készül, ezért csak konferencia-riportok jelentek meg róla.

Az ASACUSA-kísérlet, részecskefizikai mértékkel igen kis mérete ellenére, rendkívül sikeresnek számít a CERN-ben is. A CERN főigazgatója minden egyes évvégi beszámolójában kiemelte a CPT-tesztünk jelentőségét, és a CERN Courier is rendszeresen számot adott a kísérlet újabb eredményeiről, hála John Eades remek PR-tevékenységének. A kísérlet jogelődje, az Alacsonyenergiás antiproton-gyűrű PS-205 (Héliumcsapda) kísérletével együtt 15 év alatt 57 nemzetközi folyóiratcikket publikált az antiprotonos CPT-tesztekkel kapcsolatban, közöttük 10 Phys. Rev. Letters és 12 Phys. Rev. A cikket; ezekre mintegy 480 független hivatkozás történt. Mindehhez hozzájönnek az ütközési folyamatokkal és a berendezés fejlesztésével kapcsolatos közlemények: csak a pályázathoz tartozó négy év alatt 53 publikációnk született.

Együttműködésünk a főként japán résztvevőkkel igen kellemes volt. A japán fél és kisebb részben a CERN fedezte a berendezés megépítésének és fenntartásának költségeit, mintegy 20 millió EUR értékben, a magyar hozzájárulás a mozgórendszer volt. Ugyanakkor a japán fél fizette a magyar hallgatók részvételét a külföldi (Tokió és CERN) munkában, és több esetben konferencia-részvételünkhöz is hozzájárult.

A beszámolási időszakban mini-konferenciával egybekötött kollaborációs megbeszélést szerveztünk (Horváth Dezső szervezésében) Magyarországon a témakörben. Az összejövetel 2004 március 11-13-án zajlott le a Nemzeti Kutatási és Technológia Hivatal épületében *International Workshop on CPT Symmetry and Antiprotonic Atoms* címmel. Itt az ASACUSA-résztvevőkön kívül hét külső előadó tartott a témakörben előadásokat, majd belső kollaborációs megbeszéléssé alakultunk. A konferencia eredményeképpen az ASACUSA együttműködéshez csatlakozott Prof Evandro Lodi-Rizzini csoportja a Bresciai Egyetemről; alacsonyenergiás magfizikai kutatásokat kezdeményeztek lassú antiprotonokkal.

Egészében véve a viszonylag szerény OTKA-támogatást megfelelően kamatoztattuk: kis létszámmal ugyan, de megfelelő súllyal vettünk részt a kísérletben, részt vállalva annak minden fázisában, az előkészületekben, a berendezés építésében, az adatgyűjtésben, az analízisben és a cikkírásban is.

Irodalom

A [†]-tel jelölt hivatkozások szerepelnek az OTKA-nyilvántartási szám felüntetésével megjelent publikációink listáján, amely természetesen sokkal hosszabb, itt csak a leglényegesebbeket szerepeltetjük közülük.

- [1] M. Charlton, J. Eades, D. Horváth, R. J. Hughes, C. Zimmermann: *Antihydrogen physics*, **Physics Reports** 241 (1994) 65.
- [2][†] R.S. Hayano, M. Hori, D. Horváth and E. Widmann: *Antiprotonic helium and CPT invariance*, **Reports on Progress in Physics** 70 (2007) 1995-2065.
- [3][†] M. Hori, A. Dax, J. Eades, K. Gomikawa, R. S. Hayano, N. Ono, W. Pirkl, E. Widmann, H. A. Torii, B. Juhász, D. Barna, D. Horváth: *Determination of the antiproton-to-electron mass ratio by precision laser spectroscopy of pbar He*, **Physical Review Letters** 96 (2006) 243401.
- [4] G. Gabrielse, A. Khabbaz, D.S. Hall, C. Heimann, H. Kalinowsky, W. Jhe: **Physical Review Letters** 82 (1999) 3198.
- [5][†] J. Sakaguchi, H. Gilg, R.S. Hayano, T. Ishikawa, K. Suzuki, E. Widmann, H. Yamaguchi, F. Caspers, J. Eades, M. Hori, D. Barna, D. Horváth, B. Juhász, H. A. Torii, T. Yamazaki: *Cryogenic tunable microwave cavity at 13 GHz for hyperfine spectroscopy of antiprotonic helium*, **Nuclear Instr. Meth. A**, 533 (2004) 598-611.
- [6][†] J. Sakaguchi, R.S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, T. Ishikawa, B. Juhász, H. A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi, T. Yamazaki: *Study of the hyperfine structure of antiprotonic helium*, **Nuclear Instr. Meth. B** 214 (2004) 89-93.
- [7][†] M. Hori, J. Eades, R. S. Hayano, W. Pirkl, E. Widmann, H. Yamaguchi, H. A. Torii, B. Juhász, D. Horváth, K. Suzuki, T. Yamazaki: *Observation of cold, long-lived antiprotonic helium ions*, **Physical Review Letters** 94 (2005) 063401.
- [8][†] M. Hori, J. Eades, E. Widmann, T. Yamazaki, R. S. Hayano, T. Ishikawa, H. A. Torii, T. von Egidy, F. J. Hartmann, B. Ketzer, C. Maierl, R. Pohl, M. Kumakura, N. Morita, D. Horváth: *Populations and lifetimes in the $v = n-l-1 = 2$ and 3 metastable cascades of pbar He+ measured by pulsed and continuous antiproton beams*, **Physical Review A** 70 (2004) 012504.
- [9][†] H. Yamaguchi, R. S. Hayano, T. Ishikawa, J. Sakaguchi, E. Widmann, J. Eades, M. Hori, H. A. Torii, B. Juhász, D. Horváth, T. Yamazaki: *Systematic study of the decay rates of antiprotonic helium states*, **Physical Review A** 70 (2004) 012501.
- [10][†] B. Juhász, D. Barna, J. Eades, H. Fuhrmann, R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, H. A. Torii, E. Widmann, H. Yamaguchi, T. Yamazaki, J. Zmeskal: *Low temperature behaviour of collisions between antiprotonic helium and hydrogenic molecules and an indication of the Wigner threshold law*, **Chemical Physics Letters** 427 (2006) 246-250, 2006
- [11][†] K. Tökési, X. -M. Tong, C. Lemell, J. Burgdörfer, *Energy loss of charged particles at large distances from metal surfaces*. **Physical Review A** 72 (2005) 022901.
- [12][†] K. Tökési, *Double electron excitation of helium by charged particle impact*,

- Nuclear Instr. Methods B** 233 (2005) 266-269.
- [13][†] K. Tőkési, I.F. Barna and J. Burgdörfer, *Ionization of helium in positron impact*, **Nuclear Instr. Methods B** 233 (2005) 307-311.[14][†]
- [14][†] K. Tőkési, L. Gulyás, B. Paripás, Gy. Víkor and G. Vitéz, *Single ionization of Ar(2p) by antiproton and electron impact*, **Nuclear Instr. Methods B** 233 (2005) 324-329
- [15][†] D. Varga, K. Tőkési, Z. Berényi, *Quantitative analysis of the hydrogen peak in the spectra of electrons backscattered from polyethylene*, **Physical Review A**, közlésre előkészítve.
- [16][†] B. Solleder, C. Lemell, K. Tőkési, N. Hatcher, and J. Burgdörfer, *Spin-dependent low-energy electron transport in metals*, **Physical Review B** 76 (2007) 075115.
- [17][†] I.F. Barna, A.C. Gagy-Pálffy, L. Gulyás, K. Tőkési and J. Burgdörfer, *Singly differential electron emission cross sections for ionization of helium by protons*, **Nuclear Instr. Methods B** 233 (2005) 176-181
- [18][†] K. Tőkési, B. Juhász, J. Burgdörfer, *Exotic Rydberg atom formation in low-energy antiproton-helium collisions*, **J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys.** 38 (2005) 401-407
- [19][†] I. F. Barna, K. Tőkési, L. Gulyás, and J. Burgdörfer, *Total and angular differential cross sections of electrons emitted in collisions between antiprotons and helium atoms*, **Radiation Physics and Chemistry** 76 (2007) 495-498.
- [20][†] M. Kavcic, K. Tőkési, *Single and double K-shell ionization cross sections of silicon*, **Radiation Physics and Chemistry** 76 (2007) 542-545.
- [21][†] K. Tőkési, Z.-J. Ding, Z.M. Zhang, *Energy losses of swift protons to hydrogen atoms*, **Radiation Physics and Chemistry** 76 (2007) 627-630.
- [22][†] C. Lemell, M. Alducin, J. Burgdörfer, I. Juaristi, K. Schiessl, B. Solleder, and K. Tőkési, *Interaction of slow multicharged ions with surfaces*, **Radiation Physics and Chemistry** 76 (2007) 412-417.
- [23][†] N. Kuroda, H. A. Torii, K. Yoshiki Franzen, Z. Wang, S. Yoneda, M. Inoue, M. Hori, B. Juhász, D. Horváth, H. Higaki, A. Mohri, J. Eades, K. Komaki, Y. Yamazaki: *Confinement of a large number of antiprotons and production of an ultraslow antiproton beam*, **Physical Review Letters** 94 (2005) 023401.
- [24][†] N. Kuroda, H.A. Torii, M. Shibata, Y. Nagata, D. Barna, D. Horváth, M. Hori, J. Eades, A. Mohri, K. Komaki, Y. Yamazaki: *Control of plasmas for production of ultraslow antiproton beams*, **AIP Conf. Proc.** 793 (2005) 307-317.
- [25][†] B. Juhász, D. Barna, J. Eades, R. S. Hayano, M. Hori, D. Horváth, W. Pirkl, E. Widmann, T. Yamazaki: *Measurement of the ground-state hyperfine structure of antihydrogen*, **AIP Conf. Proc.** 796 (2005) 243-246.

Nyilatkozat

Hozzájárulok ahhoz, hogy a T046095 OTKA-nyilvántartási számú kutatás eredményei alapján készült zárójelentésemet az OTKA Bizottság nyilvánosságra hozza, illetve a tudományos közösség számára ismert, elérhető archivumban archiválja.

Budapest, 2008. március 10.

Horváth Dezső
témavezető