

Az antianyag matematikai felfedezése

Az antianyagra *Paul Dirac* (Nobel-díj, 1933, *1. ábra*) matematikailag bukkant rá 1928-ban. Négyzetes egyenletről négyzetgyököt vonva kétféle előjelű megoldást kapott az elektronra (ahogy a +4 négyzetgyöke lehet -2 és +2 is, mert négyzetre emelve ugyanazt adják), a pozitív energiájú és negatív elektromos töltésű, közönséges elektront, és egy faramuci, negatív energiájú, de pozitív töltésű, tehát ellentétes tulajdonságokkal rendelkezőt, amelyet később pozitronnak neveztek el. Mivel egy nyugvó részecske E energiája és tömege között az $E = mc^2$ Einstein-összefüggés áll fenn, és aszerint a pozitron negatív tömeggel rendelkezne, Dirac akkor arra gondolt, hogy ilyen állapot nem létezhet, de *Carl Anderson* (Nobel-díj, 1936, *2. ábra*) nem sokkal később kimutatta a pozitront a kozmikus sugárzásban.

Ezeket az antirészecske-állapotokat (felülvonással jelöljük, az antiproton jele \bar{p}) matematikailag jól kezeljük, remekül beépülnek az elméletbe. Bizarr módon az egyenletekben az antirészecskék úgy szerepelnek, mint térben és időben ellentétes irányban mozgó közönséges részecskék. Antirészecske és részecske egymással egyesülve sugárzássá alakul: elektron és pozitron találkozása is így végződik, és azt matematikailag úgy írjuk le, hogy jön egy elektron, kibocsátja az energiája dupláját két vagy három foton formájában, majd térben és időben visszafelé kihátrál a képből. Hasonlóképpen, sugárzás elnyelődésekor részecske-antirészecske párok keletkezhetnek, ha elegendő energia áll rendelkezésre (*3. ábra*). A fizika tehát feltételezi részecske és antirészecske, anyag és antianyag egyenértékűségét, és ez a leírás gyönyörűen egyezik mindenféle mérés eredményével.

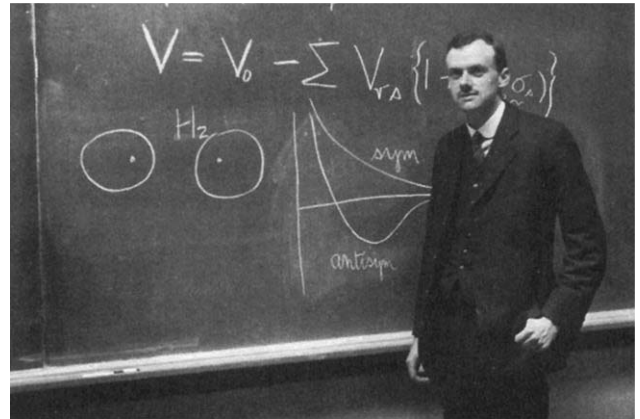
A rejtőzködő antianyag

Gyanús viszont az antianyag hiánya a Világegyetemben: nem látunk antianyag-galaxisokat, pedig az Ősrobbanás után, a sugárzási időszak lezárásával ugyanannyi részecskének és antirészecskének kellett volna keletkeznie

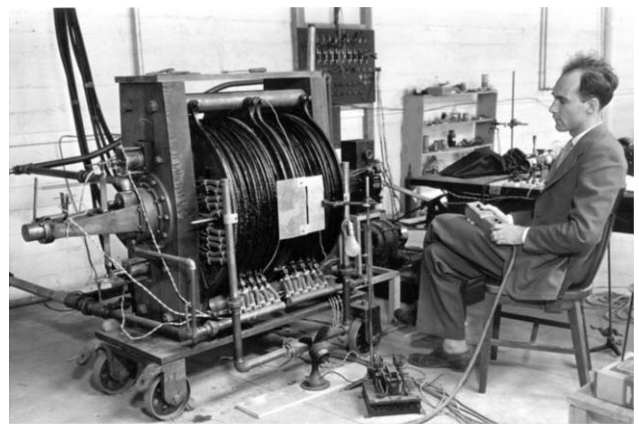
A szerző köszönetét fejezi ki a Nemzeti Kutatási és Fejlesztési Hivatalnak a kutatás támogatásáért (K103917 sz. pályázat) és *Barna Dániel*nek a cikkhez javasolt kiegészítésekért.



Horváth Dezső Széchenyi-díjas kísérleti részecskefizikus. 1970-ben végzett az ELTE-n, vizsgálatait Dubnában és Leningrádban kezdte, a kanadai TRIUMF-ban, az amerikai BNL-ben, a svájci Paul-Scherrer Intézetben, az olasz INFN-ben, majd a CERN-ben folytatta. Budapest–Debrecen kutatócsoportokat szervezett CERN-kísérletekre. 2006 óta koordinálja a magyar fizikatanárok részecskefizikai oktatását a CERN-ben. Emeritus professzor, magántanárként részecskefizikát oktat a Debreceni Egyetemen.



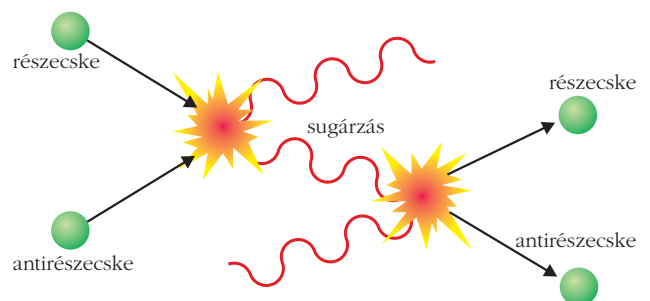
1. ábra. Paul A. M. Dirac

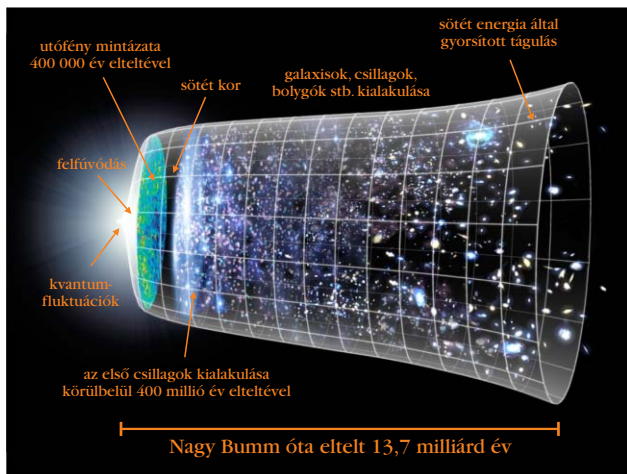


2. ábra. Carl David Anderson

(*4. ábra*): hova lett az antianyag? Háttha mégsem teljesen egyformák (töltésük előjelen kívül) a részecske és az antirészecske tulajdonságai? Egy esetleges különbség felfedezése ugyanannyira megrázná a fizikát, mint 1956-ban a *paritássértés*, a mikrofolyamatokban joggal elvárható tükrörszimmetria sértésére részecskebomlásokban. A kérdés megoldására a CERN, az európai országok közös részecskefizikai laboratóriuma Genf mellett több kísérleti berendezést is épített, a legújabbat el is nevezte Antianyaggyárnak (Antimatter Factory, *5. és 6. ábra*), és abban hét egymással versengő kísérlet vizsgálódik.

3. ábra. Részecske-antirészecske pár szétsugárzása és keltése sugárzásból.





4. ábra. Ősrobbanás után hova lett az antianyag?

Negatív tömeg = antigravitáció?

Az antirészecskék negatív tömege váltig piszkálja a fizikusok fantáziáját. A gravitáció például két pozitív tömeg között vonzó, de lehet, hogy ha az egyik tömeg negatív, akkor esetleg taszító lehet közöttük. Képzelnék el, milyen szép volna antianyaggal lebegtetett repülőn ülni, ahol csak tolóerőre lenne szükség,

5. ábra. A CERN „antianyaggyára”.



6. ábra. Az Antiproton-lassító tárológyűrűje a mágnesekkel.



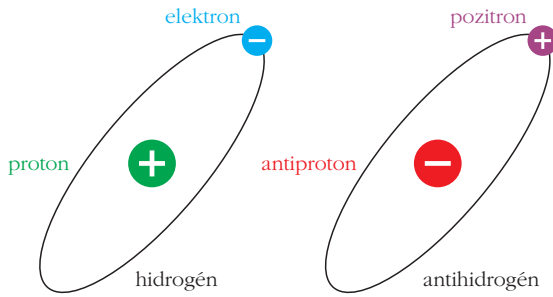
7. ábra. UFO Alaszkában, 2015. 06. 28. (Forrás: iufosightings.com)



8. ábra. UFO tehenet rabol. (Forrás: patch.com/maryland)

emelőre nem! Az oly gyakran előkerülő repülő csészealjok is természetesen így működnek: az amerikai Nemzeti UFO-figyelő Központnak – 1974-es alapítása óta – mintegy 90 000 esetet jelentettek (7. ábra). Némi rosszindulatú statisztika szerint a megfigyelések többnyire a nap azon szakából származnak, amikor az ittasság valószínűsége nagyobb (8. ábra). Az anyag és antianyag szimmetriája nem zár ki lehetséges különbséget a gravitációban, hiszen az csak azt mondja ki, hogy a proton ugyanúgy esik a Föld felé, mint az antiproton egy anti-Föld felé. Az azonos gravitációt *Einstein* ekvivalenciaelvé mondja ki.

Sajnos, több minden szól az antigravitáció létezésé ellen. Először is anyagunk tömege túlnyomórészt energia, az atommag tömegéhez a benne levő anyagi részecskék tömege legfeljebb pár százalékot tesz hozzá. A csillagászatban megfigyelhető gravitációs lencsehatás bizonyítja, hogy a fény sugárzási energiáját hordozó fotonra, habár nyugalmi tömege nincs, a gravitáció ugyanúgy hat, mint a részecskékre. Ha tehát az anyagot alkotó elemi részecskékre és az antianyag antirészecskéire másképpen hatna a közönséges anyag gravitációs hatása, azt is nehéz volna kimutatni a közönséges energia gravitációs hatása mögött. *Einstein* gravitációs elméletét, az általános relativitáselméletet – habár ismeretesebb más elméletek is – eddig minden kísérleti adat szigorúan igazolja. Márpedig azokban az egyenletekben nincs olyan tag, amely előjelet váltana részecske és antirészecske között. Ajánlottak ilyen matematikai leírásokat, de azok megbuktak a kísérleti adatokon, az előjelváltó tagok észlelhetetlenül kicsik.

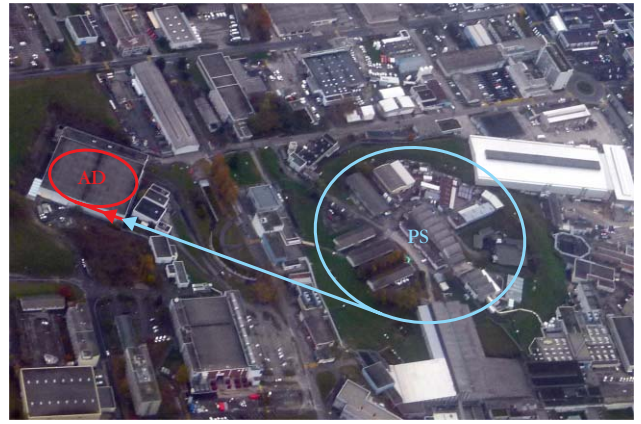


9. ábra. Atom és antiatom.

Igazán érdekes az elektron és a pozitron gravitációs mozgásának összehasonlítása volna, hiszen azok igazi elemi részecskék. Készült rá kísérlet, de a töltött részecskére ható elektromágneses erő annyival erősebb a gravitációnál, hogy ez utóbbi hatását teljesen reménytelen kimutatni. Hiszen ahhoz a részecskét valamilyen módon meg kell állítani, márpedig azt csak elektromágneses térrel lehet. Még az elektronnál csaknem 2000-szer nehezebb protonra is kisebb a Föld gravitációs ereje, mint egy elektronnyi töltés hatása 10 cm távolságból; azt pedig laboratóriumi körülmények között igen nehéz elérni, hogy – a legalább százalékos pontossághoz – a vizsgálat helyének méteres körzetében egyetlen egységnyi töltés sem legyen.

Antianyag-kísérletek a CERN-ben

A CERN létrehozott egy *antianyaggyárnak* is nevezett antiproton-lassító (AD, Antiproton Decelerator, 6. ábra) berendezést: nagy energiájú protonokat anyagba löve proton-antiproton részecskepárokhoz hoznak létre, azokból a gyors antiprotonokat kiválasztják, lelassítják és a kísérletekhez juttatják, majd különböző módokon csapdába ejtik és úgy tanulmányozzák őket. Jelen írás szerzője és négy társa 24 éve írt megvalósíthatósági tanulmányában [1] kimutatta, hogy az anyag-antianyag egyenértékűség legérdekesebb ellenőrzésére az antihidrogén-atom (9. ábra) két fotonnal bomló $2S-1S$ átmenete (10. ábra) nyújt



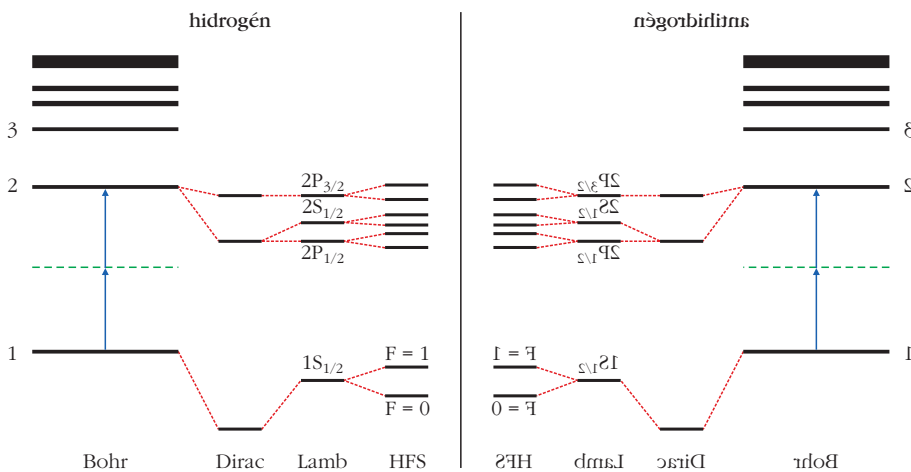
11. ábra. Protonok útja a PS protongyorsítóból az AD-ba, ahol antiprotonokat keltenek.

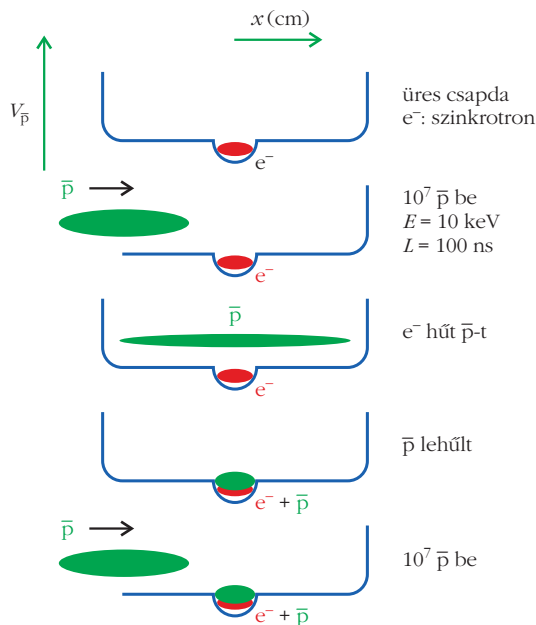
lehetőséget. Jelenleg az AD az egyetlen komolyabb antiprotonforrás a világon (11. ábra). Néhány éven belül egy újabb, a németországi Darmstadtban épülő FAIR (Facility for Antiproton and Ion Research) megindulása várható. Az AD-nál több különböző együttműködés tanulmányoz antihidrogént – az antiproton és pozitron hidrogénatom-szerű kötött állapotát –, illetve más, antiprotont tartalmazó rendszereket. Eddig valamennyi eredményük megerősíti az anyag és antianyag egyenértékűségét. A vizsgálatokhoz először is *csapdázni* kell az antiprotonokat, azaz a végletekig lelassítva (lehűtve) őket potenciálgödörbe juttatni (12. és 13. ábra), és ezt a sajátos hűtést általában elektronfelhő segítségével végzik. Utána sűrű pozitroncsomagot juttatnak a csapdába, ahol azok ütközésekben atomi állapotot, antihidrogént hoznak létre. Az AD részecskenyalábjait betonfalak közötti folyosókban vezetik, ezért általában csak felülről láthatjuk a kísérleteket, amint az a mérőberendezések fényképeiből is kiderül.

ALPHA (Antimatter Laser Physics Apparatus)

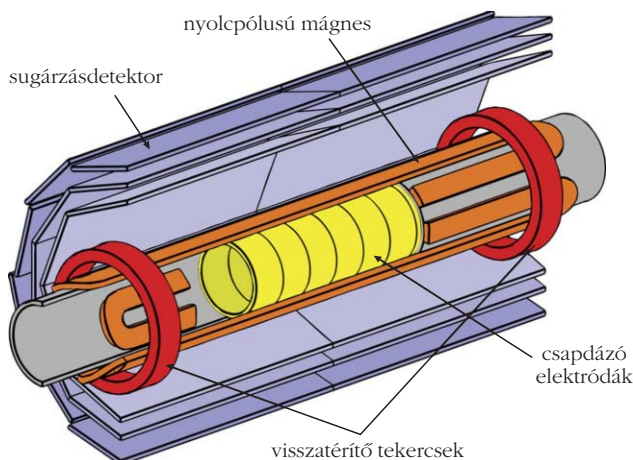
Ez az eddigi legsikeresebb antiproton-kísérlet, legújabb publikációjukon 9 ország 54 szerzője szerepel. Az ALPHA (14. ábra) volt az első, amely antihidrogén-atomokat tudott tárolni a későbbi spektroszkópiai mérésekhez elegendő ideig, 1000 másodpercig, ami az atomi folyamatok sebességéhez képest végtelen hosszú idő. Meghatározták a tárolt antihidrogén-atomok töltésének semlegességét, és azzal korlátozták a lehetséges eltérést a proton és antiproton töltése között, majd az antihidrogén-atomok gravitációs *süllyedéséből* behatárolták a lehetséges különbséget a proton és antiproton gravitációs tömege között. Az ALPHA együttműködés leg-

10. ábra. Hidrogén- és antihidrogén-atom energiaszintjei.





12. ábra. Antiprotonok hűtése elektronfelhőben és csapdázása potenciálgödörben.

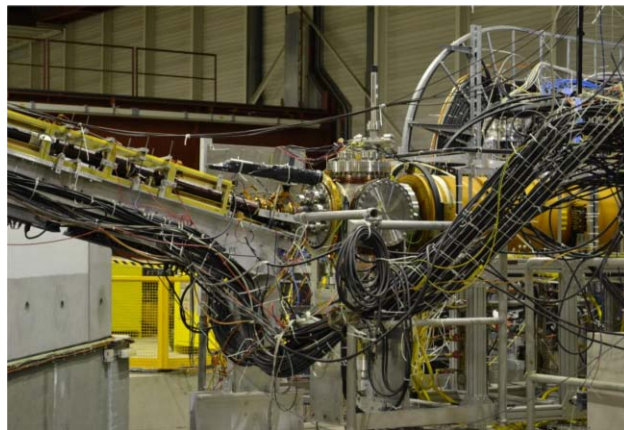


13. ábra. Elektromágneses csapda antihidrogén vizsgálatára.



14. ábra. Az ALPHA-kísérlet a CERN Antiproton-lassítójánál, bal oldalt a szomszédos ASACUSA-kísérlet elektronikája.

újabb eredménye az első spektroszkópiai észlelés antihidrogéne: a már fent említett $2S-1S$ atomi át-



15. ábra. Az ATRAP-kísérlet pozitronnyaláb-vezetőke.

menetet két foton egyidejű elnyelésével sikerült gerjeszteniük, és azzal tovább csökkenteni a lehetséges különbségeket atom és antiatom között.

ATRAP (Antihydrogen Trap)

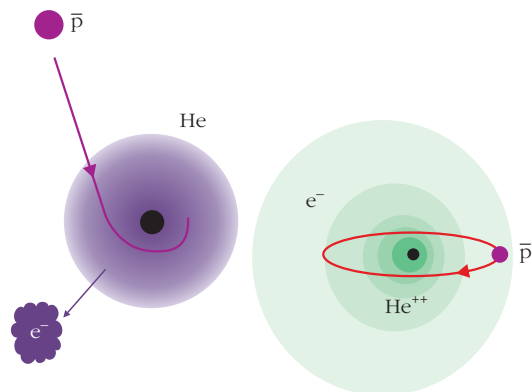
Ez az amerikai–német–kanadai együttműködés rendelkezik az egyetlen függőleges elrendezésű mérőberendezéssel és a legkifinomultabb pozitronforrással az AD-ban (15. ábra). Úttörő szerepet játszottak az antiprotonok csapdázásában és elsőként mutatták meg, hogy az antiprotonok csapdázáskor nemcsak elektronokkal, hanem egyenesen pozitronfelhőben is hűthetők, ők oldották meg először az alapállapotú antihidrogén-atomok tárolását.

ASACUSA

E japán–osztrák–olasz–magyar együttműködés neve az Atomic Spectroscopy And Collisions Using Slow Antiprotons (atomi spektroszkópia és ütközések lassú antiprotonok segítségével) rövidítése, és egyébként a meghatározó japán részvételt szimbolizálандó, a nem-japán résztvevők adták neki Tokiói templomi negyedének (16. ábra) nevét. Ugyanis nemcsak a legnagyobb létszámú három csoport volt japán benne, hanem a mérőberendezés költségének túl-

16. ábra. Tokiói Asakusa negyedének kapuja az óriási vörös lampionnal, amely az ASACUSA-kísérlet logója lett.



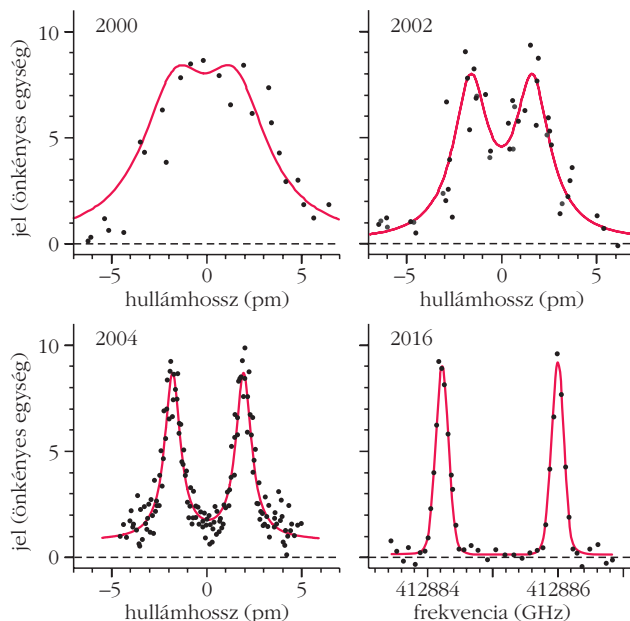
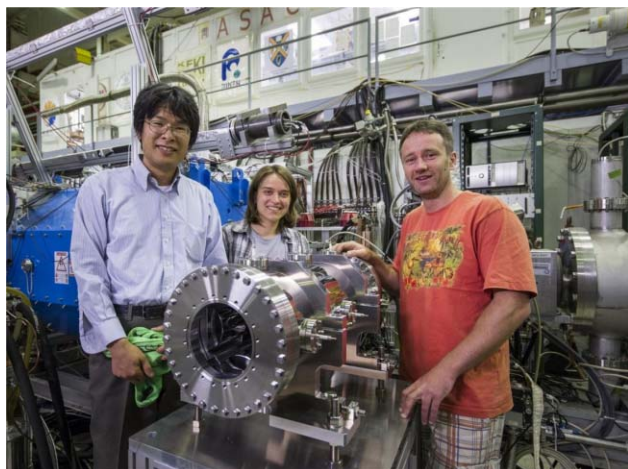


17. ábra. Antiprotonos héliumatom képződése.

nyomó részét is a Tokiói Egyetem és a Tokió melletti RIKEN intézet fedezte. Az együttműködés vezetője a kezdetektől a tokiói *Hajano Rjugo* (angolul *Ryugo Hayano*). A budapesti csoport (a szerző részvételével) finommechanikai eszközök, pontos mozgatóállványok tervezésével és szállításával járult hozzá a kísérlethez. Az együttműködés többféle antiprotonos kísérletet is végzett párhuzamosan. Mi magyarok az antiproton tömegének és mágneses momentumának meghatározásában vettünk részt, az előbbiben az egyik tokiói csoport, a másokban a bécsi Stefan Meyer Intézet játszott főszerepet. Mindkét kísérlet azon alapult, hogy héliumgázban az antiproton a héliumatom egyik elektronját *belyettesítve*, a lézerspektroszkópiához elegendően hosszú, mikroszekundumos élettartamú, héliumatommagból, antiprotonból és elektronból álló háromrészecskés atomi állapotba (17. ábra) kerülhet, amelyen nagyon pontos mérések végezhetőek.

A tömegmérés pontosságát erősen korlátozza az atom hőmozgása. Annak hatását hűtéssel vagy két egymással szemben haladó lézersugárral lehet csökkenteni. 15 év alatt lépésről lépésre csökkentettük a hélium hőmérsékletét és sűrűségét, amíg 2016-ban sikerült elérni 2 kelvin (-271 °C) alatti hőmérsékletet, amelyen a mérés pontossága már a 10. számjegy

19. ábra. Hori Maszaki (Tokió), Sótér Anna (München) és Barna Dániel (MTA Wigner FK) az ASACUSA-kísérletben.

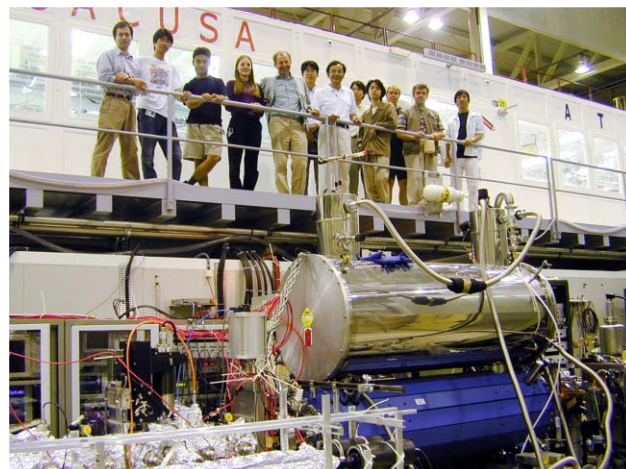


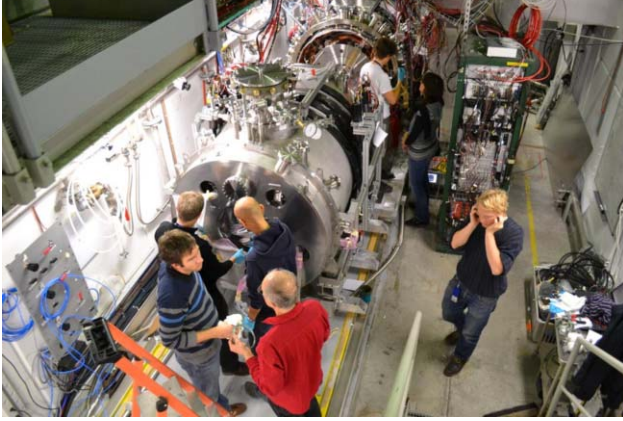
18. ábra. Az ASACUSA-kísérlet lézerspektroszkópiai felbontásának fejlődése 2000 és 2016 között egy felhasadt antiproton-átmeneten demonstrálva.

meghaladta (18. ábra). Különbséget a proton és az antiproton között – természetesen – mi sem találtunk. A hűtéssel párhuzamosan kidolgoztuk a kétfotonos spektroszkópiát is. Érdekes módon nem annyira a mérési eredmény kapott visszhangot a sajtóban, hanem maguk a módszerek: az antiprotonos atomokon végzett kétfotonos lézerspektroszkópia [2] és az egzotikus atom hűtése 2 K alá [3]. A mérést a japán *Hori Maszaki* vezeti, a hűtőrendszer megépítésében és a kísérlet elvégzésében a magyar *Sótér Annának* és *Barna Dánielnek* kulcsszerepe volt (19. ábra).

Az ASACUSA együttműködés másik fő vonala a japán RIKEN által vezetett MUSASHI projekt *Jamazaki Jaszunori* (angolul persze *Yasunori Yamazaki*) vezetésével. *Muszasi* a valaha élt egyik legismertebb japán szamuráj volt, ötkötetes életregénye magyarul is több kiadást ért meg, de a kísérletünkben a Mono-

20. ábra. Az antihidrogén-nyaláb kezdeti csoportja 2008-ban, előttük az első antiprotoncsapdájukkal.



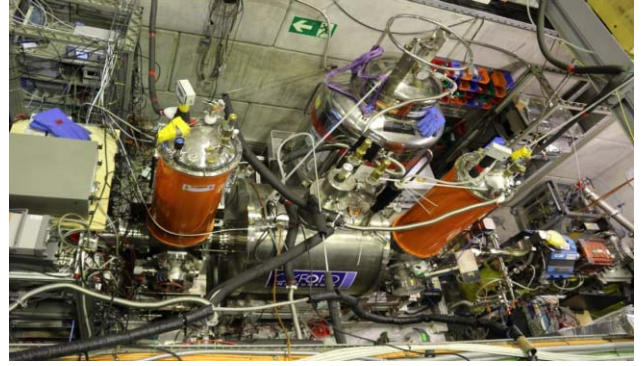


21. ábra. Munka az AEGIS-kísérlet berendezésén.

energetic *Ultra Slow Antiproton Source for High-precision Investigations* (monoenergiás, ultra lassú antiprotonforrás nagy pontosságú vizsgálatokhoz) rövidítése volt, és a 15 éves fejlesztési program végén kivezetett, vezérelhető antihidrogén-nyalábot szolgáltatott. A csoport 2008-ban készült képén (20. ábra) középen Jamazaki Jaszunori, a csoport vezetője áll, jobb oldalt Hajano Rjugo, az ASACUSA együttműködés szóvivője (így hívjuk az együttműködések választott vezetőit), mellette *Eberhard Widmann*, a bécsi Stefan Meyer Intézet igazgatója. A képen látható a kísérlet antiproton-csapdája is: az antiprotonok tárolásához – az *Angyalok és démonok* című film mesebeli apró üvegedényeivel ellentétben – ilyen többtonnás szerkezetekre van szükségünk.

AEGIS

Az AEGIS (*Antihydrogen Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy*, antihidrogén-kísérlet: gravitáció, interferometria, spektroszkópia) fő célja az antihidrogén-atom gravitációs tömegének mérése. Terveik szerint antihidrogén-nyalábot röptetnek résrendszeren át és a gravitáció hatására történő süllyedést mérik; az antigravitációs állandót 1% pontossággal remélik megmérni. Az antihidrogén-atomokat nem a szokásos pozitron-antiproton ütköztetéssel állítanák elő, hanem a pozitronokat előbb elektronokkal kötésbe hozva pozitronium ($Ps = [e^+e^-]$) atomokat keltenek és azokkal reagáltatják az antiprotonokat, így az antihidrogén a minimális energiájú alapállapotához közel fog keletkezni. Jelenleg még az antihidrogén-nyaláb formálásánál tart a kísérlet (21. ábra). Ez pillanatnyilag a legnagyobb együttműködés az AD-nál, legutóbbi cikkükön 82 szerző szerepel 8 országból, Olaszország a legnagyobb résztvevő.



22. ábra. A BASE-kísérlet az AD-nál.

BASE

A BASE (*Baryon Antibaryon Symmetry Experiment*, 22. ábra) szintén az antiprotonot hasonlítja össze a protonnal (a részecskefizika terminológiája a neutront és a protonat a *barionok* közé sorolja), de nem a tömeget, hanem – mágneses csapdában keringtetve egyetlen részecskét – a mágneses momentumát. Viszonylag kis, de annál sikeresebb együttműködés mintegy 10 szerzővel Németországból és Japánból. A módszert először protonon igazolták, utána az AD-nál egyetlen év alatt eljutottak az antiprotonra alkalmazásig, amellyel csaknem egy nagyságrenddel megjavították az előző kísérletek pontosságát, és 10^{-10} pontossággal igazolták az anyag-antianyag szimmetriát. A szerzők azt is megmutatták, hogy – a szimmetriát elfogadva – mérésük a gravitációs állandók különbségét is egy milliommód alá korlátozza, azaz ilyen mértékben igazolja az Einstein-féle gyenge ekvivalencia elvét.

GBAR

A GBAR (*Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest*, nyugalomban levő antihidrogén gravitációs viselkedése) ugyancsak AD-kísérlet, az AEGIS-hez hasonlóan az antianyag gravitációját tervezi mérni a Föld gravitációs mezőjében, de nem röptetve, hanem teljesen lefékezve. Ezt úgy érnék el, hogy az antiprotonhoz két pozitront kötő, a H^- ionhoz hasonló atomot az abszolút zérus hőmérséklethez egé-

23. ábra. AMS-02 fellövés előtt és a Nemzetközi Űrállomáson. (Forrás: AMS-02 és NASA, készült 2017. január 26-án, űrséta közben.)



szen közel (FK környékére) hűtenének, majd – az egyik pozitront eltávolítva – mérnék a gravitációs süllyedését. A GBAR együttműködés hasonló az AEGIS-hez, és a kísérlet eredménye jól kiegészítené az AEGIS eredményeit.

AMS-02

Az AMS (Alpha Magnetic Spectrometer, alfa mágneses spektrométer) kísérlet a Nemzetközi Űrállomás egyik berendezése (23. ábra). Részecskedetektor a világűrben, amely antianyagra és sötét anyagra vadászik. A CERN-ben készítették *Samuel Ting* (Nobel-díj, 1976) amerikai fizikus vezetésével és az egyik utolsó űrsiklóval sikerült feljuttatni és üzembe helyezni. A kísérlet megerősítette az antianyag hiányát a Világegyetemben: nem lát antihélium-atomokat. A vártnál sokkal több pozitront észlel ugyan, de azok jöhetnek közösleges csillagászati folyamatokból is.

Végszó

Nem várhatunk különbséget anyag és antianyag között, az eddigi adatok szerint semmilyen tulajdonságuk sem különbözik, gravitációjuk sem. Az antianyag nem esik felfelé és a repülő csészealjákat is inkább a gazdag emberi képzelet tartja a levegőben, mint az antigravitáció.

Irodalom

1. M. Charlton, J. Eades, D. Horváth, R. J. Hughes, C. Zimmermann: Antihydrogen physics. *Physics Reports* 241 (1994) 65–117.
2. 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 pbar-He and the anti-proton-to-electron mass ratio. *Nature* 475 (2011) 484–488.
3. M. Hori, H. Aghai-Khozani, A. Sótér, D. Barna, A. Dax, R. Hayano, T. Kobayashi, Y. Murakami, K. Todoroki, H. Yamada, D. Horváth, L. Venturelli: Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to-electron mass ratio. *Science* 354 (2016) No. 6312, 610.