

## Antianyag

A kvantumfizika egyik nagy eredménye az antirészecskék létezésének megjósolása volt. A *Dirac* által bevezetett egyenletnek, amely a Schrödinger-egyenlet relativisztikus megfelelője, két megoldása van: közülük az egyik magától értetődő módon feleltethető meg az elektronnak, de a másik, formálisan, egy negatív energiájú részecskét ír le. Ennek a megoldásnak az értelmezése eleinte nehézséget okozott. Végül az az interpretáció vált elfogadottá, hogy ez egy az elektronnal azonos tömegű, ám pozitív töltésű, és *pozitív energiájú* részecskét ír le, amely a *pozitron* nevet kapta. 1933-ban *Carl David Anderson* ködkamrás kísérleteivel kozmikus sugárzásban valóban fel is fedezte ezt a részecskét. Ezért az eredményéért 3 évvel később megkapta a fizikai Nobel-díjat.

Elfogadva, hogy a Dirac-egyenlet nemcsak az elektront, hanem a többi  $1/2$  spinű (az elektrontól különböző tömegű) részecskét (fermion) is leírja, az akkor ismert másik fermion, a proton antirészecskéjének a létezését is fel kellett tételezni. Az antiproton 1955-ben fedezte fel *Owen Chamberlain*, *Emilio Gino Segrè*, *Clyde Wiegand* és *Thomas Ypsilantis* az amerikai Berkeley laboratóriumában.  $6,5$  GeV/c energiájú protonokat ütköztettek egy álló céltárgyba, és a keletkező részecskék között megfigyeltek a protonnal azonos tömegű, ám negatív töltésű részecskéket. Ezért az eredményért Chamberlain és Segrè 1959-ben kapta meg a Nobel-díjat. (A következő években újabb fermionokat fedeztek fel, ezek antirészecskéjét is mind megtalálták, a kísérletek minden kétséget kizáróan igazolták a Dirac-egyenlet megoldásainak interpretációját.)

Antiprotonból, pozitronból és antineutronból azokhoz hasonló atomokat építhetünk fel, mint amilyenekből a minket körülvevő világ áll. A legegyszerűbb ilyen atom az antihidrogén, amely nem bomlik el, ugyanúgy stabil, mint a „közönséges” hidrogén. Az antiatomok által alkotott antianyag, a belőle esetleg felépülő világ egyenértékű a minket körülvevő anyaggal, világgal: az *antianyag* megjelölés önkényes. Anyag és antianyag egymásnak valamiféle tükröképei. Ez magától értetődően vezet ahhoz a kérdéshez, hogy hol van ez az antianyag. Erre az anyag, illetve antianyag egy további tulajdonsága sugall egy részleges választ. A megfigyelések szerint a hidrogénatom csak addig stabil, amíg nem találkozik egy antihidrogén atommal (általánosabban, amíg nem találkozik anyag és antianyag). Ha ez a találkozás létrejön, akkor a részecske és az antirészecske megsemmisül, annihilációs folyamat során más részecskékké, végeredményben fotonokká alakul. Legyszerűbb példa az elektron–pozitron pár, amely két vagy több fotonból álló „sugárzás” (nyugalmi tömeg nélküli anyaggá) változik át. Ugyanez a sorsa egy többlépcsős folyamat végén a proton–antiproton párnak is, bár a „szétsugárzás” eredményeként első lépésben még tömeges részecskék is, javarészt pionok, keletkeznek. Ez magyarázza, hogy lokálisan, persze galaktikus léptékben, vagy csak anyag, vagy csak antianyag lehet jelen.

Csakhogy a csillagászok nem látnak antianyagból álló galaxisokat a távolban sem. Lehet, hogy anyag és antianyag egyenértékűsége, az anyag–antianyag szimmetria mégsem pontosan igaz? Lehet, hogy csak a kísérleteink nem elég pontosak ahhoz, hogy ezt „földi” tapasztalatok alapján is belássuk?

## Antihidrogén-kísérletek

A fenti kérdések régóta foglalkoztatják a kutatókat, és számos kísérletet hajtottak már végre (illetve terveznek), hogy a választ megtalálják. Ahelyett, hogy az egyes antirészecskéket külön-külön vizsgálnánk, célszerűbb a belőlük felépülő összetett részecskékkel (általános értelemben vett atomokkal) foglalkozni.

A legegyszerűbb antiatom, az antihidrogén, egy kéttest kötött állapot, mely az elektrodinamikában könnyen kezelhető, energiaszintjei pontosan számolhatóak. A hidrogén esetében az elméleti és kísérleti eredmények igen jó egyezést mutattak. Az anyag–antianyag szimmetria ellenőrzésére elég lenne kimérni az antihidrogén energiaszintjeit, és összevetni azokat a hidrogén igen pontosan ismert energiaszintjeivel. Bármiféle szignifikáns eltérés arra utalna, hogy anyag és antianyag nem pontosan ugyanolyan.

Persze az antihidrogénnel való kísérletezéshez először létre kell hozni az antihidrogént, és ez, mint látni fogjuk, nem is olyan könnyű feladat annak ellenére, hogy a két alkotórészét már az '50-es évekre felfedezték. Ahhoz, hogy az antiproton és a pozitron összeálljanak antihidrogén atommá, kellően közel kell hozni őket a koordináta- és az impulzustérben is. Ez pedig, mivel ellentétes elektromos töltésűek, nem könnyű feladat.

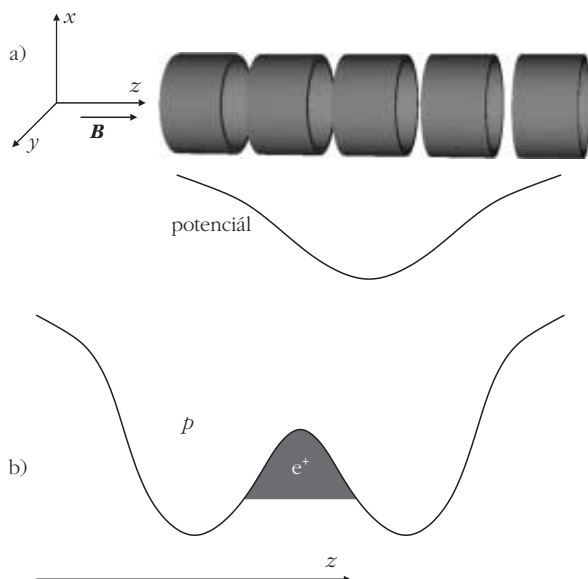
Az első antihidrogén atomokat 1995-ben a CERN LEAR (Low-Energy Antiproton Ring) nevű tárológyűrűjében hozták létre. A szükséges antiprotonokat ugyanúgy állították elő, mint 1955-ben Amerikában: protonokat ütköztettek egy álló céltárgyba. A keletkező részecskék közül kiválogatták az antiprotonokat, amelyek aztán a tárológyűrűbe kerültek. A tárológyűrűben az antiprotonok útjába egy céltárgyat helyeztek. Ennek a céltárgynak nagyon „vékonynak” (vagy ritkának) kellett lennie, hogy a keletkező antihidrogén atomok ne semmisüljenek meg már a céltárgyon belül. Ezt egy xenon gázsugár formájában valósították meg. Amikor egy antiproton keresztülhalad egy xenon atom magjának az elektromos terén, kis valószínűséggel elektron–pozitron pár keletkezik. A pozitron (ismét csak kis valószínűséggel) befogódhat az antiproton terébe. Azok az antiprotonok, amelyek nem alkottak antihidrogén atomot, a tárológyűrű mágneses terében továbbra is a körpályájukon maradnak. A keletkezett antihidrogén atomok viszont, mivel semlegesek, elhagyják a tárológyűrű mágneses terét a körpálya érintője mentén, és az útjukba helyezett detektorokba csapódnak, ahol végül az antiproton és a pozitron is megsemmisül (annihilál). Az olyan események utaltak antihidrogén keletke-

zésére, ahol ugyanazon pontból néhány pion, illetve két, egymással ellentétes irányú foton repült ki. 11 antihidrogén atom keletkezését figyelték meg. Az amerikai *Fermilab* laboratóriumban később egy hasonló kísérletben körülbelül 100 antihidrogén atomot sikerült megfigyelni. A keletkezett antihidrogén atomok száma egyrészt igen kicsi volt, másrészt nagy sebességgel hagyták el a tárológyűrűt, lehetetlenné téve, hogy rajtuk komoly méréseket végezzenek. Detektálásuk a megsemmisülésük által történt. A kísérletek eredménye az antihidrogén létének bizonyítása volt (bár ebben az antiproton és pozitron felfedezése óta senki sem kételkedett).

Az antianyag előállítására szolgáló kísérletek következő generációja szintén a CERN-ben született meg. Az ehhez szükséges berendezés egy új tárológyűrű volt, amely az AD (Antiproton Decelerator, Antiproton Lassító) nevet viseli. Mint a neve is mutatja, ez a gyűrű éppen a fordítottja a részecskefizikai laboratóriumokban megszokott berendezéseknek: nem egyre nagyobb energiákra gyorsítja, hanem lassítja a benne tárolt részecskéket. Erre azért van szükség, mert az antiprotonokat továbbra is úgy a legcélszerűbb előállítani, hogy nagyenergiájú protonokat lőnek egy fém céltárgyba. A keletkező antiprotonok ebben a folyamatban is nagy energiával rendelkeznek, a kísérleteknek viszont minél lassabb antiprotonokra lenne szükségük. (Hiszen minél kisebb egy antiproton és egy pozitron egymáshoz viszonyított sebessége, annál valószínűbb az antihidrogén keletkezése.) A tárológyűrű egy ciklusa során az antiprotonok energiája 5,3 MeV-re csökken, majd kiengedik őket a rajta dolgozó kísérletek valamelyikének.

Bár az 5,3 MeV energia igen alacsonynak számít a CERN-ben, még mindig túl nagy ahhoz, hogy hatékonyan lehessen antihidrogént előállítani. Az antiprotonok további lassítása például az úgynevezett Penning-csapdában lehetséges. Ez a berendezés elektromos és mágneses

1. ábra. a) Penning-csapda. A mágneses tér  $x/y$  irányban, a gyűrű alakú elektródák elektromos tere pedig  $z$  irányban tartja bezárva a töltött részecskéket. b) Egymásba ágyazott potenciálvölgyek antiproton és pozitron együttes csapdázásához.



teret alkalmaz töltött részecskék csapdázására (1.a ábra). A  $z$  tengellyel párhuzamos mágneses tér megakadályozza, hogy a részecskék radiális ( $x$  vagy  $y$ ) irányban elszökjenek. A gyűrű alakú elektródákra kapcsolt feszültség pedig egy elektromos potenciálvölgyet hoz létre a  $z$  tengely mentén, így a részecskék ebben az irányban sem tudják elhagyni a csapdát. Amikor az antiprotonok megérkeznek a tárológyűrűből, ez a potenciálvölgy a belépési oldalon nyitva van. Az antiprotonok a túloldali potenciálfalról visszapatannak, eddigre azonban a belépő oldalon bezárják a potenciálvölgyet azáltal, hogy ezekre az elektródákra igen gyorsan rákapcsolják a megfelelő feszültségeket. A csapda elé rendszerint még egy igen vékony fóliát is elhelyeznek. Az ezen való áthaladás során az antiprotonok energiát vesztenek, így nagyobb számban lehet őket a csapdában tartani. A módszer hátránya, hogy az antiprotonok egy része annihilál a fólia anyagával.

A csapdázás azonban önmagában nem lassítja (vagy más szóval *bűti*) az antiprotonokat. Ahhoz, hogy tovább lassítsuk őket, energiát kell elvonni tőlük. Ez az úgynevezett *elektronbűtés*: a csapdába elektronokat is betöltenek. Mivel ezeknek a töltése éppúgy negatív, mint az antiprotonoké, az elektromos potenciálvölgy ezekre is bezáró, nem tudják elhagyni a csapdát. Az antiprotonok energiát adnak át az elektronoknak a velük való ütközések során, amelytől azok az erős mágneses térben végzett körkörös mozgás közben kibocsátott szinkrotronsugárzás formájában szabadulnak meg.

Miután az antiprotonok a csapdában lelassultak, már csak össze kellene hozni őket a pozitronokkal<sup>1</sup> és várni. Mivel azonban a pozitronok pozitív töltésűek, ugyanaz a potenciálvölgy, amelyik az antiprotonokat csapdázza, számukra potenciálhegy, azaz a csapda közepétől elfelé taszítja őket. Ezért két egymásba ágyazott potenciálvölgyet kell kialakítani (1.b ábra).

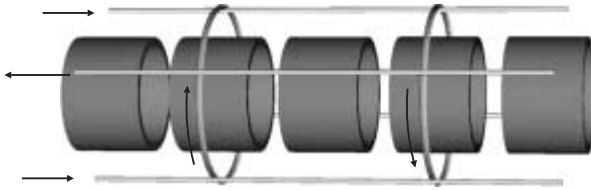
A CERN AD tárológyűrűjén két kísérlet dolgozott a kezdetektől fogva antihidrogén előállításán: az ATHENA<sup>2</sup> és az ATRAP<sup>3</sup>. Az első publikáció „hideg” (azaz kis mozgási energiájú) antihidrogén atomok keletkezéséről az ATHENA-kísérletről származik<sup>4</sup>, csak alig valamivel megelőzve az ATRAP-kísérletet. Mindkét kísérlet a fenti technikát alkalmazta antihidrogén előállítására, azonban a detektálási módszerük különböző. A keletkező antihidrogén atomokra, mivel semlegesek, már nem hat a csapda elektromágneses tere, ezért azok szabadon távoznak. Az ATHENA-kísérletben ezek az antihidrogén atomok beleütköznek a csapda elektródáiba és annihilálnak. Az ilyenkor jellemző eseményt a csapda köré helyezett detektorok észlelik: azonos helyről jövő két, egymással el-

<sup>1</sup> Az antihidrogén előállításához szükséges pozitronokhoz sokkal egyszerűbben jutunk. Bizonyos radioaktív,  $\beta^+$ -bomló anyagok (például  $^{22}\text{Na}$ ) szolgálnak forrásként.

<sup>2</sup> <http://athena.web.cern.ch/athena/>

<sup>3</sup> <http://hussle.harvard.edu/~atrap/>

<sup>4</sup> *Nature* 419 (2002) 456, [http://athena-positrons.web.cern.ch/ATHENA-positrons/wwwathena/Documents/nature01096\\_r.pdf](http://athena-positrons.web.cern.ch/ATHENA-positrons/wwwathena/Documents/nature01096_r.pdf) Ez az első cikk még mintegy 50 000 antihidrogén atom keletkezéséről számol be. Azóta a „gyártott” antihidrogén atomok száma milliós nagyságrendű.



2. ábra. Ezzel az áramelrendezéssel lehet olyan mágneses teret előállítani, amely a csapda középpontjában rendelkezik minimummal, és így alkalmas az antihidrogén atomok csapdázására.

lentétes irányba repülő foton a pozitron annihilációjából, valamint néhány ugyanonnan jövő pion az antiproton annihilációjából. Az ATRAP-kísérletben a csapdából kirepülő antihidrogén atomok erős elektromos téren haladnak át, és ez újra ionizálja őket. A pozitronjuktól megfosztott antiprotonokat egy másik csapda ejti rabul. Végül ezt a csapdát kikapcsolják, és a szétrepülő antiprotonokat az annihilációjuknak köszönhetően detektálják és számolják meg. Az ionizáló elektromos tér erősségének változtatásával ez a módszer lehetőséget ad a keletkezett antihidrogén atomok kötési energiájának, azaz a kvantumállapotuknak a meghatározására.

Az antihidrogén keletkezését mindkét kísérletben most is a megsemmisülése jelzi. Az anyag–antianyag szimmetria vizsgálatához azonban jó lenne magát az antihidrogént csapdázni, hogy alaposabb, például lézerspektroszkópiai vizsgálatnak vethessük alá. Mivel az antihidrogén elektromosan semleges, ez nem könnyű feladat. A lehetőség a mágneses dipólmomentum kihasználásában rejlik. Egy mágneses dipólus energiája külső mágneses térben  $\Phi = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$ , ahol  $\boldsymbol{\mu}$  a mágneses dipólmomentum. A kvantummechanika szerint (amennyiben egy 1/2-spinű részecske mágneses dipólmomentumáról van szó) a mágneses dipólmomentum iránya vagy megegyezik, vagy ellentétes a külső tér irányával, úgyhogy a képlet a következőképpen írható:  $\Phi = \pm \boldsymbol{\mu} B$ . Ha a mágneses tér nagysága (és ezáltal a dipólus energiája) helyről helyre változik, akkor ennek megfelelően a dipólusra  $\mathbf{F} = \pm \boldsymbol{\mu} \nabla B$  erő hat. Amennyiben a dipólmomentum iránya a külső térrel ellentétes, ez az erő abba az irányba mutat, amerre a mágneses tér csökken. Az antihidrogén esetében bonyolultabb a helyzet, hiszen ez két, saját mágneses momentummal rendelkező részecskéből áll. Továbbra is igaz azonban, hogy a különböző spinkonfigurációk<sup>5</sup> energiái különbözőképpen tolódnak el a mágneses tér nagyságától függően. Bizonyos konfigurációkra olyan erő hat, amely a csökkenő tér irányába mutat (*kis-tér keresők*), más konfigurációkra viszont a növekvő tér irányába mutató erő hat (*nagy-tér keresők*). A kis-tér kereső konfigurációkat csapdázhatjuk egy olyan mágneses térrel, amelynek a csapda középpontjában minimuma van. Például a 2. ábrán látható csapdában ilyen mágneses tér valósul meg. Ez a csapdázó erő igen kicsi, ezért eredményes használatához az szükséges, hogy a keletkezett antihidrogén mozgási energiája kicsi legyen. Ezt a módszert kívánja alkalmazni az ATHENA folytatásaként létrejött ALPHA-kísérlet.

<sup>5</sup> Az antiproton és a pozitron spinjének egymáshoz, illetve a külső térhez képesti iránya.

Újabb az ASACUSA-kísérletben<sup>6</sup> is használtak Penning-csapdát antiprotonok tárolására. Ezzel azonban (egyelőre) nem antihidrogén, hanem extrém kis energiájú antiprotonnyaláb előállítása a cél. Módszerükkel eddig nekik sikerült a legtöbb ( $10^6$ ) antiprotonot csapdázni az AD gyűrű egy ciklusában. Ehhez a sikerhez jelentősen hozzájárult a kísérletnek egy nagy elismerést kiváltó eszköze, az úgynevezett RFQD (radio-frequency quadrupole decelerator, rádiófrekvenciás kvadrupól lassító), amely az AD-ből érkező antiprotonokat 100 keV nagyságrendű energiára lassítja le, ezáltal sokkal hatékonyabbá téve a csapdázást.

Az ASACUSA-csoport eddig főleg egzotikus atomok spektroszkópiájával foglalkozott (lásd következő fejezet), és csak újabban csatlakozott az antihidrogén előállítását célzó kísérletekhez. Ez a csoport (melynek a szerző is tagja) az ellentétes töltésű antiprotonok és pozitronok együttes csapdázására egy másik módszert kíván alkalmazni. Az elv már régóta ismert: oszcilláló, inhomogén elektromos térben egy töltött részecskére ható erő időtárlaga abba az irányba mutat, ahol az oszcilláló tér amplitúdója kisebb. Miért? Tegyük fel, hogy az elektromos potenciál az  $x$  tengely mentén  $\Phi = \Phi_0 \cdot x^2$  függvény szerint változik ( $\Phi_0 > 0$ ). Ez egy pozitív töltésű részecskére nézve vonzó (csapdázó), egy negatív töltésű részecskére azonban az  $x = 0$  ponttól elfelé taszító erőt jelent. Egy  $\Phi = -\Phi_0 \cdot x^2$  potenciál viszont a pozitív részecskéket taszítja, a negatívokat vonzza. Mi történik, ha ezt a két teret időben periodikusan egymásba változtatjuk? Vegyük azt a időpillanatot, amikor a részecskékre ható erő a középpont felé mutat. A részecske ebbe az irányba elmozdul. A tér közben ellenkező előjelűre változik, ezért egy a részecskét kifelé taszító erő jelentkezik. A részecske azonban most már közelebb van a középponthez, mint korábban, ezért kisebb kifelé taszító erő hat rá, mint a korábbi, befelé vonzó erő volt. Az eredő hatás tehát a középpont felé mutat, a részecske töltésétől függetlenül. Az ezen elven működő csapdákat Paul-csapdának hívják. Kidolgozásáért Wolfgang Paul 1989-ben kapott fizikai Nobel-díjat. Az ASACUSA-kísérletben egy ilyen elv szerint működő berendezéssel tervezik megoldani az ellentétes töltésű részecskék egy helyen való csapdázását. Bár ilyen berendezést már korábban is alkalmaztak ionok csapdázására, két ennyire eltérő tömegű részecskének az együttes fogvatartása új és izgalmas lépés lesz, amely nem kevés probléma megoldását teszi szükségessé.

A keletkezett antihidrogén atomok a tervek szerint egy antihidrogén nyalábot alkotnának, amelyet az antihidrogén 1s állapota hiperfinom felhasadásának kimérésére lehetne használni. Ezt a felhasadást az antiproton és a pozitron spinjének kölcsönhatása okozza. Inhomogén mágneses térben a felhasadt állapotok némelyike kis-tér kereső lesz (azaz a mágneses tér minimuma felé mutató erő hat rá), mások viszont nagy-tér keresők lesznek. Egy szextupól mágnes (3.a ábra), amelynek a  $z$  tengely mentén minimális a térőssége, szolgál a kis-tér kereső állapotok kiválogatására. Ezeket az állapotokat ez az első mágnes fókuszálja, a nagy-tér keresőket pedig kiszórja

<sup>6</sup> <http://asacusa.web.cern.ch/ASACUSA/>

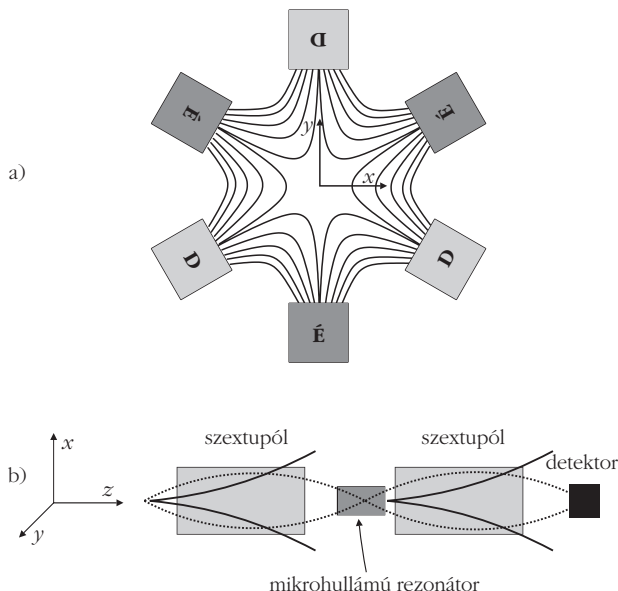
oldalra (3.b ábra)<sup>7</sup>. A mágnes után elhelyezett mikrohullámú üregbe már csak a kis-tér kereső állapotok jutnak el. Ha itt nem történik velük semmi, akkor a második szextupól mágnes ismét fókuszáló (azaz átengedő) módon fog viselkedni számukra, és becsapódnak a berendezés végén elhelyezett detektorba. Ha azonban az üregben levő mikrohullámú tér frekvenciája megfelelően van hangolva, akkor átmenetet indukál: az eddigi kis-tér keresőket átbillenti nagy-tér kereső állapotba. Ezeket a második mágnes kiszórja oldalra, és nem jutnak el az utána elhelyezett detektorig. A mikrohullámú tér rezonanciafeltételét tehát az jellemzi, hogy ekkor nem találunk a detektorba csapódó antihidrogén atomokat. Ezzel a módszerrel a két állapot közötti energiakülönbség meghatározható, amelyből azután az antiproton mágneses momentumára lehet következtetni.

## Egzotikus atomok

Egy „szokásos” atomban a pozitív töltésű mag körül elektronok keringenek. Az elektronok negatív töltésük miatt vannak a maghoz kötve. Felmerülhet a kérdés, hogy vajon lehetséges-e más negatív töltésű részecskéket is befogni egy atomba. A válasz erre a kérdésre: igen.<sup>8</sup> Sikerült már előállítani olyan atomokat, amelyekben az egyik elektront negatív müon vagy kaon helyettesíti. Ezek az atomok amiatt is rövid élettartamúak lesznek, hogy mind a müon, mind pedig a kaon előbb-utóbb elbomlik.

Az antiproton is negatív töltésű. Vajon ki lehet-e cserélni egy atomi elektront antiprotonra is? A válasz erre a kérdésre is: igen. Ez talán elsőre kicsit meghökkentő, hiszen az antiproton (hasonlóan a protonhoz) az atommagban szeretnének elképzelni, nem pedig az atommag körül „keringve”.<sup>9</sup> Ilyen atomokkal már a '80-as években is kísérleteztek. Például – szintén a CERN LEAR nevű gyűrűjén – antiprotonokat lőttek egy ólom céltárgyba. Az antiprotonok időnként kiütöttek egy elektront az ólomatombából, a helyükre léptek, majd pillanatok alatt lebukdácsoltak az egymást követő energiaszinteken, míg végül a maggal érintkezve annihiláltak. Ez az annihiláció igen hamar bekövetkezett, de az energiaszinteken való lelépkedés során kibocsátott röntgensugárzás energiáját (azaz az energiaszintek közötti különbséget) kimérve meg lehetett határozni például az antiproton mágneses momentumát.

Sokáig azt hitték, hogy az összes antiprotonos atom igen rövid élettartamú. 1991-ben azonban a Tokiói Egyetem kutatói felfedezték, hogy az antiprotonos héliumra ez nem igaz. A héliumba befogódott antiprotonok kis része (~3%) olyan kvantumállapotba kerül, amelynek az élettartama néhány mikroszekundum (metastabil állapotok). Ez



3. ábra. a) Szextupól mágnes a spinszelekcióhoz. Az antihidrogén atomok a  $z$  tengely irányában haladnak át a mágnesen. b) Az antihidrogén  $1s$  állapot hiperfinom felhasadásának mérési vázlatja.

már elegendő idő a lézerspektroszkópiai vizsgálatra. Az ASACUSA-kísérlet keretében ilyen kutatások is folynak.

Az antiprotonokat hélium gázba lövik, amelyet detektorok vesznek körül. Ezek a detektorok észlelik az antiprotonok annihilációja során keletkező töltött részecskéket, elsősorban pionokat. A detektorok jelének időbeli lefutását néhány mikroszekundumnyi ideig számítógépek rögzítik (időspektrum). Az antiprotonok nagy része azonnal annihilál, hatalmas csúcsot idézve elő az időspektrum elején. A metastabil állapotokba került antiprotonok viszont sokkal elnyújtottabb jellefutást eredményeznek, néhány mikroszekundum időállandóval. Ez alatt az időtartam alatt egy lézerimpulzust lőnek a gázba. Ha a lézer frekvenciája megfelelően van hangolva, akkor átmenetet indukál egy metastabil és egy rövid élettartamú állapot között. A metastabil állapotból az instabil állapotba „átlökött” antiprotonok gyakorlatilag azonnal annihilálnak, egy nagy csúcsot okozva a detektorok időspektrumában (a lézerimpulzussal egyidőben). A lézerfrekvencia függvényében nézve ennek a csúcsnak a nagyságát az átmenetek energiája igen pontosan meghatározható.

Az antihidrogénnel ellentétben most nem annyira egyszerű megmondani, hogy mit jelentenek ezek az eredmények az anyag–antianyag szimmetriára vonatkozóan, mivel nincsenek más kísérleti eredmények, amelyekkel össze lehetne hasonlítani őket. Az energiaszintek elméletileg kiszámolhatóak,<sup>10</sup> ha feltételezzük, hogy az antiproton a protonnal azonos tömegű. A kísérleti és elméleti eredmények összevetéséből lehet aztán következtetni a proton és antiproton tömege közti esetleges eltérésre. Jelenleg az elméleti és kísérleti eredmények igen nagy pontossággal megegyeznek, azt igazolva, hogy a proton és antiproton tömege  $2 \cdot 10^{-9}$ -es pontossággal azonos. Jelenleg ez az antiproton tömegére vonatkozó legpontosabb mérés.

<sup>7</sup> Ez a tervezett kísérlet némileg hasonlít a klasszikus Stern–Gerlach-kísérlethez, amelyben egy inhomogén mágneses tér a rajta áthaladó  $1/2$  spinű részecskenyalábot 2 részre választotta, a részecskék spinjének a mágneses térhez viszonyított állása szerint.

<sup>8</sup> Ebben a témában egy korábbi cikk bővebb információval szolgál: <http://www.kfki.hu/fszemle/archivum/fsz0403/hd0403.html>

<sup>9</sup> A legegyszerűbb ilyen antiprotonos atom a protónium, a hidrogénnek egy „antiprotonosított” változata, amely egy proton és egy antiproton kötött állapota.

<sup>10</sup> Bár ezek igen bonyolult háromtest kvantum-elektrodinamikai számítások

## Kitekintés

Az antianyag a tudományos-fantasztikus művekben is felbukkan, méltán. Valóban érdekes a természetnek ez a kettőssége. *Dan Brown: Angyalok és Démonok*<sup>11</sup> című könyvében egy titkos társaság antianyagbombával akarja megsemmisíteni a Vatikánt. Az antianyagot a CERN-ből lopják el. Mint fentebb bemutatjuk, antianyag valóban létezik, és minden szerzőnek joga, hogy igaz tényeket is felhasználjon egy izgalmas és fordultatos műben. Sajnálatos azonban, ha ez a könyvben szereplő néhány valóságos tény az olvasók számára a többi, fiktív dolog igazolásaként szolgál, ha az olvasók természettudományos ismereteiket egy (tévedésektől hemzsező) regényből szerzik. Az igazság és a fikció közötti határvonal meghúzása nagyon fontos, bár nyilvánvalóan nem könnyű feladat azok számára, akik nem járatosak az adott tudományterületen.

Mint korábban említettük, a töltött részecskék csapdázásának az egyik leghatékonyabb módszere a Penning-csapda. Az e téren eddig legeredményesebb ASACUSA-kísérletben  $10^6$  számú antiprotont tudtak csapdázni az AD gyűrű egy ciklusában. Az AD gyűrű ciklusai körülbelül 2 percig tartanak. Egy antiproton tömegének megfelelő energia 938 MeV. Ezek szerint  $10^{11}$  évi folyamatos üzem kellene ahhoz, hogy a csapdában levő antiprotonok tömege 1 kilotonna TNT robbanási energiájának ( $4,184 \cdot 10^{12}$  joule) feleljen meg. Összehasonlításként: a Egyesült Államok által eddig használt legkisebb atomfegyver 0,01–1 kilotonna körüli.

<sup>11</sup> Egy könyvnek, írónak (vagy politikusnak) a nyilvánosság előtti emlegetése szükségszerűen reklámként, figyelemfelkeltésként szolgál, akár pozitívan, akár negatívan nyilatkozunk róla. Ez a jelen cikk szerzőjének semmiképpen sem állt szándékában; ennek ellenére fontosnak látta ezt a rövid paragrafusnyi megjegyzést. A könyv és ezen cikk szerzőjének névegybeesése is pusztán a véletlen műve...

Mindez persze csak akkor lenne igaz, ha minden egyes ciklusban újabb és újabb egymillió antiprotont tudnánk elfogni a csapdában az addigiak mellé. Ez elvi okok miatt lehetetlen. Mivel az azonos töltésű részecskék tasztítják egymást, egy bizonyos mennyiség után a köztük fellépő tasztító erő legyőzi az őket bezáró elektromágneses erőket. Érintkezésbe kerülnek a csapda falával és megsemmisülnek. Semleges részecskék (például antihidrogén) esetében ez a probléma nem lép fel – csak az, hogy hogyan csapdázzuk őket egyáltalán.

Van egy további nehézség, ami megkeseríti az antianyag csapdázására vágyó kutatókat (vagy terroristákat). Az antiprotonok nemcsak a csapda falával, hanem a csapdában levő gázatomokkal való találkozás során is megsemmisülnek. Huzamosabb tárolásukhoz extrém nagy vákuumra van szükség, ezért ezeket a csapdákat nagyteljesítményű szivattyúk szolgálják ki folyamatosan. Ezenkívül folyékony héliummal való hűtésük is szükséges, egyrészt a szupravezető mágnesek miatt, másrészt a nagy vákuum elérése céljából: a hűtött falakra kifagynak a gázmolekulák. Ez a mechanizmus is szükséges az ilyen nagy vákuumok előállításához. Egy ilyen berendezés ellopása tehát nem könnyű feladat, biztosítani kell a folyamatos (nem csekély) áram- és héliumellátást.

Még egy esetleges téveszme igényel egy megjegyzést: az antianyag mint energiaforrás. Amennyiben természetes formában rendelkezésünkre állna antianyag, az használható lenne energiatermelésre. Elérhető környezetünkben azonban nincs antianyag, ezt igen nagy energiák befektetésével nekünk kell előállítani – például nagyenergiás részecskeütköztetésekben. Az ennek során felhasznált energia sokszorosra annak, ami aztán antianyag formájában ölt testet. Éppen ezért az antianyag nemcsak energiaforrásként, de (drágán előállított) üzemanyagként sem tűnik használhatónak – márcsak a tárolási nehézségek miatt sem.

## 16 ÉVEM A CERNBEN

Horváth Dezső  
MTA KFKI, RMKI

A CERN alapításának ötvenéves évfordulója alkalmából sok minden történt: hatalmas ünnepségsorozat a CERN-ben királyok és államelnökök részvételével, ünnepi ülések a részt vevő országokban, a Magyar Tudományos Akadémián is, valamint megemlékező cikkek sokasága, közöttük egy tőlem is a *Magyar Tudományban*. A jelenlegi írásom ürügye más: éppen 16 éve, hogy a CERN-be járok, és a Főszervező felkért, hogy írjam meg élményeimet.

### A CERN gyorsítói

A CERN gyorsító-berendezéseinek egymásra épülő rendszere hihetetlenül bonyolult, és számomra mindig lenyűgöző volt, milyen jól működik. A mai rendszer alapját képező *Proton-Szinkrotron* (PS, az *1. ábrán*), amelyet a brookhaveni Alternating Gradient Synchrotron mintájára

építettek, 1959-ben kezdett működni. A *Szuper Proton-Szinkrotron* (SPS, 1976) volt az első „országhatáron átívelő” gyorsító (addig a CERN eszközei elfértek a svájci oldalon), azon fedezte fel 1983-ban *Carlo Rubbia* csoportja a gyenge kölcsönhatást közvetítő W- és Z-bozonokat. Az SPS számos nagyszerű együttműködést szolgált ki, többek között a jelentős magyar részvétellel kivitelezett NA49 nehézion-kísérletet is. Rá épül majd az a nyalábrendszer is, amely neutrínókat küld Közép-Olaszországba, a Gran Sasso-i neutrínóobszervatóriumba: a távolság megfelelő a neutrínók egymásba alakulásának tanulmányozására.

A *Nagy Elektron–Pozitron Ütköztető* (LEP – Large Electron Positron Collider) 1989-ben kezdett működni a CERN-ben, akkor még a stanfordi (USA) lineáris ütköztetővel azonos energián, a Z-bozon tömegének megfelelő 91 GeV-en. 1995-től kezdve a LEP gyűrűjében a részecskeenergiát fokozatosan a duplájára emelték, utolsó év-