

Antianyag a Föld környezetében

Király Péter

MTA KFKI Részecske- és Magfizikai Kutatóintézet, Budapest

Hol találkozhatunk antianyaggal?

A szilárd Földdel vagy annak plazmakörnyezetével foglalkozó geofizikus, de még legtöbb csillagász is csak ritkán találkozik kutatása során az antianyag valamilyen válfajával. Még leggyakrabban az elektron antirészecskéjével, a pozitronnal, vagy még inkább az elektron és pozitron kölcsönös megsemmisülésekor létrejövő sugárzással, az 511 keV-es annihilációs gamma-spektrumvonallal találkozhatunk. E sugárzás a töltött részecskéktől eltérően egyenes vonalban jut hozzánk, így a forrásokról közvetlenebb információt nyújt. Többek között Galaktikánk központjának környezetéből és Nap-flerekből is észleltünk ilyen sugárzást, de az orvosi pozitron-emissziós tomográfia is e spektrumvonal megfigyelésén alapul.

Magukat a légkörünk határára érkező kozmikus pozitronokat és antiprotonokat sokkal nehezebb megfigyelni. Nem csak a sokkal nagyobb számú elektron és proton közül kell az antirészecskéket kiválasztani, de a műholdak és a műszerek falában végbemenő ütközésekben is sok zavaró részecske keletkezik. Ha a megfigyelés ballonokról történik, a ballon fölött elhelyezkedő maradék atmoszférában is keletkeznek antirészecskék. A földfelszín közelében, a légkör alatt is kelt a kozmikus sugárzás másodlagos antirészecskéket, ha sokkal kisebb számban is. Mesterségesen, gyorsítóknak ma már sokkal nagyobb intenzitású antirészecske-nyalábokat állíthatunk elő, és e részecskék tulajdonságait könnyebben és pontosabban tanulmányozhatjuk.

Tükörországok

Alice Csodaországban tett kalandos utazása után – maga sem tudta pontosan, hogyan – átmegint egy tükroren, és megkezdte Tükörország felderítését [1]. A tárgyaknak az az oldala, amelyet a tükör másik oldaláról is látott, pont olyanak bizonyult, mint várta. Amint azonban a túloldalukat is megvizsgálta, majd a "tükörház" más szobáiba és kertjébe is eljutott, egyre több új, szokatlan és meglepő jelenséggel találkozott. Charles Dodgson-ban, az ismert gyermekkönyveket Lewis Carroll álneven író oxfordi matematikusban csak játékos lehetőségként merült fel a tükörvilágnak a való világtól való eltérése. De hát nem mindennapos tapasztalat-e az, hogy a tükörírás a valóságban nem "létező" betűket is tartalmaz? Vagy hogy legtöbb élőlény tükörképének pontosan megfelelő valódi élőlény



nem létezik? Sokáig mégis mindenki természetesnek vette, hogy a jelenségek szintjétől eltérően az alapvető törvényekre a tükörszimmetria pontosan érvényes. Vagyis hogy elvileg bármely rendszer tükörképe is lehetséges, még ha az a történeti fejlődés során nem is jött létre.

Ezért okozott olyan nagy meglepetést az 1950-es években, több mint 80 évvel Alice Tükörországra tett utazásának megírása után az a felfedezés, hogy e szimmetria nagyon alapvető szinten, a gyenge kölcsönhatások terén megsérül. Egyes részecskék és elemi folyamatok tükörképe nem valósul meg és nem is hozható létre a természetben. Ezt megelőzően azonban már a P-vel jelölt térbeli tükrözés mellett (amely azonban a közönséges tükörtől eltérően nem csak az egyik, hanem mindhárom térbeli koordinátát tükrözi) a T-vel jelölt időtükrözés és a C-vel jelölt töltéstükrözés is fontos szerepet játszott a fizika törvényeinek leírásában. Bár mindhárom külön is pontos szimmetriának gondolták, általános elvekből (Lorentz-invariancia, a kölcsönhatások pontszerűsége) csak a három tükrözés CPT kombinációjának érvényességét sikerült igazolni (CPT tétel, 1954). A P-sértés felfedezése után mindegyik tükrözéshez és különböző kombinációkhoz is külön tükörvilág tartozhatott, amelyek nem feltétlenül olyanok, mint a mi világunk. Azóta is folyik e tükrözések vizsgálata. Mi elsősorban a C töltéstükrözéssel és a CP kombinált tér- és töltéstükrözéssel foglalkozunk, amelyek a közönséges anyag és az antianyag között létesítenek kapcsolatot.

Az első antirészecskék

Paul Dirac 1928-ban megalkotott relativisztikus hullámegyenlete az elektron tulajdonságait a korábbiaknál sokkal pontosabban írta le, de emellett olyasmit is jósolt, amit józan ésszel nehéz volt elfogadni. Az első megfogalmazások szerint a szokásos pozitív energiájú elektronnal együtt végtelen sok negatív energiájút is fel kellett tételeznie. E "Dirac-tengerben" viszont egy lyuk pozitív energiájú és töltésű, az elektronnal azonos nyugalmi tömegű részecskeként jelent meg. E pozitív elektron vagy pozitron akkor nyert igazán polgárjogot, amikor Carl Anderson 1932-ben, Dirac feltételezéseitől teljesen függetlenül, a kozmikus sugárzás másodlagos részecskéi között felfedezte. Ezután már csak néhány hónap telt el addig, amikor Patrick Blackett és Giuseppe Occhialini Geiger-Müller csövekkel időzített ködkamrás felvételeken megmutatta, hogy az elektron és pozitron egy nagyenergiájú foton hatására egyszerre, együtt jön létre (párkeltés). A foton, a "tisztá" energia a töltéstükör két oldalán egyszerre hoz létre egy-egy részecskét, így az egész rendszer töltésszimmetrikus marad. Egy elektron és pozitron egyesülésekor viszont mindkettő eltűnik, és tömegük Einstein híres $E=mc^2$ képletének megfelelően ismét tiszta energiává, azaz sugárzássá alakul.

Dirac 1933 decemberében tartott Nobel-előadásában már az elektronnál és pozitronnál sokkal általánosabb rendszerekről is beszélt. Felvetette, hogy ha a pozitív és negatív töltés közötti tökéletes szimmetriát komolyan vesszük, akkor ez protonokra és atomokra, sőt a belőlük összetevődő nagyobb testekre, így csillagokra is érvényes lehet. Miért ne állhatnának egyes csillagok negatív atommagokból és pozitív elektronokból? A csillagászat információhordozói a semleges fotonok, amelyek nem tesznek különbséget a kétféle anyag között, így a kétféle csillagot ugyanolyannak látnánk. Az antianyag, mint lehetőség, bevonult a fizikába, majd később a tudományos fantasztikus irodalomba is. A pozitron felfedezését követő évtizedekben a kozmikus sugárzásban sorra fedezték fel a különböző bomlékony elemi részecskéket antirészecskéikkel együtt. A protonnak és a neutronnak, az atommagok fő alkotórészeinek antirészecskéit azonban ekkor még nem

sikerült egyértelműen kimutatni. Csak az első nagy gyorsítóval, amelyet elsősorban e célra építettek, állították elő és mutatták ki mindkettőt az 50-es évek közepén. Ekkorra az is világossá vált, hogy a "töltés" fogalma nem korlátozható az elektromos töltésre, hanem a töltéstükör más megmaradó mennyiségeket is ellenkezőjűkre változtat (például a proton és neutron esetén a barionszámot, vagy a kaon esetén a ritkaságot).

Az már korábban is nyilvánvaló volt, hogy az antirészecskék gyorsítóval való előállítására nagyon energiaigényes, ezért az így létrehozott, majdnem fénysebességgel mozgó "antianyag" csak fizikai vizsgálatokra alkalmas, gazdaságos energiatermelésre nem. Ha viszont valahol a természetben jelentős mennyiségű hideg, kondenzált antianyagot találnánk, az a közönséges anyaggal egyesülve távlatilag minden korábbinál hatékonyabb energiatermelést tenne lehetővé. De vajon van-e erre kilátás? Remélhetjük-e, hogy a Naprendszerben vagy a közeli csillagközi térben olyan kisbolygókat, üstökösöket, vagy távoli csillagrendszerekből elbitangolt őrsziklákat találunk, amelyek antianyagból állnak?

Hová tűnt a sok antianyag?

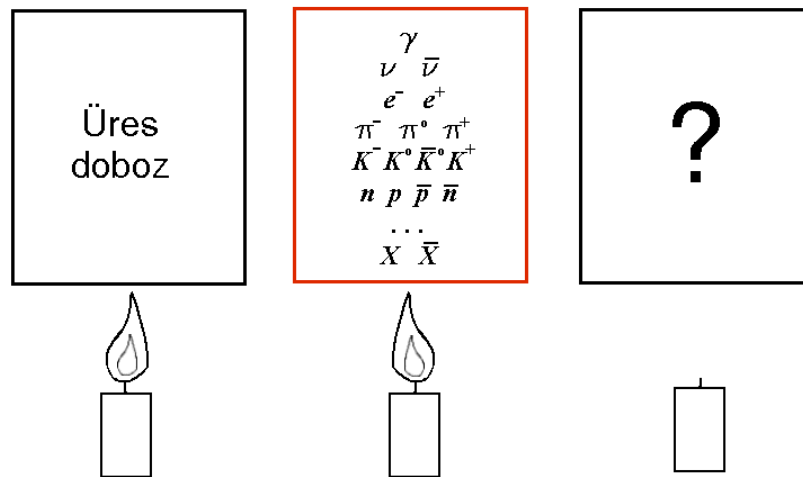
Ma úgy tűnik, hogy ilyen természetes eredetű antianyag-források felfedezésére kevés a remény. A galaktikánkban, sőt az általunk belátható egész Univerzumban lévő antianyag mennyiségére a kozmikus gamma-sugárzás mért intenzitása szab különösen szigorú korlátokat. Mivel csillagközi vagy galaxisközi gáz mindenütt jelen van, a kétféle anyag nem szigetelhető el egymástól. Találkozásukkor egyrészt jellegzetes spektrumvonalak keletkeznek (legfontosabb az elektron és pozitron egyesüléséből származó fotonok 511 keV-es vonala), részben pionok és más bomló részecskék jönnek létre, amelyek bomlásuk és kölcsönhatásaik során szintén gamma-sugárzást bocsátanak ki. Bár a becslések némileg modellfüggők, nagyon valószínűnek látszik, hogy az esetleges antianyag mennyisége mindenhol sok nagyságrenddel kisebb, mint a közönséges anyagé, és valószínűtlen, hogy nagyobb rendszámú antiatomokból álló antianyag bárhol létrejöhetett volna. Ez automatikusan felveti azt a kérdést, hogy miért ennyire aszimmetrikus világunk a töltéstükörözésre nézve. A biológiában talán a véletlenszerű mutációk rögzülésével magyarázhatjuk a közönséges tükrözéssel szemben megnyilvánuló aszimmetriát. Működhet-e vajon hasonló magyarázat a töltés-aszimmetriára is?

Mint 1965-ben Arno Penzias és Robert Wilson mikrohullámú háttérsugárzás-mérései nyomán nyilvánvalóvá vált, az Univerzum eredete a korábban csak sejtésként megfogalmazott Nagy Ősrobbanásra vezethető vissza, s a forró korai állapot nagyjából ugyanannyi anyagot és antianyagot tartalmazott. Amikor a világ elég hideggé vált ahhoz, hogy kölcsönös megsemmisülésük elkezdődjék, minden milliárd protonhoz és antiprotonhoz csak egyetlen "felesleges" proton tartozott, amely a nagy megsemmisülés után megmaradt. E megmaradt részecskékből áll ma látható világunk. Ha korábban pont ugyanannyi proton és antiproton lett volna, akkor a megsemmisülés után csak sugárzás marad. De mi okozta ezt a kis kezdeti eltérést?

Nem tudjuk biztosan, de valószínűleg legalább részben az, hogy sem a töltéstükörözés (C), sem a térbeli és töltéstükörözés együttese (CP) nem tökéletes szimmetria. Mint említettük, az 50-es évek közepén derült ki, hogy P a gyenge kölcsönhatások körében nem jó szimmetria. Ekkor azonban úgy tűnt, hogy C-vel együtt már helyreáll a teljes szimmetria, vagyis egy "jobbkezes" anyagi rendszernek (pl. egy embernek) egy "balkezes" antianyag-rendszer már tökéletesen szimmetrikus párja lehet (Richard Feynman szerint ezért kell

menekülni, ha egy földönkívüli a kézfogásra bal kezét nyújtja). A 60-as évek közepén derült ki, hogy e szimmetria sem tökéletes. Ha P-nél sokkal kisebb mértékben is, a CP szimmetria is sérül. Andrej Szaharov 1967-ben, röviddel a CP-sértés és az univerzális háttérsugárzás felfedezése után adta meg azt a három feltételt, amelyek teljesülése egy nagyon forró, szimmetrikus korai Univerzumban a barion-aszimmetria kialakulásához szükséges. Először is kellene olyan nagyon nagy energiájú folyamatok, amelyekben a barionszám megmaradása megsérül (ilyet még nem találtak). Másodszor, a C és CP szimmetriának is sérülnie kell (ilyen sérülést találtak, de nem világos, hogy ez elég nagy-e az anyag és antianyag közötti aszimmetria magyarázatához). Harmadszor az is szükséges, hogy mindeközben a táguló világegyetem ne legyen termikus egyensúlyban, és így a fordított irányban lejátszódó folyamatok ne semmisítsék meg a kialakult aszimmetriát.

Szaharov feltételeit ma is érvényesnek tekintjük, de a korai Univerzumból azóta lényegesen több információnk van. A mai elképzelések szerint a korai, felfűvődő szakaszban mintegy a semmiből, vagy inkább egy fázisátalakulás során felszabaduló tiszta energiából kellett létrejönnie annak a rengeteg részecskének és antirészecskének, amelyekből mai maradék-világunk a nagy megsemmisülés után kialakult. Valahol közben



Mi történik, ha felmelegítjük, majd lehűtjük a semmit?

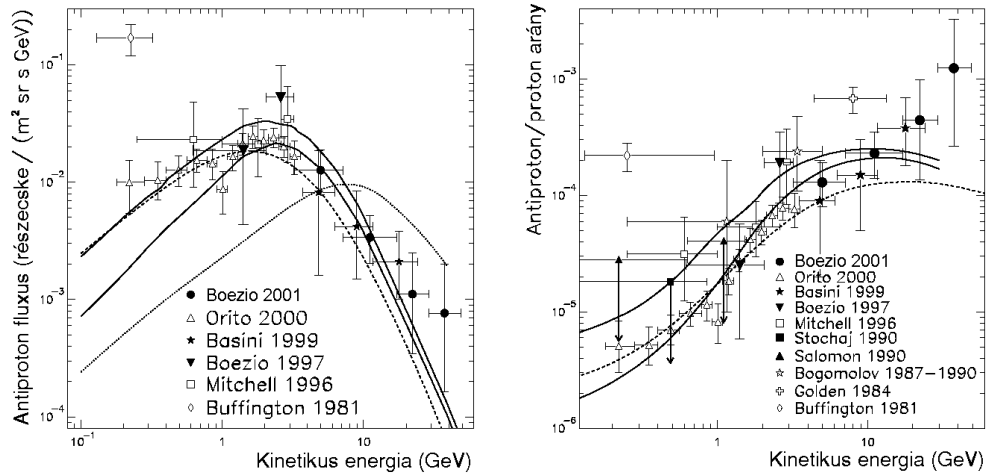
kissé meg kellett hogy bomoljék a részecskék és antirészecskék közötti egyensúly. Vagyis a vákuumot felmelegítve, majd ismét lehűtve nem feltétlenül vákuumot kapunk, mint azt ábránk is illusztrálja.

Antirészecskék a kozmikus sugárzásban

Bár az első antirészecskét - a pozitront - a kozmikus sugárzás másodlagos komponensében fedezték fel, e részecske keletkezésének nem volt köze ahhoz, hogy érkeznek-e antirészecskék légkörünk határára. Az első légköri kölcsönhatások során ugyanis sok nagyenergiájú foton is létrejön, amelyek elektron-pozitron párt keltenek, majd ezek kölcsönhatásaiban újabb fotonok, majd újabb párok keletkeznek. Ez az ún. elektromágneses kaszkád a földön sok pozitront eredményez, de mindezek a légkörben jönnek létre. Emellett a légköri kölcsönhatásokban antiprotonok és más antirészecskék is keletkeznek. Ezért a légkör tetejére érkező antirészecskék fluxusát a légkör tetején, vagy legalább ahhoz közel kell vizsgálni. Ilyen vizsgálatok végezhetők magaslégköri ballonokon, amelyek általában olcsóbbak, mint az ugyanakkora hasznos terhet hordozó

műholdak. A ballonok fölötti levegőrétegben ugyan keletkezik valamennyi antiproton, de az eredményt ezzel korrigálni tudjuk. Különösen hasznosak a nagy földrajzi (vagy pontosabban geomágneses) szélességen felbocsátott ballonok, mivel Földünk mágneses tere ide megengedi viszonylag kis energiájú töltött részecskék és antirészecskék behatolását is. Nagyobb pontosságú és hosszabb ideig tartó méréseknél viszont a műholdak vagy az Űrállomás fedélzetén elhelyezett műszerek az előnyösebbek. A mérés mindkét esetben nehéz, hiszen az antiprotonokat legalább tízezerszer annyi proton jelenlétében kell azonosítani.

A kozmikus sugárzásban Földünk légkörébe érkező antiprotonokat először 1979-ben Golden és munkatársai mutatták ki [2]. Az, hogy a kozmikus sugárzás kis mennyiségben antiprotonokat is tartalmaz, nem volt meglepő, hiszen a különböző rendszámú nagyenergiájú atommagok gyakoriságából már tudtuk, hogy a források és a Föld között a részecskék jelentős mennyiségű (több g/cm^2) csillagközi gázon haladnak át több mint tíz millió fényéves útjuk során. E gázzal kölcsönhatva a nagyenergiájú atommagok antiprotonokat is keltenek. Az 1981-ig végzett első három mérés viszont azt mutatta, hogy a várt másodlagos antiprotonoknál több érkezik, különösen kis energián. Ez utóbbi következtetést különösen Buffington és munkatársai mérése támasztotta alá [3]. Ez



Antiproton fluxus és antiproton/proton arány a kinetikus energia függvényében [5]

felvetette azt a lehetőséget, hogy vagy antianyag-csillagokból, vagy valamilyen más forrásból (pl. az Ősrobbanásban keletkezett apró, de nagy tömegű fekete lyukak párologásából) is érkezik hozzánk antiprotonok [4]. E sejtéseket a későbbi, pontosabb mérések nem igazolták, bár határozottan nem is zárták ki. Később az is felmerült, hogy bizonyos hipotetikus, nagy tömegű elemi részecskék (pl. a szuperszimmetrikus elméletekben megjelenő neutralínók) bomlásából is származhat az észlelt antiprotonok egy része. Mindegyik eredet más-más energiaspektrumot eredményezne. A mellékelt két ábra a különböző feltételezések mellett várt és a mért antiproton/proton számarányt, illetve az antiproton fluxust mutatja, mindkettőt a kinetikus energia függvényében. Bár a szórások elég nagyok, az eredmények néhány kivételtől eltekintve nagyjából összhangban vannak a legegyszerűbb feltételezéssel, ami a kozmikus sugárzás csillagközi gázzal való kölcsönhatásának felel meg (folytonos vonalak). Így a kozmikus sugárzás protonkomponense sem igazolja, hogy galaktikánkban antianyagból álló csillagok lennének. Egyedül Buffington 1981-es pontja tér el erősen a várakozásoktól, de ma azt legtöbbször mérési hibának tulajdonítják. A baloldali ábrán látható pontozott vonal a neutralínóbomlásnak felelne meg. Mint látjuk, a spektrum alakja ekkor nem egyezik meg jól a

mérésekkel. A forrásokból esetleg érkező antianyagra érzékenyebb vizsgálatot végezhetünk, ha antiprotonok helyett antianyagból álló hélium vagy szén atommagokat keresünk, hiszen ezek másodlagos kölcsönhatásokban elhanyagolhatóan kis valószínűséggel jöhetnek csak létre. Eddig ilyeneket nem sikerült találni. Azt viszont már a jelenlegi pontossággal is sikerült volna kimutatni, ha minden millió észlelt héliummagra egynél több anti-héliummag jutna. Néhány éven belül várható, hogy az Űrállomás fedélzetén e vizsgálatot ennél ezerszer nagyobb pontossággal is el lehet majd végezni.

Kozmikus sugárzási antiprotonokat eddig mintegy 50 GeV energiáig sikerült észlelni. Ennél nagyobb energiákon egyrészt fluxusuk túl kicsi, másrészt azonosításuk túl nehéz a mesterséges holdakra vagy az Űrállomásra felvitt, viszonylag kisméretű mágnesekkel. A Föld mágneses tere ennél lényegesen nagyobb irányeltérítést képes létrehozni, így felmerült az a lehetőség, hogy a messziről érkező részecskék töltését a geomágneses tér segítségével állapítsuk meg. Erre kiváló lehetőséget nyújt két olyan égitest, amelyek helyzete mindig pontosan ismert, és amelyek nem átlátszóak a beérkező részecskékre nézve: a Nap és a Hold. A Napnál bonyodalmat okoz, hogy saját mágneses tere is eltéríti a töltött részecskéket, méghozzá a napciklustól függő, pontosan nem ismert mértékben. E mérések elsősorban e tér változásainak nyomonkövetésénél hasznosak. A Holdnak viszont nincs jelentős mágneses tere, így az eltérés főleg az elég jól ismert geomágneses térben megy végbe. A Földről nézve az adott energiájú és töltésű részecskék irányeloszlásából a Hold kitakar egy kör alakú tartományt, de hogy e tartomány merre helyezkedik el a Hold valódi irányától, az a részecskék töltésétől függ. Az irányból megállapítható, hogy legalább 10^{13} eV energiáig az érkező részecskék túlnyomórészt protonok, nem pedig antiprotonok.

Atommagok mellett nagyenergiájú elektronok és pozitronok is érkeznek légkörünk határára. Ma úgy tűnik, hogy az antiprotonokhoz hasonlóan a pozitronok fluxusa és energiaspektruma is összhangban van a nagyrészt másodlagos, ütközésekben való keletkezéssel. A töltött részecskék fluxusának közvetlen mérése tehát nem bizonyítja, hogy a forrásokban is keletkeznek pozitronok, a gamma-sugárzás 511 keV-es ún. annihilációs vonalának vizsgálata azonban igen. Ilyen sugárzást több csillagból és galaxisból, de sok napkitörésből is észleltünk már. Különösen erős e sugárzás Galaktikánk középpontjának környezetéből, és egy abból több ezer fényévnnyire északi irányban kinyúló tartományból (pozitron-szökőkút) [6]. Ez utóbbi sugárzás eredete még nem tisztázott, de mért intenzitásából nyilvánvaló, hogy e tartományban hatalmas mennyiségű (másodpercenként mintegy 10^{10} tonnát kitevő) pozitron semmisül meg, illetve alakul át energiává az ott lévő elektronokkal egyesülve. Ezzel szemben a Földünk légkörére eső antiproton- és pozitron-fluxus együttesen sem haladja meg az évenkénti 1 mg összes tömeget! Földünk környezetébe tehát nagyon kevés antianyag érkezik, s annak begyűjtése sokkal nehezebb feladat lenne, mint ha egy háborúban a röpködő lövedékeket próbálnánk elkapkodni és munícióként összegyűjteni. Az antianyag földi felhasználására tehát más forrásokat kell keresnünk.

Első lépések az összetett és hideg antianyag előállítására felé

Mint említettük, az első nagy gyorsítót főleg az antiproton és antineutron létrehozására építették, ezért a gyorsított protonok energiáját ennek megfelelően választották meg. Az antirészecskéket nagyenergiájú protonok keltették álló céltárgyakon való ütközésekben, a fénysebességhez közeli sebességgel. A fő probléma egyébként nem is létrehozásuk, hanem kimutatásuk volt. Ilyen módszerrel összetett rendszert (pl. egy anti-atommagot)

létrehozni reménytelennek tűnt. A legegyszerűbb antimagot, az antiprotonból és antineutronból álló antideuteront mégis hasonló módszerrel hozták létre 1965-ben (még hozzá szinte egyidejűleg két csoport, Európában illetve Amerikában). Ha egy proton valamilyen anyagon áthaladva antiprotonot és antineutronot is kelt, és a kettő véletlenül közel azonos sebességgel és irányban halad, akkor antideuteronná állhatnak össze, s a nehéz feladat ismét csak e ritka események kimutatása volt, ami végül sikerrel járt. Persze az új mag csak addig élt, amíg nagy sebességgel be nem csapódott egy falba, de ez az idő elég volt a legegyszerűbb vizsgálatok elvégzésére. Mindenesetre e kísérletek bebizonyították, hogy az antinukleonok között is olyan a kölcsönhatás, hogy azok atommagokká szerveződhetnek. Azt, hogy a legegyszerűbb töltéstükrözött atom, az antihidrogén is létezik, csak 1995-ben Genfben, a CERN-ben sikerült kimutatni (ott összesen 9 ilyen atomot találtak, majd később Amerikában, a Fermi Laboratóriumban még néhány tucatot). Az antiproton egy nagy rendszámú atommag közelében elhaladva kis valószínűséggel elektron-pozitron párt kelt, s ha az antiproton és pozitron közel azonos sebességgel halad, antihidrogén jöhet létre. A létrehozott antihidrogén atom még mindig közel fénysebességgel mozgott, így viselkedésének részletes vizsgálatára nem volt lehetőség. Az antideuteront a nukleáris, az antihidrogént a kémiai antianyag első képviselőjének tekinthetjük.

A CERN-ben 1980-ban kezdték el azt a programot, amelynek célja az antiprotonok lassítása volt. Két évvel később már működött a LEAR alacsony energiájú antiproton gyűrű antiprotonok lassítására és tárolására. Ez azután egészen 1996-ig működött, s élettartama alatt mintegy 10^{14} lassított, bár még mindig elég nagy energiájú antiprotonot szolgáltatott különféle kísérletekhez. Bár e szám nagynak tűnik a kozmikus sugárzásban eddig talált néhány ezer antiprotonhoz képest, összes tömegük mégis csak mintegy 0,2 ng-ot tesz ki. Ezután új, még ambiciózusabb program indult a hideg antianyag előállítására. 2000-ben kezdett működni az AD antiproton lassító (Antiproton Decelerator), amelynek egyik legfőbb célja a hideg antihidrogén előállítása volt. Az AD 2002 közepén, Dirac születésének centenáriumára jutottak el addig, hogy a hideg antihidrogén létezését ki tudták mutatni. Két kísérleti csoport (ATHENA, ATRAP) is közölte 2002 őszén ezzel kapcsolatos eredményeit [7, 8]. A legfontosabb eltérés a korábbiaktól az volt, hogy itt csapdába ejtett, hideg antiprotonokat és pozitronokat eresztettek össze, s az ezekből képződő hideg antihidrogén megsemmisülésekor kibocsátott sugárzást mutatták ki. A sugárzás alapján több tízezer ilyen antiatom jött létre, de ezeket, semlegesek lévén, a csapda már nem korlátozta. Az ATRAP kísérletben erős elektromos terek alkalmazásával azt is ki tudták mutatni, hogy az antiatomok nem alapállapotban, hanem erősen gerjesztett állapotban keletkeznek, és így viszonylag gyenge terek hatására is szétesnek. Távolilag az antihidrogént is tárolni akarják, és lézertűnyel gerjesztve nagyon nagy pontossággal meg akarják határozni, hogy különböző spektrumvonalai mennyire pontosan egyeznek a hidrogén megfelelő vonalaival. Ha ugyanis a CPT szimmetria pontosan érvényes, a kétféle vonalrendszer között semmilyen eltérésnek sem szabad lenni. Hasonlóan, a részecskék és az antirészecskék tömegének, valamint bomlás esetén a bomlási időnek is azonosnak kell lennie a CPT szimmetria teljesülése esetén. Ha viszont a CPT szimmetria igen, de a CP szimmetria nem pontosan teljesül, akkor bizonyos végállapotokba való bomlások valószínűsége már nem feltétlenül azonos. Könnyen lehet, hogy ezekben a csapdáknak már antihidrogén-molekulák is kialakultak, de ennek kimutatása még várat magára.

Az antiproton lassítóhoz kapcsolódik egy másik, jelentős magyar részvétellel működő kutatócsoport is (ASAGUSA), amelyik különféle egzotikus, antiprotonot is tartalmazó

atomi rendszerekben ellenőrzi a CPT szimmetria és a kvantumelektrodinamika eredményeit. Például a hélium atom egyik elektronja helyett antiprotont beépítve kiszámíthatók a spektrális átmeneti frekvenciák, s ezeket a lézerrel gerjesztett valódi átmenetek frekvenciáival összehasonlítva a szimmetria rendkívül pontos ellenőrzését kapjuk. Eddig úgy tűnik, a szimmetria tökéletes.

A hideg antianyaghoz vezető úton tett lépések mellett a nagyon forró, nehéz ionok ütköztetésével kapott anyag is szolgáltat érdekes új eredményeket az antianyaggal kapcsolatban. Brookhaven-ben aranyatomok ütköztetésével nemrégiben olyan parányi tűzgolyókat hoztak létre, amelyekből a közönséges és antirészecskék mellett összetett antimagok, így antideuteron és anti-³He magok is kirepültek. Ez utóbbi mag az eddig észlelt első 3 elemi összetevőből álló antianyag-darabka.

Mire használható az antianyag?

A tudományos fantasztikus irodalomban az antianyag főleg ideális energiaforrásként szerepel. Adott tömegű reagensek esetén valóban a közönséges és antianyag egyesülésekor szabadul fel a legtöbb energia, $E=2mc^2$, ahol m a rendelkezésünkre álló antianyag tömege. Egyetlen gramm antianyagból több mint húszszor annyi energiát nyerhetnénk, mint amennyi kémiai energiát az úrkomp hatalmas külső üzemanyagtartálya tartalmaz. De honnan vegyük hozzá az antianyagot? Sajnos úgy néz ki, bányászni nem tudjuk. A világűrben érkező antianyag túl kevés és túl nehezen begyűjthető. Marad a mesterséges előállítás. A befektetett és a kinyerhető energia hányadosa viszont rendkívül nagy, milliárdos nagyságrendű. Nagyüzemi termeléssel ez talán 2-3 nagyságrenddel csökkenthető lenne, de a termelt antianyag üzemanyagként való direkt felhasználása így is nehezen képzelhető el, és különösen nem várható el, hogy megoldja az emberiség energiagondjait. Jelenleg mintegy 13 TW (terawatt, 10^{12} watt) energiát használunk átlagosan, és az évi szükséglet fedezéséhez mintegy 2 tonna antianyagra lenne szükség, 100 %-os hatásfokot feltételezve. (Összehasonlításként megemlíthetjük, hogy a Föld belsejéből származó teljes, valószínűleg főként radioaktív eredetű hőfluxus teljesítménye mintegy 30 – 40 TW-nak felel meg.) Ezzel szemben a földi gyorsítóknál évente létrehozott antianyag mennyisége néhány ng, vagyis legalább 15 nagyságrenddel kisebb az emberiség energiaszükségletének fedezéséhez szükségesnél.

Vannak azonban reményteljesebb felhasználási területek is. A pozitronokat már évtizedek óta használják az orvostudományban daganatok és más elváltozások helyének megállapítására (PET, pozitron emissziós tomográfia). Mivel a pozitron megsemmisülésekor általában két 511 keV energiájú, egymással ellentétes irányban kibocsátott foton keletkezik, a kibocsátás helye elég jól lokalizálható. Több közönséges elem radioaktív izotópja is bocsát ki pozitronokat, így az izotópokat a véráramba juttatva pontosan meghatározható, hová milyen mennyiségben jutnak el. Félvezető anyagok hibahelyeit is meghatározhatjuk pozitronok segítségével. Megfelelő körülmények között az anyagba belőtt pozitronok az ott talált elektronokkal pozitroniumot alkotnak, melynek bomlási ideje attól függ, hogy a környezet milyen sok elektront tartalmaz. Egy pozitív ion hiánya esetén kevesebb elektron van a hibahely környékén, ezért a bomlás lassúbb lesz, ami jól kimutatható. Hasonló vizsgálat később talán antiprotonokkal is végezhető lesz. Daganatok gyógyítására is tervezik az antiproton-besugárzást.

Nagyrendszámú anyagot (pl. uránt) antiprotonnal besugározva a magok belsejében olyan robbanások következnek be, amelyek szétvetik a magot és sok neutron is termelnek, így

az egész anyag robbanásához vagy a folyamatos láncreakcióhoz szükséges kritikus tömeg lecsökkenthető. E folyamatok beindításához jóval kevesebb antiproton is elég, mint a közvetlen energiatermeléshez. Az USA-ban már most alakulnak vállalatok, amelyek a nagy gyorsítóktól antiprotont akarnak vásárolni, s azokat raffinált elektromágneses csapdákból szállítva fúziós vagy hasadási reakciók élénkítésére akarják felhasználni. Még az út elején tartunk, és egyelőre a fő felhasználási terület az alap kutatás, a természet szimmetriáinak jobb megértése. De vigyáznunk kell, nehogy az antianyag földi megjelenésével megnyíló új lehetőségeket - mint már annyi korábbi lehetőséget - ismét bűvészi módjára kezeljük.

Irodalom

1. Lewis Carroll: Through the looking glass (első kiadás:1872).
URL: <http://www.ongoing-tales.com/SERIALS/oldtime/STORIES/ALICE/LG02.html>
Magyarul: Alice Tükörországban, Móra Ferenc Kiadó, fordította Révbíró Tamás (1980)
2. R.L. Golden és mások, Phys. Rev. Lett. **43**, 1196 (1979)
3. A. Buffington és S.M. Schindler, Astrophys. J. **248**, L105 (1981),
A. Buffington és mások, Astrophys. J. **248**, 1179 (1981)
4. P. Király és mások, Nature **293**, 120 (1981)
5. M. Simon (Siegen, Németország), URL: <http://ida1.physik.uni-siegen.de/pbarprat.html>
6. W.R. Purcell és mások, Astrophys. J. **491**, 725 (1997)
7. M. Amoretti és mások, Nature **419**, 456 (2002)
8. G. Gabrielse és mások, Phys. Rev. Lett. **89**, 213401 (2002)