



Antiatomi

dr. Janez Strnad

Povzetek

Vsak delec ima svoj antidelec, ki ima enako maso in razpolovni čas, a nasproten električni naboj. Ob začetku vesolja so za nastanek antidelcev veljali enaki zakoni kot za nastanek delcev. Kako to, da je v vesolju tako malo antidelcev? To je eno od pomembnih nerešenih vprašanj fizike.

Abstract

Every particle has its antiparticle with the same mass and half-life, but opposite charge. When the universe was created, the creation of antiparticles was governed by the same laws as the creation of particles. How come there are so few antiparticles in the universe? That is one of the important, unsolved mysteries in physics.

Ozadje

Vzemimo katero znano reakcijo delcev ali razpad delca. Opazujemo pojav v zrcalu, učeno povedano, v koordinatnem sistemu, ki ga zrcalimo na izhodišču, kar zaznamujemo s *parnostjo P*. Opazujemo pojav, pri katerem delce nadomestimo z antidelci, kar zaznamujemo s *konjugacijo naboja C*. Opazujemo pojav v obrnjenem časovnem redu, kar zaznamujemo z *obratom časa T*. Najprej so mislili, da dobimo v vseh treh primerih mogoč pojav, ki je enako pogost kot prvotni pojav. V tem primeru bi bili pojavi *invariantni* na parnost *P*, na konjugacijo naboja *C* in na obrat časa *T*. Leta 1956 sta Tsung Dao Lee in Chen Ning Yang spoznala, da to ne velja, če pojav povzroči šibka jedrska *interakcija* (z interakcijo v *kvantni teoriji polja* opišemo delovanje delca na delec, ki ga sicer opišemo s silo). Velja pa, če ga povzroči *elektromagnetna interakcija* ali *močna jedrska interakcija*. Za »raziskovanje tako imenovanih zakonov parnosti, ki pripeljejo do pomembnih odkritij o osnovnih delcih«, sta že leta 1957 dobila Nobelovo nagrado. Šibka interakcija torej ni invariantna ne na *P* in ne na *C*. To imenujemo *neohranitev* parnosti in konjugacije naboja.

Potem so nekaj časa mislili, da so pojavi po šibki interakciji invariantni na *kombinirano parnost CP*, da torej dobimo mogoč pojav, če pri znanem pojavu delce nadomestimo z antidelci in opazujemo v zr-

calu. Antidelec ima enako maso in razpadni čas kot delec, a nasprotno nekatere druge lastnosti, denimo električni naboj. Nekateri nevtralni antidelci se ne razlikujejo od svojih delcev, na primer foton ali nevtralni pion. Leta 1964 sta James Cronin in Val Fitch s sodelavcema ugotovila, da pri majhnem delu pojavov z nevtralnimi mezoni *K* to ne velja. Za »odkritje prekršitve osnovnih načel simetrije pri razpadu nevtralnih mezonov *K*« sta leta 1980 dobila Nobelovo nagrado. Pri pojavih po šibki interakciji gre torej tudi za neohranitev kombinirane parnosti *CP*.

Iz zelo splošnih izhodišč sledi, da so pojavi invariantni na *CPT*. Ne glede na interakcijo dobimo mogoč pojav, če pri znanem pojavu delce zamenjamo z antidelci, opazujemo v zrcalu in obrnemo čas. Iz neohranitve *CP* pri šibki interakciji potem sledi neohranitev *T*. Pojavi, ki jih povzroča šibka interakcija, po obratu časa potekajo drugače. Spomnimo se, da v svetu velikih teles zaradi entropijskega zakona v termodinamiki ne velja invariantnost proti obratu časa.

Delci in antidelci v vesolju

Ob začetku vesolja so za nastanek antidelcev veljali enaki zakoni kot za nastanek delcev. Tudi če upoštevamo, da je bila učinkovita šibka interakcija, ne moremo pojasniti sedanje prevlade delcev nad antidelci v vesolju. Mogoče bi bilo, da bi v vesolju bilo enako število galaksij iz antidelcev kot galaksij iz delcev.

A merjenja ne podpirajo te možnosti. Merilniki na umetnih satelitih so med delci iz vesolja zaznali samo posamezne antiprotone, kot jih pričakujemo zaradi trkov delcev z veliko energijo iz vesolja s preostalimi delci v medzvezdnem plinu (proton je jedro vodika, antiproton pa njegov antidelec). Drugih antijeder iz antiprotonov in antinevtronov niso zaznali. Tako merjenje so izvedli tudi na Mednarodni vesoljski postaji (ISS). Tako kaže, da v vesolju delci močno prevladujejo nad antidelci.

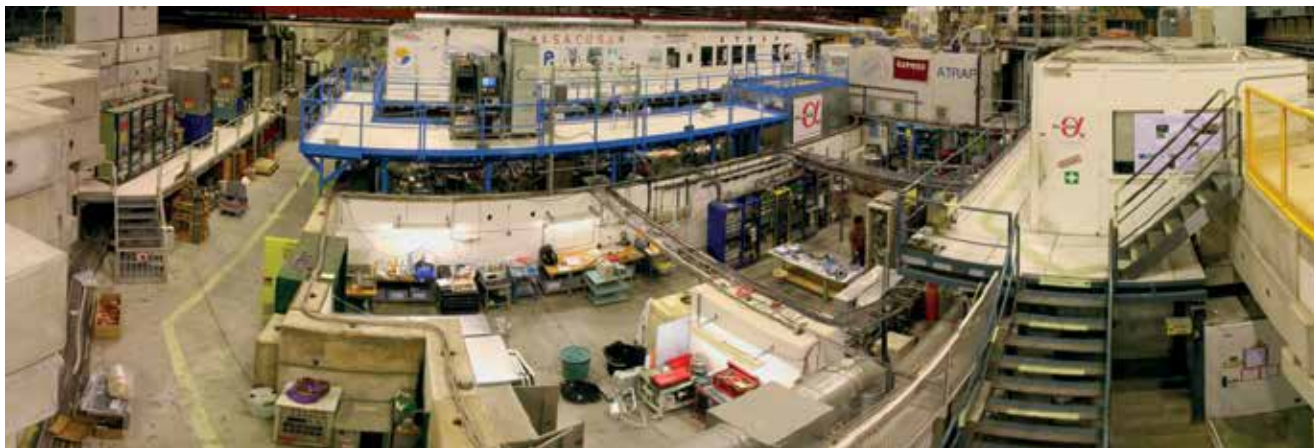
Denimo, da je v vesolju na milijardo antidelcev prišla milijarda in en delec. Milijarda antidelcev se je anihilirala z milijardo delcev. Od vseh teh antidelcev in delcev je preostal en sam delec. Ti preostali delci sestavljajo zvezde in galaksije. Danes pride v vesolju približno en proton ali nevtron na milijardo fotonov (nevtron je nevtralen delec, ki podobno kot proton sestavlja atomska jedra). Zato smo v prejšnjem premisleku izbrali milijardo.

Andrej Saharov je med prvimi ugotovil, da za antidelce niso mogli veljati enaki zakoni kot za delce, če v vesolju prevladujejo delci nad antidelci. Med razvojem vesolja sta morali biti prekršeni konjugacija naboja C in kombinirana parnost CP. Mogoče bi bilo tudi, da bi bila prekršena simetrija CPT, čeprav se zdi ta možnost bolj oddaljena. Opisali smo, kako poskusi kažejo, da sta pri šibki interakciji prekršeni konjugacija naboja C in kombinirana parnost CP. Toda opazovani prekršitvi pri pojavih po šibki interakciji ne moreta pojasniti, da pride v vesolju en proton ali nevtron na milijardo fotonov. Pojasnili bi lahko kvečjemu to, da bi na en proton ali nevtron prišel trilijon fotonov, z drugimi besedami, da »bi v vesolju obstajala ena sama galaksija«.

Merjenja z antidelci

V Evropski organizaciji za jedrske raziskave (CERN) v Ženevi deluje največji pospeševalnik na svetu – veliki hadronski trkalnik (LHC). Septembra 2014 so ga po prenovi, ki je trajala poldrugeto leto, začeli pripravljati za ponovno delovanje. Zdaj bodo z njim začeli meriti. Največ pozornosti vzbujajo veliki merilniki v štirih velikih podzemnih dvoranah. Z merilnikoma ATLAS (A Toroidal LHC Apparatus, svitkasta naprava LHC) in CMS (Compact Muon Solenoid, kompaktna mionska tuljava), visokima kot šestnadstropni stavbi, so leta 2012 odkrili Higgsov delec. Z merilnikom ALICE (A Large Ion Collider Experiment, veliki ionski trkalniški poskus) raziskujejo trke svinčevih jeder s protoni in s svinčevimi jedri ter z merilnikom LCHb pri pojavih z mezoni B iščejo odgovor na vprašanje o prevladi delcev nad antidelci.

Poleg poskusov z velikimi merilniki poteka v CERN-u še veliko manjših poskusov, ki vzbujajo manj pozornosti, a so tudi zanimivi. Mednje sodijo poskusi z antiatomi. Protonski sinhrotron sicer daje protone, ki jih vbrizgavajo v LHC. Pri opisanih poskusih pa gruče protonov z energijo 26 GeV iz njega usmerijo na iridijevo tarčo. Pri reakcijah protonov s protoni in nevtroni v jedrih nastanejo pari protonov in antiprotonov, nekako en par na milijon reakcij. Del nastalih antiprotonov z energijo 2,7 GeV zberejo z magnetnim poljem in jih uvedejo v antiprotonski decelerator oz. pojemalnik (AD). Krožni nakičevalni obroč ima obseg 188 metrov. V njem z izmeničnim električnim poljem zavirajo gruče antiprotonov, obratno kot v pospeševalniku pospešujejo gruče protonov. Pri *elektronskem hlajenju* s trki z elektroni dosežejo, da postajajo gruče antiprotonov



Slika 1: Položaj antiprotonskega deceleratorja v CERN-u. Gruče protonov najprej pospeši linearni pospeševalnik, nato jih vbrizgajo v krožni pospeševalnik in iz njega v protonski sinhrotron, ki jih pospeši do energije 26 GeV. Te vbrizgajo v veliki hadronski trkalnik ali jih usmerijo na tarčo, v kateri nastanejo antiprotoni. Del teh zajame antiprotonski decelerator.

vse manjše. Enak namen ima stohastično hlajenje, pri katerem posebne elektrode na določenem kraju v antiprotonskem deceleratorju otipajo gruče antiprotonov. Po vodnikih preko naprav napajajo elektrode na nasprotni strani obroča z napetostjo, ki antiprotone zavrača proti težišču gruče [1], [4].

Do leta 1996 so v CERN-u poganjali trkalnik s protoni in antiprotoni. Antiprotone so dobili na opisani način s tremi napravami: z antiprotonskim kolektorjem (AC), antiprotonskim akumulatorjem (AA) in nizkoenergijskim antiprotonskim obročem (LEAR). V LHC pa ne uporabljajo antiprotonov, pač pa gruče protonov krožijo v nasprotnih smereh v dveh bližnjih ceveh. Omenjene naprave z antiprotoni so postale odveč. Da ne bi opustili raziskovanja z antiprotoni, so leta 1997 začeli graditi antiprotonski decelerator (AD). Zanj so porabili dele prejšnjih naprav AA, AC in LEAR, katerih vlogo je prevzel. Uporabljajo ga od leta 2000 kot edino napravo na svetu, ki daje antiprotone s tako majhno energijo. Medtem ko so si prej morale gruče antiprotonov slediti v kratkem časovnem razmiku 2,4 sekunde, AD oddaja gruče s 30 milijoni antiprotonov vsakih 90 sekund.

Gruče antiprotonov vodijo skozi tanke kovinske lističe, da se jim pri trkih energija nadalje zmanjša. Tako dobijo antiprotone z energijo nekaj tisoč elektronvoltov. Pri tem izgubijo 99,9 % antiprotonov. Tej izgubi se bodo izognili z antiprotonskim obročem s posebno majhno energijo (ELENA, Extra Low Energy Antiproton ring). Nakopičevalni obroč z obsegom, manjšim od 30 metrov, bo dajal gruče antiprotonov z energijo samo 0,005 MeV. Obroč gradijo v dvorani deceleratorja tako, da ne moti poskusov. Končan naj bi bil do leta 2017.

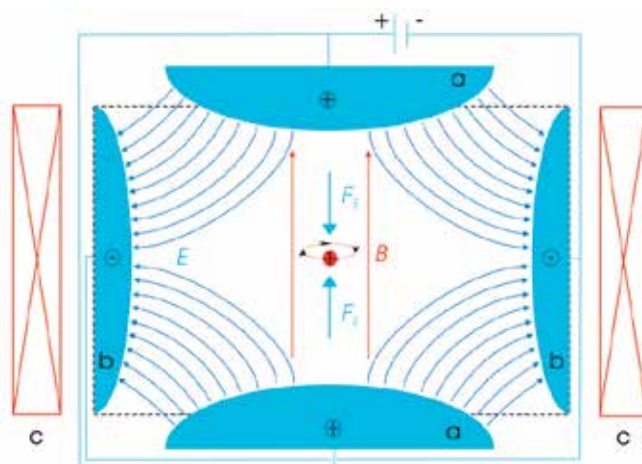
Prenovo LHC, med katero ni deloval protonski sinhrotron, so pri antiprotonskem deceleratorju dobro izkoristili [3]. Temeljito so pregledali enega od 24 odklonskih magnetov in dotrajane dele nadomestili z novimi. Dogradili so nov del za poskus BASE, pri katerem nameravajo zelo natančno izmeriti magnetni moment antiprotona in ga primerjati z magnetnim momentom protona. Sredi poletja 2014 so dela končali. V dvorani antiprotonskega deceleratorja poskuse izvajajo mednarodne raziskovalne skupine:

- antiprotonska/antivodikova past (ATRAP) raziskuje svetlobo, ki jo sevajo atomi antivodika;
- atomska spektroskopija in trki počasnih antiprotonov (ASACUSA) z laserji raziskuje vodikove antiatome in nenavadne atome iz helijevega iona in antiprotona; naprava za lasersko fiziko

antivodika (ALPHA) preizkuša ohranitev CPT s spektroskopijo hiperfine razcepitve atomov antivodika; poskus z antisnovjo: gravitacija, interferometrija, spektroskopija (AEGIS) raziskuje padanje atomov antivodika in je še v gradnji.

Prve atome antivodika so v CERN-u dobili že leta 1995 pri trku gruče antiprotonov s curkom atomov ksenona. Toda ti antiatomi so imeli veliko hitrost in z njimi ni bilo mogoče izvajati natančnih spektroskopskih merenj. Skupina ATHENA, predhodnica naštetih skupin, je leta 2002 dobila prve atome antivodika z majhno hitrostjo in z njimi izvedla prva merjenja.

Naštete skupine uporabljajo valjaste *Penningove pasti* različnih izvedb. V pasti močno magnetno polje z gostoto od 3 do 5 tesel v smeri osi zadržuje delce v radialni smeri. Močno električno polje z napetostjo do 10 kilovoltov pa delce zadržuje v radialni smeri. Elektrode so razvrščene tako, da ima električna potencialna energija po osi na razdalji dobrih deset centimetrov dve grbi. V dolini med njima se naberejo pozitroni, v grbah pa antiprotoni z nasprotnim nabojem. Pozitroni pridobijo na primer pri radioaktivnem razpadu β^+ umetnega izotopa ^{22}Na . Past ohladijo s tekočim helijem na 4 do 15 kelvinov. Elektroni in pozitroni v močnem magnetnem polju krožijo z veliko frekvenco in sevajo sinhrotronsko valovanje. S tem izgubljajo energijo, ki jo pri trkih prevzemajo od antiprotonov. Tako antiprotoni izgubljajo energijo, da imajo naposled energijo, ki ustreza nizki temperaturi. S posebnimi prijemi dosežejo, da se gruči antiprotonov približata gruči pozitronov in se pozitron in antiproton zvežeta v atom antivodika, brž ko se njuna energija zmanjša pod ionizacijsko energijo atoma 13,5 elektronvolta. Na



Slika 2: Penningova past in električni potencial po njeni osi.

opisani način ATRAP ustvari okoli deset tisoč atomov antivodika na dan. Antiatomi so nevtralni, zato jih polji ne vežeta. Gibljejo se iz pasti in ob stiku z elektrodami se antiproton anihilira s protonom, pozitron pa z elektronom.

Atom antivodika sestavljata antiproton in pozitron – kot atom vodika sestavljata proton in elektron. Atomi imajo magnetni moment kot drobne magnetnice. V nehomogenem magnetnem polju na magnetnico deluje sila proti gostejšemu polju, če magnetni moment kaže v smeri polja, ali proti redkejšemu polju, če magnetni moment kaže v nasprotni smeri polja. Tako je mogoče z nehomogenim magnetnim poljem zajeti nevtralne atome antivodika. Pri poskusu ATHENA so z večplastnim polprevodniškim merilnikom zaznali pri anihilaciji antiprotona in protona nastale pione in po njih določili kraj, kjer je prišlo do anihilacije. Hkrati so s scintilacijskim merilnikom s cezijevim jodidom zaznali fotona in po njiju ugotovili kraj anihilacije pozitrona in elektrona. Tako so se lahko prepričali o nastanku atoma antivodika in ugotovili kraj anihilacije. Past te vrste pa je zelo plitva. Pri gostoti magnetnega polja 1 tesla veže le delce s kinetično energijo, kot ustreza temperaturi pod 0,5 kelvina ali energijo $kT = 4,3 \cdot 10^{-5}$ elektronvolta. Zato zadržijo le kako tisočino atomov.

Vseeno je leta 2012 pri poskusu ALPHA uspelo atome antivodika zadržati več minut. Če ne bi bilo pasti, bi se anihilirali z delci snovi v milijoninah sekunde. Natančno so merili valovno dolžino svetlobe, ki jo sevajo antiatomi pri prehodih iz vzbujenih stanj. Primerjava z valovno dolžino pri ustreznih prehodih atomov vodika bi lahko razkrila, ali se antidelci razlikujejo od delcev. Pri poskusu ASACUSA

želijo podrobno raziskati sevanje atomov antivodika, da bi ga primerjali s sevanjem atomov vodika. V ta namen morajo antiatome spraviti na kraj, kjer ni magnetnega polja. Poročali so že o prvih uspehih [4].

Pri poskusu AEGIS, ki ga gradijo od leta 2010, bodo neposredno opazovali padanje gruč atomov antivodika v zemeljskem težnem polju. Na razdalji enega metra pri vodoravni hitrosti 500 m/s pade gruča samo za 9,8 pm. Vendar je na poseben način z dvema mrežicama z razmikom med sosednjima režama 40 pm in z merilnikom v razdalji 25 mm to mogoče izmeriti. Pri tem pot antiatomov primerjajo s potjo svetlobe.

Raznovrstni poskusi z atomi antivodika obetajo, da bomo v prihodnje natančneje spoznali njihove lastnosti. To utegne prispevati k odgovoru na vprašanje o antidelcih v vesolju. Za zdaj take poskuse izvajajo le v CERN-u. Načrtujejo pa podobne poskuse tudi drugod.



Slika 3: Pogled na del antiprotonskega deceleratorja v CERN-u.

Viri in literatura

- [1] *Antiproton decelerator*. en.wikipedia.org/wiki/Antiproton_Decelerator (september 2015).
- [2] Asacusa produces first beam of antihydrogen atoms for hyperfinestudy (2014). *Cern Courier*, marec 2014, 5.
- [3] Beams back at the Antiproton Decelerator. (2014). *CERN Courier*, november 2014, 7.
- [4] Kellerbauer, A. (2014). Antimaterie im Labor, *Physik-Journal*, 13(7), str. 27–33.