

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 30 (2002/2003)

Številka 4

Strani 218-222

Janez Strnad:

VEČ VODIKOVIH ANTIATOMOV

Ključne besede: fizika, zgradba snovi, antiatom, antidelec.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/30/1522-Strnad.pdf>

© 2003 Društvo matematikov, fizikov in astronomov Slovenije

© 2010 DMFA - založništvo

Vse pravice pridržane. Razmnoževanje ali reproduciranje celote ali posameznih delov brez poprejšnjega dovoljenja založnika ni dovoljeno.

VEČ VODIKOVIH ANTIATOMOV

V šesti številki leta 1996 je Presek poročal o prvih devetih antiatomih vodika, ki so jih tedaj zaznali v Evropskem laboratoriju za jedrska raziskovanja CERN v Ženevi. V istem letniku Preseka so izšli tudi trije prispevki o pasteh, v katerih naelektrene delce z električnim in magnetnim poljem zadržimo v delu prostora. Na kratko povzemimo tedanje pisanje.

Vsak delec ima svoj antidelec z enako maso, a nasprotnim znakom naboja. Antidelec ali razpada z enakim razpolovnim časom kot delec ali je obstojen, če je obstojen delec. Nekateri nevtralni delci se ne razlikujejo od svojih antidelcev. Foton, obrok energije elektromagnetnega valovanja, se, na primer, ne razlikuje od antifotona. Antidelec elektrona je pozitron in antidelec protona antiproton. Antidelec atoma vodika, v katerem sta vezana negativni elektron in pozitivni proton, je antiatom vodika ali atom antivodika, v katerem sta vezana pozitivni pozitron in negativni antiproton. Pozitron in antiproton sta obstojna, kot sta obstojna elektron in proton. Toda pozitron preneha obstajati, brž ko sreča elektron. Pri tem pride do *anihilacije*, pri kateri energijo mase elektrona in pozitrona prevzamejo dva ali trije fotoni, ki pri tem nastanejo. Tudi antiproton se anihilira, brž ko sreča proton. Pri tem nastanejo naelektreni in nevtralni pioni, ki niso obstojni in razpadejo dalje; pogosto nastanejo štirje naelektreni pioni, dva negativna in dva pozitivna. Pioni so mezoni, "delci z maso med elektronom in protonom", in z njimi lahko pojasnimo sile med protoni in nevtroni v atomskih jedrih.

Pozitroni torej ne smejo srečati elektronov in antiprotoni ne protonov. Enim in drugim je treba preprečiti, da bi prišli v stik z navadno snovjo, na primer s steno posode. V ta namen uporabimo past. Antiprotone in pozitrone je potrebno ujeti v past in jih nato spraviti skupaj, da se vežejo v antiatome vodika. Kakor je zamisel preprosta, jo je težko uresničiti. Antiprotoni imajo naboj drugega znaka kot pozitroni in obojih delcev ni mogoče preprosto ujeti v isto past. Antiprotoni in pozitroni se ob nastanku gibljejo s hitrostjo, le malo manjšo od hitrosti svetlobe. Električna privlačna sila, ki veže elektron in proton v atom ter pozitron in antiproton v antiatom, pa je tako šibka, da delcev ne more zvezati, če domala ne mirujeta.

Leta 1996 še niso mogli dobiti počasnih antiprotonov in pozitronov. Tedaj so antiatome dobili tako, da so antiprotone zavrlili do hitrosti 270 km/s in jih usmerili na curek atomov ksenona. Ob reakcijah so nastali tudi pozitroni, od katerih so se maloštevilni gibal domala z enako hitrostjo kot antiprotoni in se z njimi zvezali v antiatome. Zato so zaznali samo devet antiatomov. Tega leta je v CERN prenehal delovati nizkoenergijski

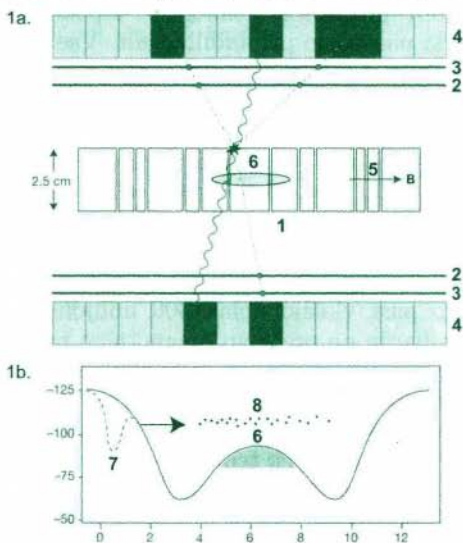
antiprotonski obroč LEAR (Low-Energy Antiproton Ring), v katerem so zbirali in zavirali antiprotone. V nekaj letih so ga nadomestili z antiprotonskim pojemalnikom AD (Antiproton Decelerator), v katerega so delno vgradili stare sestavne dele. Tako je stal po merilih eksperimentalne fizike visokih energij skromnih 5 milijonov dolarjev. Stroški za njegovo delovanje pa so desetkrat nižji od stroškov za delovanje LEAR. Čeprav daje stokrat manj antiprotonov, to zadostuje za raziskovanje antiatomov.

Ob njem se z antiatomi ukvarjata dve mednarodni raziskovalni skupini. Skupina ATHENA – sestavlja jo 39 raziskovalcev z devetih ustanov, večinoma univerz, iz Anglije, Brazilije, Danske, Italije, Japonske in Švice – je septembra 2002 poročala o svojem uspehu. Njeno napravo v neposredni bližini pojemalnika sestavljajo past za antiprotone, past za pozitrone, mešalna past, v kateri antiprotone “zmešajo” s pozitroni, in merilnik za zaznavanje delcev, ki nastanejo pri anihilacijah. Vse pasti so Penningove vrste z več zaporednimi obročastimi elektrodami na isti osi, priključenimi na različne električne napetosti (slika 1a). V pasti ustvarijo v smeri osi močno magnetno polje s superprevodno tuljavo za antiprotone in šibkejše magnetno polje z običajno tuljavo za pozitrone. Naelektreni delci se v prečnem magnetnem polju gibljejo po krožnicah in se ne oddaljijo od osi. Električno polje pa veže naelektrene delce v smeri osi (slika 1b). Pasti so v vakuumu pri temperaturi samo 15 kelvinov, to je samo 15 °C nad absolutno ničlo.

Najprej v prvo past vložijo oblak 300 milijonov elektronov, ki se zaradi sevanja pri gibanju po prečnem magnetnem polju “ohladi”. S tem hočemo reči, da delci v oblaku sevajo in se jim zato zmanjša povprečna kinetična energija na vrednost, značilno za tamkajšnjo temperaturo. Za temperaturo T je značilna energija kT z Boltzmannovo konstanto $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ joulov na kelvin. Po tem je za 15 kelvinov značilna energija $2 \cdot 10^{-22}$ joula ali 0,0013 elektronvolta. Tolikšni kinetični energiji ustreza hitrost elektronov 21 km/s ali hitrost protonov 0,5 km/s. V tem smislu govorijo o vodikovih antiatomih z majhno kinetično energijo kot o hladnih antiatomih.

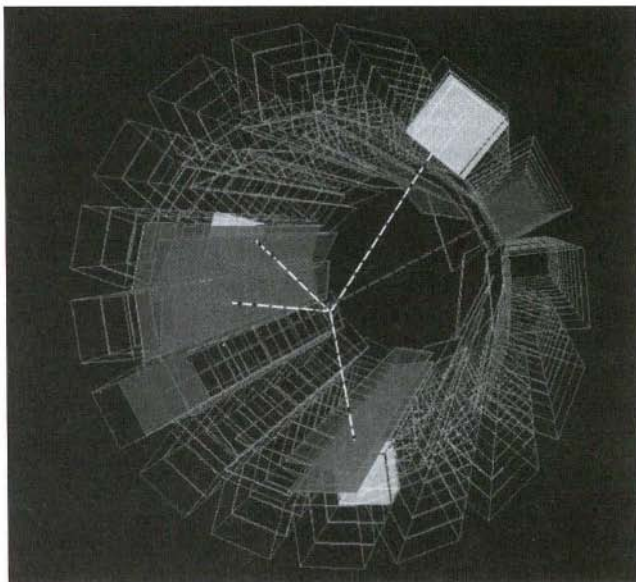
Iz pojemalnika prileti gruča 20 milijonov antiprotonov s hitrostjo 31 000 km/s skozi tanek aluminijev listič. Pri prehodu skozi listič antiprotone zgubijo velik del kinetične energije in jih sunek električne napetosti nato umesti v past. V njej se v ohlajenem oblaku elektronov zaradi sodelovanja z njimi – anihilirati se ne morejo – ohladijo tudi sami. Antiprotone so precej počasnejši od elektronov in oblak antiprotonov se ne bi mogel ohladiti brez elektronov samo zaradi gibanja po prečnem magnetnem polju. Po tem elektrone zavrzajo. V kovinskem lističu je zaradi anihilacije šlo v izgubo veliko antiprotonov. V antiprotonski del mešalne pasti vložijo tri gručice, to je skupaj 10 tisoč antiprotonov.

Pozitroni dobijo iz radioaktivnega izvira, v katerem razpade 1,4 milijarde jeder umetnega radioaktivnega izotopa natrija ^{22}Na na sekundo. Najprej v pozitronskem delu pasti zberejo oblak pozitronov, ki se zaradi sevanja pri gibanju po prečnem magnetnem polju ohladi. Nato jih 70 milijonov skozi tanko plast trdnega neona vložijo v mešalno past. Po prehodu skozi plast neona pozitroni izgubijo nekaj kinetične energije in se poslej po njej manj razlikujejo med seboj. Oblak pozitronov se sprva zadržuje v srednjem delu mešalne pasti (slika 1a). Nato spremenijo napetost na eni od elektrod (od sklenjene krivulje na črtkano krivuljo na sliki 1b) in oblak antiprotonov začne nihati skozi oblak pozitronov. Pri tem se nekateri od pozitronov vežejo z antiprotoni v antiatome. Delce zbirajo dobre tri minute, nato vse delce zavržejo in postopek vsakih pet minut ponovijo.



Slika 1. Mešalno past sestavljajo obročaste elektrode (1). Okoli njih so nameščeni silicijeva merilnika (2 in 3) in merilnik s kristali cesijevega jodida (4). Naprava je osno simetrična. Obdajata jo tuljavi, s katerima ustvarijo magnetno polje v smeri osi (5) in ki ju ni na risbi (a). Med obročastimi elektrodami je električno polje v smeri osi. Na navpično os je nanesena napetost v voltih, ki do predznaka ustreza potencialni energiji v elektronvoltih. Na vodoravno os je nanesena razdalja od levega roba pasti v centimetrih. Črtkana krivulja kaže napetost tik pred mešanjem in sklenjena krivulja med mešanjem. Oblak pozitivnih pozitronov se zadržuje v bližini lokalnega maksimuma (6), oblak negativnih antiprotonov pa najprej okoli lokalnega minimuma (7) in potem med mešanjem niha sem in tja (8) skozi oblak pozitronov. Fotona nakazujeta valoviti črti, naelektrene pione pa črtkane črte (b). Slika je vzeta iz članka M. Amoretti in drugi, *Production and detection of cold antihydrogen atoms*, Nature **419** (2002) 456 z ljubeznivim dovoljenjem profesorja Jeffreyja Hangsta. Sliki 1 in 2 sta z dovoljenjem ponatisnjeni iz Nature, ki jo izdaja založba Macmillan Publishers Ltd.

Antiatomi so električno nevtralni in jih električno in magnetno polje ne vežeta na past. Brž ko nastanejo, jo zapustijo in zadenejo atome v elektrodah. Tam se antiproton anihilira s protonom in merilnik zazna naelektrene pione, ki pri tem nastanejo. Pozitron se anihilira z elektronom in merilnik zazna dva fotona z določeno energijo (slika 2). Pione zaznavata silicijeva merilnika. Rezina silicija ima zgoraj in spodaj mikroskopsko tanke pasove, ki jih od sosednjih pasov ločijo mikroskopsko tanke brazde. Vsak pas ima vlogo polprevodniške diode, priključene v zaporni smeri. Naelektreni delec na poti skozi polprevodnik ustvari nosilce naboja in ti povzročijo sunek toka skozi diodo, ki ga ojačijo. Po tem, v katerem pasu na zgornji strani in v katerem pasu na spodnji se pojavita sunka, je mogoče določiti mesto prehoda naelektrenega piona skozi merilnik. Spodnji pasovi so namreč glede na zgornje za približno 2° zasukani in tako na opisani način določimo lego kot presečišče premic, ki se sekata pod majhnim kotom.



Slika 2. Dogodek, kakršnega kaže slika, priča, da je nastal in se anihiliral antiatom vodika. Ob anihilaciji antiprotona in protona so nastali štirje naelektreni pioni, ob anihilaciji pozitrona in elektrona pa sta nastala dva fotona z energijo po 511 keV in odletela v nasprotnih smereh. Naelektrene pione sta zaznala silicijeva merilnika, fotona pa scintilacijska merilnika s cezijevim jodidom. Slika je vzeta iz članka T. W. Hijmans, *Cold antihydrogen*, Nature **419** (2002) 439 z ljubeznivim dovoljenjem profesorja Toma Hijmansa.

Prvi silicijev merilnik je nameščen po plašču valja, koncentričnem z osjo, in drugi silicijev merilnik po plašču valja z nekoliko večjim polmerom. Po točkah, v katerih merilnika zaznata pion, je mogoče ugotoviti, iz katere smeri je prišel. S štirimi določenimi smermi naelektrenih pionov je mogoče določiti, kje je prišlo do anihilacije antiprotona in protona. Fotona z določeno energijo, ki nastaneta pri anihilaciji pozitrona in elektrona, odletita v nasprotnih smereh. Zaznajo ju in izmerijo njuno energijo s kristali cezijevega jodida. Po dvanajst takih kristalov je razvrščenih v šestnajst vrst po plašču valja zunaj drugega silicijevega merilnika. Fotoni v kristalih sprožijo drobne bliske, ki jih zaznavajo fotopomnoževalke.

Za anihilacijo antiatoma sta značilna dva fotona, z določeno energijo v nasprotnih smereh, in štirje naelektreni pioni. Vsi ti delci se morajo pojaviti sočasno v roku 5 milijonin sekunde in izhajati iz dela prostora z linearno razsežnostjo 4 mm. Bolj natančno točke anihilacij ne morejo določiti, ker ne upoštevajo posebej, da se pioni odklonijo, ko se gibljejo po magnetnem polju. Podatke z merilnikov neposredno zapisujejo v računalnik. Iz množice dogodkov je računalnik izbral 131 takih, ki ustrezajo zahtevama o sočasnosti in skupnem kraju nastanka. Ocenili so, da se je od teh okoli 22 antiprotonov in pozitronov anihiliralo, ne da bi se prej zvezali v antiatome vodika. Vseeno so opazovali nastanek in anihilacijo več kot sto antiatomov vodika. Vsega skupaj naj bi nastalo približno 50 tisoč antiatomov vodika, a njihove anihilacije niso zaznali.

Čeprav je povečanje od 9 do 131 antiatomov velik korak, bi si jih želeli še veliko več. Le z veliko večjim številom antiatomov bi bilo mogoče delati podobne poskuse kot z vodikom. Zelo natančno je mogoče izmeriti valovne dolžine svetlobe, ki jo seva plinasti vodik. Pri merjenju ene od valovnih dolžin je uspelo zmanjšati relativno napako celo na 10^{-14} . Želeli bi si, da bi s podobno natančnostjo uspeli izmeriti valovno dolžino svetlobe, ki jo seva plinasti antivodik. Primerjava obeh valovnih dolžin bi pokazala, kako natančno se lastnosti antiatomov ujemajo z lastnostmi atomov. Odgovor na to vprašanje je v teoriji delcev zelo pomemben.

Možnost za dosego tega bi bila past za nevtralne antiatome. V tako past z magnetnim poljem, ki se spreminja s krajem, je raziskovalcem že uspelo ujeti oblak atomov vodika ali alkalijskih elementov. Ti atomi se v magnetnem polju vedejo kot drobne magnetnice. Vendar je past za nevtralne delce še šibkejša in morajo v tem primeru atomi v oblaku imeti zelo majhno povprečno hitrost, se pravi, da morajo biti ohlajeni na temperaturo nekaj kelvinov.