

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 23 (1995/1996)

Številka 3

Strani 142-146

Janez Strnad:

PAST ZA DELCE

Ključne besede: fizika, zgradba snovi, kvadrupolno električno polje, vakuum, geonij, antidelci, anihilacija.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/23/1265-Strnad.pdf>

© 1996 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.

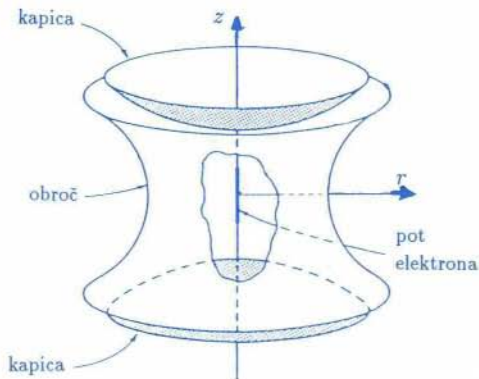
PAST ZA DELCE

*Ujemi ion, daj ga v past
in pazi, da ti ne uide.¹*

Ali bi lahko naelektren delec – zaradi preprostosti na začetku govôrимо o pozitivnem ionu – ločili od vseh drugih delcev in dosegli, da bi dalj časa ostal v določenem delu prostora? Ion bi hitro izgubili, če bi ga zaprl v posodo, ker bi zadel steno posode. Pomagamo si z drugimi naelektrenimi delci, ki ustvarijo električno in magnetno polje. Polji izvajata silo na ion. Z električnim in magnetnim poljem je treba ion ločiti od okolice in zadržati v določenem delu prostora, da bi ga v miru opazovali. Napravo, ki nam to omogoči, imenujemo *past*. S pastmi so v zadnjem času naredili merjenja, ki so se zdela prej neizvedljiva.

Past sestavljajo tri osno simetrične elektrode: obroč s hiperboličnim presekom in hiperbolični kapici (slika 1). Obroč je priključen na en, kapici pa na drug priključek izvira enosmerne napetosti. Taka razporeditev elektrod ustvari *kvadrupolno električno polje*. Vsa naprava je v zelo močnem magnetnem polju v smeri osi in je nameščena v nepredušni posodi, iz katere so izsesali ostanke zraka.

Slika 1. Elektrode pasti ustvarijo kvadrupolno električno polje. To polje in magnetno polje zadrži elektrone v majhnem valjastem prostoru s premerom nekaj deset mikrometrov in nekoliko večjo višino. V močnem magnetnem polju elektroni zaradi gibanja pravokotno na smer polja s tako imenovanim sinhrotronskim sevanjem v desetini sekunde izgubijo kinetično energijo, ki je naložena v hitro kroženje v ravnini, pravokotni na smer magnetnega polja.



Delci iz okolice ne smejo motiti delcev v pasti. Zato morajo ustvariti dovolj dober vakuum. Tlak znižajo v skrajnem primeru na okoli $7 \cdot 10^{-17}$ mbara, kar je okoli $1,4 \cdot 10^{19}$ -krat manj od navadnega zračnega tlaka. To je milijonkrat nižji tlak od najnižjega tlaka, ki ga je mogoče izmeriti z običajnimi merilniki.

¹ Po ameriški popevki "Catch a falling star and put it in your pocket, never let it go away."

Kljub zelo dobremu vakuumu delci v pasti niso popolnoma neodvisni od okolice. Elektroni, ki ustvarijo električno polje, se v elektrodah neurejeno gibljejo sem in tja in se po naključju zdaj tu nakopičijo in tam razredčijo, zdaj tam nakopičijo in tu razredčijo. Te *fluktuacije* so tem izdatnejše, čim večja je povprečna kinetična energija elektronov, torej čim višja je temperatura. Fluktuacije elektronov povzročajo fluktuacije električnega polja, ki vplivajo na naelektrni delec. Tako delec v pasti sledi fluktuacijam elektronov v elektrodah in se neurejeno giblje sem in tja. Delcu lahko priredimo v povprečju kinetično energijo, ki jo ima zaradi fluktuacij in ki je sorazmerna s temperaturo. Navadno nam ne pride na misel, da bi posameznemu delcu priredili temperaturo, a v tem primeru to na opisani način lahko storimo, le pozabiti ne smemo, za kaj gre.

Past hladijo s kapljevinskim helijem pri temperaturi malo nad 4 K, samo dobre 4 stopinje nad absolutno ničlo pri -273° . Zato ima delec pri tej temperaturi okolice v povprečju samo 0,0005 eV kinetične energije. Izračunamo jo z enačbo za povprečno kinetično energijo $\frac{3}{2}kT$, v kateri je $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K Boltzmannova konstanta. Joule spremenimo v elektronvolte: $1 \text{ eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}$ J.

Zaradi zelo nizke temperature se molekule preostalega plina obesijo na stene posode, tako da za vakuum ni treba še posebej skrbeti. Pri navedenem tlaku in temperaturi je v kubičnem centimetru v povprečju 130 molekul. To izhaja iz plinske enačbe za gostoto molekul $n = p/kT$.

Delec v pasti s svojim električnim poljem vpliva na elektrone v elektrodah in povzroča med elektrodama napetost, ki je odvisna od njegove lege. Zaradi tega nastane med obema kopicama napetost, ki jo ojačijo in neposredno opazujejo efektivno napetost na izhodu ojačevalnika. (Efektivno vrednost napetosti dobimo tako, da trenutno vrednost napetosti kvadriramo, izračunamo povprečje in nato korenimo.) Na drugi strani lahko med kاپici priključijo visokofrekvenčno izmenično napetost in z njo vplivajo na gibanje ujetega delca, s tem da delcu dovedejo energijo ali jo odvedejo od njega (slika 2).

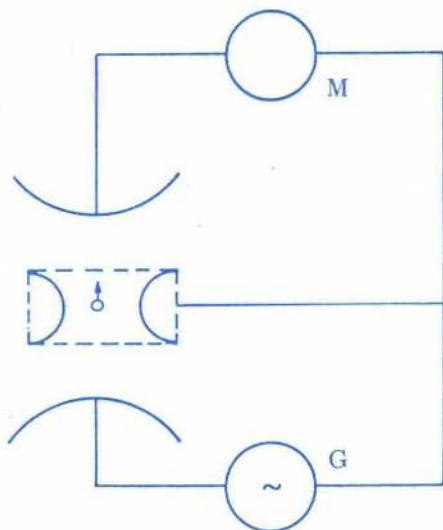
Na poseben način zmanjšajo povprečno kinetično energijo delca v pasti – ga “hladijo”. Med kاپici priključijo napetost, ki niha z malo nižjo frekvenco od lastne frekvence delca. Energijo iz elektromagnetnega valovanja absorbirajo pretežno delci, ki potujejo v nasprotni smeri kot elektromagnetno valovanje in za katere je na račun Dopplerjevega pojava frekvenca povečana. Delci nato valovanje izsevajo v vseh mogočih smereh, zaradi česar se jim v povprečju zmanjša kinetična energija.

Pasti so razvili po stari Penningovi zamisli: Hans Georg Dehmelt z univerze v Seattlu v ZDA in Wolfgang Paul z univerze v Bonnu ter njeguni učenci in sodelavci. Dehmelt in Paul sta svoj čas imela istega učitelja in sta

si leta 1989 razdelila Nobelovo nagrado. Paul je raziskoval pasti, na katere je priključil izmenično napetost z radijsko frekvenco, Dehmelt pa je uporabil enosmerno napetost in dodal magnetno polje.

V past ujamajo različne delce in izvajajo z njimi zelo natančna merjenja v različne namene. Najprej omenimo merjenja z elektronom. Elektron je v pasti vezan kot v orjaškem atomu, le da ga namesto električnega polja jedra vežeta električno polje elektrod in magnetno polje tuljave. Tak "atom" imenujejo *geonij*, češ da je elektron, vezan na Zemljo. V marsičem je geonij preprostejši od navadnih atomov in omogoča merjenja, ki jih z navadnimi atomi ni mogoče izvesti. Pri enem izmed poskusov so elektron zadrževali v pasti deset mesecev.

Doslej smo elektron opisovali, kot da bi šlo za naelektreno točkasto telo, katerega gibanje obravnava Newtonova mehanika. Vendar je treba vezani elektron obravnavati v okviru kvantne mehanike, ki velja v svetu atomov. Naelektreni delci v pasti ne morejo imeti katere koli energije, ampak so lahko samo v stanjih z določeno energijo. Mogoči so prehodi med stanji, pri katerih vezani delec seva ali absorbira elektromagnetno valovanje. Z merjenjem frekvence tega sevanja je mogoče priti do pomembnih podatkov. Elektron se obnaša hkrati kot vrtavka in magnetnica. Vrtenja elektrona si sicer ne moremo predstavljati kot vrtenja kolesa, ker se naboj elektrona kaže do zelo majhnih razdalj do 10^{-18} m, kot točkast. Mogoče pa je količino, ki zadeva magnetne lastnosti elektrona, povezati s količino, ki zadeva njegovo "vrtenje". Z merjenjem frekvence elektromagnetnega valovanja pri prehodih med stanji so določili to razmerje na enajst mest. Podatek se v okviru napak pri merjenju in računanju ujema s teoretično napovedjo in je eden izmed najnatančnejše izmerjenih količin v fiziki.

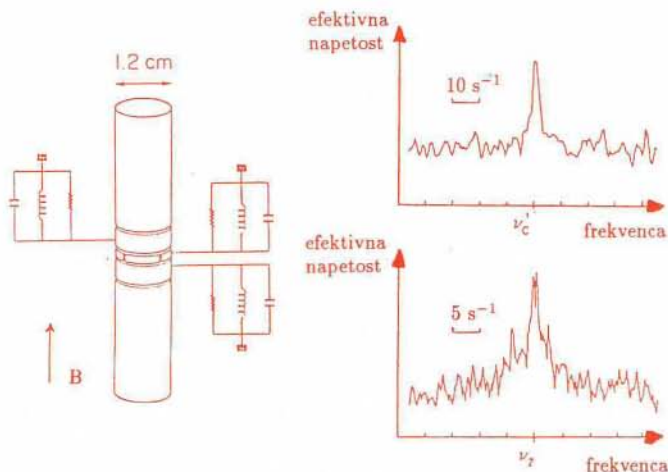


Slika 2. Elektronski krog, s katerim posredno opazujejo gibanje naelektrenega delca v pasti. Z merilnikom M merijo efektivni tok, medtem ko izvir G daje izmenično gonilno napetost z visoko frekvenco. Zasledujejo časovno odvisnost efektivne napetosti, ki ustreza efektivnemu toku. To napetost nanesejo v grafu v odvisnosti od časa.

V pasti lahko zadržujejo posamični ion težjega elementa in ga dražijo s curkom laserske svetlobe, da znova in znova absorbira in seva. Izsevano svetlobo je mogoče opazovati na primer v smeri pravokotno na curek laserske svetlobe. Tako so opazovali barijev ion, ki je seval modrozeleno svetlobo, ko so ga osvetlili z laserjem. Ion so poimenovali Astrid, češ da so bili z njim tako dolgo v stiku, da so dobili do njega oseben odnos. Dehmelt, ki si je ves čas želel delati poskuse s posamičnimi delci in ki so ga nekateri zato imeli za čudaka, je zapisal: "Laserska svetloba je lahko povprašala en in isti atom: 'Ali si še tukaj?' in zelenomodra fluorescenčna svetloba je odgovarjala: 'Da, še sem tukaj.'"

Delec v pasti zelo dolgo časa ne trči z delcem iz okolice. Zato je mogoče v pasti zadrževati antidelce. Antidelci so nekakšne slike delcev, podobno kot je leva roka zrcalna slika desne. Antidelci imajo enako maso in ne razpadejo, če ne razpadajo njihovi delci, a imajo naboj z nasprotnim znakom. Če antidelec trči z delcem, se spremeni v druge delce ali v sevanje, kar imenujemo *anihilacija*. V pasti so trki tako redki, da je mogoče v njej zadrževati tudi antidelce po več mesecev. Tako so več mesecev držali v pasti pozitron, antidelec elektrona, in delali z njim poskuse. Temu pozitronu so dali ime Priscilla. Zapisali so: "Tukaj prav zdaj v majhnem valjastem prostoru s premerom približno $30 \mu\text{m}$ in dolžino $60 \mu\text{m}$ v središču naše pasti biva pozitron Priscilla, ki je v zadnjih treh mesecih po ukazih ali sam od sebe nastopal z baletom kvantnih skokov." Pozitronov ni težko dobiti, oddaja jih na primer umetni radioaktivni izotop natrija ^{22}Na .

Z nekoliko spremenjeno pastjo so raziskovali antiprotone, antidelce protonov, vodikovih atomskih jeder (slika 3). Past mora biti nekoliko drugačna, ker nastanejo antiprotoni z veliko energijo pri reakcijah protonov z veliko energijo s protoni v snovi. V nekakšnem majhnem pospeševalniku, pravzaprav "pojemalniku", sicer zavrejo antiprotone, a imajo ti kljub temu preveliko energijo. Gruče antiprotonov gredo skozi steno pasti in pri trkih izgubijo kinetično energijo, nekateri se anihilirajo. Zato je past oblikovana nekoliko drugače. V njo spustijo gručo antiprotonov na strani, na kateri je tisti trenutek na zunanji elektrodi pozitivna napetost. V pasti pa pripravijo množico elektronov z majhno energijo. Del antiprotonov se ob trkih z njimi znebi presežne energije in običi v pasti. Potem ko gruča vstopi v past, takoj tudi na to zunanjo elektrodo priključijo znatno negativno napetost. Antiprotoni niso antidelci elektronov in pri trkih ne pride do anihilacije. Upajo, da bo mogoče ob pospeševalniku spraviti antiprotone v past in nato past odpeljati na mesto, kjer ne moti zunanje magnetno polje. Izdelali so tudi superprevodno tuljavo, ki se je odzvala na spremembe magnetnega polja ob pospeševalniku, tako da je ostal tok po njej nespremenjen.



Slika 3. Elektrode pasti za antiprotonove imajo nekoliko drugačno obliko. Med srednjim obročem in zunanjsima elektrodama, ki ustrezata kapicama, sta vmesni elektrodi. Tudi tako razvrščene elektrode dajo kvadrupolno električno polje. Obroč je razdeljen na več odsekov, ki jih uporabljajo pri merjenju. Med tak odsek in vmesno elektrodo priključijo izmenično napetost, ki ji spreminjajo frekvenco. Med drug odsek in vmesno elektrodo priključijo vhod ojačevalnika in na izhodu merijo efektivno napetost. V odvisnosti te napetosti od frekvence izmenične napetosti se pojavi vrh, ko pride do resonance. Tedaj se frekvenca izmenične napetosti ujema s frekvenco hitrega kroženja ν'_c v ravnini, pravokotni na magnetno polje delca (zgoraj), ali s frekvenco nihanja v smeri magnetnega polja ν_z (spodaj). S tem natančno izmerijo obe frekvenci in preko prve določijo maso.

V pasti so zadrževali več tisoč antiprotonov več kot dva meseca. Pri tem so tisočkrat natančneje kot prej izmerili maso antiprotona. Ugotovili so, da se na sedem mest ujema z maso protona. Nadejajo se, da bo na istem kraju nekako uspelo shraniti dovolj antiprotonov in dovolj pozitronov, da se bodo spojili v atome antivodika. Raziskovanje teh naj bi natančno pokazalo, ali imajo antidelci glede na delce natančno opisane lastnosti in ne obstajajo majhni odmiki od teh. Antiatomov ne bo lahko opazovati. Načrt je sicer jasen: dobiti dovolj pozitronov in antiprotonov pri zelo majhni hitrosti, da ujamejo drugi druge in se spojijo v antiatome. Pri tem je treba opazovati sevanje in ugotoviti, ali je prav tako kot sevanje, ki nastane pri zduževanje elektronov in protonov v atome. Težava je v tem, da so antiatomi brez naboja in jih ni mogoče zadržati v pasti.

Past so uporabili tudi kot zelo natančen *masni spektrometer*, s katerim merijo mase ionov. Z relativno natančnostjo $4 \cdot 10^{-10}$ so, na primer, določili razliko mas ionov CO^+ in N_2^+ .