



Antigravitacijski pogon se je izmuznil

Antimaterija Gravitacija nanjo deluje v običajni smeri – Se en eksperiment je potrdil Einsteinove napovedi

Znanstveniki v Cernu so konec septembra predstavili rezultate preizkusa, ki je tako zelo značilen za sodobno fiziko. Prvim na svetu je z eksperimentom uspešno potrditi pojav, ki se je v teoriji vsem zdel sila smiseln in logičen, domala gotov, a ga je bilo vendarle treba preveriti. Kompleksnost eksperimenta ne bi mogla biti v večjem nasprotju s preprostostjo vprašanja in samoumevnostjo odgovora. Pokazali so, da na antimaterijo gravitacija deluje običajno. Ali povedano drugače: antimaterija pada – navzdol.

MATEJ HUŠ

V začetku 20. stoletja je Victor Hess z elektroskopom izmeril šibko ionizirajoče sevanje, vendar vira ni poznal. Tedaj je veljalo prepričanje, da pronica iz kamnin na Zemlji, zato ga je želel izmeriti visoko nad površjem. Ko se je leta 1911 z balonom povzpел dober kilometer visoko, ni opazil bistvene razlike v jakosti sevanja. Leto pozneje je izkoristil sončni mrk in se povzpел na višino 5300 metrov, a je še vedno izmeril skoraj enako. Ne le da ionizacije niso povzročale kamnine, vir je bil očitno dlje v vesolju, ne na Soncu. Hess je odkril tok delcev z visokimi energijami iz vesolja, ki prečkajo tudi Zemljo, za kar je leta 1936 prejel Nobelovo nagrado.

To je bil čas, ko je bilo poznavanje zgradbe atomov še zelo primitivno. Joseph John Thomson je leta 1897 ravno odkril negativni elektron, zgradbe jedra pa še niso poznali. Šele Ernest Rutherford je leta 1917 odkril pozitivni proton, James Chadwick pa leta 1932 nevtralni nevtron. Zato Hess leta 1912 še ni mogel vedeti, kako so sestavljeni kozmični žarki in kaj povzročajo. Danes vemo, da so to nabiti delci visokih energij, ki izvirajo tako iz Sonca kakor naše galaksije in celo onstran nje.

Navdih iz enačbe

Fiziki svet opisujejo z matematičnimi izrazi in enačbami, kar ima včasih tudi daljnosežne posledice. To se je zgodilo Paulu Diracu, ki je leta 1928 v znamenitem članku *Kvantna teorija elektrona* matematično opisal gibanje elektronov pri visokih hitrostih. Tedaj namreč poleg kvantne teorije postane pomembna tudi Einsteinova teorija relativnosti, zato je moral upoštevati obe. Dirac je presenečeno ugo-

toval, da imajo enačbe dve rešitvi: za elektron s pozitivno in za elektron z negativno energijo.

Namesto da bi drugo rešitev opravil kot matematično čudaškost – energija bi vendarle morala biti pozitivna – jo je vzel resno. Morda rešitev opisuje delec, ki ima nasprotni naboj. Kmalu se je izkazalo, da to ne more biti proton, ker je 1836-krat težji od elektrona. Hermann Weyl je pravilno predpostavil, da druga rešitev opisuje elektronu povsem enak delec, ki pa ima nasprotni električni naboj. Predvideli so nekakšen antielektron, ki mu danes pravimo pozitron.

Da je Dirac leta 1933 skupaj z Erwinom Schrödingerjem dobil Nobelovo nagrado za fiziko, je ključno pripomogel Carl Anderson. Skoraj leto dni je opazoval sledove, ki so jih kozmični žarki puščali v meglični celici z magnetnim poljem. To je naprava, ki jo je izumil Charles Thomson Rees Wilson za opazovanje gibanja električno nabitih delcev, za kar je tudi dobil Nobelovo nagrado leta 1927. Anderson je odkril, da so poleg sledov elektronov vedno nastajali še enaki sledovi, ki so se odklanjali v nasprotno smer. Sklenil je, da gre za pozitrone, s čimer je prvi na svetu eksperimentalno potrdil njihov obstoj. Anderson in Hess sta nato leta 1936 dobila še svojo Nobelovo nagrado za fiziko.

Vesolje ima rado simetrijo. Levi ovinki so enaki desnim, krivulja meta žoge v zrak je enaka njemu padanju (v vakuumu), elektroni in pozitroni so razen naboja v vseh pogledih identični. Fiziki izkoriščajo simetrijo za napovedovanje in odkrivanje – tako so navsezadnje odkrili kvarke – po drugi strani pa kršitve simetrije kažejo, da nečesa še ne vemo, da so naše teorije nepopolne, da potrebujemo več.

Zato bi bilo nenavadno, da ima samo elektron svojega dvojčka z obratnim nabojem. Simetrija terja, da poleg protonov obstajajo še antiprotoni, poleg nevtronov antinevtronov in enako tudi za bolj eksotične delce. Pričakovati je bilo, da ima vsa običajna snov svoje dvojčke. Da obstaja antimaterija.

Kako do antimaterije

Antimaterija ima za pisce znanstvene fantastike idealno lastnost, ki jo imenujemo anihilacija. Ka-

darkoli pride v stik z materijo, se enaki količini materije in antimaterije izniči. Po Einsteinovi najznamenitejši enačbi $E = mc^2$ se pretvorita v veliko energije in izgine. To je razlog, da na Zemlji in v vsem vidnem vesolju antimaterije ne najdemo. Če je kdaj obstajala, je v velikem blisku izginila ob stiku z materijo.

Od kod neki so se torej vzeli pozitroni, ki jih je opazil Anderson? Kozmični žarki, ki so nabiti delci, so sestavljeni večinoma iz jeder običajnih atomov, med katerimi prevladujejo vodikova jedra (to so prosti protoni), slaba desetina pa je helijevih jeder (dva protona in dva nevtrona). Zelo majhen del predstavljajo antidelci, med katerimi prevladujejo pozitroni. Večina pozitronov v kozmičnih žarkih pa nastane kar v Zemljini atmosferi, ko primarni žarki trkajo z jedri molekul v naši atmosferi. Zgodi se kaskada sekundarnih kozmičnih žarkov, v kateri nastajajo tudi pozitroni. Te je opazil Anderson.

Dogajanje visoko v atmosferi namiguje, kako bi lahko tudi na Zemlji ustvarili še druge antidelce, ne le pozitronov. V Berkeleyju v Kaliforniji so leta 1954 zgradili velik protonski pospeševalnik z imenom Bevatron, kjer so trkali protone s skoraj svetlobno hitrostjo (energije 6,2 GeV). Pri tako silovitih trkih se sprosti ogromno energije, kjer nam pomaga pregovorna simetrija vesolja. Delca materije in antimaterije anihilirata v blisk energije, iz velikih energij pa lahko nastanejo pari delcev in antidelcev. Resnično so iz Bevatrona novembra 1955 poročali o odkritju antiprotona, za kar sta zgolj štiri leta pozneje Emilio Segrè in Owen Chamberlain dobila Nobelovo nagrado za fiziko. Le leto dni po antiprotonu so v Kaliforniji opazili še antinevtron. Začel se je lov na antiatome.

Držati brez dotika

Ni samoumevno, da se antimaterija resnično obnaša enako kakor običajna snov. Takšno lastnost imenujemo simetrija C (črka C pomeni *charge*, tj. naboj) in predvideva, da bi se vsi delci obnašali enako, če bi jih zamenjali z antidelci nasprotnega naboja. Formalno bi to pomenilo, da fizikalni zakoni ostanejo nespremenjeni ob zamenjavi naboja. Že v 50. letih prejšnjega stoletja so opazili, da to ne drži

vedno. Kompleksnejša je simetrija CP (*charge, parity*), kjer delce zamenjamo z antidelci in jih hkrati še prezrcalimo. Da niti ta simetrija ni absolutna, sta leta 1964 pokazala James Cronin in Val Fitch, ko sta merila razpad subatomskih delcev kaonov in antikaonov. Za svoje delo sta leta 1980 prejela Nobelovo nagrado.

Kljub kršitvam simetrije CP se delci in antidelci še vedno vedejo nadvse podobno. Po standardnem modelu bi morali enako občutiti elektromagnetne in močne interakcije, ne pa tudi šibke interakcije. Tudi gravitacija naj med njimi ne bi razlikovala. Kakor se protoni in nevtroni povezujejo v atomska jedra, bi se torej morali antiprotoni in antinevtroni povezati v jedra antiatomov. Da to resnično drži, sta leta 1965 pokazali kar dve raziskovalni skupini, v Cernu in v Brookhavnu v New Yorku.

Naposled je bilo treba ustvariti še antiatome, v katerih pozitroni krožijo okrog jeder iz antiprotonov in lahko tudi antinevtronov. Prvi ustvarjeni antielement je bil antivodik, ki so ga leta 1995 v Cernu ustvarili s trki antiprotonov in ksenonovih atomov. Skupno so proizvedli vsega devet atomov antivodika, ki so živeli 40 milijardink sekunde, kar pa je bilo dovolj za potrditev njihovega obstoja. Iz antidelcev je resnično možno ustvariti antiatome. Do leta 2002 so bili v Cernu sposobni shraniti že 50.000 atomov antivodika.

Tako hitro niso razpadli, ker bi bili kaj manj stabilni od običajne snovi, temveč ker je običajna snov vseokoli nas, ob stiku z njo pa anihilirajo. Pri shranjevanju antimaterije na paradoksalno težavo: kako s posodo zamejiti (anti)snov, ki se posode ne sme dotakniti. Na nabite delce – pozitrone in antiprotone – enostavno vplivamo z električnim in magnetnim poljem, teže pa je z nevtralnimi atomi antivodika. Zato je toliko impresivnejši dosežek iz leta 2011, ko so v Cernu 3000 atomov antivodika shranili za debelih 16 minut v pasteh z okupolnimi magneti, potem ko so jih zadosti ohladili oziroma upočasnili.

Odkar znajo antiatome ohladiti, so jim izmerili čedalje več lastnosti. Z veliko natančnostjo danes poznamo mase antidelcev, njihove magnetne lastnosti, naboje, optične spektre in številne druge lastnosti. Vse kaže, da se antiatomi resnično obnašajo povsem enako kakor atomi, saj simetrijo CP kršijo zgolj bolj eksotični delci (denimo kaoni, mezoni B in mezoni D0).

Pojdimo še korak dlje. Hitrost svetlobe v vesolju pogosto navajamo kot univerzalno konstanto, absolutno omejitev in nezlomljivo resnico. Bistveno redkeje pa ji postavimo ob bok simetrijo CPT, ki po vseh znanih meritvah velja enako trdno. Če bi vsem delcem obrnili naboj (C), jih prezrcalili (P) in obrnili tok časa (T), bi bil rezultat neoločljiv od našega vesolja. Fizikalni zakoni se tedaj ne spremenijo in to je prava absolutna simetrija.

Kam pada antimaterija?

V vsakdanjem življenju imamo od štirih osnovnih sil največ izkušenj z gravitacijo, čeprav je daleč najšibkejša. Preostala trojica – šibka, močna in elektromagnetna sila – je nepredstavljivo močnejša. Za primerjavo: celotna Zemlja še vedno šibkeje (gravitacijsko) privlači elektron, kot ga (električno) privlači en sam samcat proton. V vsakdanjem življenju gravitacija prevladuje izključno zato, ker sta šibka in močna sila izjemno kratkosežni in onstran atomskih razdalj njun vpliv izzveni, elektromagnetna sila pa ne dobi veliko priložnosti, ker je v snovi večinoma enako mnogo pozitivnih in negativnih nabojev, magnetni momenti pa so naključno obrnjeni. Od človeškega do vesoljskega merila svet kroji večinoma gravitacija, a vendarle šibek magnet na kuhinjskem hladilniku ukroti privlak celotne Zemlje in spominek ne pade na tla.

Ker se gravitacija ne meni za naboj, bi po vsem zapisanem pričakovali, da bo gravitacija na antimaterijo delovala enako kot na snov, hkrati pa trepetali, ali jo bo sploh možno izmeriti. Več kot nekaj tisoč atomov antimaterije ne znamo izdelati, a že to zadostuje.

Septembra so raziskovalci v Cernu v okviru eksperimenta ALPHA-g izmerili vpliv gravitacije na antivodik in ugotovili, da deluje v isto smer kakor pri običajnem vodiku. To je sicer koristna potrditev pričakovanega dejstva, a prava veličina dosežka tiči v njegovi izvedbi. Proizvajanje antidelcev je danes že rutinsko, toda samo v Cernu jih znajo združiti v antivodik, šele zdaj pa so izmerili, kam pada. To so poskušali že leta 2013, vendar so bili rezultati premalo natančni za dokončno sodbo.

Če Cern poznamo po velikih pospeševalnikih delcev, sta za antivodik ključna upočasnjevalnik AD (Antiproton Decelerator) in ELENA (Extra Low Energy Antiproton ring), ki pripravita dovolj počasne antiprotone, da so primerni za nadaljnjo uporabo v številnih ek-

sperimentih. ALPHA-g (Antihydrogen Laser Physics Apparatus) jih združi s pozitroni v antivodik. Zelo razredčen plin, v katerem je bilo nekaj tisoč atomov antivodika, so z magnetnimi pastmi ujeli v trimetrski navpične cilindre. Nato so ga z odparevanjem hitrih antiatomov ohladili na približno 0,5 kelvina. Izkoristili so dejstvo, da je temperatura vedno povprečna hitrost delcev, prava porazdelitev pa je široka. Če hitrejši delci odletijo proč, je temperatura preostanka seveda nižja.

Antivodik je bil dovolj ohlajen, da je imela gravitacija opazen vpliv. Ko so popustili primež magnetnih polj, je začel uhajati skozi zgornjo in spodnjo odprtino, a večinoma skozi slednjo. Nenatančnost pri meritvi je še vedno precejšnja in ne omogoča ocene, ali gravitacija na antivodik deluje enako močno kot na vodik, zagotovo pa vemo, da vsaj v isto smer. Vodja eksperimenta Jeffrey Hangst je pojasnil, da so ga večkrat ponavljali z različnimi jakostmi magnetnih polj, nato pa delež antivodikovih atomov, ki je izšel na spodnji strani, primerjali s simulacijami. Eksperimentalni podatki so se vsakokrat ujemali s simulacijami normalne gravitacije, ne pa njene odsotnosti ali celo antigravitacije.

Italijanski fizik Ruggero Caravita, ki v Cernu vodi tretji eksperimenti z antimaterijo (AEGIS), je dejal, da nihče ni pričakoval nič drugega. Antiprotone resda sestavljajo antikvarki, a so odgovorni le za kakšen odstotek mase; preostalo je energija. Četudi bi antikvarki »padali« navzgor, bi antiprotoni še vedno »padali« navzdol, le malenkost počasneje. Karkoli drugega bi terjalo popolno prenovo standardnega modela in teorije gravitacije. V Cernu se zdaj meritve vpliva gravitacije nadaljujejo tako z večjo natančnostjo kakor tudi z drugimi delci antimaterije, denimo antivodikovimi ioni in pozitronijem (elektron in pozitron, ki krožita drug okrog drugega).

Nad rezultati torej nihče ni razočaran, četudi to pomeni, da so se antigravitacijski pogoni še trdneje pomaknili med znanstveno fantastiko. A ker je možno sestaviti skladno teorijo, kjer je gravitacijski vpliv na antidelce poljuben, bodo zdaj znanstveniki z meritvami skušali čim natančneje pokazati, da gravitacija zares ne razlikuje med delci in antidelci.

Dr. Matej Huš je višji znanstveni sodelavec na Kemijskem inštitutu in Zavodu za varstvo kulturne dediščine Slovenije.

*Kršitve simetrije
kažejo, da nečesa še
ne vemo, da so naše
teorije nepopolne, da
potrebujemo več.*

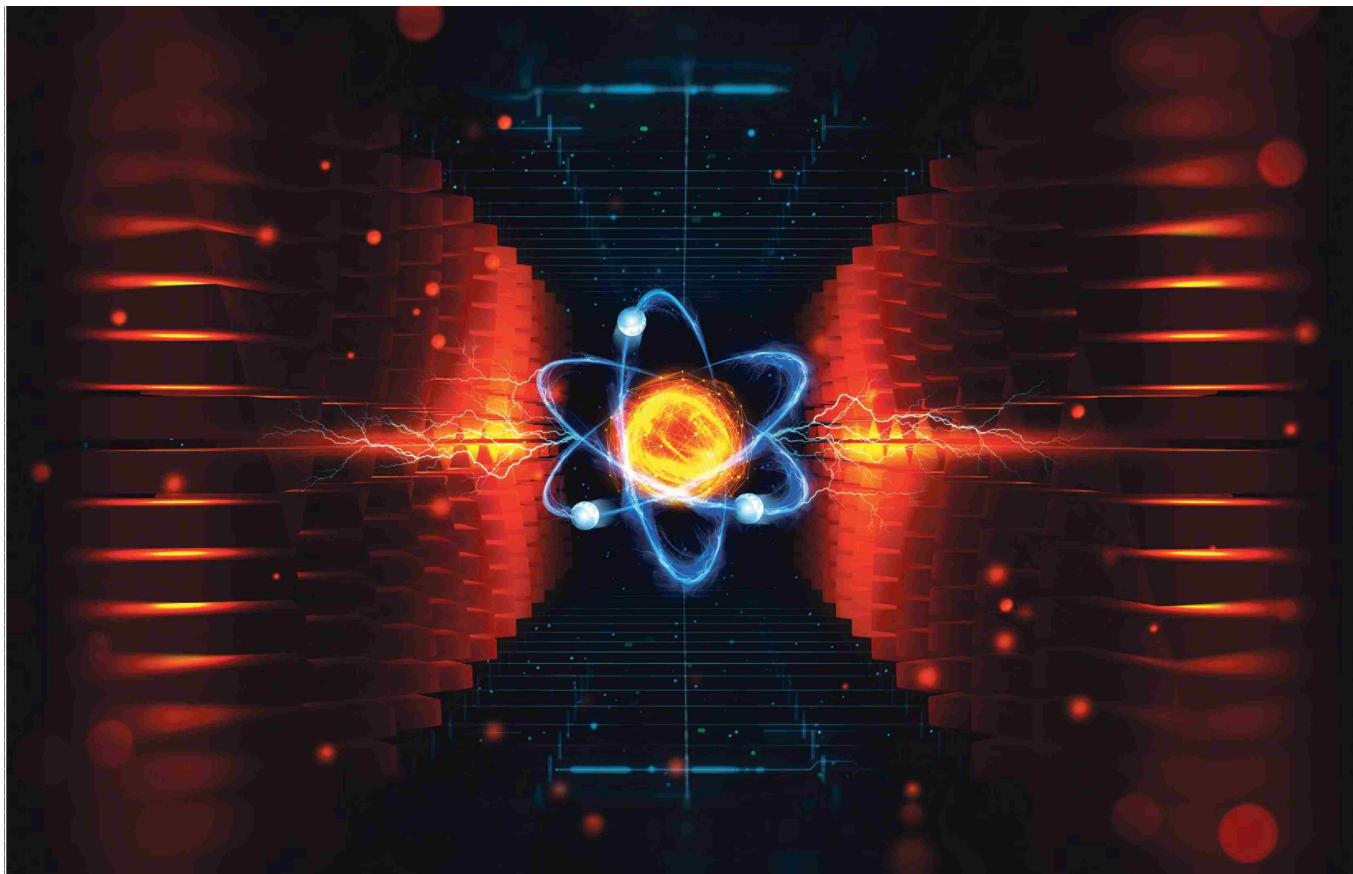
*V vsakdanjem
življenju imamo od
štirih osnovnih sil
največ izkušenj z
gravitacijo, čeprav je
daleč najšibkejša.*

ZAKAJ SVET OBSTAJA

Ena najpomembnejših nerešenih ugank moderne fizike je obstoj sveta iz snovi in ne antimaterije. V vseh znanih procesih nastaneta enaki množini obeh. Če se je to zgodilo tudi ob velikem poku, bi pričakovali totalno anihilacijo in vesolje brez snovi, polno energije. Ker svet obstaja, je morala biti v otroškem vesolju asimetrija, ki je favorizirala materijo.

Zadoščovalo je, da je preživela milijardinka snovi, pa je iz nje zgrajeno današnje vesolje. Kljub znanim razlikam med materijo in antimaterijo v obliki kršitev simetrije CP niti standardni model niti gravitacija ne znata pojasniti, kako je materija zmagala oziroma zakaj sploh imamo zmagovalca. Razlage segajo od modelov, ki skušajo utemeljiti presežek materije že spočetka, do uporabe kršitev simetrije CP. Bolj metafizične razlage pa uvajajo velike zaplate vesolja, v katerih prevladuje antisnov, in celo zrcalna antivesolja.

A prepričljivega odgovora preprosto ni.



Znanstveniki bodo z meritvami skušali čim natančneje pokazati, da gravitacija zares ne razlikuje med delci in antidelci. FOTO SHUTTERSTOCK