

najnižjo lego vrha glave pri počepu, oseba na stolu pa naj s prstom označi višino vrha skakalčeve glave v najvišji legi skoka. Tretja oseba lahko s štoparico na mobilnem telefonu približno izmeri čas trajanja odnosa in z metrom izmeri razdaljo med najnižjo in najvišjo lego skakalčeve glave. S tako ocenjenimi podatki nato približno izračunamo delo mišic nog in njihovo moč.

Literatura:

Herman, I. P., 2007: *Physics of the Human Body*. Berlin,

Heidelberg: Springer-Verlag.

Reberc, M., Cvahte, M., Brumen, M., 1997: *Energijska bilanca človeka*. Maribor: Univerza v Mariboru, Pedagoška fakulteta, Oddelek za fiziko.

Cvahte, M., 1998: *Energijske pretvorbe v človeškem telesu*. Fizika v šoli. Št.1, str. 10-17.

Slovarček:

Kinetična energija. Energija, ki jo ima telo z maso m zaradi gibanja s hitrostjo v . Kinetična energija telesa je določena kot

$$W_{\text{kin}} = \frac{mv^2}{2}.$$

Gravitacijska potencialna energija. Za telesa blizu površine Zemlje izračunamo gravitacijsko potencialno energijo kot $W_{\text{pot}} = mgh$, kjer je m masa telesa, g težni pospešek in h višina nad nekim referenčnim nivojem, na katerem si izberemo, da je potencialna energija enaka nič.

Moč. Količina, s katero merimo, koliko dela opravi sila v določenem času. Moč izračunamo kot

$$P = \frac{A}{t},$$

kjer je A delo, ki ga sila opravi v času t .

Nevtrini hitrejši od svetlobe?

Janez Strnad

Uvod

Lanske jeseni se je razširil glas o poskusu, pri katerem naj bi nevtrini potovali hitreje od svetlobe. To je izzvalo precej zanimanja tudi med nefiziki. V fiziki je v navadi počakati na preizkus nenavadnega izida. Čakanje se utegne zavleči do naslednjega leta. Zato je smiselno pregledati razmere, ne da bi se dokončno opredelili o trdnosti nenavadnega izida.

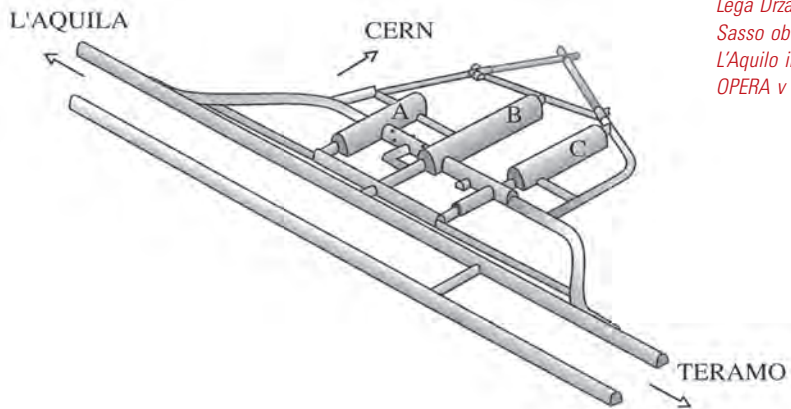
Ustanove

Pri poskusu sta sodelovala CERN in LNGS, Državni laboratorij Gran Sasso. Drugi je manj znan kot ženevski CERN. Italijanski parlament je prvič razpravljal o ustanovitvi podzemnega laboratorija leta 1979. Leta 1982 so odobrili gradnjo in jo pod okriljem Državnega inštituta za jedrsko fiziko INFN leta 1987 končali. Dve leti pozneje je laboratorij začel delovati. Na svetu je kakih deset velikih podzemnih laboratorijev.

Debela plast kamnin zadrži večino naletenih delcev iz vesolja. Na razmere v takih laboratorijih manj vpliva okolje in se na primer temperatura manj spreminja. Zato so pripravljeni za občutljiva merjenja.

Laboratorij LNGS leži v Abruzzih v srednji Italiji ob dvocevnem predoru ceste med L'Aquila in Teramom. Nad njim je 1400 metrov debela plast kamnin najvišjega vrha Apeninskega polotoka, 2912 metrov visokega Gran Sassa. Laboratorij se razteza na površini 18 tisoč kvadratnih metrov. Naprave so nameščene v treh podolgovatih dvoranah. V laboratoriju dela skoraj tisoč raziskovalcev iz številnih držav.

CERN in INFN sta leta 1999 odobrila skupni načrt CNGS, Nevtrini iz CERN-a za Gran Sasso. S poskusi so začeli leta 2006. Eden od obeh delov načrta je poskus OPERA, Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus, v dvorani C. Pri njem sodelujejo raziskovalci iz Belgije, Francije,



Lega Državnega laboratorija Gran Sasso ob cestnih predorih med L'Aquilo in Teranom. Poskus OPERA v dvorani C.

Hrvaške, Italije, Izraela, Japonske, Kitajske, Nemčije, Švice, Rusije in Turčije. Poskusa so se lotili, da bi zaznali prehajanje mionskih nevtrinov v tauonske.

Nevtrini

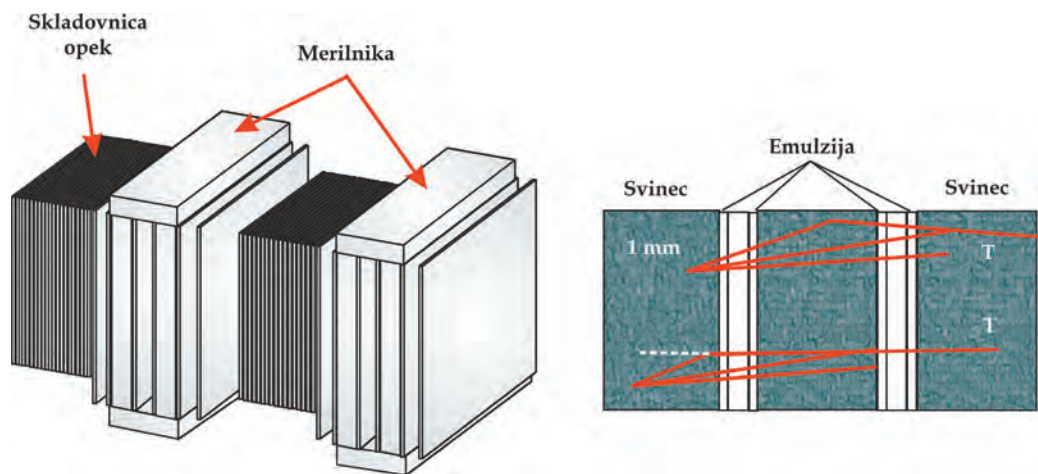
Nevtrini so treh vrst. Skupaj z elektroni se pojavijo *elektronski nevtrini*, skupaj z mioni *mionski nevtrini* in skupaj s tauoni *tauonski nevtrini*. Nekdaj so nevtrini veljali za delce z maso nič, ki se vselej gibljejo s hitrostjo svetlobe v praznem prostoru c . Nato so ugotovili, da nevtrini ene vrste prehajajo v nevtrine druge vrste. Te *nevtrinske oscilacije* so zasledili pri elektronskih nevtrinih z razmeroma majhno energijo, ki nastanejo ob zlivanju vodikovih jeder v Soncu in podobnih zvezdah. Oscilacije so zasledili tudi pri mionskih nevtrinih, ki nastanejo pri reakcijah hitrih delcev iz vesolja v vrhnjih plasteh ozračja. Nevtrinom so pripisali zelo majhno od nič različno maso, po kateri se vrste nevtrinov med seboj razlikujejo. Zaradi majhne mase naj bi se nevtrini gibal s hitrostjo, malo manjšo od c . (Razlika je tako majhna, da je pri poskusu OPERA ne bi mogli zaslediti.) V katero vrsto nevtrini preidejo ob oscilaciji, še niso neposredno ugotovili. V tej zvezi se je pojavilo vprašanje, ali mionski nevtrini pri oscilaciji preidejo v tauonske.

Leptoni, »lahki« delci, so obstojni elektron e^- , mion μ^- z 207-krat večjo maso od elektrona, ki v povprečju razpade po 2,20 milijonine sekunde, in tauon τ^- , »težki lepton« s 3477-krat večjo maso od elektrona, ki v povprečju razpade po slabih treh desetbilijoninah sekunde ($2,91 \cdot 10^{-13}$ s). Njihovi antidelci z nasprotnim električnim nabojem imajo enako maso in enako hitro razpadejo.

Proteus je večkrat poročal o nevtrinih: *Oj, ti presneti nevtrino*, 44 (1981/82): 171-177, *Nevtrini z maso*, 61 (1998/99): 24-31, *Tretji rod nevtrinov*, 63 (2000/01): 229-230.

Merilnik OPERA

Superprotonski sinhrotron SPS v CERN-u pospeši gruče protonov, atomskih jeder vodika, do energije 400 GeV (energijo 1 GeV bi dobili, ko bi v praznem prostoru pretekli napetost milijarde voltov). S sunkom toka po elektromagnetu vsakih šest sekund iz pospeševalne cevi SPS odklonijo dve po 10,5 milijonine sekunde trajajoči gruči protonov v časovnem razmiku 50 tisočin sekunde. Protone vodijo v smeri proti Gran Sasso na bližnjo tarčo iz grafita, v kateri pri reakcijah s protoni in nevtroni v ogljikovih jedrih nastane množica delcev, med njimi pozitivni in negativni pioni. Z magnetnim poljem nastale pozitivne pione vodijo po



Merilnik OPERA. Velikima skladovnicama merilnih opek sledita merinika z magnetnim poljem za merjenje energije mionov (levo) ter razporeditev svinečnih plošč in filmov z emulzijo v merilni opeki (desno). Nevtrini prihajajo z leve.

Risba po predlogi: Janja Benedik.

ceveh, polnjenih s helijem, da v njih razpadejo, ne da bi reagirali. Pozitivni pion razpade na pozitivni mion in mionski nevtrino. Nevtrini na druge delce delujejo samo s šibko silo in le redkokateri od njih sproži reakcijo. Zaradi tega prepotujejo velike razdalje, a jih je tudi težavno zaznati. Pozitivni mion dalje razpade, a vsi naelektreni delci obtičijo v napravah po kilometru poti. V curku preostanejo skoraj samo mionski nevtrini. Mionskih antinevtrinov je le dva odstotka, elektronskih nevtrinov in antinevtrinov pa manj kot en odstotek. 730 kilometrov dolga pot skozi zemeljsko skorjo zaradi ukrivljenosti zemeljskega površja na najglobljem mestu teče deset kilometrov pod površjem. Curek doseže LNGS, kjer se razširi na 2,8 kilometra. Povprečna energija nevtrinov v njem meri 17 GeV.

Nevtrini zadenejo merilnik OPERA, ki ga sestavljata dva dela. Vsak od njiju tehtja 625 ton in vsebuje 75 tisoč merilnih »opek«. Opeko z maso 8,3 kilograma sestavlja 56 po milimeter debelih plasti svineca in 57 plasti filmov s fotografsko emulzijo. V svincu tauonski nevtrino, v katerega je z oscilacijo prešel mionski nevtrino, rodi tauon. Ta razpade v povprečju, ko preleti pot 87 tiso-

čin milimetra. Tako kratke poti ni mogoče opazovati drugače kot v fotografski emulziji. Včasih so emulzijo z mikroskopom preiskovali ročno, danes to mikroskop opravi samodejno.

Zaznavanje hitrih naelektrenih delcev s fotografsko emulzijo je vpeljal Cecil Powell. Plast emulzije je nekoliko debelejša in zrnca srebrove soli nekoliko večja kot v emulziji navadnega filma. V trdni emulziji delec preleti krajšo pot, preden razpade, kot v plinu meglične celice ali tekočini mehurčne celice. Na poti po emulziji delec poškoduje zrnca srebrove soli, ki počrtnijo, ko film razvijejo. Po zrnih je pod mikroskopom mogoče zasledovati pot delca. Na opisani način je Powell leta 1947 zaznal pione in mione in za »razvoj fotografske metode in odkritje mezonov s to metodo« leta 1950 dobil Nobelovo nagrado.

Med opekami je pravokotno na smer nevtrinov v preseku 7,6 metra krat 7,6 metra postavljenih 256 vodoravnih in navpičnih trakov scintilatorja. V njih hitri naelektreni delci prožijo drobne bliske, ki jih vodijo po

svetlobnih vodnikih in zaznavajo s fotopomnoževalkami. Po teh bliskih ugotavljajo kraj in čas reakcij, ki jih povzročijo mionski nevtrini. Po njih spoznajo, iz katerih opek je treba vzeti film in preiskati emulzijo. Leta 2010 so naleteli na prvo sled tauona in sklepali, da je njegov nastanek sprožil tauonski nevtrino, v katerega je z oscilacijo prešel mionski nevtrino.

Hitrost mionskih nevtrinov so ugotovili po izmerjenem kraju in času reakcij, ki so jih povzročili. Za vsako od obeh velikih enot stoji merilnik, v katerem v magnetnem polju določijo vrsto in energijo naelektrenih delcev, ki nastanejo pri reakciji, pretežno mionov. Hitrost nevtrinov so dobili tako, da so razdaljo med merilnikom v LNGS-u in napravo v CERN-u delili s časom, ki so ga nevtrini porabili za pot. Pri merjenju razdalje so si pomagali s sistemom umetnih satelitov za določanje lege na Zemlji GPS. Prvo točko so izbrali v CERN-u, drugi dve pa ob krajiščih cestnega predora Gran Sasso. Tako so ugotovili razdaljo med obema napravama 730 kilometrov na 20 centimetrov natančno. (Razdalja se je zaradi potresa leta 2009 v L'Aquila spremenila za 7 centimetrov.) Pri tem je leta 2008 sodeloval švicarski Zvezni urad za metrologijo in je merjenje leta 2011 preveril nemški Fizikalno-tehniški urad.

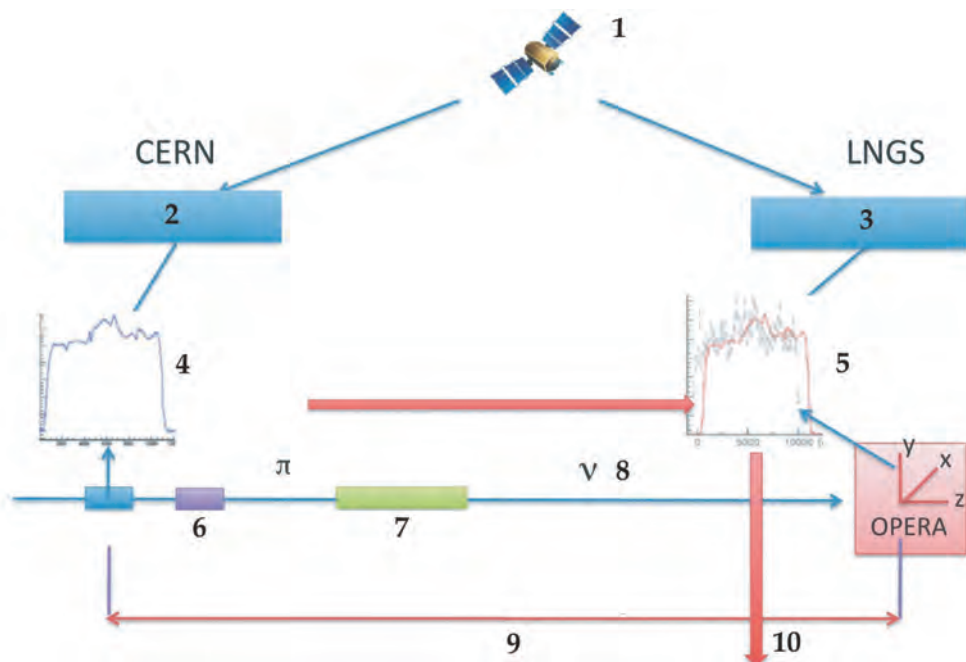
Za merjenje časovnega razmika med ustrežno skupino nevtrinskih reakcij v LNGS-u in sunkom protonov v CERN-u sam sistem GPS ni bil dovolj natančen. V CERN-u in v LNGS-u so namestili natančni uri na curek atomov cezija in ju s podporo GPS naravnali. Niso mogli neposredno izmeriti časovnega razmika med nevtrinsko reakcijo v merilniku in odhodom protona, ki je povzročil to reakcijo. Merili so časovni razmik med skupino reakcij v merilniku in odhodom gruč, ki je povzročila skupino reakcij. V letih 2009, 2010 in 2011 so z merilnikom zaznali dobrih 15 tisoč nevtrinskih reakcij, pri katerih so nastali mioni. Potovanje nevtrinov je trajalo 2,4 tisočine sekunde.

Ugotovili so, da naj bi nevtrini za 58 milijardin sekunde, to je za 17 metrov, prehiteli svetlobo. Negotovost izida so ocenili na 8 milijardin sekunde. Po tem izidu bi hitrost nevtrinov v relativno za 24 milijonin preseгла hitrost svetlobe v praznem prostoru (tolično bi bilo razmerje $\frac{(v - c)}{c}$).

Nekaj mesecev po objavi so izvedli izboljšani poskus. Namesto dveh po 10,5 milijonine sekunde trajajočih gruč so izvedli poskus s štirimi po 3 milijardine sekunde trajajočimi gručami v časovnem razmiku po pol milijonine sekunde. Zasledili so sicer le dvajset nevtrinskih reakcij, a navedli manjšo negotovost in zaostanek svetlobe z 58 milijardin povečali na 62 milijardin sekunde.

Tahioni

O delcih z večjo hitrostjo od c je razmišljal Arnold Sommerfeld leta 1904. Po Einsteini posebni teoriji relativnosti leta 1905 je razprava o njih zamrla. Oživili so jo Olexa-Myron Bilaniuk, Vijaj Deshpande in George Sudarshan leta 1962 s člankom *Meta relativnost*. Nato se je pojavilo veliko število člankov o *tahionih* (po grškem tahys, hiter). Tahione so si prizadevali vgraditi v posebno teorijo relativnosti. Ugotovili so, da ima tahion imaginarno maso, kar pomeni, da je kvadrat mase negativen. Vselej se giblje s hitrostjo, večjo od c . Energija običajnega delca je pri hitrosti nič enaka lastni energiji mc^2 in naraste preko vsake meje, ko hitrost delca naraste proti hitrosti svetlobe. Energija tahiona pa je pri neomejeni hitrosti enaka nič in naraste preko vsake meje, ko hitrost pojema proti hitrosti svetlobe. Naelektren tahion bi v praznem prostoru seval. Podobno *sevanje Čerenkova* opazimo, ko se naelektren delec po snovi giblje hitreje od svetlobe v snovi, a počasneje od c . Podoben pojav je Machov stožec pri nadzvočnem letalu ali trikotni val, ki ga na gladini vode pušča plovilo, hitrejšje od valov.



Okvira razporeditev naprav pri poskusu OPERA: 1 – GPS satelitski sistem za določanje lege na Zemlji, 2 – cezijeva ura v CERN-u, 3 – cezijeva ura v LNGS-u, 4 – povprečni časovni potek toka v sunkih protonov, 5 – povprečni časovni potek reakcij, ki jih povzročajo nevtrini, 6 – grafitna tarča, v kateri reagirajo protoni, 7 – s helijem polnjena cev, v kateri razpadajo pioni, 8 – curek nevtrinov, 9 – razdalja med CERN-om in Gran Sassom, 10 – časovni razmik.

Po članku T.Adama in sodelavcev. Risba po predlogi: Janja Benedik.

Iz izkušenj izluščimo *načelo kavzalnosti* (vzročnosti): vzrok je v času pred svojim učinkom. Po tem načelu ni mogoče pošiljati sporočil v preteklost. V posebni teoriji relativnosti izhaja iz tega, da delci, energija in sporočila ne morejo potovati hitreje od c . Vzemimo, da bi obstajali tahioni kot delci ter bi bilo mogoče vplivati na njihovo sevanje in jih zaznavati. V tem primeru bi izvir v točki 1 izseval tahion s hitrostjo, večjo od c , in merilnik v točki 2 bi tahion pozneje zaznal. Opazovalec, ki bi se glede na izvir in merilnik gibal z dovolj veliko hitrostjo, manjšo od c , pa bi ugotovil obraten časovni red dogodkov. Zanj bi tahion zaznali, preden bi bil izsevan. To bi na prvi pogled nasprotovalo načelu kavzalnosti in bi vodilo do sklepa, da bi bilo s tahioni mogoče sporočila pošiljati v preteklost. O tem pojavu

so razpravljali kot o *tahionskem antitelefону*. Za drugega opazovalca pa energija tahiona postane negativna, ko se zanj spremeni časovni red dogodkov. To omogoči, da pojav uskladimo z načelom kavzalnosti. Tahion z negativno energijo, ki potuje v preteklost, pojasnimo kot antidelec, *antitahion*, s pozitivno energijo, ki potuje v prihodnost. Pri tem se moramo sprijazniti z ugotovitvijo, da izvir tahionov za prvega opazovalca postane merilnik antitahionov za drugega in merilnik tahionov za prvega opazovalca izvir antitahionov za drugega.

Vseeno tahionov ne moremo uskladiti z načelom kavzalnosti. Zatakne se pri *kavzalnih zankah*. Opazovalca, ki se oddaljujeta drug od drugega, se dogovorita za poskus. Ob dogodku 1 prvi izseva tahion. Drugi ob dohodku 2 tahion zazna in to s tahionom

sporoči prvemu, ki ob dogodku 3 sporočilo sprejme. Za drugega, oddaljujočega se opazovalca je dogodek 2, ko izseva antitahion in tahion, vzrok, dogodka 1 in 3 pa njegova učinka. Zanj velja načelo kavzalnosti. Za prvega, mirujočega opazovalca pa naj bi bil dogodek 1 vzrok dogodka 2 in ta vzrok dogodka 3. Toda dogodek 3 se zanj dogodi pred dogodkom 1, če je hitrost oddaljevanja drugega opazovalca dovolj velika, a manjša od c . Ta ugotovitev nazadnje pripelje do sklepa, da obstoja tahionov kot delcev, ki bi jih po volji izsevali in zaznavali in ki bi preleteli znatne razdalje, ni mogoče uskladiti z načelom kavzalnosti in posebno teorijo relativnosti. To je mogoče uskladiti s posebno teorijo relativnosti le, če razpadejo po zelo kratkem času, v katerem preletijo le mikroskopske razdalje.

V relativistični kvantni mehaniki se pokaže, da s tahionskimi valovi sporočila ne potujejo hitreje kot svetloba ali pa za valovanje značilne količine ne moremo prirediti določenemu kraju.

Drugi poskusi

O *tahionskih nevtrinih* so v zadnjih desetletjih prejšnjega stoletja veliko razpravljali tudi v zvezi z razpadom β tritija. Tritij je izotop vodika, ki ima v atomskem jedru poleg protona še dva nevtrona. Jedro tritija razpade v jedro lažjega izotopa helija, ko odda delec β , to je elektron, in elektronski antinevtrino. Ob razpadu delci prevzamejo energijo razlike mas začetnega jedra in delcev po razpadu. Nevtrino uide, ne da bi ga zaznali. Po kinetični energiji helijevega jedra in elektrona pa je mogoče ugotoviti kvadrat mase antinevtrina. Posamezna merjenja so namigovala, da bi kvadrat mase utegnil biti negativen. Drugi poskusi pa so za kvadrat mase dali nič. Podobna merjenja so izvedli tudi pri razpadu mionov in tudi ta niso dala nedvoumnega rezultata.

V Fermijevem državnem laboratoriju v Batavii blizu Chicaga so izvedli poskus MINOS, Main Injector Neutrino Oscillati-

on Search, pri katerem so tudi raziskovali nevtrinske oscilacije. Pri reakcijah protonov z energijo 120 GeV v grafitni tarči so med drugimi delci nastali pozitivni pioni in so ob razpadu nastali mionski nevtrini s srednjo energijo energijo 3 GeV. Te so zaznavali z manjšim 980-tonskim merilnikom v neposredni bližini tarče in z večjim 5400-tonskim merilnikom v globini 700 metrov v 734 kilometrov oddaljenem rudniku Soudan v severnem delu Minnesote. V merilnikih so se plasti namagnetnega jekla izmenjevale s plastmi plastičnega scintilatorja. V magnetnem polju so se nastali mioni odklonili, tako da so po smeri odklona določili njihov naboj in ugotovili, ali so jih rodili nevtrini ali antinevtrini. V plasteh scintilatorja so naelektreni delci, večinoma mioni, prožili drobne bliske, ki so jih zaznavali, in po njih sklepali na čas in kraj nastanka. Prve nevtrinske oscilacije so ugotovili leta 2006.

Leta 2007 so izmerili hitrost nevtrinov, tako da so zakasnitev delili z razdaljo merilnikov. Ugotovili so, da leži hitrost med $0,999976c$ in $1,000126c$. Merjenje pa ni bilo dovolj natančno, da bi mogli trditi, da nevtrini potujejo s srednjo hitrostjo $1,000051c$. V okviru poskusa MINOS pripravljajo z izboljšanim velikim merilnikom natančnejše merjenje in s tem preizkus poskusa OPERA. Drugi preizkus pripravljajo na Japonskem. V okviru poskusa T2K nameravajo nevtrine iz protonskega sinhrotrona v Tokaiju na vzhodni obali Japonske zaznavati v tristo kilometrov oddaljenem rudniku v Kamioki. Poskus se je zakasnil zaradi velikega potresa.

Namesto zaključka

Pri poskusu OPERA so skrbno premislili, kaj bi utegnilo vplivati na izid, in podrobno opisali vse korake, s katerimi so se želeli izogniti napakam. Zavedati pa se je treba omejitev pri poskusu. Primerjali so časovni razmik med skupino nevtrinskih reakcij in gručo protonov. Bolje bi bilo primerjati časovni razmik med skupinama nevtrinskih

reakcij v dveh merilnikih, kakor so to storili pri poskusu MINOS. Niso navedli energije nevtrinov. To energijo je mogoče ugotoviti po energiji naelektrenih delcev, ki nastanejo ob nevtrinskih reakcijah. Pri prejšnjih poskusih so druge raziskovalne skupine ugotovljale mejo za hitrost nevtrinov v odvisnosti od njihove energije. Pri energiji nevtrinov nad 30 GeV so postavili mejo za relativno razliko hitrosti nevtrinov pod $4 \cdot 10^{-5}$, pri energiji okoli 3 GeV pri poskusu MINOS pod $5 \cdot 10^{-5}$ in pri energiji okoli 10 MeV pod $2 \cdot 10^{-9}$. Zadnja zadeva nevtrine, ki so jih zaznali ob eksploziji supernove SN1987A.

Vprašanje, ali nevtrini potujejo hitreje od c , ostaja odprto. Vsi čakajo na neodvisna preizkusa. Za zdaj med fiziki prevladuje dvom. Razlogov je precej. Poleg naštetih težav z delci, hitrejšimi od svetlobe, zelo številni poskusi podpirajo posebno teorijo relativnosti. Vse velike naprave – pospeševalniki in nakopičevalniki – za elektrone in protone uspešno delujejo. Zelo natančna merjenja pri jedrskih reakcijah in reakcijah med delci kažejo, da posebna teorija relativnosti natančno velja za jedra in delce. V primerih, v katerih so jo lahko preizkusili, velja tudi za velika telesa. Nevtrini, ki na druge delce delujejo le s šibko silo, bi morali biti nenaavadna izjema, če upoštevamo, da uspešna elektro-sibka teorija na enaki osnovi obravnava elektromagnetno in šibko silo.

Posebna teorija relativnosti seveda ni nedotakljiva. Andrew Cohen in Sheldon Glashow sta na primer leta 2006 raziskala zelo posebno teorijo relativnosti, v kateri sta sprostila nekatere zahteve posebne teorije relativnosti na omejenem območju. Vendar se teorija za zdaj ni izkazala. Leta 2011 sta v članku ocenila, da bi nevtrini, če bi se gibali s hitrostjo, ki jo navajajo pri poskusu OPERA, morali pri nekakšnem sevanju Čerenkova roditi pare elektronov in antidelecev. Pri poskusu ICARUS, ki je sosed poskusa OPERA in ki zaznava nevtrine iz istega curka, nastanka takih parov niso zaznali.

Posebno teorijo relativnosti so za hitre delce že večkrat poskušali nadomestiti z boljšo teorijo, a do zdaj niso uspeli. Za gravitacijo pa jo je že zdavnaj uspešno nadomestila splošna teorija relativnosti, v kateri svetlobe in teles ne omejuje hitrost c . Fiziki niso proti novim teorijam, a zanje želijo imeti trdno eksperimentalno oporo. V vsakem primeru nas čakajo zanimive ugotovitve.

Konec februarja letos je raziskovalna skupina OPERA objavila, da je ugotovila dva mogoča izvira napak. Prvi je povezan z napravo, ki meri čas med naravnavanjem obeh ur po GPS, drugi pa s stikom optičnega vlakna z zunanjim signalom GPS z glavno uro. Oboje lahko vpliva na čas potovanja nevtrinov, eno ga lahko zmanjša, drugo ga lahko poveča. Podrobnejša pojasnila naj bi vsebovalo poročilo, ki bo sledilo v kratkem. Izjava bo kljub previdnosti poglobila dvom o ugotovitvi, da so nevtrini hitrejši od svetlobe.

Literatura:

- Adam, T., in drugi (skupaj 174 podpisnikov z 48 ustanov), 2011: *Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam. Novembra poslano v Journal of High Energy Physics.*
- Agafonova, N., in drugi (skupaj 200 podpisnikov z 39 ustanov), 2010: *Observation of the first ν_τ candidate event in the OPERA experiment. Physics Letters B*, 691: 138-145.
- Strnad, J., 1986: *Posebna teorija relativnosti. Ljubljana: DMFA.*