

PRESEK

List za mlade matematike, fizike, astronome in računalnikarje

ISSN 0351-6652

Letnik 6 (1978/1979)

Številka 1

Strani 7-16

Norma Mankoč, priredba Marjan Hribar:

NEVTRINO

Ključne besede: fizika.

Elektronska verzija: <http://www.presek.si/6/348-Mankoc-Hribar.pdf>

© 1978 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.



NEVTRINO

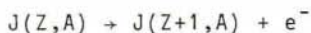
Od časa do časa preberemo med časopisnimi novicami, da so fiziki odkrili nov *osnovni delec*. To pomeni, da se je pred raziskovalce postavilo novo vprašanje o zgradbi snovi. Ponavadi vzpodbudi odkritje nove raziskave. Navada je tudi, da se take raziskave končajo z novimi vprašanji.

Tudi *nevtrino* je eden od osnovnih delcev. Fiziki so ga spoznali že pred časom, pa še vedno postavlja za sedaj nerešljiva vprašanja. Za razliko od delcev, ki jih odkrivajo v sedanjem času in nastajajo le pri trkih delcev z velikimi energijami, se rodi nevtrino pri mnogih pojavih v atomskem svetu, ki so postali naša vsakdanjost. Veliko se govori in piše o jedrskih reaktorjih in o radioaktivnih izotopih. Debela plast betona in kovine varuje okolico reaktorja pred nevtroni, ki nastajajo pri razcepu uranovih jeder, in pred sevanjem gama, ki ga oddajajo radioaktivni preostanki uranovih jeder. Reaktor pa je tudi močan izvir nevtrinov, ki brez ovir zapuščajo sredico reaktorja, predirajo Zemljo in se izgube v vesolju. Tudi s Sonca nas neprestano obliva tok nevtrinov. Nobene sledi ne puščajo v snovi, skozi katero potujejo, zato tudi življenju niso nevarni.

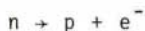
Kako so se raziskovalci prepričali o obstoju nevtrina, če se ta sploh ne meni za snov in v njej ne zapušča sledi?

Na misel o obstoju nevtrina je napeljalo raziskovalce opazovanje *razpada beta*. Pri razpadu beta oddajajo atomska jedra elektrone ali pozitrone. Razpad z oddajo elektrona imenujemo razpad β^- (*beta minus*), razpad z oddajo pozitrona pa razpad β^+

(*beta plus*). Pri razpadu β^- se jedro atoma spremeni v jedro atoma sosednjega elementa v periodnem sistemu, ki ima atomsko število za eno večje. Označimo jedro z atomskim številom Z in z masnim številom A simbolično kot $J(Z,A)$. Spremembo pri razpadu β^- zapišemo tedaj takole:

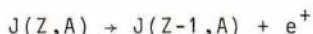


Zapis označuje, da je v preostalem jedru enako število delcev, vendar se je za eno povečalo število protonov. Pomeni, da se je za eno zmanjšalo število nevtronov. Predstavljajmo si, da se je pri spremembi eden od nevtronov spremenil v proton. Simbolično bomo zapisali spremembo pri razpadu β^- takole:

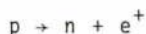


Po tej shemi tudi prosti nevtroni razpadajo v protone in elektrone. Razpolovni čas je okoli 12 minut.

Pri razpadu β^+ se jedro atoma spremeni v jedro atoma elementa, ki ima atomsko število za eno manjše. Simbolično bomo zapisali:



Predstavljamo si lahko, da se je pri razpadu eden od protonov spremenil v nevtron:



Protoni (vodikova jedra), ki niso vezani z nevtroni v jedru, ne razpadajo.

S tem pa še nismo povedali vsega. Pri vsakem novo odkritem pojavu preverjamo veljavnost prejšnjih spoznanj. Taka spoznanja so med drugim, da se pri telesih, ki so ločena od okolice, ohrani skupni električni naboj; da se energija teles, ki so ločena od okolice, ne spreminja; da se gibalna količina teles, ki so ločena od okolice, ne spreminja. Kaj po teh spoznanjih pričakujemo od delcev, ki so vključeni v razpad beta?

Pri obeh spremembah se mora ohraniti skupni električni naboj. Pri razpadu β^- ugotovimo tole: nevtron nima naboja, proton ima pozitivni osnovni naboj, elektron ima negativni osnovni naboj.

Skupni naboj po spremembi je res enak naboju pred spremembo, to je nič. Tudi pri razpadu β^+ se skupni naboj ne spremeni.

Notranja energija atomskega jedra po razpadu je manjša od notranje energije jedra pred razpadom. Na račun te razlike se je rodil elektron, ki ima tudi kinetično energijo. Ker so vsa istovrstna atomska jedra popolnoma enaka, prav tako pa so popolnoma enaki vsi elektroni, pričakujemo, da bodo imeli vsi elektroni enako kinetično energijo.

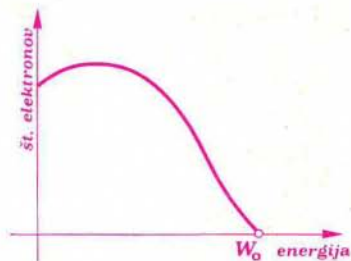
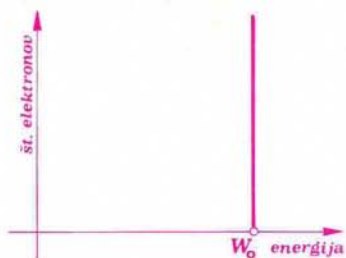
Vzemimo, da jedro pred razpadom miruje. Njegova gibalna količina je tedaj nič. Ker se gibalna količina pri razpadu ne spremeni, se morata elektron in preostalo jedro gibati v nasprotnih smereh. Prav tako se gibata drsalca, ki na ledu sprva mirujeta, nato pa se odrineta drug od drugega.

Sl. 1a kaže pričakovano in izmerjeno kinetično energijo izsevanih elektronov. Večina elektronov ima manjšo energijo od pričakovane. Pri opazovanju sledi jeder in elektronov so ugotovili, da le pri neznatnem številu razpadov odletita delca v pričakovanih nasprotnih smereh (Sl. 1b).

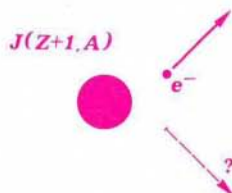
Ali tu preneha veljavnost zakonov ali pa naše spoznanje ni popolno? V veri v dotlej vselej veljavne zakone je Wolfgang Pauli leta 1930 predpostavil, da se pri razpadu poleg elektrona ali pozitrona rodi še neodkriti delec brez naboja in najbrž brez lastne mase. Imenoval ga je nevtrino. Ta delec odnese manjkajočo kinetično energijo in manjkajočo gibalno količino.

Šele v letu 1953 sta z zelo zahtevnimi eksperimenti ameriška fizika C. Cowan in F. Reines dokazala obstoj nevtrina. Z nadaljnjimi raziskavami so odkrili, da nevtrino, ki se rodi pri razpadu β^- , ni enak nevtrinu, ki se rodi pri razpadu β^+ . Prvi delec so imenovali antinevtrino, drugega pa nevtrino. Sl. 2 ponazarja, da se delca razlikujeta po smislu svojih vrtilnih količin glede na smer gibanja. Pravimo, da ima antinevtrino desnosučno (pozitivno), nevtrino pa levosučno (negativno) vijačnost. Z vsemi temi spoznanji lahko zapišemo spremembi pri razpadu beta pravilno takole:

1a

 $J(Z,A)$

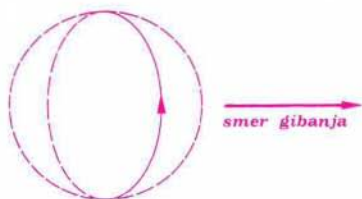
1b



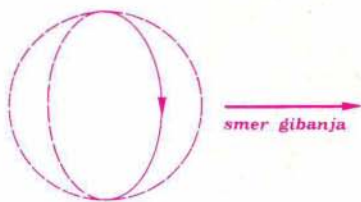
Sl. 1: Razlike med pričakovanji in dejstvi so napolile W. Paulija, da je predpostavil obstoj nevtrina.

Sl. 2: Nevtrino in antinevtrino se razlikujeta po vijačnosti. Pravimo, da ima antinevtrino pozitivno, nevtrino pa negativno vijačnost.

2



neutrino



antineutrino

$$n \rightarrow p + e^{-} + \bar{\nu} \quad \text{in} \quad p \rightarrow n + e^{+} + \nu$$

če s simbolom ν označimo nevtrino, s simbolom $\bar{\nu}$ pa antinevtrino.

Da bomo spoznali, kako težko je odkriti nevtrino, omenimo poskus, s katerim so hoteli določiti tok nevtrinov, ki nastajajo pri jedrskih reakcijah v sredici Sonca.

V sredici Sonca se v nizu jedrskih reakcij po štiri jedra vodika spajajo v jedra helija. Iz teh reakcij dobiva Sonce energijo, ki jo seva v vesolje. Pri reakcijah nastajajo tudi nevtrini. Velika večina nevtrinov uide iz Sončeve sredice, saj se v povprečju le vsak stotisoči ustavi v Soncu. Po računih naj bi prebadalo kvadratni meter Zemljinega površja okoli 100 milijard sončevih nevtrinov v sekundi. Natančna določitev tega toka naj bi pomagala podrobneje oceniti razmere v Soncu. Slika 3 kaže, kakšen je bil poskus. Posodo tetrakloretilena s prostornino 450m^3 so postavili v zapuščen rudnik okoli kilometer in pol pod zemljo. Tako globoko ne prodrejo niti kozmični žarki niti delci, ki nastanejo pri trkih kozmičnih žarkov z molekulami in atomi v atmosferi in na površju. Edino nevtrini prodirajo v to globino.

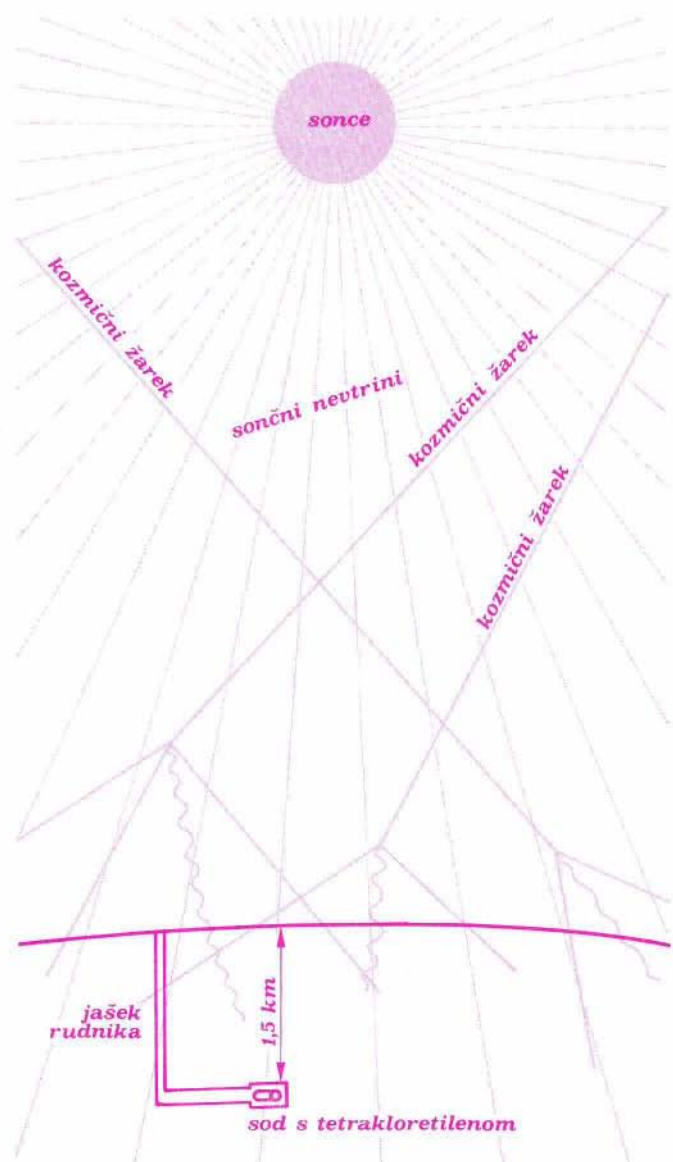
Pri trkih nevtrinov z dovolj veliko energijo se lahko jedro klora z masnim številom 37 - Cl^{37*} spremeni v jedro argona z masnim številom 37 - A^{37} , ki je radioaktivno. Reakcijo zapišemo takole:



Verjetnost, da se reakcija zgodi, je zelo majhna. Četudi je v posodi okoli $2 \cdot 10^{30}$ jeder Cl^{37} , preteče med dvema reakcija v povprečju okoli 50 ur.

Eksperiment je trajal nekaj mesecev. Nato so nastali argon zelo skrbno izločili iz tetrakloretilena. Argon je zlahka plin in ne more ostati vezan na mestu klora. Zapusti molekulo tetrakloretilena, ostane pa ujet v tekočini. Tekočino so zato

*V naravnem kloru ima v povprečju vsak četrti atom klora jedro z masnim številom 37. Preostali atomi imajo jedra z masnim številom 35.



S1. 3: Odkrivanje sončnih nevtrinov. Do soda s tetrakloretilenom 1500 m pod površjem Zemlje prodirajo le nevtrini.

skrbno prepričevali s helijem. Heliju so nato dodali še neaktivni argon in mešanico ohladili do temperature 77 K. Pri tej temperaturi je argon trden in se je izločil iz plinastega helija na stene posode. S števci so nato merili sevanje, ki nastane pri radioaktivnem razpadu nastalega argona A-37. Jedro argona A-37 namreč prej ali slej ujame enega od atomskih elektronov in se spremeni v jedro klora.* Elektronska lupina okoli nastalega jedra klora je pri tem v vzbujenem stanju in oddaja rentgenske žarke, ki jih zaznamo s števci.

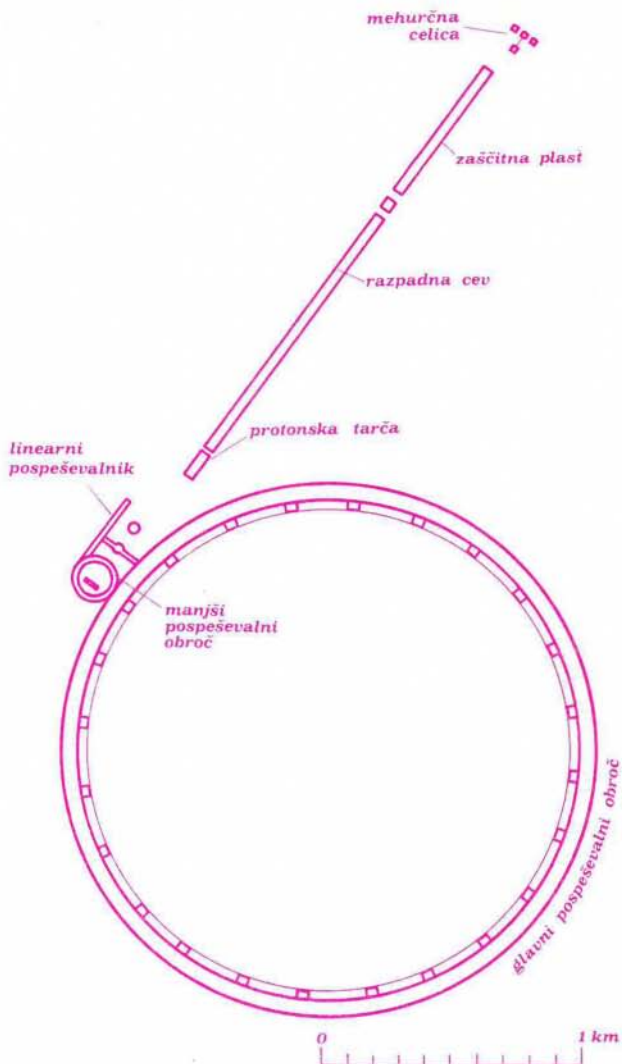
Pri tem velikem poskusu je nastalo vsega nekaj deset atomov argona, precej manj, kot so pričakovali. Ali pomeni to, da je tok Sončevih nevtrinov precej manjši od pričakovanega ali da so raziskovalci pri eksperimentu kaj spregledali? Majhnega toka nevtrinov ni mogoče razložiti na osnovi naših sedanjih predstav o dogajanjih v sredici Sonca. Da bi razrešili ta vprašanja, bo najbrž treba še veliko dela.

Poskuse z nevtrini je mogoče delati tudi pri velikih pospeševalnikih, kjer dobimo curke z zelo velikimi energijami. Sl. 4 kaže pospeševalnik v laboratoriju NAL v ZDA. V pospeševalniku pospešijo protone do hitrosti, ki je enaka 999 tisočink svetlobne hitrosti. Curek protonov vpada na debelo kovinsko ploščo, v kateri nastane ob trkih protonov z jedri veliko število zelo kratkoživih delcev pionov in kaonov, ki potujejo naprej po nekaj 100 m dolgi cevi in že med potjo razpadajo, pri čemer nastajajo tudi novi nevtrini. Konec cevi zapira okoli kilometer debela plast zemlje, ki naj ustavi vse razen nevtrinov. Curek nevtrinov na koncu udarja v tarčo, ponavadi v tekoči vodik. Raziskovalci fotografirajo sledi delcev, ki nastanejo pri reakcijah in jih kasneje razčlenjujejo (Sl. 5). Spoznali so, da so reakcije vse pogostejše, čim večjo energijo imajo nevtrini.

Kako si razlagamo, da snov tako malo moti gibanje nevtrina?

Oblika snovi in pojavi v snovi so odvisni od osnovnih gradnikov in od njihove medsebojne povezave. Gradniki vesolja so

*Tudi to je razpad, pri katerem se rodi nevtrino, podobno kot pri razpadu β^+ .

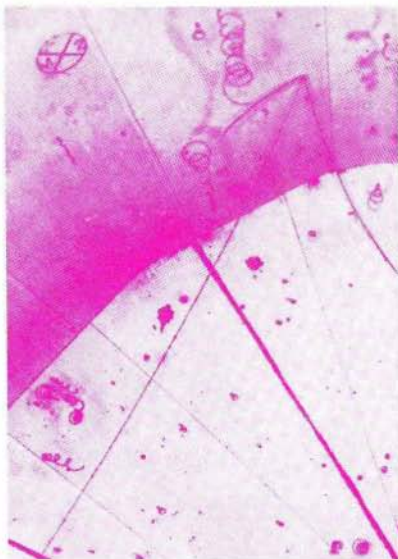


S1. 4: Skica pospeševalnikov in drugih naprav, ki jih imajo v ustanovi NAL v ZDA. Linearni pospeševalnik in pomožni krožni pospeševalnik rabita za to, da pospešita protone do 0,945 svetlobne hitrosti za vstop v glavni pospeševalni obroč, ki jih pospeši naprej do 0.999 svetlobne hitrosti.

galaksije in zvezde - povezuje jih *težnostna* ali *gravitacijska sila*. Vso raznoliko snov okoli nas in v vesolju sestavljajo atomi, ki jih povezujejo *električne sile*.

Električne sile povezujejo tu di elektrone in jedra znotraj atoma. Jedro sestavljajo protoni in nevtroni, ki jih povezuje *močna jedrska sila*. *Močna sila* povzroča tudi nastanek različnih kratkoživih delcev pri trkih protonov in nevtronov z velikimi energijami.

Nobena izmed naštetih sil ne deluje na nevtrino. Je pa še *šibka sila*. Ta je mnogokrat slabša od električne in močne, deluje pa med vsemi delci z nevtrinom vred. Ker je preslaba, ne povezuje delcev v stalne tvorbe, ampak povzroča le medsebojne



Sl. 5: Sledi delcev, ki so nastali ob reakciji nevtrina s protonom v mehurčni celici. Nevtrino je priletel s spodnje leve strani slike in na svoji poti ni pustil sledi. Pri reakciji so nastali proton, pozitivni pion in negativni mion. Sledi delcev so ukrivljene, ker je v celici magnetno polje.

Sila	Razmerje med silo in močno silo pri razdalji 10^{-15} m med delcema*				
	e-v	e-p	p-p	p-n n-n	n-v p-v
Močna	0	0	1	1	0
Električna	0	10^{-2}	10^{-2}	0	0
Šibka	10^{-13}	10^{-13}	10^{-13}	10^{-13}	10^{-13}
Gravitacijska	0	10^{-41}	10^{-38}	10^{-38}	0

* Močna in šibka sila sta sili kratkega dosega in ju delci pri razdaljah, ki so večje od 10^{-15} m, ne čutijo. Električna in gravitacijska sila delujeta med delci pri poljubno veliki razdalji.

spremembe. Tabela nam kaže primerjavo medsebojnih sil med nekaterimi delci pri razmiku, ki je tolikšen, da čutijo delci vse naštete sile. Vidimo, da je električna sila med delci z nabojem stokrat manjša od močne sile in da je šibka sila deset bilijonkrat slabša od močne. Gravitacijska sila pa je v primerjavi s prejšnjimi zanemarljiva. Čim močnejša je sila, tem večja je verjetnost za reakcije med delci. Vidimo, da spremembe v snovi v prvi vrsti uravnavata močna in električna sila. Razumemo, zakaj nevtrini nemoteno potujejo skozi snov, saj uravnava njihovo gibanje le šibka sila.

Po prispevku Norme Mankoč
prireديل Marjan Hribar