

# ASTROFIZIKA Z NEVTRINI – POSKUS ICE CUBE

VERONIKA VODEB

Fakulteta za matematiko in fiziko  
Univerza v Ljubljani

V članku je predstavljen poskus Ice Cube, ki se izvaja na južnem polu in detektira nevtrine, ki na Zemljo prispejo iz vesolja. Najprej so na kratko predstavljeni zgodovina spoznavanja in nekaj splošnih lastnosti nevtrinov, nato pa so opisani princip delovanja, postopek konstrukcije ter pomembnejši izsledki eksperimenta Ice Cube. Na koncu so povzeti eksperimenti, ki se na to temo obetajo v prihodnosti.

## ASTROPHYSICS WITH NEUTRINOS – THE ICE CUBE EXPERIMENT

This article presents the Ice Cube experiment, that is being carried out on the south pole and is used for detection of neutrinos that arrive to Earth from space. First a short history of neutrino discovery is presented, followed by information about how the experiment works, describing the process of construction and going through the results of the experiment. At the end new experiments that are planned for the future in this field are described.

### 1. Uvod

Najprej si v uvodu odgovorimo na vprašanje, kakšna je sploh osnovna znanstvena motivacija za uporabo nevtrinov na področju astrofizike.

Z odkritjem elektrona (J. J. Thomson [1]) se je leta 1897 v fiziki začela nova doba – fizika osnovnih delcev. Kmalu so se pričela pojavljati vprašanja o tem, kateri delci poleg elektrona še sestavljajo atom. Z zmanjševanjem valovne dolžine oz. večanjem energije pri poskusih v trkalnikih je bila odkrita cela vrsta novih delcev, kar je pripeljalo do trenutno sprejetega standardnega modela fizike delcev. V njem osnovni gradniki med seboj interagirajo preko treh osnovnih sil: elektromagnetne, močne in šibke sile [2].

Med delci, natančneje fermioni, se nahaja vrsta delcev, o kateri je naše znanje še danes precej omejeno – to so nevtrini. Nevtrini so leptoni, kar pomeni, da ne sodelujejo pri močni interakciji in ker nimajo naboja, nanje prav tako ne deluje elektromagnetna sila. Interagirajo torej le preko šibke interakcije, kar pa dela eksperimentalne raziskave na področju nevtrinov izjemno zapletene. To je na eni strani težava, na drugi pa odpira možnosti za raziskovanje takšnih dogodkov v vesolju, ki jih z uporabo drugih delcev ne bi mogli proučevati. Ker nevtrini redko interagirajo s snovjo, lahko prepotujejo ogromne razdalje, ne da bi bistveno spremenili smer ali po poti reagirali. Z meritvijo energije nevtrinov na Zemlji in smeri, iz katere prihajajo, lahko torej izvemo pomembne informacije o njihovem izvoru. Po tem principu proučujemo dogodke iz vesolja, kot so eksplozivno zvezde, izbruhi sevanja gama in kataklizmični fenomeni. Zapletenost detekcije nevtrinov je razlog za izgradnjo ogromnih detektorjev, kot je Ice Cube, kateremu se bomo posvetili v jedru članka.

Odgovor na izhodiščno vprašanje je torej dvodelen – nevtrini so za področje astrofizike pomembni, ker:

- lahko prepotujejo velike kozmološke razdalje in
- lahko uidejo iz optično gostih izvorov.

### 2. Zgodovina odkrivanja in lastnosti nevtrinov ter sevanje Čerenkova

Posvetimo se sedaj fizikalnemu ozadju detekcije nevtrinov. Da bomo to lahko razumeli, moramo najprej izvedeti, kaj je znanstvenike spodbudilo k razmišljanju o obstoju nevtrina in katere so reakcije, preko katerih interagira s snovjo.

Kot že omenjeno - nevtrino je električno nevtralen elementaren subatomskega delec, ki šibko interagira, ima polovičen spin in je zato fermion. Nevtrino, katerega ime v italijanščini sicer pomeni "majhen nevtralen", označujemo z grško črko  $\nu$  (ni). Izsledki kažejo, da nevtrini sicer imajo maso, vendar je ta izjemno majhna celo po standardih za subatomske delce. Na nevtrine deluje šibka sila, ki ima znatno krajši doseg kot elektromagnetna sila in gravitacija. Vse omenjene značilnosti nevtrinu omogočajo, da večinoma nemoteno potuje skozi snov.

## 2.1 Odkritje nevtrina

V nasprotju z običajno prakso odkrivanja delcev je bil nevtrino najprej predpostavljen teoretično. Zgodovina nevtrina se je začela z raziskovanjem razpada  $\beta$ .

Po opaženih diskretnih spektrih  $\alpha$  in  $\gamma$  razpadov atomskih jeder je bilo odkritje zveznega energijskega spektra elektronov izsevanih pri razpadu beta (J. Chadwick [3]) presenečenje. Interpretacija tega rezultata se je razcepila v dve smeri: ena je predpostavljala primarne elektrone z zvezno energijsko porazdelitvijo (kar je zagovarjal predvsem C. D. Ellis [4]), druga pa je sklepala, da so posredi sekundarni procesi, ki razširijo v osnovi diskretno energijo elektrona (zagovornik L. Meitner). Da bi razrešili to vprašanje, so izvedli kalorimetrično meritev, katere rezultat bi bil ali povprečna energija elektrona (če ima prav C. D. Ellis) ali maksimalna energija (če je pravilna L. Meitnerjeva predpostavka). Razpad  $\beta$  danes opišemo z razpadom:

$$M(A, Z) \rightarrow D(A, Z + 1) + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (1)$$

kjer  $M(A, Z)$  predstavlja materinsko jedro in  $D(A, Z+1)$  hčerinsko jedro [2].

Meritev je podprla prvo razlago. Za pojasnitev novih opažanj sta nato obstajali dve rešitvi: ali je ohranitveni zakon za energijo v tem procesu veljaven le statistično (podprta s strani N. Bohra) ali pa je pri procesu izsevan dodatni delec, ki ga detektorji ne zaznajo in prevzame manjkajočo energijo in spin (podprta s strani W. Paulija). Obstajal je še en razlog, zakaj je Paulijev predlog o dodatnem delcu smiseln: ohranitev vrtilne količine. Pri razpadu beta je bilo opaženo, da v primeru, ko materinski atom nosi cel/polovičen spin, isti spin nosi tudi hčerinski atom, kar ni mogoče razložiti z emisijo elektrona samega. V znamenitem pismu napisanem 4. decembra 1930 [5] je Pauli predlagal rešitev za ta problem: novi delec, ki mu danes pravimo nevtrino, pri razpadu beta nastane skupaj z elektronom, vendar se izogne detekciji. Na ta način lahko razumemo zvezni spekter: elektron in nevtrino si razdelita energijo tako, da obveljata zakon o ohranitvi energije in zakon o ohranitvi gibalne količine. Prvi poskusi, ki so podprli ugibanja o nevtrinih, so sledili 20 let kasneje [2].

Nevtrino torej s snovjo interagira preko razpada  $\beta$ , kar si velja zapomniti za nadaljnje razumevanje.

## 2.2 Okus nevtrinov, problem solarnih nevtrinov in oscilacije

Leta 1962 so Leon M. Lederman, Melvin Schwartz in Jack Steinberger [8], s tem, ko so zaznali interakcije muonskega nevtrina, pokazali, da obstaja več kot en tip nevtrinov in si s tem leta 1988 prislužili Nobelovo nagrado za fiziko. Ko so leta 1975 v Stanfordu odkrili tretji tip leptonov – tau – so predvidevali, da ima tudi ta pripadajoči nevtrino – tau nevtrino. Prva detekcija interakcij tau nevtrina je bila objavljena poleti leta 2000<sup>1</sup>.

Omenimo na kratko še problem solarnih nevtrinov, ki sicer s samim razumevanjem delovanja detektorja Ice Cube nima neposredne povezave, je pa lep primer problema, ki ga s tovrstnimi detektorji lahko razrešimo.

V poznih 60. letih prejšnjega stoletja so številni eksperimenti (različni detektorji nevtrinov) pokazali, da je število elektronskih nevtrinov, ki prihajajo s Sonca, manjše od predpostavljenega

<sup>1</sup>S strani kolaboracije DONUT, Fermilab.

števila. To neujemanje je postalo znano kot problem solarnih nevtrinov in je ostalo nepojasnjeno približno naslednjih 30 let. Razrešeno je bilo z odkritjem nevtrinskih oscilacij in nevtrinske mase. Standardni model fizike delcev je predpostavil, da so nevtrini brez mase in ne morejo spreminjati okusov, medtem ko bi, če bi imeli maso, lahko spreminjali okuse oz. med njimi oscilirali. Z letom 1998 so tudi eksperimenti začeli kazati, da solarni in atmosferski nevtrini spreminjajo okuse, kar je dokončno razrešilo problem solarnih nevtrinov: elektronski nevtrini, ki nastajajo na Soncu, deloma spremenijo okus v takšnega, ki ga eksperiment ne more zaznati [2].

### 2.3 Nevtrini s supernov in začetek astronomije z nevtrini

Raymond Davis, Jr. in Masatoshi Koshiba sta bila leta 2002 skupaj nagrajena z Nobelovo nagrado iz fizike; Davis za svoje pionirsko delo na področju kozmičnih nevtrinov in Koshiba za prve opažene nevtrine s supernove. Detekcija solarnih nevtrinov in nevtrinov s supernove SN 1987A leta 1987 je zaznamovala začetek astronomije z nevtrini [2].

### 2.4 Sevanje Čerenkova

Za razumevanje delovanja detektorja, ki bo predstavljen v naslednjem poglavju, je potrebno poznavanje pojava, ki se imenuje sevanje Čerenkova. Sevanje Čerenkova je elektromagnetno valovanje, ki ga povzročajo nabiti delci ob potovanju skozi električni izolator s hitrostjo, ki je večja od hitrosti svetlobe v tej snovi. Pojav je leta 1934 prvi opazil Pavel Aleksejevič Čerenkov [10], v laboratoriju Sergeja Vavilova, ko je steklenico vode izpostavil radioaktivnemu sevanju in pri tem opazil soj modre svetlobe. Teorijo pojava Čerenkova sta leta 1937 razdelala Igor Tamm in Ilja Frank [9]. Za svoje odkritje in za izdelavo teorije so leta 1958 Čerenkov, Frank in Tamm prejeli Nobelovo nagrado.

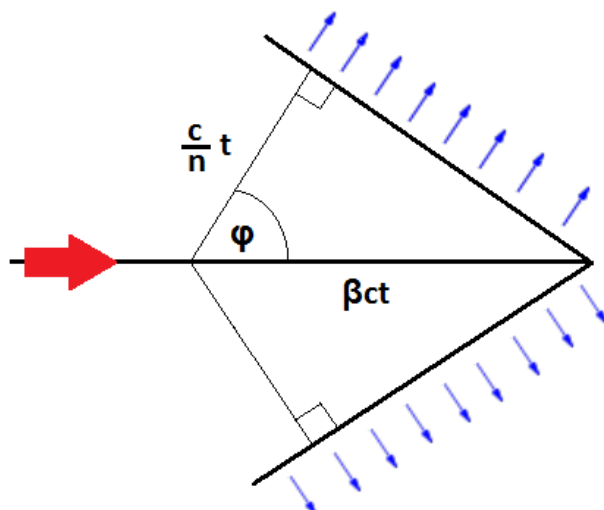
Čeprav je eden od privzetkov posebne teorije relativnosti, da je hitrost svetlobe v praznem prostoru osnovna fizikalna konstanta, pa se lahko hitrost svetlobe v snovi od te precej razlikuje. Delci snovi se lahko pospešijo prek te hitrosti v jedrski reakciji ali s pospeševalnikom. Sevanje Čerenkovega je izsevano elektromagnetno valovanje v vidnem ali ultravijoličnem delu spektra, do katerega pride, ko nabit delec na svoji poti skozi dielektrik preseže hitrost svetlobe v tej snovi.

Delec na svoji poti zmoti lokalno elektromagnetno polje v dielektriku. Potujoče elektromagnetno polje gibajočega se nabitega delca vpliva na elektrone v atomih snovi in jih polarizira. Ob vračanju elektronov v ravnovesne lege po prehodu delca ti izsevajo fotone<sup>2</sup>. Ti fotoni običajno med seboj destruktivno interferirajo, zato sevanja ne zaznamo [6]. Kadar pa motnja potuje hitreje kot fotoni, pa ti interferirajo konstruktivno, zato se opaženo sevanje ojači, kot lahko vidimo na sliki 1. Lahko pišemo:

$$\cos \varphi = (n\beta)^{-1}. \quad (2)$$

Z detektiranjem Čerenkovih fotonov (njihove intenzitete in smeri) lahko torej posredno zaznamo nabit delec, ki potuje skozi določeno snov. Z ustrezno postavitvijo detektorjev nam je omogočena celo rekonstrukcija tira tega delca, količina prejete svetlobe pa nosi informacije o njegovi energiji. Vse to je osnova zaznavanja nevtrinov v detektorju Ice Cube. Pri  $\beta^-$  razpadu na primer nevtrini interagirajo z nevtroni, ki se nahajajo v jedrih molekul vode oz. ledu in povzročijo nastanek protona ter emisijo elektrona, ki potuje skozi zelo čist led in Čerenkovo seva. Sevanje se ujame v fotopomnoževalke, obdelani podatki pa nam dajo rekonstrukcijo tira elektrona, ki se, če je njegova energija dovolj velika, zadovoljivo dobro ujema s smerjo začetnega nevtrina.

<sup>2</sup>V električnem prevodniku se prvotno lokalno elektromagnetno polje vzpostavi brez izsevanja fotonov.



**Slika 1.** Na sliki  $v$  označuje hitrost delca (rdeča puščica),  $\beta$  je razmerje med hitrostjo delca  $v$  in hitrostjo svetlobe  $c$ ,  $n$  pa je lomni količnik snovi. Modre puščice predstavljajo smer širjenja fotonov [6].

### 3. Poskus Ice Cube

Vemo že, da je Ice Cube detektor delcev na južnem polu (blizu postaje Amundsen-Scott), ki beleži interakcije nevtrinov. Je sicer največji detektor nevtrinov na svetu in išče nevtrine z najbolj divjih astrofizikalnih izvorov, kot so eksplodirajoče zvezde, izbruhi sevanja gama in kataklizmični fenomeni. Ice Cube teleskop je močno orodje za iskanje temne snovi in bi lahko razkril fizikalne procese povezane z izvori delcev z največjimi energijami v naravi. Poleg tega Ice Cube raziskuje ozadje nevtrinov, ki so nastali v atmosferi in študira nevtrine same; njihove energije so namreč daleč višje od energij nevtrinov nastalih v pospeševalnikih [11].

#### 3.1 Postavitev in sestava detektorja

Glavni del detektorja Ice Cube je zakopan pod površjem in se razširja do globine 2500 metrov. Shema detektorja je prikazana na sliki 2.

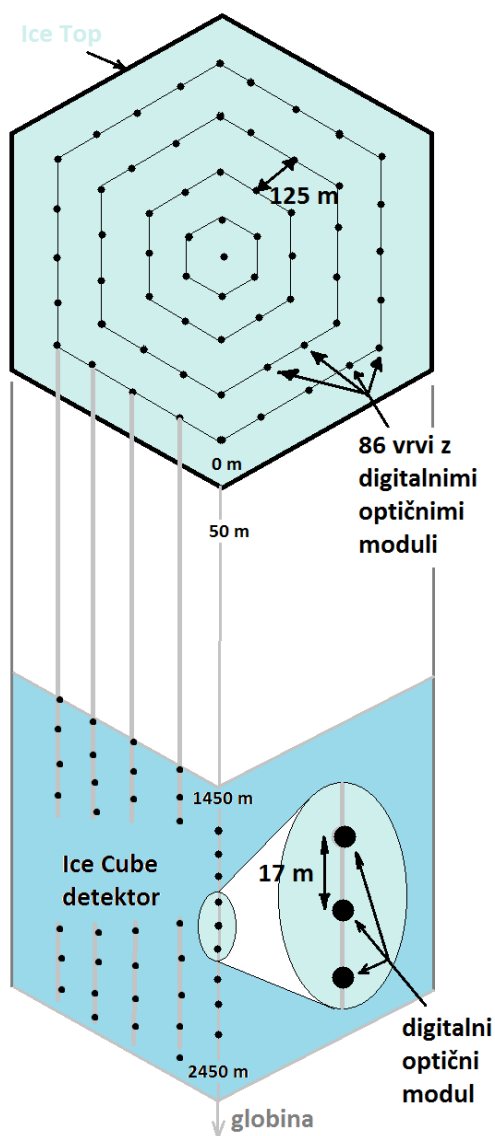
Glavno komponento eksperimenta, ki je skrita znotraj ledu, sestavlja 5160 digitalnih optičnih modulov (*podrobnejši opis delovanja v poglavju 3.2*), od katerih ima vsak 25 centimetrov veliko fotopomnoževalno cev in pripadajočo elektroniko. Optični moduli so pritrjeni na vertikalne vrvi, zamrznjeni v 86 vrtin in zbrani na več kot kubičen kilometer velikem območju na globini med 1450 in 2450 metrov. Vrvi so nameščene v heksagonalni mreži z medsebojno razdaljo 125 metrov in držijo vsaka po 60 optičnih modulov. Ti so med seboj v vertikalni smeri oddaljeni 17 metrov [11].

Osem izmed vrvi v centru zbirke je bilo nameščenih bolj kompaktno, in sicer je horizontalno med njimi 70 metrov, vertikalno pa med posameznimi moduli le 7 metrov. Ta gostejša konfiguracija predstavlja DeepCore subdetektor, ki zniža energijski prag detektiranih nevtrinov na približno 10 GeV in s tem ustvarja možnost za študij nevtrinskih oscilacij [11].

IceTop sestavlja 81 postaj, ki so locirane na vrhu istega števila vrvi. Vsaka postaja ima dve cisterni in vsaka od teh je opremljena z dvema navzdol gledajočima optičnima moduloma. Ta del eksperimenta je zasnovan kot kalibracijski detektor in zaznava tudi delce v energijskem območju med 300 TeV in 1 EeV [11].

Razvoj astronomije z nevtrini je bil v glavnem usmerjen v iskanje izvorov kozmičnih sevanj, kar je pripeljalo do zgodnje faze koncepta velikega nevtrinskega detektorja. AMANDA<sup>3</sup>, antarktični

<sup>3</sup>The Antarctic Muon And Neutrino Detector Array; manjši predhodnjik detektorja Ice Cube, ki je deloval do maja



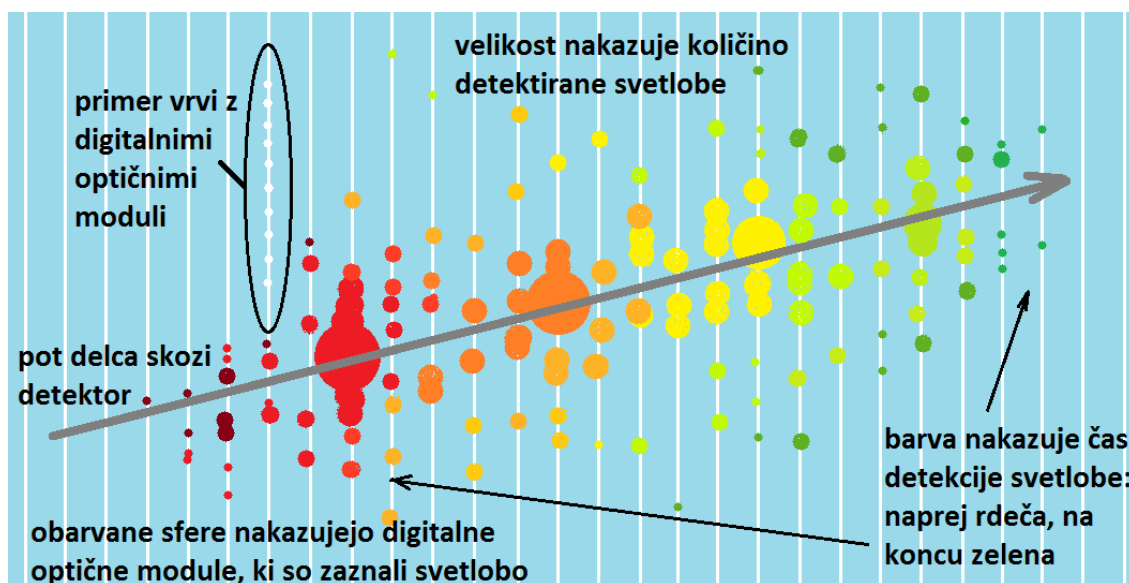
Slika 2. Shema detektorja Ice Cube z oznakami bistvenih dimenzij [11]

detektor mionov in nevtrinov, nadgradnja katerega je Ice Cube, je pokazal, da je ekstremno čist antarktični led primeren za detektiranje visoko energijskih nevtrinov [11].

Kot že rečeno, nevtrini niso zaznani neposredno, pač pa pri reagiranju z ledom proizvedejo električno nabite sekundarne delce, ki kot rezultat potovanja skozi led hitreje od svetlobe sevajo Čerenkovo svetlobo. Senzorji nato zberejo to svetlobo ter jo kasneje digitalizirajo in časovno označijo. Ta informacija je poslana računalnikom v laboratoriju na površju, ki konvertirajo sporočila iz individualnih optičnih modulov v vzorce svetlobe. Ti razkrijejo smer in energijo nabitih delcev in posredno nevtrinov, kar lahko vidimo na sliki 3.

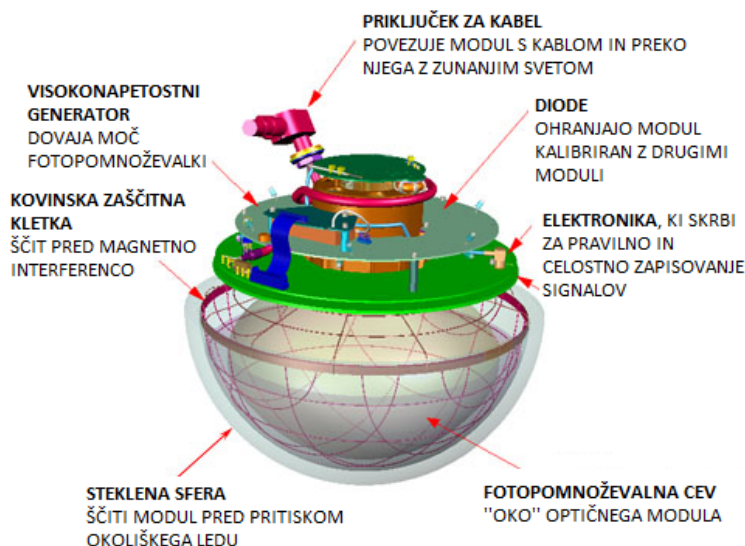
### 3.2 Sestava digitalnega optičnega modula in delovanje fotopomnoževalke

V zadnjih letih je bilo izdelanih več kot 3500 optičnih modulov za projekt Ice Cube. Shema optičnega modula je prikazana na sliki 4. Vsak optični modul s premerom 330 mm vsebuje fotopomnoževalno cev in osnovno ploščo s tiskanim vezjem, ki sta v jasni stekleni polobli potopljeni v optično prozornem silikonskem gelu. Zgornja polobla vsebuje povezavo z zunanjim svetom, preko katere z modulom



**Slika 3.** Kako deluje detektor Ice Cube. Ko nevtrino interagira z antarktičnim ledom, ustvari druge delce. V primeru, ki je prikazan na ilustraciji, je bil ustvarjen mion, ki je skozi detektor potoval s skoraj svetlobno hitrostjo. Vzorec in količina svetlobe, ki jo senzorji zaznajo, nam pokažeta smer in energijo delca. Del optičnih modulov je prikazanih z belo piko. Obarvane krogle kažejo senzorje, ki so zaznali svetlobo, velikost krogle pa nakazuje njeno količino. Barva nam pove čas prihoda: na začetku je rdeča, na koncu zelena. Tipičen čas, ki mine znotraj prehoda od rdeče do zelene barve je nekaj nanosekund [12].

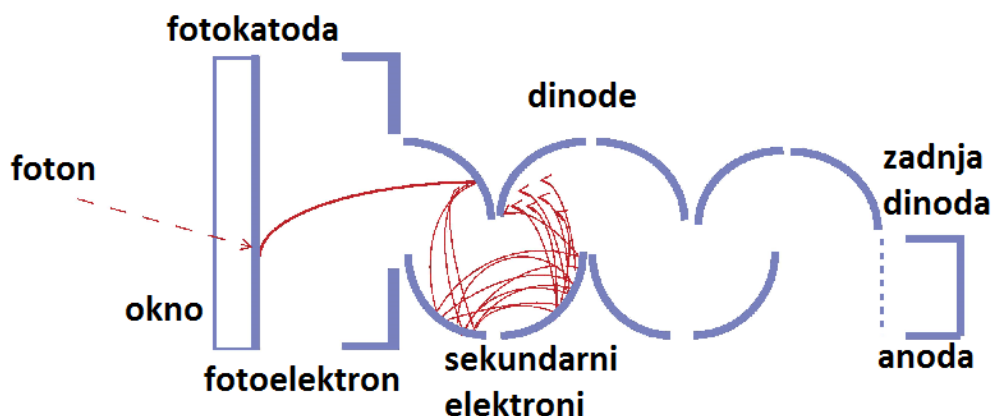
interagirajo izvor napajanja in elektronske komande s površja. Moduli so zamrznjeni v ledu v veliki globini tako, da fotopomnoževalne cevi gledajo proti središču Zemlje. Zaradi neprijaznih razmer, v katerih bodo morali moduli delovati, gre vsak modul skozi obsežno testiranje kakovosti, ki med drugim vključuje tudi šest tedensko zamrznitev v posebej oblikovanem zamrzovalniku pri  $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Slika 4.** Zgradba digitalnega optičnega modula [15]

Opišimo na kratko še delovanje fotopomnoževalne cevi. Fotopomnoževalke temeljijo na fotoelektričnem pojavu. Naprava sestoji iz kovinskih elementov – dinod, ter iz anode in katode. Katoda je negativno naelektrena in tako se ob vpadu fotona sprosti elektron, ki zaradi močnega električnega polja z veliko hitrostjo poleti proti anodi. Ta elektron se nato zaleti v najbližjo dinodo in, ker ima veliko energijo, povzroči, da se iz dinode sprostita dva elektrona. Ta se nato zaletita v naslednjo

dinodo in to povzroči plazovno naraščanje toka, kar se brez težav zazna. Spektralna občutljivost je odvisna od fotokatode. Da lahko dosežemo plazovni pojav, mora biti med elektrodama napetost več kV [7]. Shemo delovanja fotopomnoževalke vidimo na sliki 5.



Slika 5. Shema fotopomnoževalke [7]

## 4. Raziskovalni izsledki

### 4.1 Astrofizika z nevtrini

IceCube je bil zgrajen za iskanje zelo visoko energijskih nevtrinov, ki nastajajo v najbolj ekstremnih kozmičnih okoljih. Prvi astrofizikalni visoko-energijski nevtrinski tok so opazili po analizi triletnih podatkov (2010-2013). V tej raziskavi so odkrili tri nevtrinske dogodke z energijami nekaj PeV. To so najbolj visoko-energijski nevtrini, kar so jih kadarkoli zaznali [12].

Vsak izmed treh okusov nevtrinov  $\nu_e$ ,  $\nu_\mu$  in  $\nu_\tau$  ima specifično sled v detektorju. Približno 80 % energije nevtrina  $\nu_\mu$  gre v energijo miona, ki v detektorju pusti dolgo sled. Ti dogodki imajo zelo dobro določeno kotno resolucijo, vendar pa imajo, ker lahko mion energijo v detektor tako prinese kot iz njega tudi odnese, omejeno energijsko resolucijo. Tau nevtrino  $\nu_\tau$  z energijo nad 1 PeV v detektorju pusti značilno sled z dvema izrazitejšima izbruhoma Čerenkovega sevanja - edega, ko nevtrino tau interagira in drugega približno 100 metrov stran, ko razpade delec  $\tau$ . Pri nižjih energijah lahko  $\nu_\tau$  povzroči sled z dvema pulzoma tako, da svetloba zadane iste optične module, vendar ob drugačnih časih. Elektronski nevtrino  $\nu_e$  pusti sled, ki je podobna tisti, ki bi jo pustil točkasti izvor svetlobe. Detektor lahko natančno izmeri energijo teh dogodkov, vendar je kotna določenost veliko slabša [13].

Iskanje zelo visoko energijskih nevtrinov je prvotno namenjeno odkrivanju izvorov kozmičnih žarkov in njihove narave. Ducat astrofizikalnih nevtrinov, ki so jih do sedaj opazili, nam ne dovoljuje, da identificiramo katerikoli individualni vir. Visoko-energijski nevtrini, ki so unikatni prstni odtisi hadronskih pospeševalnikov, tako predstavljajo potencial za odkrivanje novih izvorov ali novih pogledov na proizvajanje energije v znanih izvorih.

## 5. Prihodnost in nadaljnje raziskave

Ice Cube je izjemno uspešen detektor. Upravljanje s tem detektorjem se je izkazalo za dobro popotnico pri načrtovanju še bolj optimiziranih in učinkovitih detektorjev naslednje generacije.

Eden takšnih je poimenovan IceCube-Gen2 in je osnovan na robustni obliki trenutnega detektorja. Cilj novega observatorija je pridobiti bistvene vzorce zelo visoko energijskih astrofizikalnih nevtrinov (z energijo med redoma PeV in EeV) in zaznati na stotine nevtrinov vseh okusov z energijami nad 100 TeV. To bo omogočilo podrobne spektralne študije, bistvene detekcije točkastih izvorov in druga nova odkritja [14].

Unikatne lastnosti antarktičnega ledu, ki sta jih razkrila konstrukcija in upravljanje z detektorjem Ice Cube, dovoljujejo povečanje razdalje med svetlobnimi senzorji do 250 metrov namesto trenutnih 125 metrov (Ice Cube). Namestitev senzorjev na vrvi, med katerimi bodo večje razdalje, bo omogočilo hitro večanje volumna detekcije z nižjimi stroški izgradnje. V grobem bo količina instrumentov podvojena, teleskop pa bo dosegel desetkratni volumen - približno 10 kubičnih kilometrov. Manjše spremembe v konstrukciji bodo sicer zadevale izboljšave na področju modernizacije, učinkovitosti in nižanja stroškov [14].

Člani pred kratkim ustanovljene kolaboracije IceCube-Gen2 delajo na razvoju podrobnega načrta, ki bo vključeval tudi odsek PINGU<sup>4</sup>. Projekt PINGU cilja na natančne meritve atmosferskih oscilacijskih parametrov in določenosti masne hierarhije nevtrinov, kot tudi iskanje temne snovi. Za doseg tega cilja bodo znanstveniki v središče detektorja Ice Cube namestili še 40 dodatnih vrvi z optičnimi moduli. PINGU je zastavljen kot podaljšek Ice Cube observatorija in bo presegel največji svetovni učinkoviti volumen za detektiranje nevtrinov pri energijah nekaj GeV. To mu bo omogočalo, da doseže svoj poglavitni cilj – določitev nevtrinske masne hierarhije – hitro in s skromnimi stroški [14].

## 6. Zaključek

Nevtrini nam torej omogočajo opazovanje pojavov, ki jih z drugimi detektorji ne bi mogli proučevati. Meritve pretoka, energijskega spektra ter kotne in časovne porazdelitve visoko-energijskih nevtrinov predstavljajo temelje opazovanja vesolja. Z izgradnjo uspešnega detektorja Ice Cube je znanost dobila pomembne informacije o naravi nevtrinov in delovanju vesolja. Še bolj poglobljeno raziskovanje vesolja z nevtrini zahteva Ice Cube detektor naslednje generacije - IceCube-Gen2. Ta detektor bo priskrbel pomemben vpogled v vesolje visokih energij in prenesel astrofiziko z nevtrini na nov nivo odkritij. Astronomija nevtrinov bo le ena izmed tem v bogatem znanstvenem programu nevtrinskih observatorijev naslednje generacije. Na področju študija lastnosti kozmičnih žarkov in iskanja sledi fizike nevtrinov izven standardnega modela bodo ti detektorji ostali glavni raziskovalni instrumenti fizike in astrofizike.

## LITERATURA

- [1] J. J. Thomson, *Cathode Rays*, Philosophical Magazine **44** (1897), 293.
- [2] K. Zuber, *Neutrino Physics: Series in High Energy Physics, Cosmology and Gravitation*, Bristol: IOP Publishing (2004), ISBN 0 7503 0750 1.
- [3] J. Chadwick, *Intensitätsverteilung im magnetischen Spectrum der  $\beta$ -Strahlen von radium B + C*, Verhandl. Dtsch. Phys. Ges. **16** (1914), 383.
- [4] J. Chadwick, C. D. Ellis, *A Preliminary Investigation of the Intensity Distribution in the  $\beta$ -Ray Spectra of Radium B and C*, Proceedings of the Cambridge Philosophical Society **21** (1922), 274-280.
- [5] W. Pauli, *'letter to a physicists' gathering at Tübingen, December 4, 1930*, reprinted in Wolfgang Pauli, *Collected Scientific Papers*, ed. R. Kronig and V. Weisskopf, **2** (1978), 1313.
- [6] J. Strnad, *Fizika, 3. del. Posebna teorija relativnosti. Kvantna mehanika. Atomi*, DMFA - založništvo (2009), ISBN 978 961 212 132 7.
- [7] Spletni naslov: <http://www.et-enterprises.com/photomultipliers/>, dostopno dne 7. 9. 2016.
- [8] G. Danby, J. M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz, J. Steinberger, *Observation of high-energy neutrino reactions and the existence of two kinds of neutrinos*, Physical Review Letters, **9(1)** (1962), 36.

<sup>4</sup>Precision IceCube Next Generation Upgrade



- [9] I. Frank, I. Tamm, *Coherent visible radiation from fast electrons passing through matter*, CR Acad. Sci. USSR **14** (1937), 109-114.
- [10] P. A. Cherenkov, *Visible emission of clean liquids by action of  $\gamma$  radiation*, Doklady Akademii Nauk SSSR **2** (1934), 451.
- [11] Karle, Albrecht, et al. *IceCube—the next generation neutrino telescope at the South Pole*, Nuclear Physics B-Proceedings Supplements **118** (2003), 388-395.
- [12] IceCube Collaboration, *Evidence for high-energy extraterrestrial neutrinos at the IceCube detector*, Science **342(6161)** (2013), 1242856.
- [13] J. Ahrens, et al. *Sensitivity of the IceCube detector to astrophysical sources of high energy muon neutrinos*, Astroparticle physics **20(5)** (2004), 507-532.
- [14] Aartsen, M. G., et al, *IceCube-Gen2: a vision for the future of neutrino astronomy in Antarctica*, arXiv: **1412.5106** (2014).
- [15] Spletni naslov: <http://astroleaks.lamost.org/>, dostopno dne 5. 5. 2016.