

Neutrinske oscilacije i eksperiment OPERA

Arena, Aldo

Undergraduate thesis / Završni rad

2019

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **University of Rijeka / Sveučilište u Rijeci**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:194:882872>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-01-14**



Repository / Repozitorij:

[Repository of the University of Rijeka, Faculty of Physics - PHYRI Repository](#)



Sveučilište u Rijeci
Odjel za fiziku
Preddiplomski studij fizike

Završni rad

Neutrinske oscilacije i eksperiment OPERA



Mentor:

doc. dr. sc. Saša Mićanović

Student:

Aldo Arena

Rijeka, 20. rujna 2019.

Sadržaj

1	Uvod	1
2	Neutrino i neutrinske oscilacije	2
2.1	Standardni model	2
2.2	Neutrini	4
2.3	Problem solarnih i atmosferskih neutrina	7
2.4	Neutrinske oscilacije	9
3	Ekperiment OPERA	12
3.1	CNGS snop	13
3.2	ECC detektor	16
3.2.1	Film nuklearne emulzije	17
3.2.2	Slaganje cigle	18
3.3	VETO sustav	19
3.4	Magnetski spektrometar	20
3.4.1	Magneti	20
3.4.2	RPC/XPC sustav	21
3.4.3	Driftne cijevi (PT)	21
3.5	Rezultati eksperimenta	22
4	Zaključak	24

Sažetak

Neutrini su elementarne neutralne čestice koje jako slabo interagiraju s materijom. Iako su teoretizirani 1930. godine, "skrivali" su svoje detekcije u eksperimentima do druge polovice 20. stoljeća. Pokazalo se da se neutrini razlikuju po 3 okusa (vrste): elektronski, mionski i tau. Razna istraživanja pokazala su značajan nedostatak toka neutrina iz Sunca i atmosfere, što je postalo poznato kao problem solarnih i atmosferskih neutrina. Taj problem je doveo do proširenja kvantno mehaničke teorije, Standardnog modela, uključivši neutrinske oscilacije, to jest da neutrini mijenjaju svoj okus.

Kako bi se dobilo osnovno znanje o neutrinima i njihovim oscilacijama, u ovom radu će se proći kroz nekoliko tema. Na početku prezentirat će se Standardni model elementarnih čestica i gdje su u njemu smješteni neutrini. Pričat će se o povijesti ove čestice i proći će se kroz značajne eksperimente koji su doveli do današnjeg znanja o neutrinima. Također, što se tiče oscilacija, predstaviti će se spomenuti problem solarnih i atmosferskih neutrina te analizirati eksperimenti koji su prva opazili manjak toka. Za bolje razumijevanje predstaviti će se osnovne točke teorije, matrica miješanja te će se izračunati i grafički prikazati vjerojatnost dvookusne oscilacije. Na drugom dijelu rada detaljnije će se opisati eksperiment OPERA u laboratoriju Gran Sasso (LNGS), koji je prvi opazio "pojavljivanje" oscilacija iz mionskih u tau neutrine.

1 Uvod

Tema ovog rada odabrana je na temelju mog interesa za neutrine i neutrinske oscilacije koji sam izgradio tijekom svog fakultetskog obrazovanja. Eksperiment OPERA (*"Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus"*) kojeg sam analizirao i opisao u ovom radu, se izvodio u regiji Abruzzo u Italiji gdje sam odrastao. Budući da ovo područje istraživanja nije potpuno istraženo, a broj istraživanja svakim danom raste, odlučio sam se za ovu temu. S obzirom na to da se otkrićem neutrinskih oscilacija ustanovilo da neutrini imaju masu i da su svojstvena stanja okusa (slabe interakcije) u biti superpozicija masenih stanja, što jako dugo nije bilo integrirano u Standardnom modelu elementarnih čestica, i dan danas je potrebno dalje istraživati ovo područje za potpuno razumijevanje fenomena. Rezultati istraživanja neutrinskih oscilacija ukazali su na potrebu promjena tadašnje teorije elementarnih čestica te su jedni od najbitnijih za napredak ovog područja fizike. Vjerujem da će ovaj rad biti dobra osnova za ono čime se želim baviti u nastavku obrazovanja, ali i kasnije u životu.

2 Neutrino i neutrinske oscilacije

2.1 Standardni model

Elementarne čestice i njihove interakcije su opisane kvantnom teorijom polja koju nazivamo Standardni model (SM) koji uspješno opisuje rezultate dobivene iz eksperimenata i jedan je od glavnih temelja današnje moderne fizike.

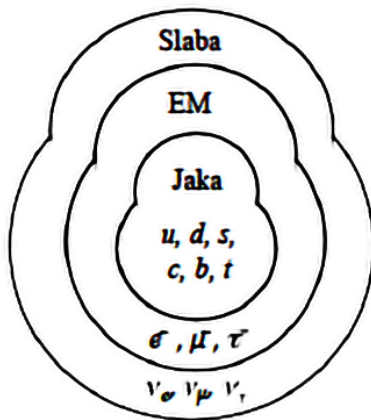
Atomi su vezana stanja negativno nabijenih elektrona (e^-) i jezgre sastavljene od pozitivno nabijenih protona (p) i nenabijenih neutrona (n). Elektroni i jezgra su vezani preko elektromagnetske sile. Protoni i neutroni su vezani jakom nuklearnom silom. Dok su elektroni elementarne čestice, protoni i neutroni sastavljeni su od *up* i *down* kvarkova koji su također elementarne čestice. Treća fundamentalna interakcija je preko slabe sile kojom se objašnjavaju nuklearni raspadi nestabilnih izotopa (β -raspadi) i nuklearna fuzija u Suncu. U oba slučaja kao produkti interakcija stvaraju se elektronski neutriini (ν_e). U Standardnom modelu elektronski neutrino je opisan kao bezmasena nenabijena elementarna čestica koja međudjeluje samo slabom silom. Ove spomenute čestice (e^- , *up*-kvark, *down*-kvark i ν_e), zajedno sa svojim antičesticama, imaju polucjelobrojni spin tako da pripadaju prvoj generaciji elementarnih *fermiona*. Kao što je prikazano u Tablici 1, ukupno razlikuje se tri generacije fermiona kojima se mase povećavaju kako idemo od prve do treće generacije.

Tablica 1: Elementarni fermioni grupirani po generacijama [1].

Generacija	Leptoni				Kvarkovi		
	Čestica		Naboj/e	Masa/GeV	Čestica	Naboj/e	Masa/GeV
Prva	elektron	(e^-)	-1	0,0005	<i>down</i> (d)	-1/3	0,003
	elektronski neutrino	(ν_e)	0	$< 10^{-9}$	<i>up</i> (u)	2/3	0,005
Druga	mion	(μ^-)	-1	0,106	<i>strange</i> (s)	-1/3	0,1
	mionski neutrino	(ν_μ)	0	$< 10^{-9}$	<i>charm</i> (c)	2/3	1,3
Treća	tau	(τ^-)	-1	1,78	<i>botton</i> (b)	-1/3	4,5
	tau neutrino	(ν_τ)	0	$< 10^{-9}$	<i>top</i> (t)	2/3	174

Kao što je prikazano u Tablici 1, postoje dvije glavne skupine fermiona: leptoni i kvarkovi. Glavna razlika između ove dvije vrste čestica su njihove interakcije. Prikazano je na Slici 1

kako su podijeljene čestice na odnosu interakcije: kvarkovi (u, d, s, c, b, t) interagiraju jakim, elektromagnetskom (EM) i slabom silom, električki nabijeni leptoni (e^-, μ^-, τ^-) ne interagiraju jakim silom, a neutralni leptoni (neutrini: ν_e, ν_μ, ν_τ) interagiraju samo slabom interakcijom.



Slika 1: Fermioni grupirani po interakcijama [2].

Kao što je već spomenuto, u prirodi postoje 4 fundamentalne sile kojima čestice međusobno interagiraju: gravitacija, elektromagnetska, jaka i slaba sila. Na Slici 1 zanemarena je gravitacijska sila jer je gravitacijska interakcija između dvije elementarne čestice jako slaba na odnosu ostale tri fundamentalne sile. Ove interakcije često se događaju "bez vidljivog dodira tijela" i, u klasičnoj fizici, je dovoljno samo postojanje polja da se sila "magično" prenese s jedne na drugu česticu. Međutim, u kvantnoj teoriji polja (QFT) prijenosnici ovih sila su čestice cjelobrojnog spina zvane (*baždarni*) *bozoni*. U Tablici 2 su prikazane sile i pripadajući bozoni. Nositelji jake sile, gluoni, i elektromagnetske sile, foton, pripadaju skupini bezmasenih čestica spina 1 (vektorski bozoni). Za slabu silu imamo dvije vrste interakcije: nabijenu ("charged-current", CC) i neutralnu ("neutral-current", NC); za CC medijatori sile su W^\pm bozoni, dok za NC interakcije je nositelj električni neutralan Z bozon. Što se tiče gravitacije, pretpostavlja se da je njen nositelj graviton (bozon spina 2), međutim još uvijek ne postoje eksperimentalni dokazi koje bi jednoznačno potvrdili njegovo postojanje.

Tablica 2: 4 fundamentalne sile i pripadajućih bozoni. Kostante jakosti sila su aproksimirane za dvije elementarne čestice na udaljenosti od 10^{-15} m (otprilike radius protona) [1].

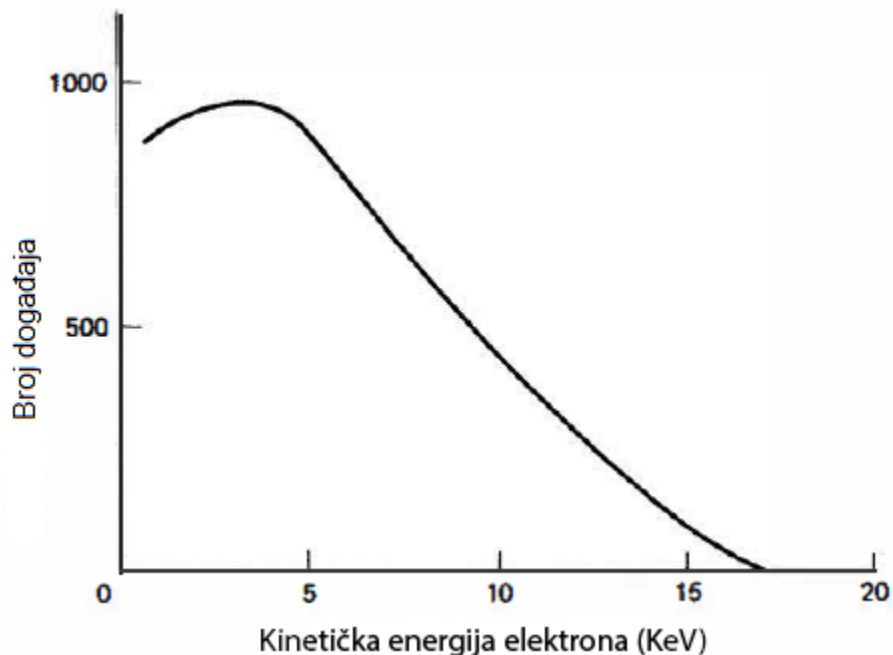
Sila	Snaga	Bozon	Spin	Masa/GeV
Jaka	1	Gluon g	1	0
Elektromagnetska	10^{-3}	Foton γ	1	0
Slaba	10^{-8}	W bozon W^\pm	1	80,4
		Z bozon Z	1	91,2
Gravitacijska	10^{-37}	Graviton(?) G	2	0

2.2 Neutrini

Nakon otkrića nuklearnog β -raspada (E. Rutherford, 1899.) i snimanja spektra β -zračenja (J. Chadwick, 1914.), došlo je do problema u vidu narušenja zakona očuvanja energije i impulsa zbog toga što je snimljeni energijski spektar elektrona kontinuiran (Slika 2). Očekivalo se da elektron proizveden u β -raspadu ima diskretan spektar približne vrijednosti kinetičke energije $Q = [(M_{A,Z} - M_{A,Z+1}) - m_e]^1$ [3], ali iz eksperimenata su dobivene kontinuirane vrijednosti energije približno do iznosa Q . Jedno objašnjenje je bilo da elektron tijekom raspada gubi (predaje sustavu) energiju ili kao što je N. Bohr zaključio, da zakon očuvanja energije ne vrijedi.

C. D. Ellis i W. A. Wooster 1927. godine napravili su kalorimetrijski eksperiment za β -raspad u kojem su dobili da je energija elektrona (E_{e^-}) po raspadu približno jednaka prosječnoj energiji cijelog spektra (Slika 2). To je značilo da je E_{e^-} samo dio spektra pa je 1930. godine W. Pauli postavio hipotezu da zakoni očuvanja energije i impulsa vrijede: u β -raspadu se zajedno s elektronom mora emitirati druga, neutralna čestica koja do tada nije detektirana u eksperimentima. Znanstvena zajednica je bila skeptična prema ideji nove čestice sve dok 1934. E. Fermi nije izgradio novu teoriju o β -raspadu u koju je uključio Paulijevu česticu pa se njegova hipoteza počela shvaćati ozbiljnije. Izgrađena teorija polazi

¹U ovom radu korištene su prirodne jedinice (na primjer $c = \hbar = 1$) osim ako nisu eksplicitno prikazane za bolje razumijevanje koncepata.



Slika 2: Spektar β -raspada tricija (${}^3_1H \rightarrow {}^3_2He$) [4].

od pretpostavke da je nuklearna jezgra sastavljena od vezanog stanja protona i neutrona². A analogno kao elektron emitira foton, Fermi je pretpostavio da se u β -raspadu emitira par $e^- - \nu$ prilikom kvantne tranzicije neutrona u proton³



Prema eksperimentalno dostignutim vrijednostima energije elektrona snimane, ova nova neutralna čestica mora biti jako male mase te ju je Fermi nazvao *neutrino* (iz talijanskog jezika “malo neutralno“).

Prvi dokaz o postojanju neutrina dobio se iz eksperimenata F. Reinesa i C. L. Cowana⁴ između 1953. i 1959. godine. U tim eksperimentima antineutrini ($\bar{\nu}$) iz *Savannah River* reaktora, SAD, su bili detektirani opažanjem procesa



²1932. J. Chadwick je otkrio neutron, nenabijenu česticu približne mase protona.

³Danas znamo da se zapravo emitira antineutrino.

⁴Reines i Cowan su prvotno planirali eksperiment s neutrinima odraditi s eksplozijom atomske bombe, ali su se kasnije predomislili i zaključili da je reaktorski eksperiment s antineutrinima jednostavniji i lakše izvediv.

Antineutrini dolaze iz β -raspada jezgara bogatih neutronima (iz fisije uranija i plutonija). Energija reaktorskih $\bar{\nu}$ je $\lesssim 10$ MeV. Tok antineutrina u eksperimentu bio je oko 10^{13} cm^2s^{-1} , dok su iz reaktora bili emitirani u količini od $2,3 \times 10^{20}$ s^{-1} . Koristili su tekući scintilator (spremnik od $1,3$ m^3 punjen s CdCl_2) kao metu kako bi pozitron (e^+) iz procesa (2.2) u sudaru s elektronom proizveo 2 γ -zrake energije $\simeq 0,51$ MeV i suprotnih impulsa.

1962. godine eksperiment Brookhaven⁵ je prvi dokazao postojanje mionskog neutrina⁶. To je prvi akceleratori eksperiment s neutrinima i smišljen je na način da gađanjem mete (Be) protonima energije od 15 MeV se producira snop piona (π^+). Kroz 21 m dug put praktično svi π^+ bi se raspali

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu, \quad (2.3)$$

pa apsorpcijom nabijenih čestica iz snopa kroz 13,5 m željeza, snop dolazi do detektora neutrina (aluminijaska komora mase 10^4 kg). Interakcijom snopa ν_μ s detektorom proučavale su se nabijene čestice iz procesa

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + X. \quad (2.4)$$

Nakon otkrića trećeg leptona τ^\pm u eksperimentima između 1975. i 1977. godine u e^+e^- sudarivaču u Stanfordu, SAD, prvi eksperiment koji je opažao ν_τ bio je DONUT u Fermilabu 2000. godine. Korišćući nuklearne emulzije, detektirali su τ čestice iz interakcije $\nu_\tau + (A,Z) \rightarrow \tau + \dots$.

Kao što se može vidjeti iz ovih eksperimenata, postoje 3 okusa neutrina koje razlikujemo

Tablica 3: Leptoni i njihove antičestice.

Leptonski broj	Čestice						Antičestice					
	e^-	ν_e	μ^-	ν_μ	τ^-	ν_τ	e^+	$\bar{\nu}_e$	μ^+	$\bar{\nu}_\mu$	τ^+	$\bar{\nu}_\tau$
L_e	1	1	0	0	0	0	-1	-1	0	0	0	0
L_μ	0	0	1	1	0	0	0	0	-1	-1	0	0
L_τ	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	-1	-1

prema proizvedenim leptonima u njihovoj slaboj interakciji. Svaki okus neutrina ima svoju

⁵Brookhaven National Laboratory (BNL), Upton, New York, SAD.

⁶L.M. Lederman, M. Schwartz, J. Steinberger et al., Nobelova nagrada za fiziku 1988.

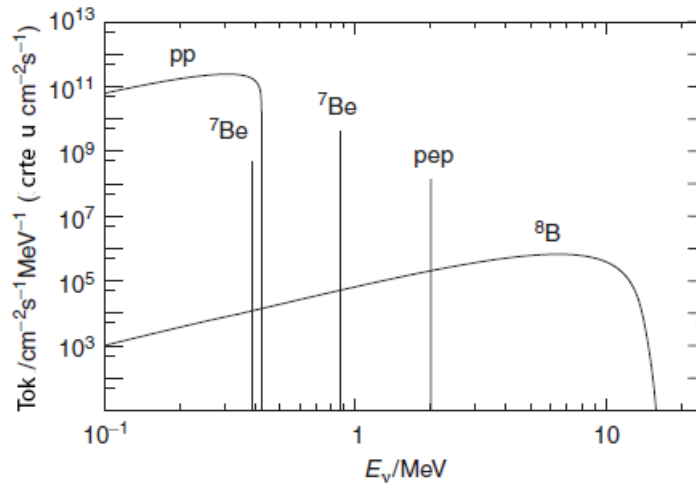
antičesticu, antineutrino, koja ima leptonski broj suprotnog preznaka. U Tablici 3 su prikazani leptoni i njihove antičestice.

2.3 Problem solarnih i atmosferskih neutrina

Nuklearne fuzije u Suncu stvaraju veliki tok elektronskih neutrina, $2 \times 10^{38} s^{-1}$. Bez obzira na jako mali udarni presjek i velike udaljenosti od Sunca, solarni neutrina mogu se detektirati dovoljnom masivnim detektorima. Veliki dio toka ν_e dolazi iz niza proton-proton (pp niz), nuklearne fuzije vodika u helij:



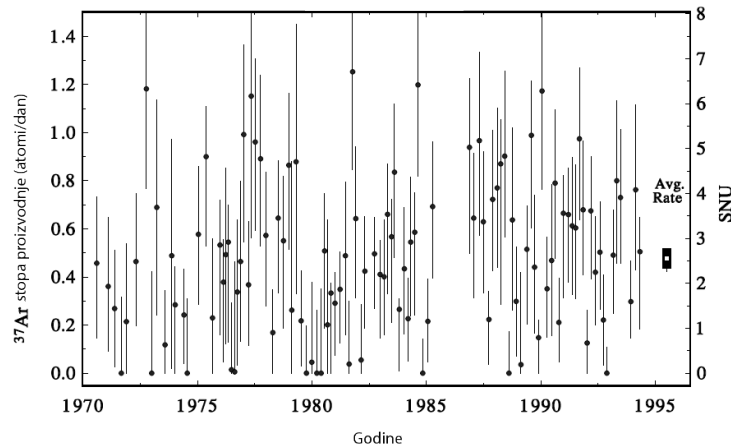
Neutrina iz (2.5) su jako male energije ($E_{\nu_e} < 0,5$ MeV) zbog jako male energije veze deuterija ${}^2_1\text{D}$ (2,2 MeV) pa ih je zbog toga teško za detektirati. Zbog ovog razloga većina eksperimenata promatra više energetske neutrina iz drugih rjeđih procesa. Najenergetskiji ν_e iz Sunca dolaze iz β -raspada bora (${}^8_5\text{B} \rightarrow {}^8_4\text{Be} + e^+ + \nu_e$) gdje dosežu energije do 15 MeV.



Slika 3: Tok solarnih neutrina iz glavnih solarnih procesa [1].

Prvi eksperiment za opažanje solarnih neutrina se provodio 1970. u Homestake Mine u

South Dakota, SAD, koristeći radiokemijsku metodu opažanja putem inverznog β -raspada, $\nu_e + {}^{37}_{17}\text{Cl} \rightarrow {}^{37}_{18}\text{Ar} + e^-$. Za detekciju se koristio 380 m³ velik tank napunjen sredstvom za čišćenje, perkloretilen, Cl₂C=CCL₂, 1500 m pod zemljom. Iako veliki tok neutrina stiže iz Sunca, očekivalo se 1,7 interakcija/dan, a opaženi tok je bio $0,48 \pm 0,04$ interakcija/dan (Slika 4). Ovaj deficit je postao poznat kao problem solarnih neutrina. Drugi slični eksperimenti⁷ su provedeni s osjetljivošću na manje energetske neutrine iz pp niza i opažen je isti problem. Iako su radiokemijski eksperimenti bili značajni za otkriće manjka toka solarnih neutrina⁸, eksperimenti koji su koristili Čerenkovljevo zračenje za detekciju su dali definitivni dokaz deficita.



Slika 4: Prikaz ukupnih rezultata Homestake eksperimenta. SNU na desnoj vertikalnoj osi označava *Solar Neutrino Unit* [5].

Prvi definitivni dokaz za neutrinske oscilacije dobiven je iz atmosferskih neutrina iz Super-Kamiokande (SK) eksperimenta 1998. godine. Veliki tok visoko-energijskih kozmičkih zraka (većinom protona) interagira s jezgrama kisika ili dušika u atmosferi gdje se produciraju nabijeni pioni. Iz raspada $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + \nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ i nakon toga⁹ iz mionskog raspada $\mu^\pm \rightarrow e^\pm + \nu_e/\bar{\nu}_e + \nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$ dobijemo takozvane *atmosferske neutrine*. Neutrini mogu proći kroz Zemlju tako da ih je moguće detektirati s druge Zemlje. Iz procesa stvaranja atmosferskih

⁷SAGE i GALLEX eksperimenti su koristili galij kao metu.

⁸Ray Davis, izumitelj Homestake eksperimenta, dobio je Nobelovu nagradu 2002. godine.

⁹Intrinzično vrijeme života piona je $c\tau \sim 8$ m.

neutrina, očekivani omjer između mionskih i elektroskih (anti-)neutrina je bio

$$\frac{N(\nu_\mu) + N(\bar{\nu}_\mu)}{N(\nu_e) + N(\bar{\nu}_e)} \sim 2. \quad (2.8)$$

Super-Kamiokande detektor u Japanu koristio je tank napunjen s 5×10^7 kg ultra-čiste vode kao metu za neutrine. Na unutarnjim stijenkama su postavljeni 11146 fotomultiplikatorskih cijevi za detekciju Čerenkovljevog zračenja. Neutrini koji prolaze kroz detektor interagiraju preko

$$\nu_\mu + A \rightarrow \mu + X, \quad (2.9)$$

$$\nu_e + A \rightarrow e + X. \quad (2.10)$$

Iz opažanja SK eksperimenta ovaj omjer je bio ~ 1 . Ovaj rezultat je poznat kao problem atmosferskih neutrina. Rezultati ovih eksperimenata¹⁰ potvrdili su oscilacije neutrina.

2.4 Neutrinske oscilacije

Eksperimenti sa solarnim, atmosferskim, reaktorskim i akcelerskim neutrinima dali su značajne dokaze za oscilacije, prijelaze između različitih okusa neutrina ν_e , ν_μ i ν_τ (i antineutrina $\bar{\nu}_e$, $\bar{\nu}_\mu$ i $\bar{\nu}_\tau$). Oscilacije neutrina su kvantno mehanički fenomen, gdje neutrino jednog okusa α energije E , dobivenom iz neke slabe interakcije, s dovoljnom velikom udaljenosti L od izvora ima vjerojatnost prijelaza, $P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta; E, L)$, u neutrino drugog okusa β , različitu od nule. Zbog postojanja neutrinskih oscilacija smatra se da neutrini imaju masu i da je to maseno stanje u biti miješano stanje 3 okusa. U čestičnoj fizici svojstvena stanja mase odgovaraju stacionarnim stanjima Hamiltonijana slobodne čestice:

$$\hat{H}\psi = i\frac{\partial\psi}{\partial t} = E\psi. \quad (2.11)$$

Razlikujemo tri neutrinska svojstvena stanja mase zapisane kao ν_1 , ν_2 i ν_3 , koja ne odgovaraju slabim svojstvenim stanjima, ν_e , ν_μ i ν_τ . Na primjer, nije moguće znati u kojem svojstvenom stanju mase je neutrino nastao, zajedno s pozitronom, iz električno nabijene

¹⁰I drugi eksperimenti su dali značajne evidencije oscilacija, npr. MINOS, SNO, Borexino, KamLAND, RENO itd.

slabe interakcije $W^+ \rightarrow e^+\nu_e$. Stoga u kvantnoj mehanici možemo zapisati relaciju između slabih i masenih svojstvenih stanja preko unitarne matrice U , zvana PMNS (Pontecorvo–Maki–Nakagawa–Sakata) matrica

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \quad (2.12)$$

Stanje elektronskog neutrina nastalog iz slabe interakcije opisano je linearnom kombinacijom stanja ν_1 , ν_2 i ν_3 pa iz (2.12) dobijemo

$$|\psi\rangle = U_{e1}^* |\nu_1\rangle + U_{e2}^* |\nu_2\rangle + U_{e3}^* |\nu_3\rangle. \quad (2.13)$$

Ako su mase ν_1 , ν_2 i ν_3 u (2.13) različite, onda imamo i razliku u fazi između komponenti valnih funkcija pa dolazi do oscilacije neutrina. Iako postoje oscilacije između tri svojstvena stanja (ν_e , ν_μ , ν_τ), za razumijevanje fenomena dovoljno je razmotriti dvookusne oscilacije. U slučaju 2 okusa (npr. ν_μ i ν_τ) imamo 2 svojstvene vrijednosti mase (npr. ν_2 i ν_3) stoga PMNS matrica (2.12) za dvookusne oscilacije poprima oblik

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{\mu1} & U_{\mu2} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}, \quad (2.14)$$

Budući da mora vrijediti uvjet unitarnosti $UU^\dagger = I$ za matricu 2×2 dobijemo

$$U = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}$$

pa slijedi

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}. \quad (2.15)$$

Ako pretpostavimo da je neutrino u trenutku $t = 0$ u svojstvenom stanju ν_μ , valna funkcija glasi

$$|\psi(0)\rangle = |\nu_\mu\rangle = \cos \theta |\nu_2\rangle + \sin \theta |\nu_3\rangle. \quad (2.16)$$

Masena svojstvena vrijednost u ovisnosti o vremenu širi se kao ravni val i ima oblik

$$|\nu_i\rangle = |\nu_i\rangle e^{-i(E_i t - \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{x})}. \quad (2.17)$$

Uvrštavanjem (2.17) u (2.16) dobijemo vremenski ovisnu valnu funkciju

$$|\psi(\mathbf{x}, t)\rangle = \cos \theta |\nu_2\rangle e^{-i(E_2 t - \mathbf{p}_2 \cdot \mathbf{x})} + \sin \theta |\nu_3\rangle e^{-i(E_3 t - \mathbf{p}_3 \cdot \mathbf{x})}. \quad (2.18)$$

Iz (2.18) može se dobiti izraz za vjerojatnost oscilacije $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ koja glasi

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m_{23}^2 L}{4E_\nu} \right), \quad (2.19)$$

gdje je

$$\Delta m_{23}^2 = m_2^2 - m_3^2.$$

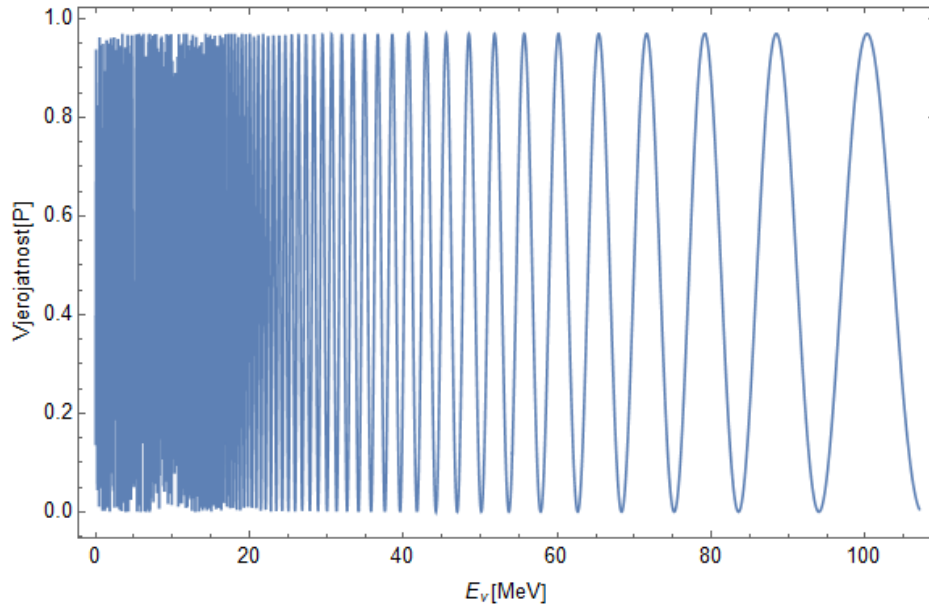
Jednadžba (2.19) zapisana je u prirodnom sustavu jedinica, ali u izračunavanju vjerojatnosti oscilacija prikladnije je iskazati razliku masa Δm^2 u eV^2 , udaljenost L u km i energiju neutrina E_ν u GeV stoga (2.19) postaje

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta_{23} \sin^2 \left(1,27 \frac{\Delta m_{23}^2 L}{E_\nu} \right). \quad (2.20)$$

Eksperimenti atmosferskih neutrina kao Super-Kamiokande zajedno s K2K, MINOS, T2K i NO ν A odredili su vrijednosti atmosferskih parametara [8]:

$$\begin{aligned} \Delta m_{23}^2 &= \Delta m_{atm}^2 = 2,54 \times 10^{-3} \text{ eV}^2, \\ \sin^2 \theta_{23} &= \sin^2 \theta_{atm} = 0,425. \end{aligned}$$

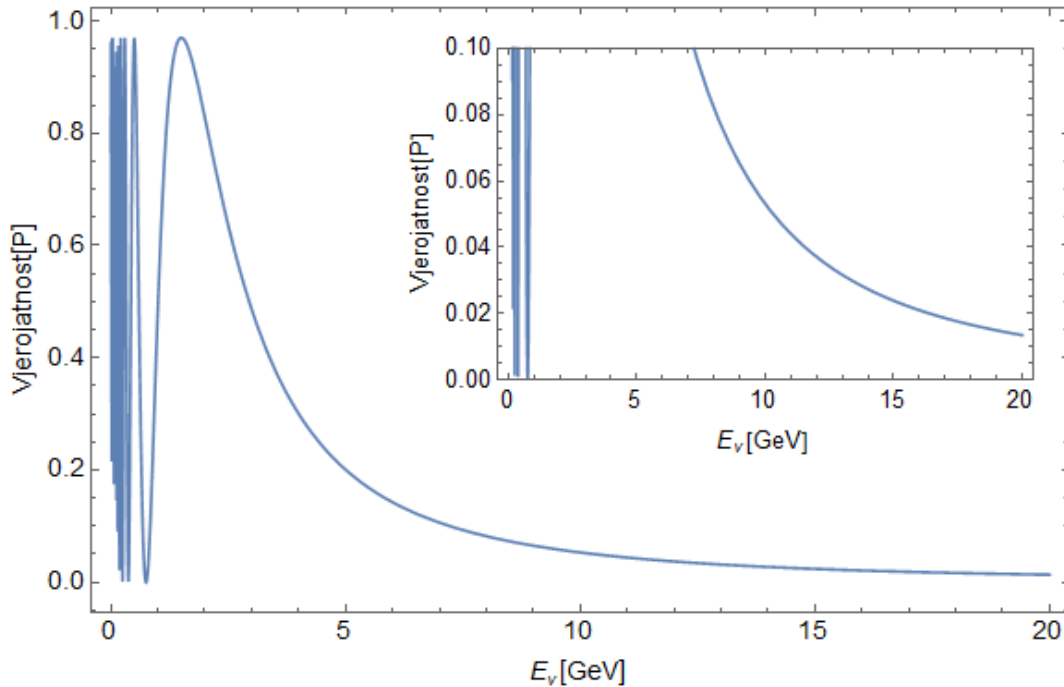
Ako uvrstimo u (2.20) udaljenost $L = 732$ km iz OPERA eksperimenta opisanog u Poglavlju 3 dobijemo ovisnost vjerojatnosti $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ o energiji neutrina E_ν (Slika 5)



Slika 5: Grafički prikaz ovisnosti vjerojatnosti oscilacija $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ o energiji neutrina E_ν .

3 Eksperiment OPERA

Nestanak atmosferskih neutrina ν_μ je već ustanovljen iz drugih eksperimenata, ali pojavljivanje neutrina iz oscilacije koja slijedi iz nestanka još nije bilo snimljeno. Eksperiment OPERA je prvi koji je pokušavao snimiti pojavljivanje ν_τ iz ν_μ snopa. Poznato je bilo da $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ oscilacija nije bila glavni razlog manjka ν_μ iz mjerenja atmosferskih ν_e . Statistički dokaz $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscilacija je pokazao detektor Super-Kamiokande iz opažanja atmosferskih neutrina. U eksperimentu OPERA glavni cilj bio je dokazivanje $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ tranzicije te da ta oscilacija predstavlja glavni udio deficita atmosferskih ν_μ iz promatranja CNGS ("CERN Neutrinos to Gran Sasso") snopa. CNGS snop iz CERN-a do Gran Sasso laboratorija (LNGS), koji su međusobno udaljeni 732 km, je sastavljen od većine ν_μ srednje energije od $E_\nu \approx 17$ GeV, s kontaminacijom $\bar{\nu}_\mu$ od 2,1% i ν_e od $\approx 0,9\%$. Energija snopa je optimizirana za dobivanje maksimalnog broja τ događaja: da je u isto vrijeme dovoljno velika vrijednost značajnog udarnog presjeka nabijenih (CC) interakcija za oscilirani ν_τ , a dovoljno mala da poveća vjerojatnost same oscilacije. Udarni presjek tau neutrina ($\sigma(E_\nu)$) raste eksponencijalno s energijom E_ν ; između ≈ 3 i ≈ 20 GeV $\sigma(E_\nu)$ se povećava s faktorom od $\approx 10^5$. Na Slici 6 vidi se kako vjerojatnost oscilacije $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ eksponencijalno pada za $E_\nu \gtrsim 1,5$ GeV, točnije za energiju



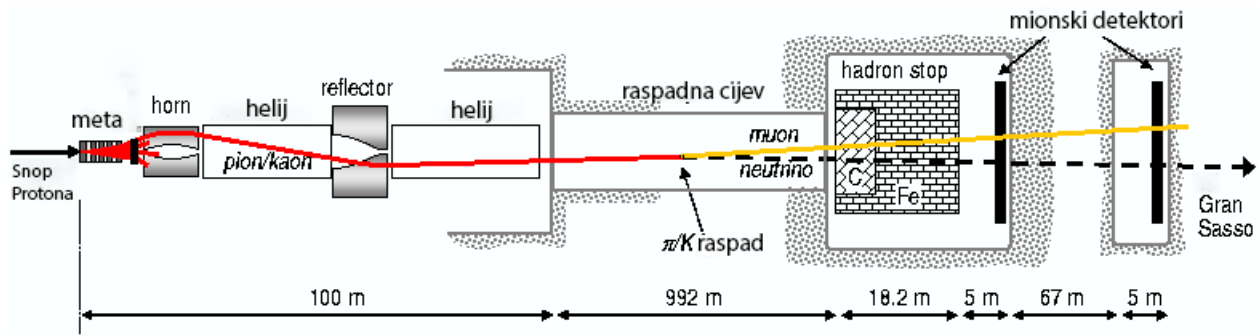
Slika 6: Grafički prikaz ovisnosti vjerojatnosti oscilacija $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ o energiji neutrina E_ν u blizini raspona prosječne energije CNGS snopa ≈ 17 GeV. Vjerojatnost P za energiju snopa je $\approx 0,019 = 1,9\%$.

CNGS snopa od ≈ 17 GeV vjerojatnost je oko 1,9%. OPERA je specifično dizajniran da proučava τ česticu iz njenog raspada i kinematičku analizu događaja. U ovu svrhu koristio se hibridni model detekcije, "real time" tehnika (elektronički detektor) i ECC (*Emulsion Cloud Chamber*). ECC detektor je pasivna metoda detekcije korištenjem slojeva materijala alterniranih s filmom nuklearne emulzije. Elektronički detektori služe za početak skupljanja podataka, prepoznavanje i izračunavanje putanje nabijenih čestica i lokaliziranje područja gdje je bila interakcija.

3.1 CNGS snop

CNGS neutrinski snop je proizveden iz snopa protona od 400 GeV iz SPS ("Super Proton Synchrotron") akceleratora i usmjeren na 840 m udaljenu karbonsku metu tako da bi se stvorili kaoni (K) i pioni (π). Pozitivno nabijeni π i K su odabrani prema njihovim energijama i usmjereni prema Gran Sasso-u koristeći dvije leće zvane "horn" i "reflector". Pomoću

vakuumske cijevi dužine 1000 m ove čestice raspadnu se u ν_μ i μ . Svi hadroni (na primjer protoni koji nisu interagirali s metom), pioni i kaoni koji se nisu raspali, zaustavljeni su hadronskim zapušačem. Samo neutrini i mioni mogu preći preko 18 m dug zid od grafitu i željeza. Da se izračuna intenzitet snopa neutrina, korištena su dva mionska detektora za monitoriranje miona koji su na kraju apsorbirani na ≈ 500 m stijena.



Slika 7: Shema CNGS snopa [9].

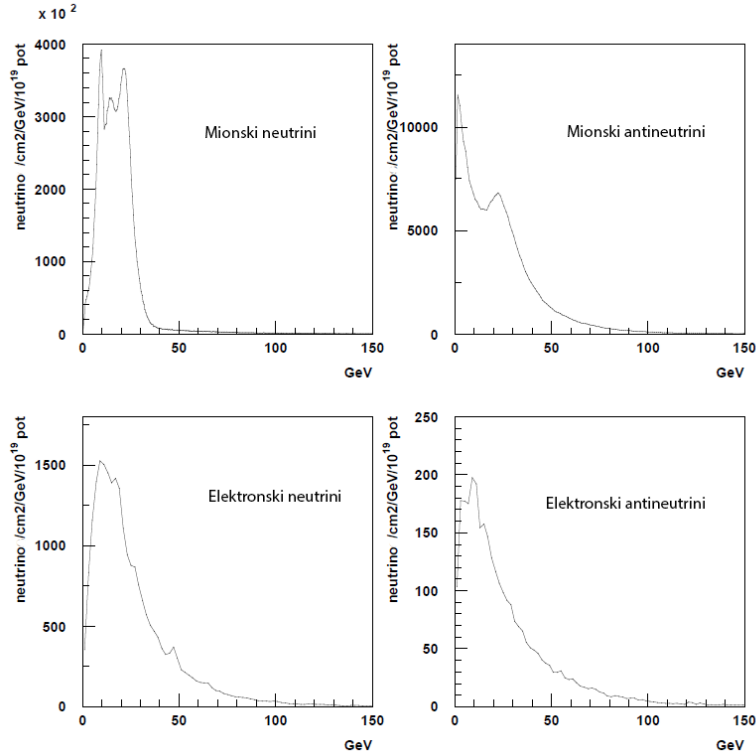
Snop protona iz SPS-a je usmjeren prema CNGS meti koristeći niz prekidačkih magneta. Magnetski sustav je sastavljen od 73 dipolnih magneta (nominalno polje je 1,7 T na 400 GeV), 20 kvadrupolnih magneta (nominalni gradient 40 T/m) i 12 ispravljačkih magneta (maksimalni kut otklona $80 \mu\text{rad}$). Snop usmjeren prema Gran Sasso-u ima nagib od 5,6% koji se postiže s 32 horizontalna dipolna magneta izmaknuta za $12,8^\circ$. Niz protona je jako dobro praćen sa monitorima snopa tako da osiguravaju stabilnost i jakost snopa kroz svih 840 m do mete.

Drugi dio snopa ide iz CNGS mete do mionskog detektora (Slika 7). CNGS meta je smišljena da može izdržati inducirani stres upadnog snopa (termo-mehanički udar, naslaga topline) do $3,5 \times 10^{13}$ protona izvađenih iz jednog ciklusa SPS-a od 400 GeV (do 750 kW). Kao što je prikazano na Slici 8, meta je sastavljena od 5 spremnika tako da je jedan u funkciji, a ostala 4 su zamjenska "in-situ". Svaka jedinica ima aluminijski cilindar zatvoren berilijevim prozorima. Unutra se nalazi 13 grafitnih šipki dugačkih 10 cm, međusobno udaljenih 9 cm. Iz mete snop ulazi u magnetki sustav fokusiranja, *horn* i *reflector*. Oba su toroidne leće dužine 7 m s fokusirajućim magnetskim poljem između unutarnjeg i vanjskog vodiča pulsevima visoke struje (*horn* - 2 pulsa od 150 kA za svaki ciklus; *reflector* - jedan puls od 180 kA). Nakon svake leće instalirane su cijevi (promjera 1,2 m) punjene helijem na 20 mbar, prva dužine



Slika 8: CNGS meta sastavljena je od 5 spremnika. Najniži prima protonski snop, ostala 4 su zamjenska [9].

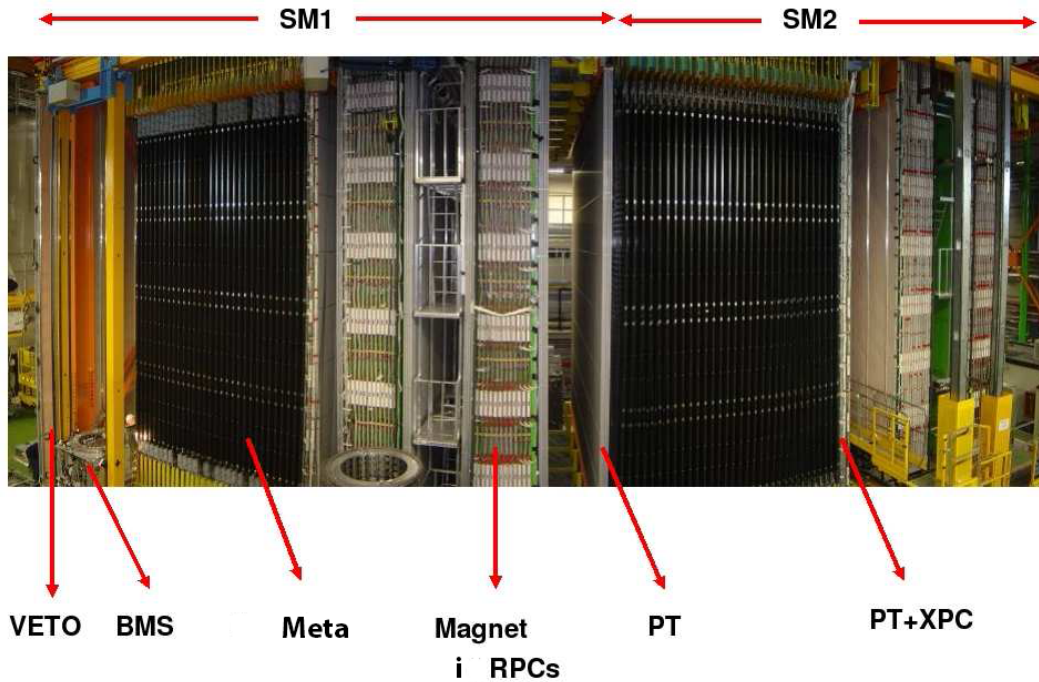
31 m i druga 41 m. Nakon helijeve komore je vakuumska cijev (tlak <1 mbar), tzv. CNGS raspadna cijev. Napravljena je od 18 mm čelika, duga je 992 m i promjera 2,45 m, okružena s 50 cm betona. Na kraju raspadne cijevi nalazi se vodeno hladjeni hadronski prigušivač, 3 m grafita i 15 m željeza, osmišljen na način da može apsorbirati do 100 kW protona i hadrona. U drugom dijelu snopa postavljeni su detektori tako da se može pratiti profil i intenzitet piona i miona. Odmah nakon mete postavljen je detektor "Secondary Emission Monitor", napravljen od titanske folije debljine $12\mu\text{m}$ i promjera 145 mm u vakuumskoj kutiji, tako da prati efikasnost stvaranja sekundarne čestice iz ulaznog snopa protona. Dvije stanice mionskih detektora nalaze se nakon hadronskog prigušivača i odvojene su s 67 m kamena. Svaka stanica je sastavljena od 42 mionska detektora u križnoj strukturi, a služi mjerenju intenziteta i presjeka stvorenih miona, zajedno s ν_μ , iz raspada piona i kaona. Prva stanica detektora je jako osjetljiva na odstupanje između mete i *horn*-a, dok druga daje informacije o poziciji protonske mete. Ovakvo skeniranje omogućava optimalno poravnanje snopa i efikasnost produkcije sekundarnih čestica. Detektori uživo mjere stvoreni sekundarni snop i mogu izmjeriti do 10^8 miona/cm² po ekstrakciji (trajanje $10,5 \mu\text{s}$). Na Slici 9 prikazane su 4 neutrinske komponente izlaznog snopa.



Slika 9: 4 komponente CNGS snopa [9].

3.2 ECC detektor

ECC (*Emulsion Chamber Cloud*) tehnika se počela koristiti nakon Drugog svjetskog rata u eksperimentima kozmičkih zraka koje je i dovelo do prvog opažanja *charmed* čestice (kvarka) 1971. godine. DONUT eksperiment koji je prvi promatrao ν_τ (2000.) je također koristio ECC tehnologiju. OPERA eksperiment koristio je isti način promatranja. Detektor je sastavljen od 150000 jedinica, "cigla" napravljenih od 56 olovnih ploča (1 mm debljine) između kojih se nalazi film nuklearne emulzije. Cigle su složene u 62 vertikalna "zida" dijagonalnog smjera snopa, a između svakog zida stavljeni su plastični scintilatori. Svaka cigla ima masu od 8,3 kg tako da cijeli detektor ima ukupnu masu od $1,25 \times 10^6$ kg. Detektor je podijeljen u 2 identične jedinice (*Supermodule*, SM1 i SM2), a svaka se sastoji od 31 zida i 31 dvoslojnog scintilatora. Nakon svakog modula nalazi se magnetski spektrometar (Slika 10).



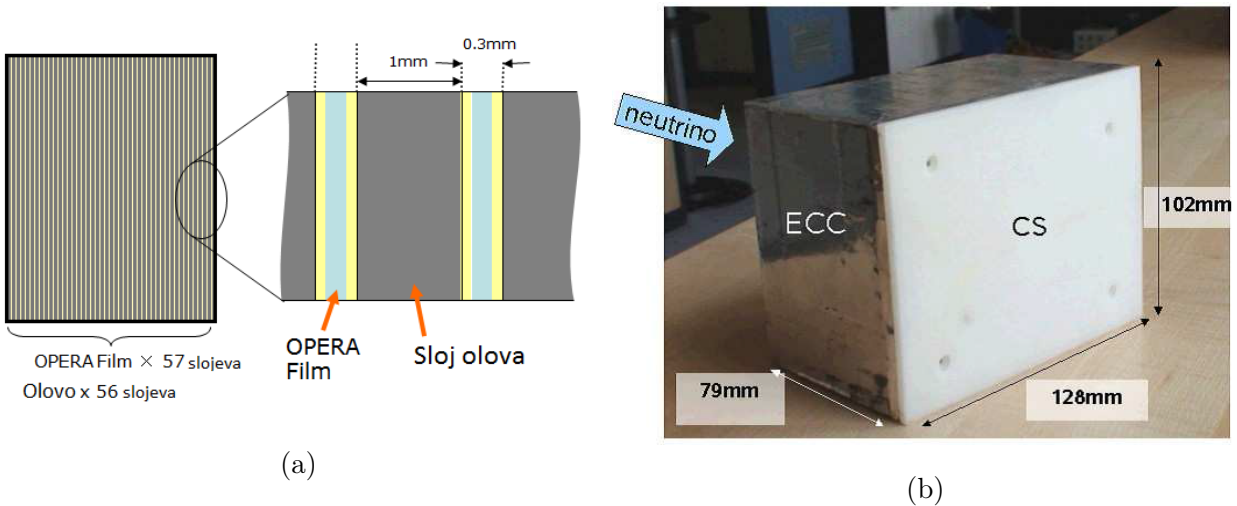
Slika 10: Širokokutna slika 2 identične jedinice detektora (SM1 i SM2) [9].

3.2.1 Film nuklearne emulzije

Nuklearna emulzija je sastavljena od kristala AgBr (poluvodič), promjera $0,2 \mu\text{m}$, raspršenog u želatinsko vezivo. Prolaskom nabijene čestice, parovi elektronskih šupljina se stvaraju u kristalu, te su pobuđeni elektroni zarobljeni u nepravilnostima rešetki na površini kristala tako da stvaraju atome Ag koji služe kao latentne sredine slika. U procesu razvijanja filma, reduktor u razvijaju predaje elektrone kristalu preko latentnih sredina i stvara srebrne filamente koristeći atome srebra iz kristala. Ovaj proces povećava broj srebrnih atoma (10^8 - 10^{10} puta) i zrna Ag atoma se povećavaju ($\approx 0,6 \mu\text{m}$) tako da su vidljivi optičkim mikroskopom. Efikasnost detekcije kristala za minimalno ionizirajuće čestice je $\approx 0,16$ i probijanje nabijene čestice je ≈ 230 kristala/ $100 \mu\text{m}$ kroz njihovu putanju. Jedna ionizirajuća čestica ostavlja trag od ≈ 36 zrna/ $100 \mu\text{m}$ pa je to osjetljivost filma. Izrada filma je bila u radnji s tvrtkom Fuji Film¹¹, kojoj je za izradu jednog filma trebalo otprilike mjesec dana (ukupno oko 10^7

¹¹Fuji Photo Film Co., Ltd, Minamiashigara, Kanagawa 250-0193, Japan.

filмова za izradu). Budući da nuklearna emulzija sakuplja sve tragove iz kozmičkog zračenja i radijacije okoliša, od izrade do razvijanja sakuplja oko 3000 tragova/cm². Dozvoljena gustoća šuma za analizu cigli je 100 tragova/cm² tako da je izumljena nova procedura zvana osvježavanje ("refreshing"): sastojala se od čuvanja filma na visokoj relativnoj vlažnosti (*RH*) i na visokoj temperaturi (≥ 27 °C). Na primjer, na 98% *RH* i 27 °C, nakon 3 dana, gustoća tragova kozmičkog zračenja prije i poslije osvježavanja se smanji s 36 na manje od 10 zrna/100 μm bez utjecanja na osjetljivost novih sljedećih tragova.



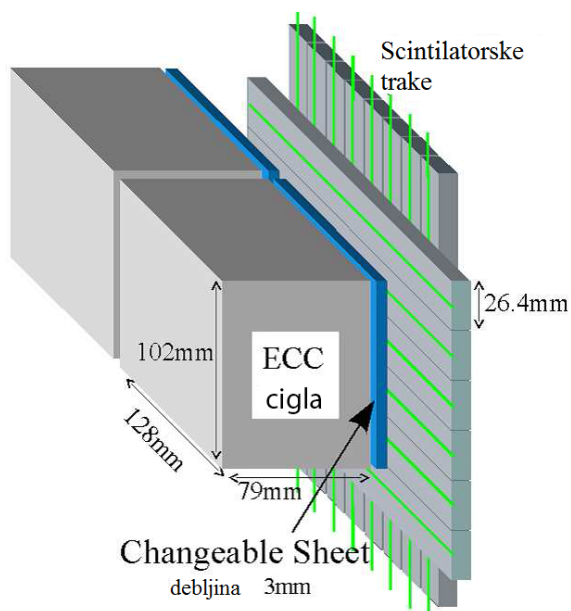
Slika 11: (a): Shema ECC cigle. (b): Fotografija cigle s dimenzijama; CS ("Changeable Sheets") je dodatni detektor s 2 filma nuklearne emulzije [9].

3.2.2 Slaganje cigle

OPERA je eksperiment koji se bazirao na *quasi-online* detekciji. Da bi to postigli ECC detektor je podijeljen u manje jedinice, cigle, tako da su mogli izolirati i izvaditi dio u kojem se dogodio kandidat za interakciju, a odmah nakon toga ga se moglo razviti i analizirati, bez zaustavljanje eksperimenta. Cigle su morale biti dovoljno velike da sadrže primarne i raspadne vrhove tako da bi se moglo identificirati čestice i kinematičku strukturu događaja. Cigla, veličine $128 \times 102 \times 79$ mm³, je sastavljena od 57 filmova emulzije i 56 olovnih ploča, a ukupne mase od 8,3 kg (Slika 11). Za analizu događaja iz cigle treba jako precizno poravnati film tako da se poravnaju tragovi kozmičkog zračenja odmah nakon vađenja cigle, a prije razvijanja. Kako je traženje događaja u cigli bilo bi jako teško zbog malog omjera signala i

šuma iz kozmičkog zračenja, između elektroničkog detektora i cigle postavljen je emulzijski detektor "Changeable Sheets" (CS). CS sastavljen je od 2 filma tako da bi smanjili pozadinski šum na $\approx 10^{-4}$ tragova/cm².

Kao što je već spomenuto, OPERA cigle složene su u zidove između kojih se nalaze slojevi plastičnih scintilatorskih traka (Slika 12) koje konstantno prate izlazne čestice. Svaki zid je sastavljen od 2 identična nezavisna dijela zvana *Semi-Wall* (SW). Struktura jednog SW je napravljena od nehrđajućeg čelika i može sadržavati 1664 cigle (Slika 13). Za vađenje i



Slika 12: Shema složene cigle (ECC cigla) s CS-om i scintilatorskim trakama [9].



Slika 13: Instalacija jednog Semi-Wall OPERA detektora u LNGS-u [9].

stavljanje cigla iz nosača u zidu koristio se automatizirani sistem zvan *Brick Manipulator System* (BMS). Glavna uloga BMS-a je da vadi cigle označene od strane elektroničkog tragača (scintilator) kao mjesto neutrino događaja. Nakon toga, BMS nastale praznine puni ciglama iz vanjskog dijela zida, budući da ne postoje druge zamjenske cigle.

3.3 VETO sustav

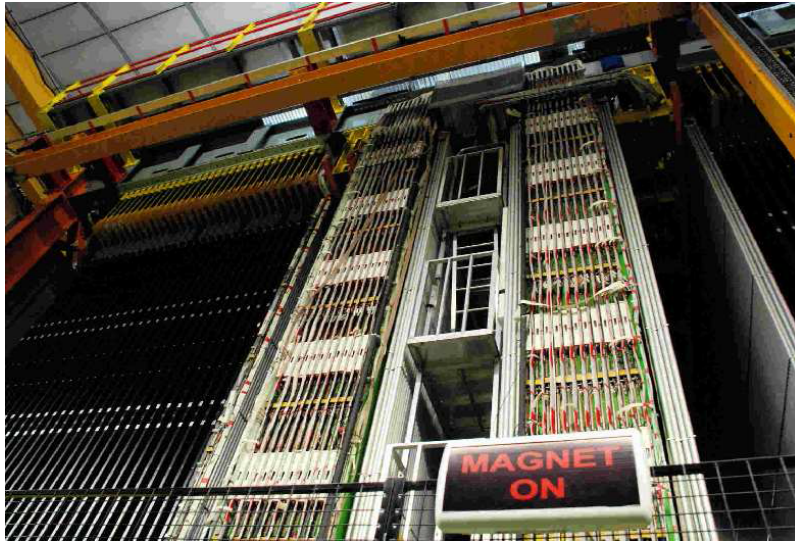
Zbog mogućnosti interakcije CNGS snopa sa stijenama i betonom oko OPERA-e i stvaranja sekundarnih čestica koje bi dovele do lažnih "aktivacija" (koje bi dovele do vađenja i skeniranja krivih cigli), instaliran je VETO sustav na početku detektora kako ne bi došlo do ovakvih

dogadaja. VETO je napravljen od komora staklenih otporničkih ploča ("glass resistive plate chambers", GRPC). Ovaj detektor je sastavljen od 2 sloja, svaki od 8 redova od 4 jedinice, s ukupnom osjetljivom površinom od 200 m².

3.4 Magnetski spektrometar

Kao što je prikazano na Slici 10 za svaki *Supermodule* nakon ECC detektora i 2 sloja scintilatorskih traka slijedi veliki željezni magnet s komorama otporničkih ploča ("resistive plate chambers", RPC). Skretanje nabijenih čestica unutar magnetu praćeno je sa 6 stanica driftnih cijevi ("Precision Trackers", PT). Da se ne bi dogodilo dvosmislenost "lijevo-desno" u rekonstrukciji trajektorija, postavljeni su dodatni RPC (XPC) detektori koji su rotirani za $\pm 42,6^\circ$ pokraj prve dvije PT stanice.

3.4.1 Magneti



Slika 14: Fotografija jednog OPERA magnetu [9].

Iz Slike 14 vidljivo je da je OPERA magnet napravljen od 2 vertikalna zida pravokutnog poprečnog presjeka. Zidovi su napravljeni od 12 slojeva željeza s razmakom od 2 cm između njih gdje su stavljene RPC detektori. Magnet ima ukupnu težinu od $9,9 \times 10^5$ kg i napajan je istosmjernom strujom od 1600 A kako bi na sredini bio imao minimalno magnetsko polje od $1,46 \pm 0,01$ T s najviše 3% promjene kroz cijelu visinu magnetu.

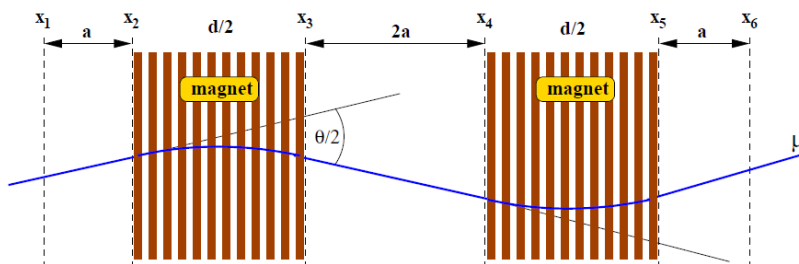
3.4.2 RPC/XPC sustav

Glavna uloga OPERA RPC sustava je da rekonstruira tragove unutar magneta te služi kao okidač za očitavanje podataka iz PT-a (aktivacija i zaustavljanje). RPC sustav je odijeljen na dva detektora: unutarnji tragač ("Inner Tracker", IT) i XPC. Unutarnji tragač je sastavljen od 22 RPC sloja od 70 m^2 postavljenih između 24 željezne ploče od magneta, a XPC je sastavljen od 2 RPC sloja postavljena nakon magneta gdje su pruge za očitavanje nagnute za $\pm 42,6^\circ$.

3.4.3 Driftne cijevi (PT)



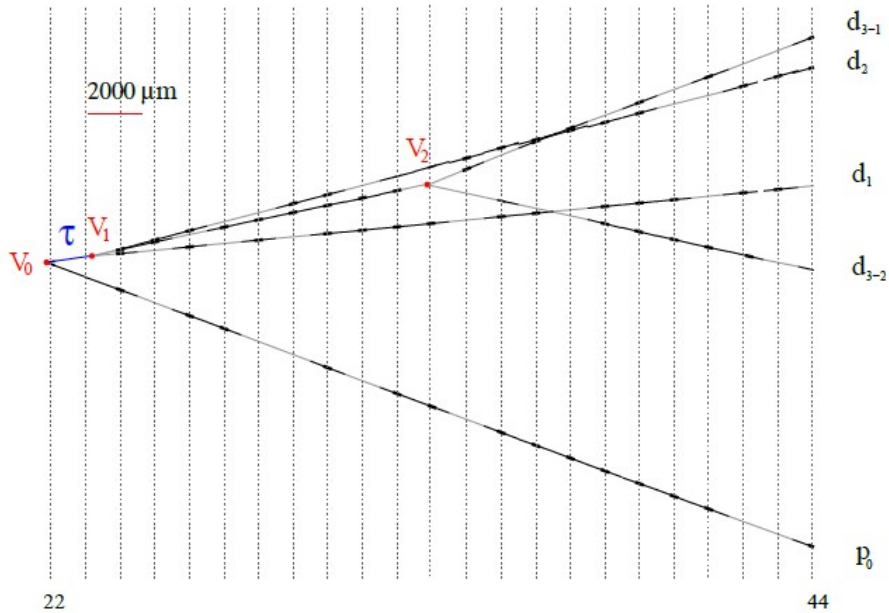
Slika 15: Fotografija driftnih cijevi ("Precision Trackers") [9].



Slika 16: Shema mionskog spektrometra; s x_1 do x_6 su označene pozicije driftnih cijevi (PT zidova) [9].

Precision Trackers prikazan na Slici 15 služi, zajedno s drugim dijelovima, za mionsku spektrometriju kako bi odredili predznak naboja i impuls. Mioni su otklonjeni preko 2 magnetna suprotnog smjera magnetskog polja pa PT mjeri vodoravne koordinate putanje miona kao što je prikazano na shemi iz Slike 16. PT sustav je napravljen od 10000 vertikalnih driftinih cijevi (punjene s 80% Argona i 20% CO₂) 8 m dužine i vanjskog promjera od 38 mm. Grupirane su u 12 skupina (PT zidovi), 6 po *Supermodule*-u.

3.5 Rezultati eksperimenta



Slika 17: Bočni prikaz rekonstruiranog ν_τ događaja u cigli. Vertikalne linije predstavljaju poziciju filmova od 22. do 44. Iz slike je vidljivo da prvi vrh (V_0) sadrži dva traga: τ lepton i drugu česticu (p_0). Sekundarni vrh (V_1) se raspada ($\tau \rightarrow 3h$) u 3 traga: d_1 , d_2 i d_3 [11].

Jedan od izazova OPERA eksperimenta bio je detektirati kratkoživuće τ leptone koji su nastali iz tau neutrinske CC interakcije. Koristeći nuklearnu emulziju kao metodu snimanja, uspješno su pokazali postojanje $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscilacija iz pojavljivanja τ leptona, odnosno njegovog raspada. Raspadni događaji kategorizirani su u 4 kanala na temelju sekundarnih čestica: $\tau \rightarrow 1h$, $\tau \rightarrow 3h$, $\tau \rightarrow \mu$, $\tau \rightarrow e$. Kako bi izolirali pozadinski šum i poboljšali selekciju, ko-

ristili su kinematičku analizu na svakom kanalu. OPERA eksperiment prikupljao je podatke između 2008. i 2012. godine tijekom kojih je zabilježio 106422 interakcije neutrina iz CNGS snopa. Koristeći klasificirajući algoritam koji izdvaja one interakcije koje su se dogodile u meti (*contained events*), selektirano je 19505 događaja. Od 5603 potpuno rekonstruirane neutrinu interakcije, samo njih 10 je zadovoljilo sve topološke i kinematičke zahtjeve selekcije. Jedan primjer rekonstruirane τ interakcije je prikazan na Slici 17. Ovih 10 događaja potvrđuju s velikom značajnosti od $6,1 \sigma$ ¹² otkriće $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ oscilacije kroz opažanja pojavljivanja (*"appearance event"*). Uz pretpostavku da je $\sin^2 2\theta_{23} = 1$, dobili su $\Delta m_{23}^2 = (2,7_{-0,6}^{+0,7}) \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, dok je udarni presjek ν_τ CC interakcije u olovu $(5,1_{-2,0}^{+2,4}) \times 10^{-36} \text{ cm}^2$ [10].

¹²Značajnost od $6,1 \sigma$ predstavlja vjerojatnost od $\approx 1 : 5 \times 10^8$ da su tih 10 opaženih događaja slučajna fluktuacija.

4 Zaključak

Kroz ovaj rad opisali smo glavna svojstva neutrina te kako se kroz povijest nadograđivala teorija sve do oscilacija. Neutrinske oscilacije su jedna od glavnih tema za razumijevanje ove čestice i općenito fiziku elementarnih čestica. Neutrini imaju tri slaba svojstvena stanja (3 okusa) koje razlikujemo prema njihovim slabim interakcijama na ν_e , ν_μ i ν_τ . Otkrićem oscilacija se ustanovilo da neutrini imaju masu i da imaju miješana stanja okusa koja ne odgovaraju masenim svojstvenim stanjima. Ovaj kvantno mehanički fenomen je uspješno dokazan u eksperimentima. Kao primjer je detaljno opisan eksperiment OPERA koji je s velikom značajnošću potvrdio postojanje $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ kroz metodu opažanja ("*appearance*"). Iz OPERA-e i drugih eksperimenata izmjereni su kutevi miješanja θ i razlika kvadrata mase² između stanja. Još uvijek nije moguće točno odrediti mase neutrina, ali poznato je da su jako male i da $\nu_1 \neq \nu_2 \neq \nu_3$. To nam pokazuje da su neutrinske oscilacije i dalje aktivno područje istraživanja, te se uz nekoliko već postojećim eksperimenata trenutno planiraju te urade i novi.

Popis slika

1	Fermioni grupirani po interakcijama [2].	3
2	Spektar β -raspada tricija (${}^3_1H \rightarrow {}^3_2He$) [4].	5
3	Tok solarnih neutrina iz glavnih solarnih procesa [1].	7
4	Prikaz ukupnih rezultata Homestake eksperimenta. SNU na desnoj vertikalnoj osi označava <i>Solar Neutrino Unit</i> [5].	8
5	Grafički prikaz ovisnosti vjerojatnosti oscilacija $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ o energiji neutrina E_ν	12
6	Grafički prikaz ovisnosti vjerojatnosti oscilacija $P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau)$ o energiji neutrina E_ν u blizini raspona prosječne energije CNGS snopa ≈ 17 GeV. Vjerojatnost P za energiju snopa je $\approx 0,019 = 1,9\%$	13
7	Shema CNGS snopa [9].	14
8	CNGS meta sastavljena je od 5 spremnika. Najniži prima protonski snop, ostala 4 su zamjenska [9].	15
9	4 komponente CNGS snopa [9].	16
10	Širokokutna slika 2 identične jedinice detektora (SM1 i SM2) [9].	17
11	(a): Shema ECC cigle. (b): Fotografija cigle s dimenzijama; CS ("Changeable Sheets") je dodatni detektor s 2 filma nuklearne emulzije [9].	18
12	Shema složene cigle (ECC cigla) s CS-om i scintilatorskim trakama [9].	19
13	Instalacija jednog Semi-Wall OPERA detektora u LNGS-u [9].	19
14	Fotografija jednog OPERA magneta [9].	20
15	Fotografija driftnih cijevi ("Precision Trackers") [9].	21
16	Shema mionskog spektrometra; s x_1 do x_6 su označene pozicije driftnih cijevi (PT zidova) [9].	21
17	Bočni prikaz rekonstruiranog ν_τ događaja u cigli. Vertikalne linije predstavljaju poziciju filmova od 22. do 44. Iz slike je vidljivo da prvi vrh (V_0) sadrži dva traga: τ lepton i drugu česticu (p_0). Sekundarni vrh (V_1) se raspada ($\tau \rightarrow 3h$) u 3 traga: d_1 , d_2 i d_3 [11].	22

Popis tablica

1	Elementarni fermioni grupirani po generacijama [1].	2
2	4 fundamentalne sile i pripadajućih bozoni. Kostante jakosti sila su aproksimirane za dvije elementarne čestice na udaljenosti od 10^{-15} m (otprilike radius protona) [1].	4
3	Leptoni i njihove antičestice.	6

Literatura

- [1] Thomson M., “*Modern Particle Physics*”, I. edition (2013.)
- [2] F. Suekane, “*Neutrino Oscillations : A Practical Guide to Basics and Applications*”, Lect. Notes Phys. **898** (2015) pp. 1. doi:10.1007/978-4-431-55462-2
- [3] S. M. Bilenky, “Neutrino. History of a unique particle”, Eur. Phys. J. H **38** (2013) 345 doi:10.1140/epjh/e2012-20068-9 [arXiv:1210.3065 [hep-ph]].
- [4] Griffiths D., “*Introduction to Elementary Particles*”, II. edition (2008.)
- [5] B. T. Cleveland, T. Daily, R. Davis, Jr., J. R. Distel, K. Lande, C. K. Lee, P. S. Wildenhain and J. Ullman, “*Measurement of the solar electron neutrino flux with the Homestake chlorine detector*”, Astrophys. J. **496** (1998) 505. doi:10.1086/305343
- [6] Kajita T., *Atmospheric neutrinos and discovery of neutrino oscillations*, Proc Jpn Acad Ser B Phys Biol Sci. 2010;86(4):303–321. doi:10.2183/pjab.86.303
- [7] T. Kajita, “*Atmospheric Neutrinos*”, Advances in High Energy Physics, vol. 2012, Article ID 504715, 24 pages, 2012. doi:10.1155/2012/504715
- [8] M. Tanabashi *et al.* [Particle Data Group], “Review of Particle Physics”, Phys. Rev. D **98** (2018) no.3, 030001. doi:10.1103/PhysRevD.98.030001
- [9] R. Acquafredda *et al.*, “*The OPERA experiment in the CERN to Gran Sasso neutrino beam*”, JINST **4** (2009) P04018. doi:10.1088/1748-0221/4/04/P04018
- [10] N. Agafonova *et al.* [OPERA Collaboration], “Final Results of the OPERA Experiment on ν_τ Appearance in the CNGS Neutrino Beam”, Phys. Rev. Lett. **120** (2018) no.21, 211801 Erratum: [Phys. Rev. Lett. **121** (2018) no.13, 139901] doi:10.1103/PhysRevLett.121.139901, 10.1103/PhysRevLett.120.211801
- [11] N. Agafonova *et al.* [OPERA Collaboration], “New results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ appearance with the OPERA experiment in the CNGS beam”, JHEP **1311** (2013) 036 Erratum: [JHEP **1404** (2014) 014] doi:10.1007/JHEP11(2013)036, 10.1007/JHEP04(2014)014

[12] G. Galati, J. Phys. Conf. Ser. **1226** (2019) no.1, 012022. doi:10.1088/1742-6596/1226/1/012022