Nevtrinske oscilacije

Urban Bitenc

MENTOR: doc.dr.Boštjan Golob

Ljubljana, 25. februar 2003

Pregled

Uvod

LEPTONI:

	generacija		
naboj $[e_0]$	1	2	3
-1	e^-	μ^-	τ^-
0	ν_e	ν_μ	ν_τ

✯ SM: $m_\nu = 0$

✯ Glede na izvor:

- s sonca
- atmosferski
- reaktorski
- iz pospeševalnikov

Izbruh supernove SN1987A.

✯ Izmerjeni tok manjši od pričakovanega.

⇨ Možna razlaga - nevtrinske oscilacije: $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$ ali $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$.

✯ Pogoj za oscilacije: $m_1 \neq m_2$.

✯ Eksperimentalno oscilacije težko dokazati:

✔ Japonska, Super-Kamiokande, 1998

✔ Kanada, SNO - Sudbury Neutrino Observatory, 2001

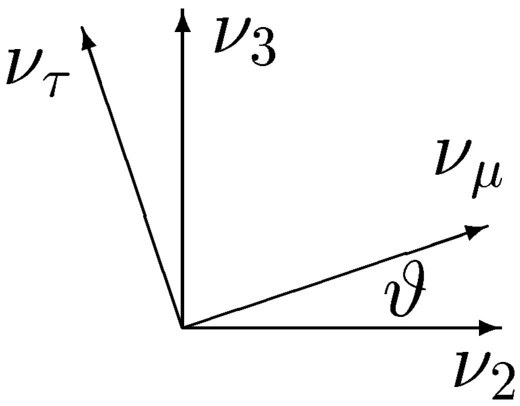
Fenomenološki opis oscilacij

Različna lastna stanja nevtrina:

- glede na šibko interakcijo: ν_e, ν_μ, ν_τ
  nastanek/detekcija - lastna stanja šibke interakcije.
- masna lastna stanja: $H|\nu_i\rangle = E_i|\nu_i\rangle$, i = 1, 2, 3

Poenostavitev ➜ mešanje le dveh vrst nevtrinov hkrati:

$$\begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\vartheta & -\sin\vartheta \\ \sin\vartheta & \cos\vartheta \end{bmatrix} \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



ϑ - prost parameter

Ravni valovi z znano gibalno količino; časovni razvoj:

$$|\nu_2(\vec{x},t)\rangle = e^{-iE_2t+i\vec{p}_2\vec{x}}|\nu_2(0)\rangle$$

Lastno stanje šibke interakcije

▼

masna lastna stanja

▼

časovni razvoj

▼

lastna stanja šibke interakcije:

$$\begin{pmatrix}|\nu_\mu(\vec{x},t)\rangle\\|\nu_\tau(\vec{x},t)\rangle\end{pmatrix} = e^{i\vec{p}\,\vec{x}}\begin{bmatrix}\cos\vartheta & -\sin\vartheta\\ \sin\vartheta & \cos\vartheta\end{bmatrix}\begin{bmatrix}e^{-iE_2t} & 0\\ 0 & e^{-iE_3t}\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\cos\vartheta & \sin\vartheta\\ -\sin\vartheta & \cos\vartheta\end{bmatrix}\begin{pmatrix}|\nu_\mu(0)\rangle\\|\nu_\tau(0)\rangle\end{pmatrix}$$

$\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu$:

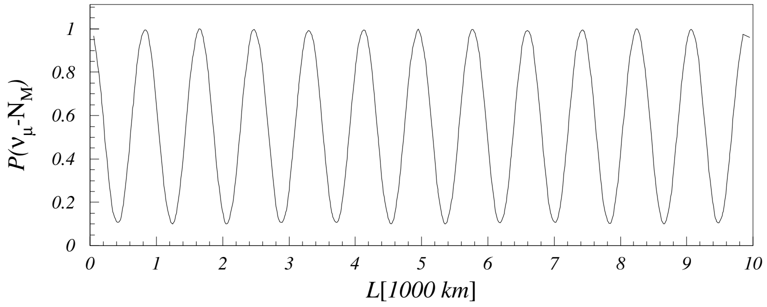
$$P_{\nu_\mu \to \nu_\mu} = ||\nu_\mu(\vec{x}, t)\rangle|^2 = 1 - \sin^2 2\vartheta \sin^2 \left(\frac{m_2^2 - m_3^2}{4E} t \right) .$$

V praktičnih enotah:

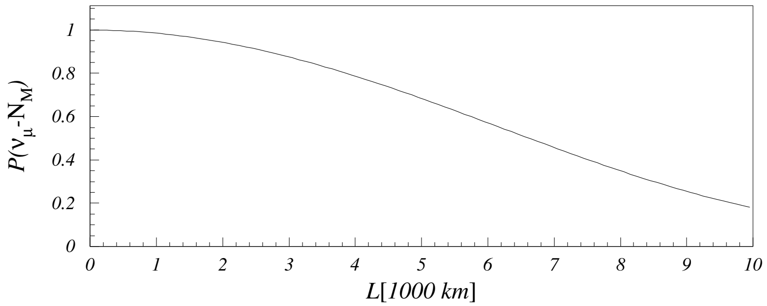
$$P_{\nu_\mu \to \nu_\mu} = 1 - \sin^2 2\vartheta \sin^2 \left(1.27 \Delta m^2 [eV^2] \frac{L[km]}{E_\nu [GeV]} \right) .$$

Izmerijo: L, E_ν

Prosta parametra: $\sin 2\vartheta$, Δm^2



$\Delta m^2 = 3 \cdot 10^{-3}$



$\Delta m^2 = 1 \cdot 10^{-4}$

Sliki: verjetnost, da je na razdalji L od mesta nastanka mionskega navtrina ta nevtrino še vedno mionski.
$E_\nu = 1 GeV$, $\sin^2 2\vartheta = 0.9$.

Poskus Super-Kamiokande

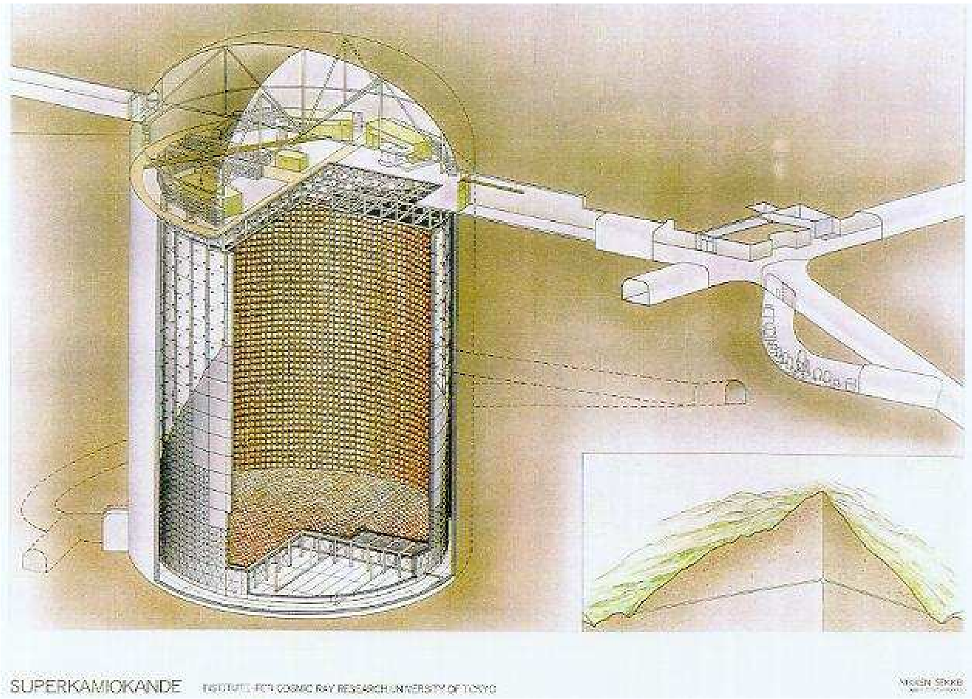
ATMOSFERSKI NEVTRINI: nastanejo v trkih kozmičnih delcev z molekulami ozračja.

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu, \qquad \mu^+ \to e^+ + \overline{\nu}_\mu + \nu_e.$$

$$\frac{N(\nu_\mu) + N(\overline{\nu}_\mu)}{N(\nu_e) + N(\overline{\nu}_e)} = 2$$

DETEKTOR:

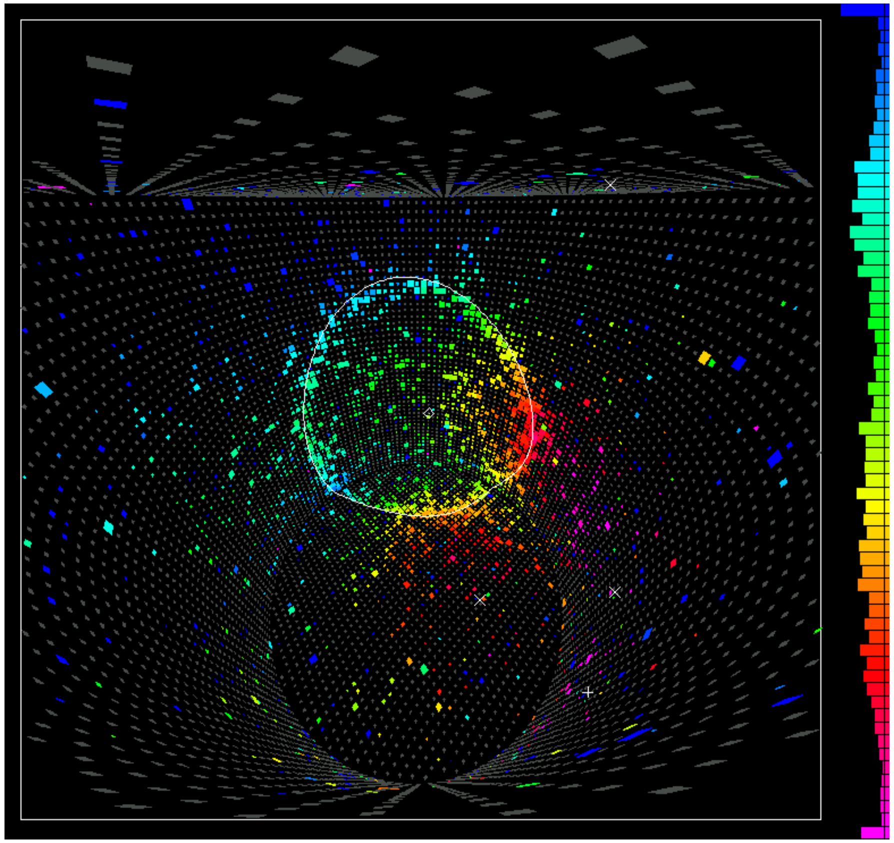
- ✗ Rudnik Mozumi, 1200 m pod površjem zemlje
- ✗ h = 42m, 2R = 39m
- ✗ izredno čista voda - H_2O
- ✗ zunanji in notranji detektor
- ✗ 11 146 + 1 885 fotopomnoževalk
- ✗ 26 Helmholzovih tuljav



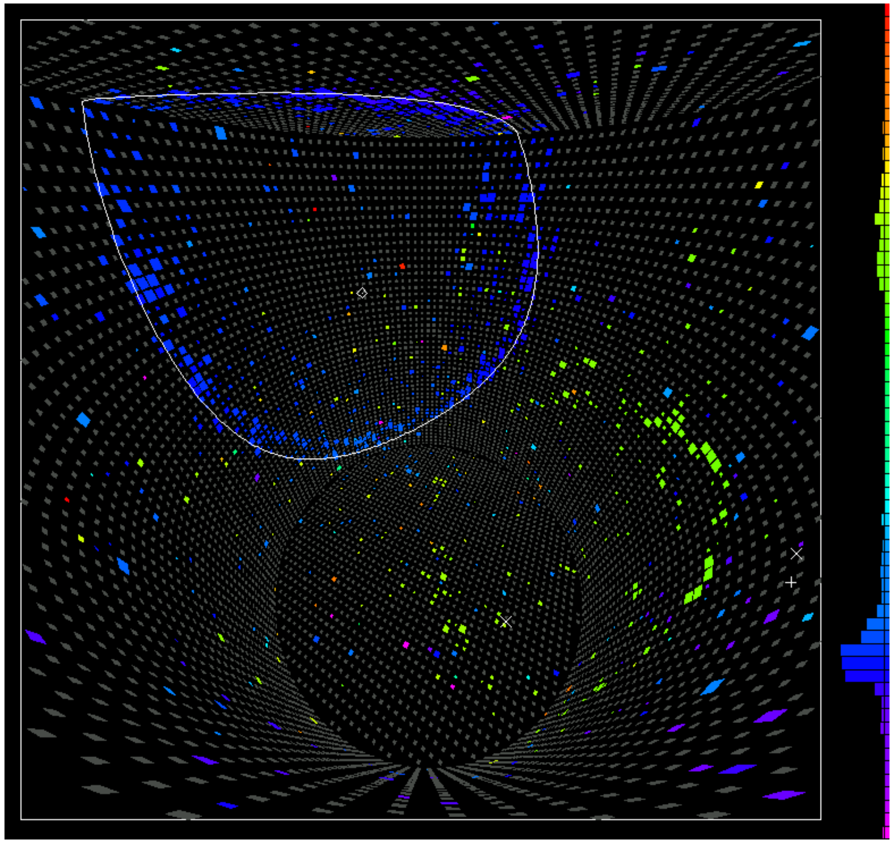
EKSPERIMENT:

Detekcija nevtrina: $\nu_\ell + n \to \ell^- + p$ ali $\overline{\nu}_\ell + p \to \ell^+ + n$

Nastali lepton Čerenkovo seva. Preko sevanja Čerenkova ga identificirajo:

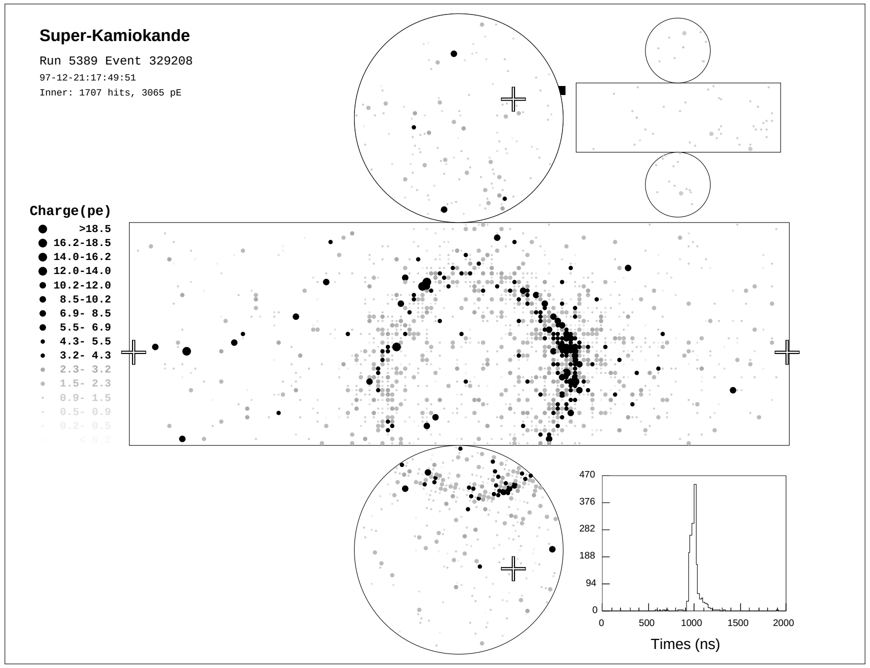


elektron

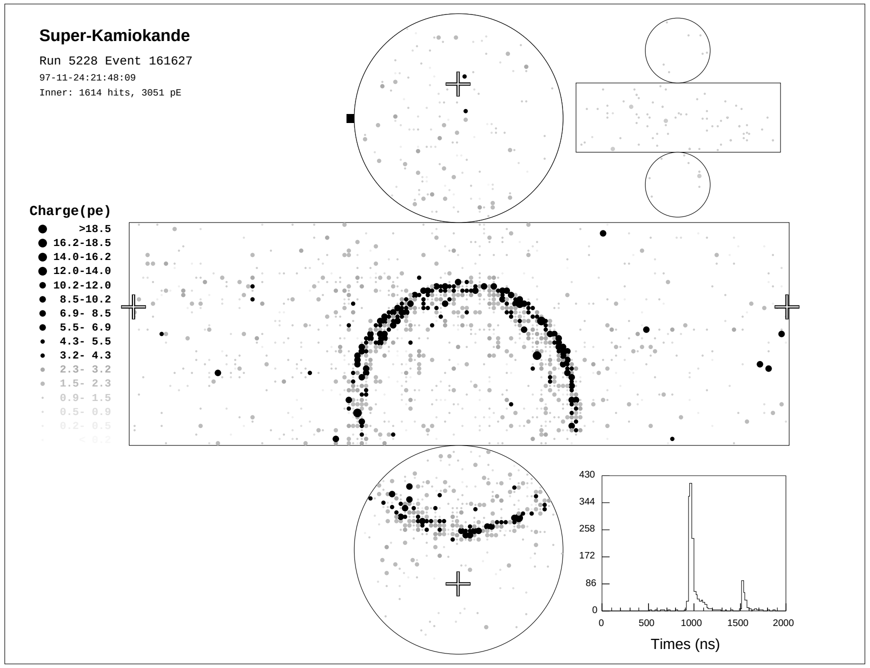


mion

IDENTIFIKACIJA



elektron

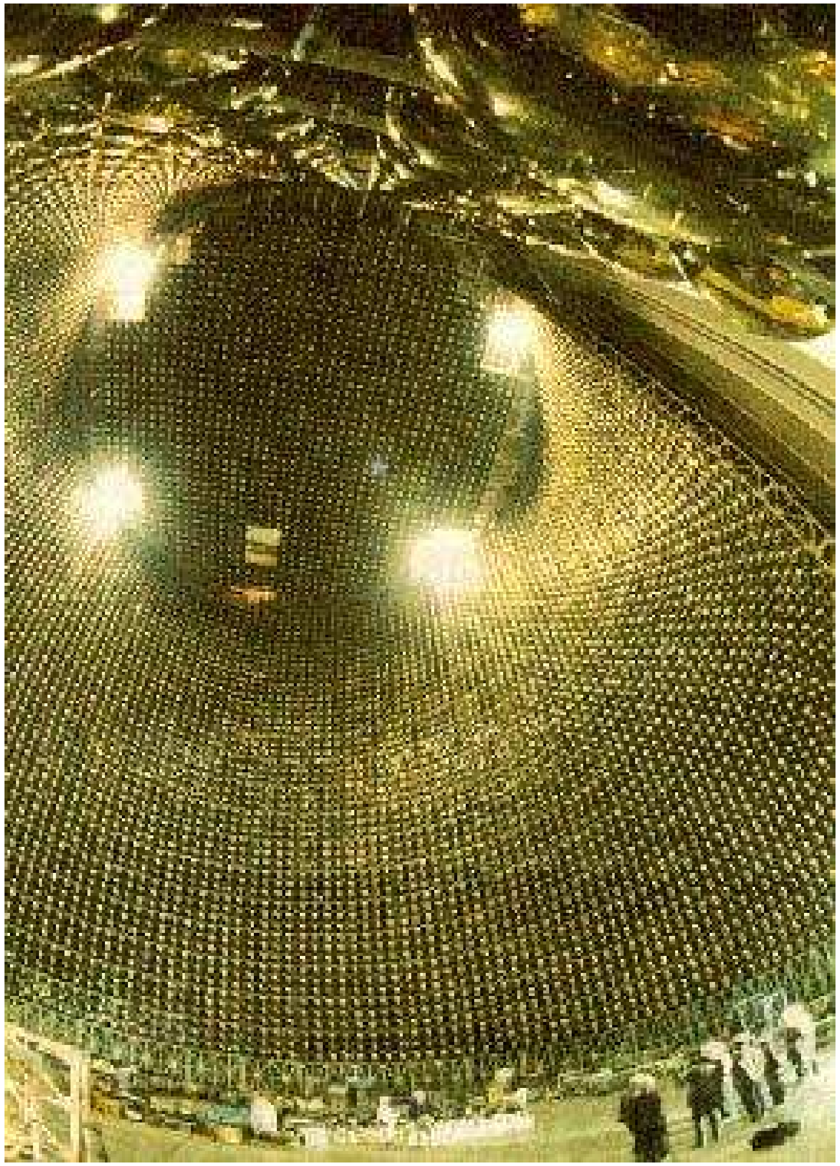


mion

- Podatki iz fotopomnoževalke:
  - ✔ število fotoelektronov,
  - ✔ čas, ko so fotoni zadeli fotopomnoževalko.

- Izračunajo:
  - ➥ verteks,
  - ➥ smer nevtrina,
  - ➥ energijo nevtrina:
    - mion - dolžina sledi
    - elektron - količina svetlobe.

- Glavna vira ozadja:
  - ☞ šum fotopomnoževalk
  - ☞ kozmični delci: 3/s

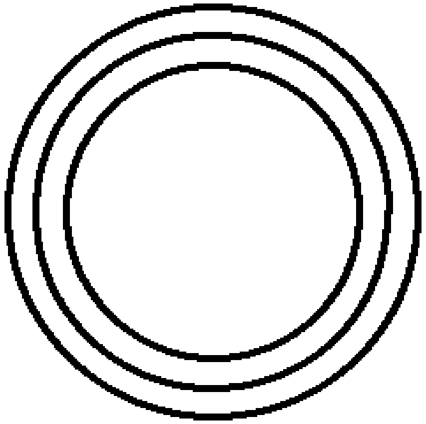


Notranjost detektorja

Signalne dogodke razdelijo:

- ☞ delno vsebovani: le ν_μ, povpr. $E_\nu = 15 GeV$
- ☞ polno vsebovani: ν_e in ν_μ

Izkoriščena prostornina: vsaj 2 m od roba notranjega detektorja.



Shematični tloris detektorja

Detektor zazna 10^6 dogodkov na dan, povprečno 6 signalnih.

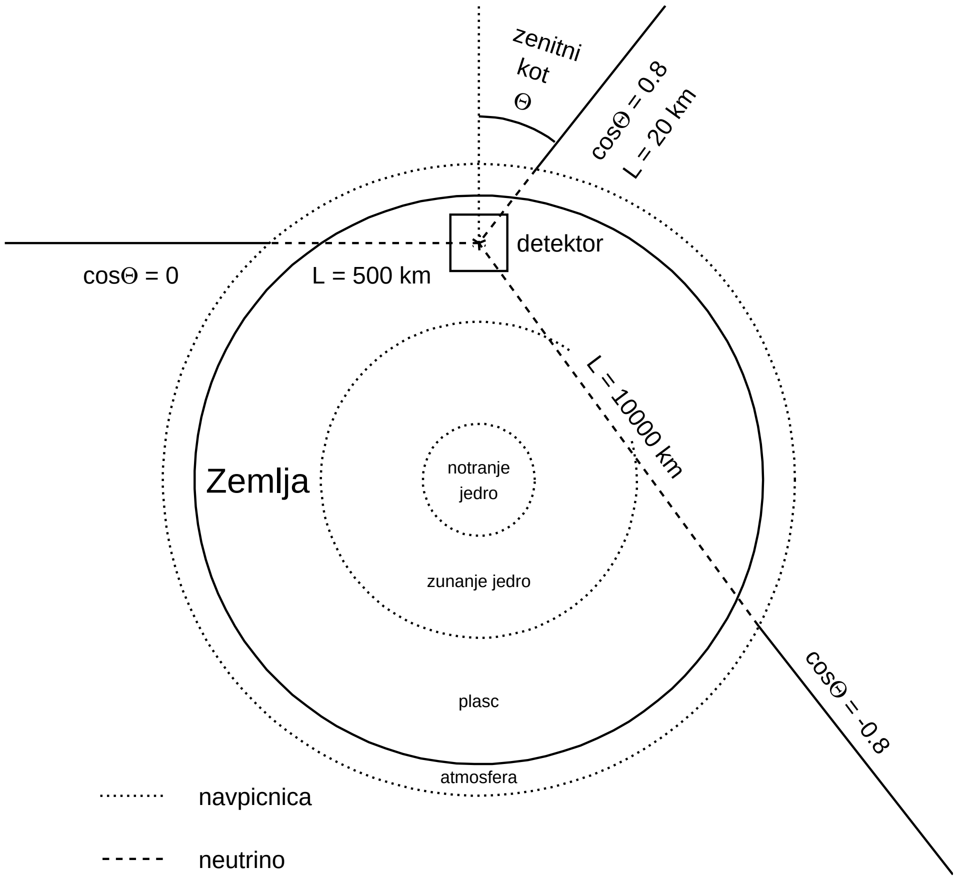
535 dni opazovanj ➜ 3210 nevtrinov.

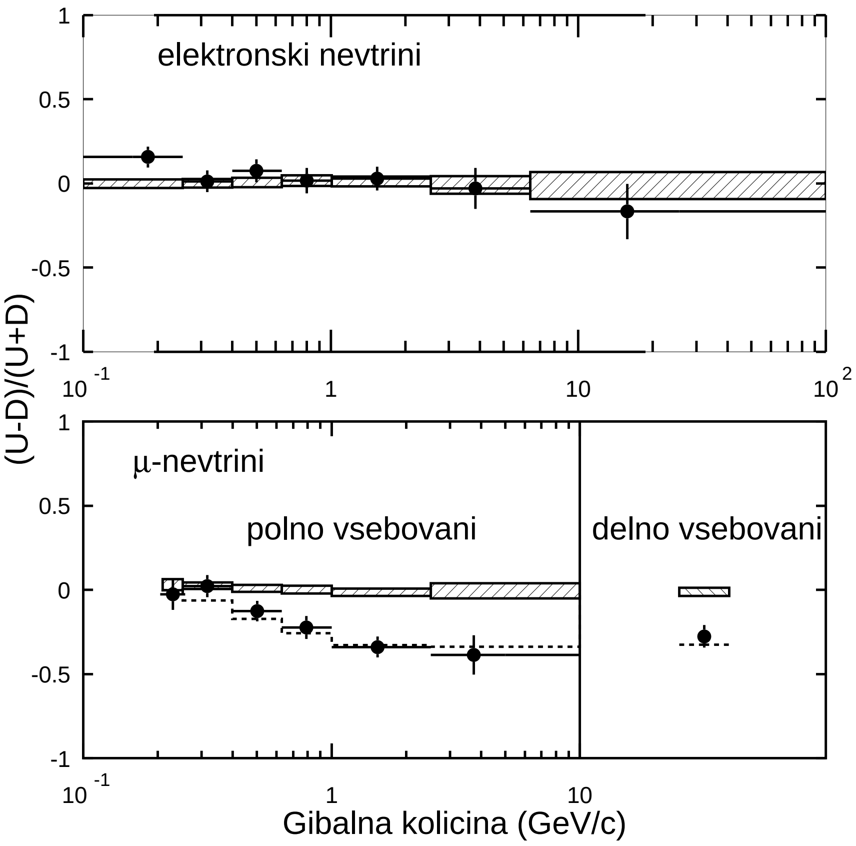
REZULTAT:

$$R \equiv \frac{(N_\mu/N_e)_{MERITEV}}{(N_\mu/N_e)_{TEOR}} = \frac{1689/1521}{1.74} = 0.64 \pm 0.07 \neq 1.$$

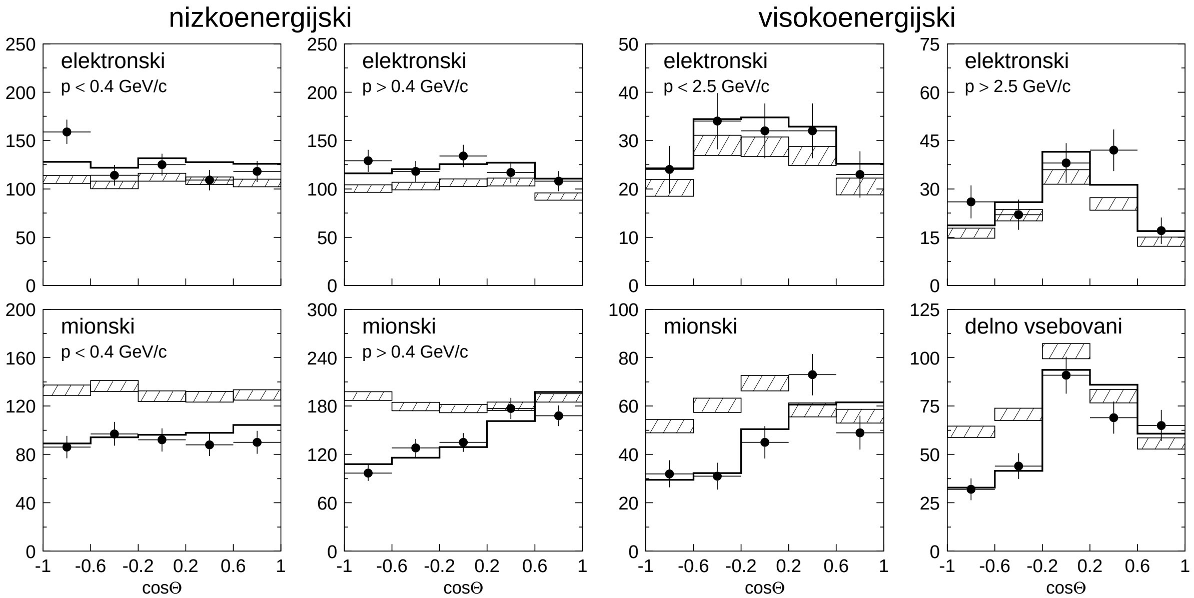
Asimetrija gor-dol:

$$A \equiv \frac{U - D}{U + D}$$





Kotna porazdelitev ν_e in ν_μ:



❢ Razlaga:

- ☞ ν_μ oscilirajo, a ne v ν_e
- ☞ ν_e ne oscilirajo ❖

✍ Rezultat prilagajanja:

$$\sin^2 2\vartheta = 1.0 \qquad \text{in} \qquad \Delta m^2 = 2.2 \cdot 10^{-3} eV^{-2}.$$

ν_μ z $E_\nu = 1 GeV$ se po $L = 5\,500 km$ z verjetnostjo 1 spremeni v ν_τ.

Poskusi z nevtrini iz drugih izvorov

1. NEVTRINI S SONCA

Na soncu poteka:

- ✗ zlivanje lahkih jeder v težja jedra,
- ✗ β razpadi težjih jeder.

Pri tem nastajajo elektronski nevtrini:

$$p \rightarrow n + e^{+} + \nu_e \ , \qquad p + e^{-} \rightarrow n + \nu_e$$

Sončevi modeli ➜ napoved toka nevtrinov.

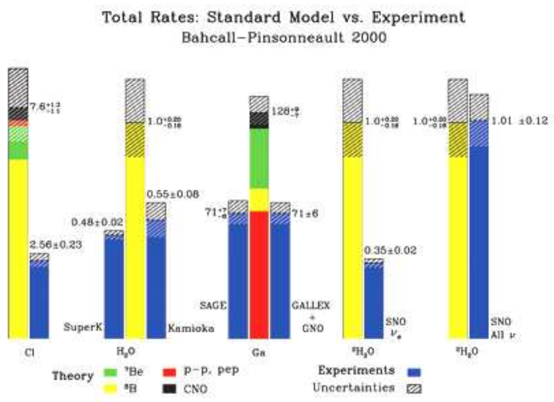
Merjenje toka nevtrinov:

1.1 Homestake

520 ton C_2Cl_4:

$$\nu_e + \ ^{37}Cl \rightarrow \ ^{37}Ar^{*} + e^{-}.$$

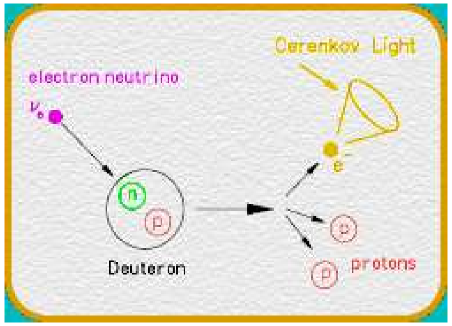
V 2 mesecih pričakujejo 46 atomov Ar^{*}, v povprečju izmerijo 14.



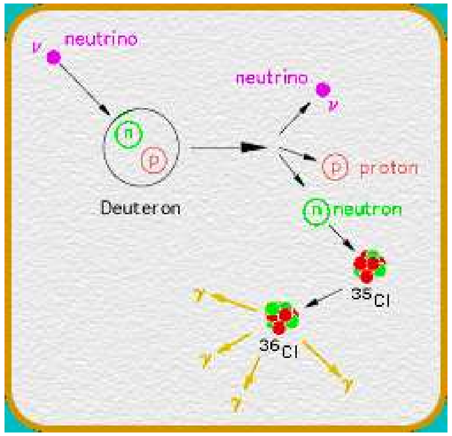
Napovedani in izmerjeni tok ν za različne poskuse.

1.2 Sudbury Neutrino Observatory

1000 ton D_2O
2 reakciji:



① nabiti tok: $\nu_e + d \to e^- + p + p$ ➜ le ν_e



② nevtralni tok: $\nu_x + d \to \nu_x + p + n$ ➜ vsi ν enako

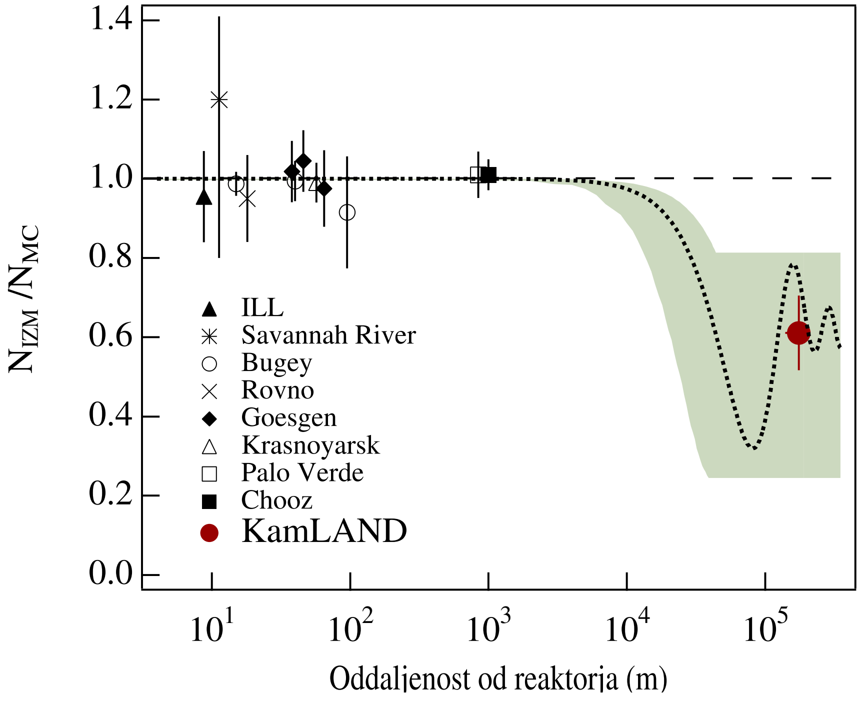
Tok vseh nevtrinov, ki priletijo s sonca ➜ se ujema z napovedmi.
Tok ν_e manjši.
} ➜ dokaz za oscilacije.

2. REAKTORSKI NEVTRINI

Cepitev urana in plutonija v jedrskih reaktorjih
➜ $\overline{\nu}_e$.

L = nekaj 10 m do nekaj 100 km

Primanjkljaj izmeril poskus KAM-Land, 2002:



3. POSPEŠEVALNIŠKI NEVTRINI

Razpad piona:

$$\pi^+ \to \mu^+ + \nu_\mu \qquad \text{in} \qquad \pi^- \to \mu^- + \overline{\nu}_\mu .$$

Merijo tok ν_μ. Primanjkljaj izmerili s poskusom LSND.

Zaključek

Oscilacije dokazane: Super-K, SNO ✔

⊗ neujemanje nekaterih rezultatov ⊗

Ponazoritev:

izvor	eksperiment	manjkajoči nevtrini	$\Delta m^2 [eV^2]$
sonce	SNO	ν_e	$\Delta_1 m^2 \sim 10^{-5}$
ozračje	Super-K	ν_μ	$\Delta_2 m^2 \sim 10^{-3}$
pospeševalnik	LSND	$\overline{\nu}_\mu$	$\Delta_3 m^2 \sim 10^{-1}$

Ne vemo, v katere nevtrine oscilirajo manjkajoči nevtrini.

Različni Δm^2 ➜ mešanje med različnimi nevtrini.

$$\Delta_1 m^2 = m_1^2 - m_2^2, \tag{1}$$
$$\Delta_2 m^2 = m_2^2 - m_3^2, \tag{2}$$
$$\Delta_3 m^2 = m_1^2 - m_3^2. \tag{3}$$

Sledi

$$\Delta_1 m^2 + \Delta_2 m^2 - \Delta_3 m^2 = 0.$$

Tabela ➜ zahteva ne more biti izpolnjena. Torej:

- en rezultat zavreči,

  ali pa

- model s tremi družinami ne opiše zadovoljivo nevtrinov.

Obstaja še ν_s?