Проблемы солнечных нейтрино.

ν_e от $\odot$ – проявление слабых взаимодействий.

β-распад: $n \to p + e^- + \bar{\nu}_e$.

обратный β-распад: $n + \nu_e \to p + e^-$

– протон – протонный цикл: $p + p \to D + e^+ + \nu_e$

$E^{\nu}_{пор} < 0.4$ МэВ ; SSM : $f = 1.68 \cdot 10^{38} \left(\frac{\nu}{c}\right)$.

– борный цикл: ${}^8B^* \to 2 \times {}^4He$

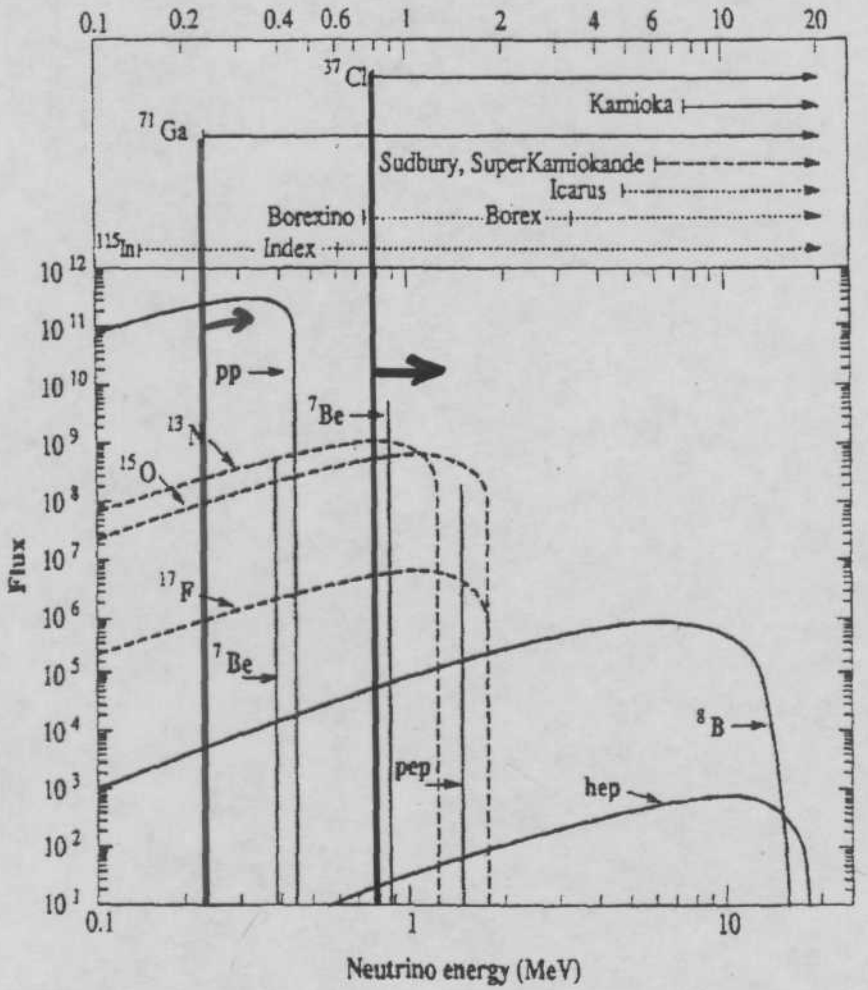
$E^{\nu}_{пор} < 20$ МэВ ; SSM : $f = 1.35 \cdot 10^{34} \left(\frac{\nu}{c}\right)$

Сложность в определение потока нейтрино – плохое знание сечения взаи-ия при малых энергиях.

$$\sigma_\nu \simeq 11.4 \cdot 10^{-43}, \text{ см}^2$$

$$\odot : N_\nu^{\odot} = 2 \times \frac{L_\odot}{25 \text{ МэВ}} = 10^{39}, \frac{1}{c}$$

$$f_\nu = N_\nu^{\odot} / 2\pi R = 10^{11} \frac{1}{1 \text{ см}^2 \cdot \text{сек}} \quad !!!$$



$p + p \to D + e^{+} + \nu_e$ (pp neutrinos)
$p + p + e^{-} \to D + \nu_e$ (pep neutrinos)
ppII chain: $^{7}Be + e^{-} \to^{7} Li + \nu_e$ (^{7}Be neutrinos)
ppIII chain: $^{7}Be + p \to^{8} B$ $^{8}B \to^{8} Be^{*} + e^{+} + \nu_e$
$^{8}Be^{*} \to 2^{4}He$ (^{8}B neutrinos)
$p +^{3} He \to \nu_e + e^{+} +^{4} He$ (hep neutrinos)
CNO I cycle: $^{13}N \to^{13} C + e^{+} + \nu_e$ (^{13}N neutrinos)
$^{15}O \to^{15} N + e^{+} + \nu_e$ (^{15}O neutrinos)
CNO II cycle: $^{17}F \to^{17} O + e^{+} + \nu_e$ (^{17}F neutrinos)

Эксперимент Дэвиса. (1968 ÷ 1990) гг.

$M = 610$ тонн C_2Cl_4, $h = 4900$ мвэ (Южная Дакота)

$(n + \nu_e \to p + e^-)$

обратный β-распад: $\nu_e + {}^{37}_{17}Cl \to {}^{37}_{18}Ar + e^-$, $E^{\nu}_{пор} = 0.814$ МэВ

$\to T_{1/2} = 35$ дней

чувствителен к ^{8}B, ^{7}Be, pep, CNO – циклам

Набор статистики $1 \div 2$ месяца. (накопление ^{37}Ar)

попеременно добавляли по $\sim 1/10$ см^3 изотопов ^{36}Ar и ^{38}Ar

для определения эффективности извлечения Ar из жид-и

далее: $\left[{}^{37}Ar + {}^{40}Ar + {}^{36}_{38}Ar\right] + 10\%\ CH_4 \to$ в пропор-ый счётчик.

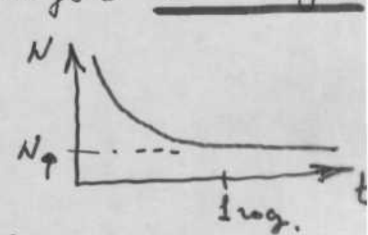
$^{37}Ar \to {}^{37}Cl + e^-$ (э-захват) регист-ся Оже элек-к

$T_{1/2} = 35$ дней. $E_e = 2.82$ кэВ

$p + e^- \to n + \nu_e$

Для опре-ния фона подсчёт числа распадов $t \sim 1$ года

$$N = 0.49 \pm 0.03 \left(\frac{\text{захвата}}{\text{день}}\right)$$



60 дней $\to$ $20 \div 30$ ν взаимодействий.

$F = 2.55 \pm 0.25$, SSU (эксп)

$F = (7.0 \pm (1.7 \div 3.9))$, SSU (модели)

$$SSU = 10^{-36} \frac{\text{захвата}}{\text{атом} \cdot \text{сек}}$$

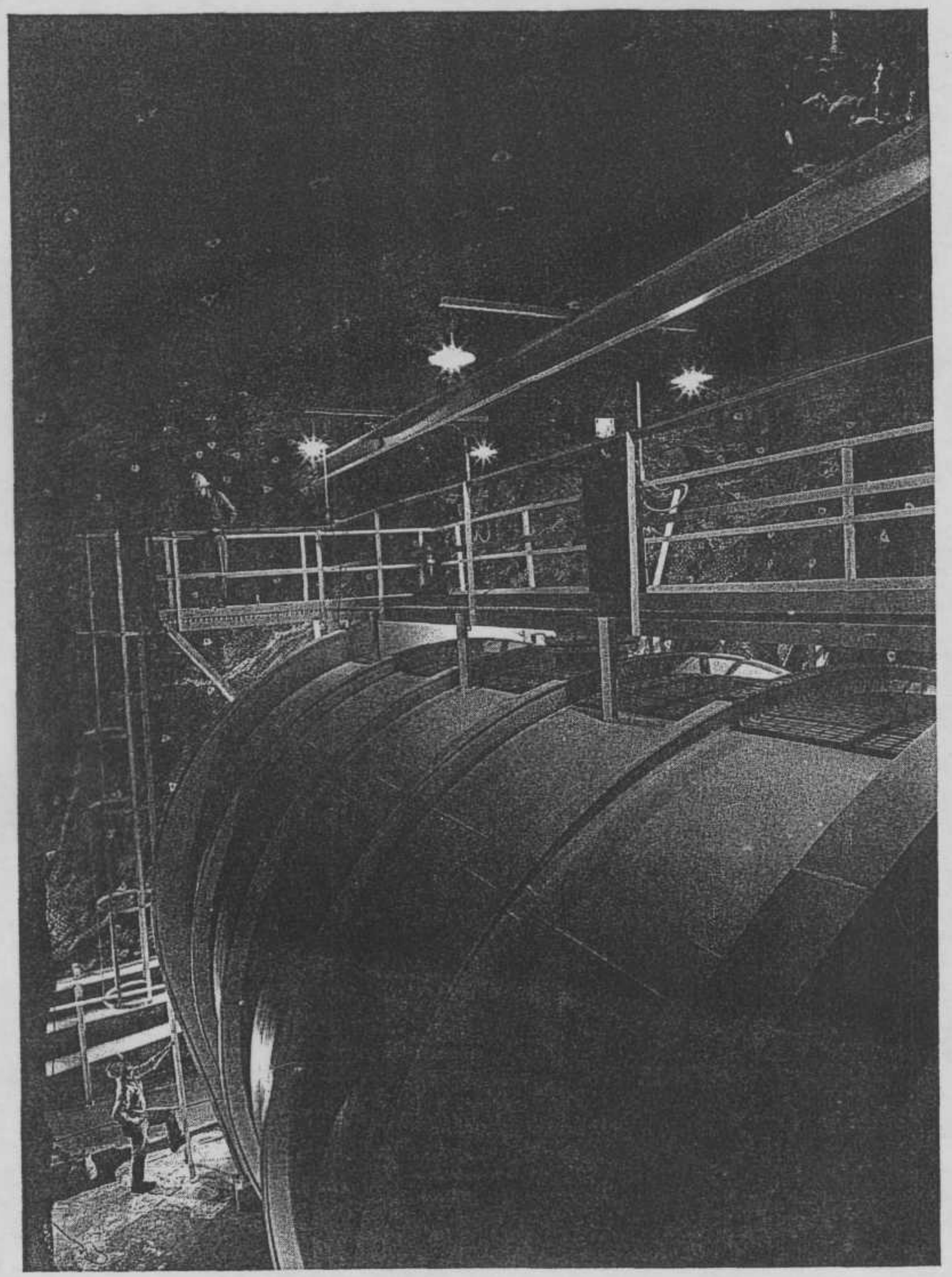
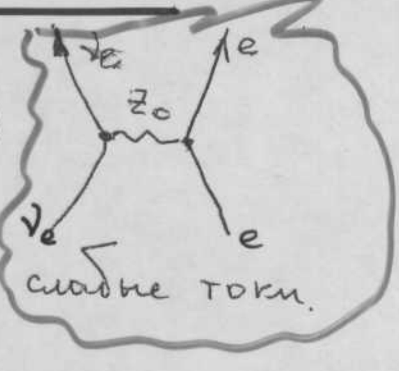


FIGURE 3.6

The large underground tank holding 615 tons (100,000 gallons) of liquid containing chlorine, located in the Homestake gold mine in Lead, South Dakota. The tank was built by a Brookhaven team, under the direction of Ray Davis, Jr., to search for the signal from neutrinos emitted by the sun. The photo shows the tank before the experiment was begun in 1967. This detector, now operated by the University of Pennsylvania, has operated for more than twenty years. (Photo provided by R. Davis, courtesy of Brookhaven National Laboratory.)

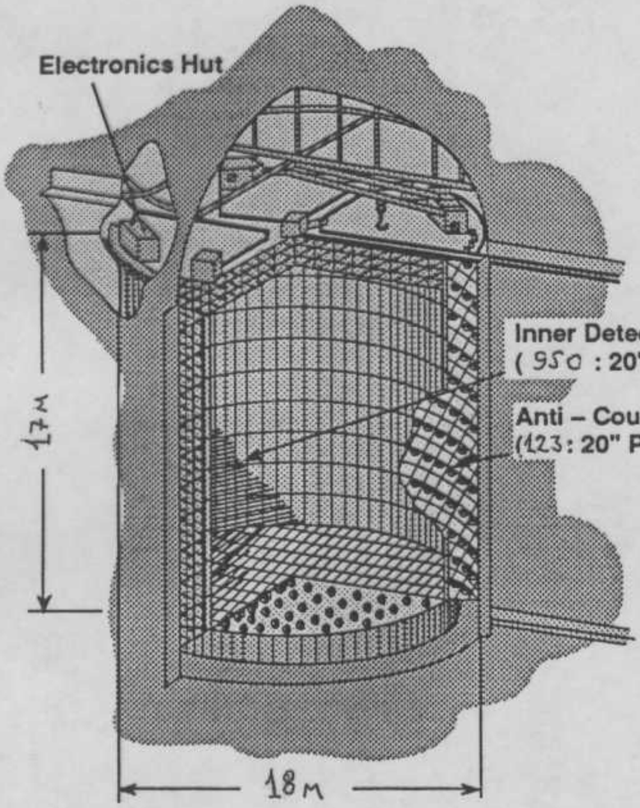
(IMB), Камиоканда II (1986 ÷ 1992)



<u>реакция:</u> $\nu_x + e^- \to \nu_x + e^- (+\Delta E)$

регистрация черенковского света от e^-.

$E_{пор} > 7.5$ МэВ (^8B - цикл)

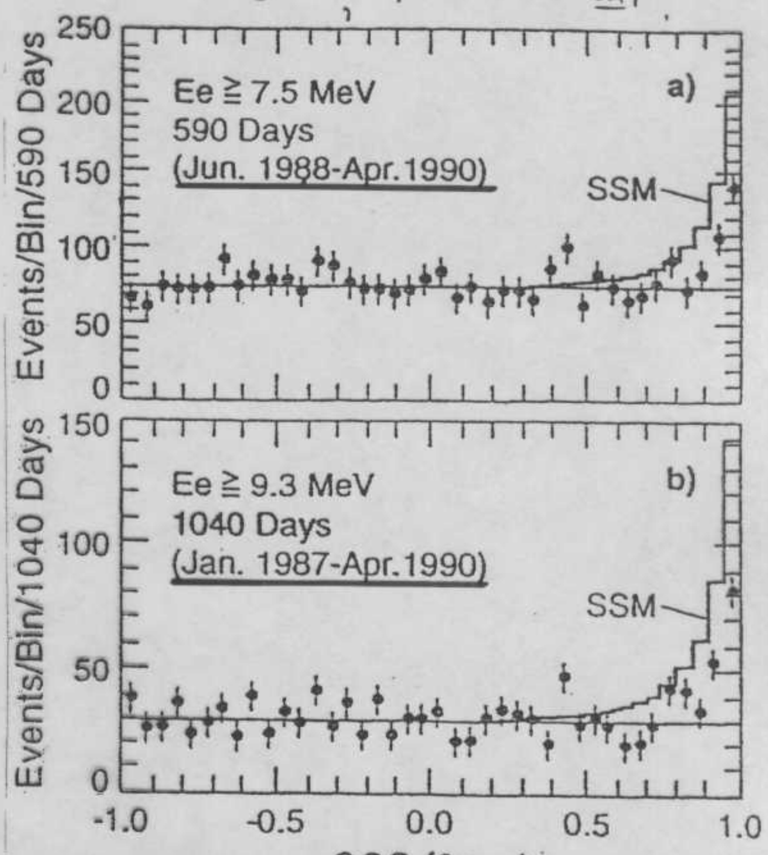


В шахте на $h = 2700$ мвэ.

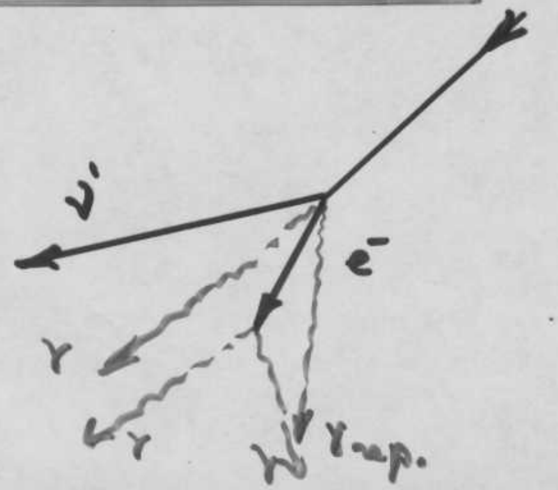
Масса воды 4500 т.

$N_{ФЭУ} = 950$ шт, $\varnothing ФК = 50$ см

Снаружи 2 метра воды с антисовпадательными ФЭУ, $N = 123$ шт.



$F = 2.44 \pm 0.26$ SSU



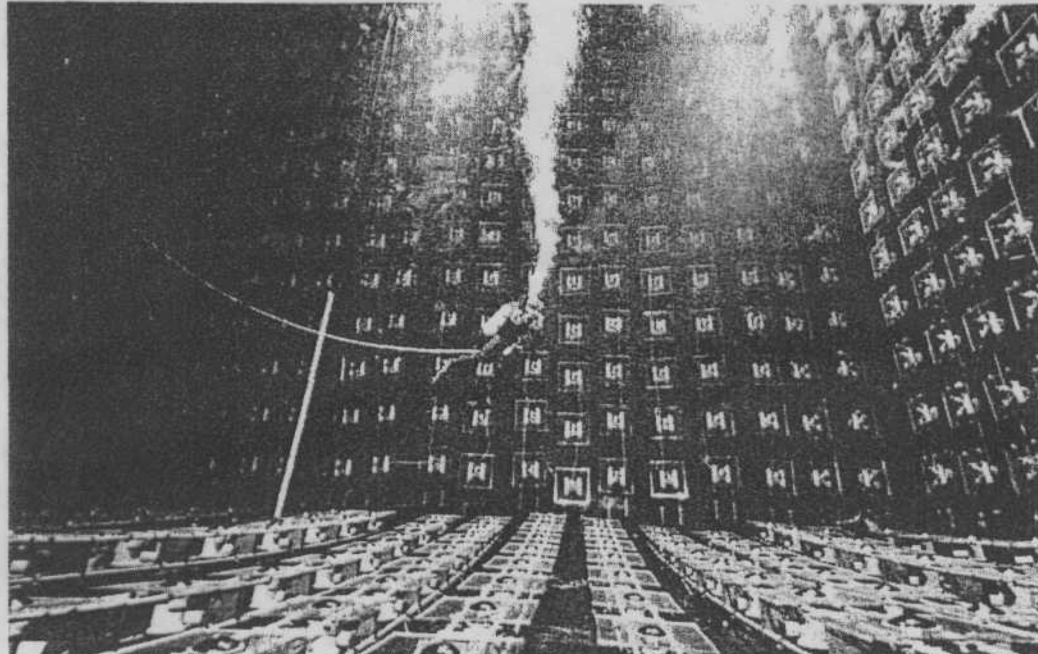


FIGURE 12.3

A photograph taken inside the Irvine-Michigan-Brookhaven proton decay detector (also displayed in figure 6.5 before being filled with water). Clearly seen around the periphery are some of the thousands of huge photosensitive tubes that detect the light produced by charged particles traveling in the water. (Photo by Joe

Галлиевый эксперимент (GALLEX, SAGE)

SAGE: (1988 ÷ 1993) гг.

$$\nu_e + {}^{71}_{31}Ga \to e^- + {}^{71}_{32}Ge \quad , \quad \underline{E^{\nu}_{пор} = 0.233\ МэВ}$$

$$(\nu_e + n \to p + e^-)$$

→ чувствителен ко всем солнечным циклам !

p-p цикл даёт $\underline{54\%}$ ν_e при этом пороге.

Эксперимент: 57 т Ga в соединении $GaCl_4$ (200 т)

глубина $h = 4700$ м в э

добавка ~1 мг Ge для определения эф-и извлечения.

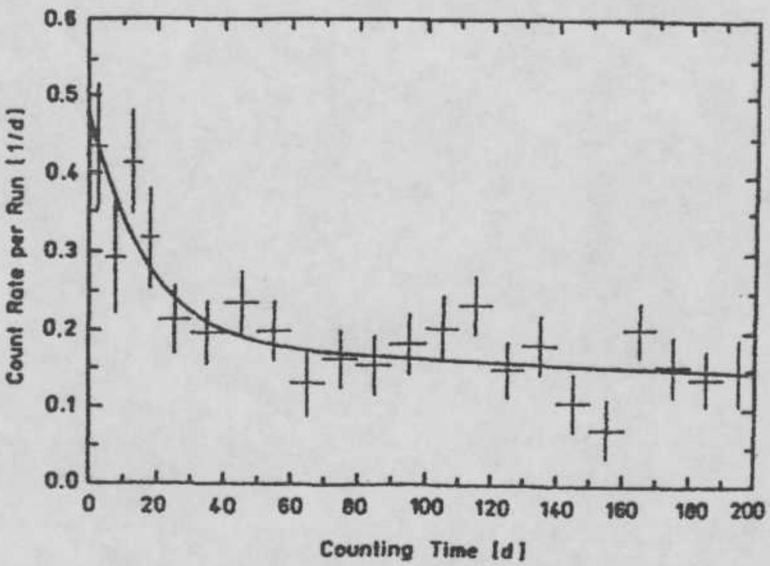
$$\left.\begin{array}{l} GaCl_4 \text{ — не летучий} \\ GeCl_4 \text{ — летучий} \end{array}\right\} \text{продувки вали Xe}$$

далее: $GeCl_4 \xrightarrow{химия} GeH_4 \to$ смесь ($30\%\ GeH_4 + 70\%\ Xe$)

→ пропорциональный счётчик.

$${}^{71}Ge \xrightarrow[T_{1/2} = 11.4\ дня]{} {}^{71}Ga \text{ (электронный захват)}, \quad p + e^- \to n + \nu_e$$

регистрируется Оже электрон $\begin{cases} E^L_e = 1.17\ кэВ \\ E^K_e = 10.37\ кэВ \end{cases}$



Average count rate per run in GALLEX I plotted as a function of time after the start of counting. The solid line represents the best fit to the data obtained with the maximum likelihood method.

Суммарная таблица.

Neutrino Observations				
Experiments	Chlorine exp.	SuperK exp.	Gallium	experiments
		$(10^6/cm^2/s)$	GALLEX	SAGE
	2.55 ± 0.25 SNU	2.44 ± 0.26	76 ± 8 SNU	70 ± 8 SNU
			(cal= 0.91 ± 0.08)	(cal= 0.95 ± 0.12)
Neutrino predictions				
Reference model	7 ± 1.7 SNU	5 ± 1.25	127 ± 8 SNU	127 ± 8 SNU
Nuclear model	5.2 SNU	3.21	119 SNU	119 SNU
^7Be model	3.87 SNU	2.4	105 SNU	105 SNU

1 SNU is the solar neutrino unit which is equal to 10^{-36} capture/atom s.

Попытки решения проблемы Солнечных ν.

- 1. Изменение модели Солнца.
  - гидродинамика
  - $T(r)$
- 2. ν-осцилляции.

Осцилляции:

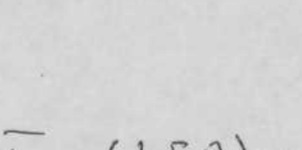
$\exists^{\text{т}}$ 3 типа ν: $\quad Z_0 \to \nu\bar{\nu}$ (LEP) $\to \underline{N_\nu = 3}$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} \sim \begin{pmatrix} e \\ \mu \\ \tau \end{pmatrix} \qquad \begin{aligned} m_e &= 0.511 \text{ МэВ} \\ m_\mu &= 105 \text{ МэВ} \\ m_\tau &= 1777 \text{ МэВ} \end{aligned}$$

ν введено для выполнения ЗСЭ в β-распаде (Паули, Майорана)

$$A^1 \to A^2 + e^-$$

$$n \to p + e^- + ?(\nu)$$



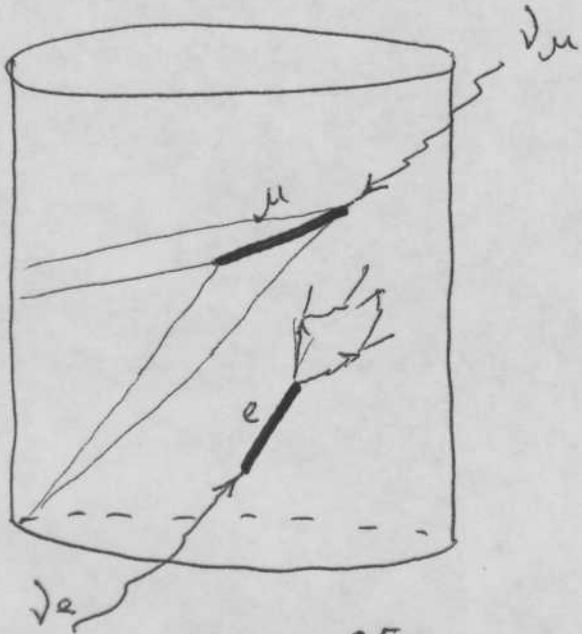
$$(\text{СВ}) \quad \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\Theta & \sin\Theta \\ -\sin\Theta & \cos\Theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} N_1 \\ N_2 \end{pmatrix} \quad (\text{Масса}) \quad \Rightarrow$$

Θ – угол смешивания

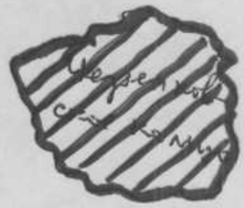
$$W_{12} = \sin^2 2\Theta \cdot \sin^2\left(\pi \frac{R}{L}\right) \qquad \nu_1 \xrightarrow{R} \nu_2$$

L – длина осцилляций

$$\underline{L[\text{км}] = 2.5 \cdot E[\text{ГэВ}] / \delta m^2[\text{эВ}]}$$



e – даёт ливень



μ – не даёт ливень

за 2.5 года: $N_e = 2270$ шт

$N_\mu = 2200$ шт.

$$R = \frac{(N_\mu / N_e)_{изм}}{(N_\mu / N_e)_{MC}} = 0.68 \pm 0.02 \pm 0.06$$

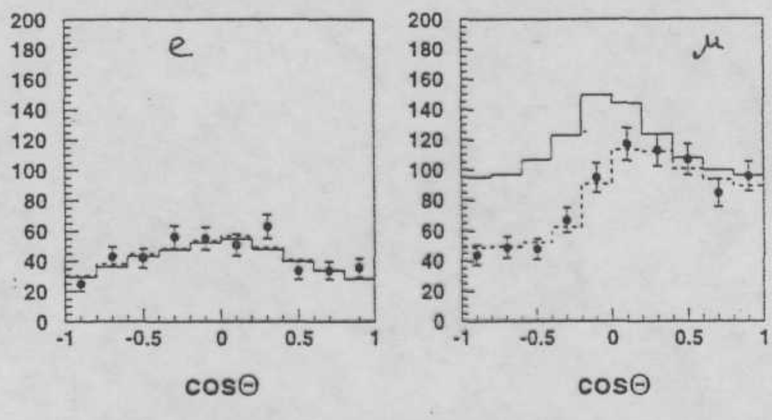
обнаружен недостаток ν_μ, прошедших Землю.

обнаружен переход $\nu_\mu \to \nu_\tau$!

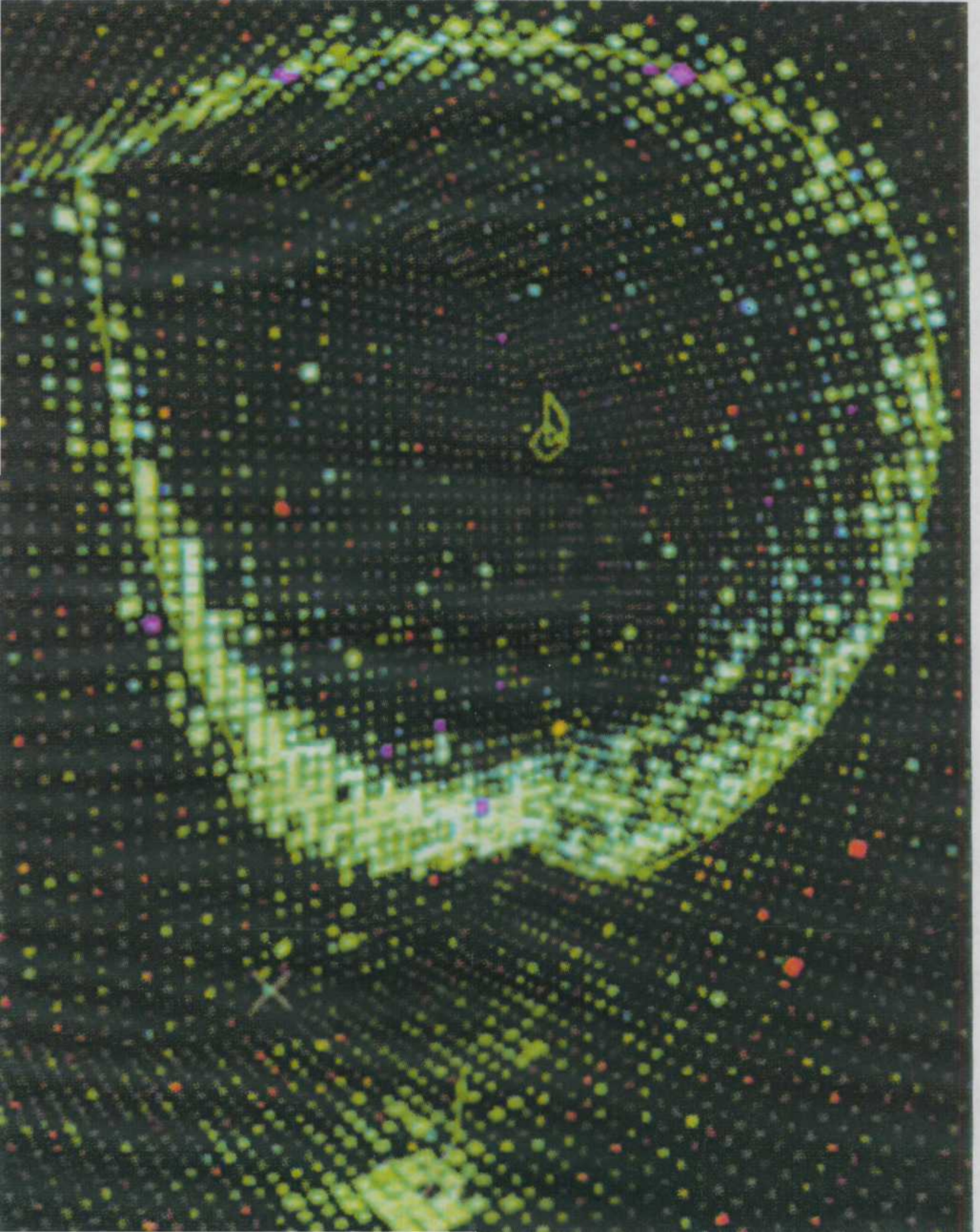
$\sin^2 2\Theta = 1.0$

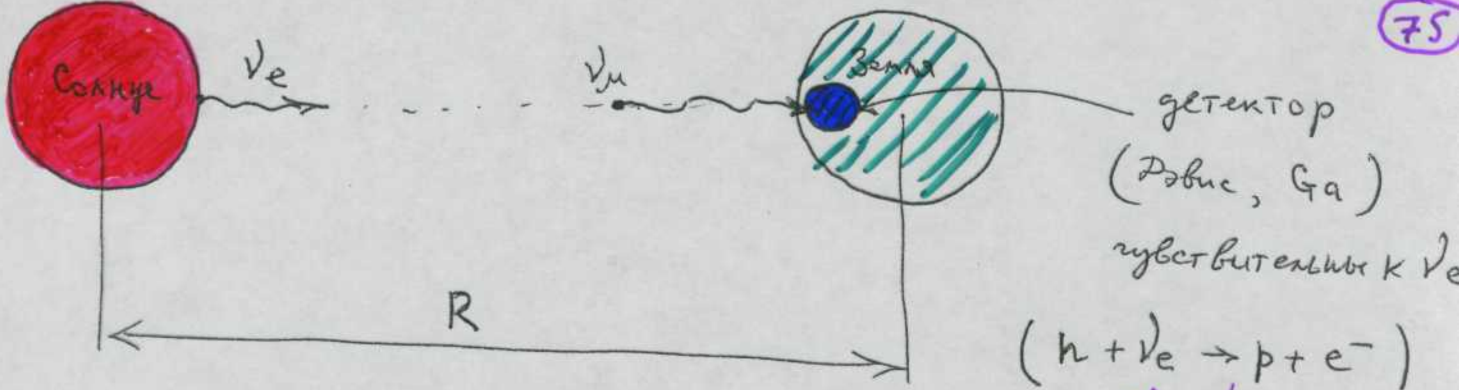
$\delta m^2 = 4.5 \cdot 10^{-3}$ эВ^2

$\delta m = 0{,}05 \div 0{,}07$ эВ



Preliminary angular distributions for sub-GeV (top) and multi-GeV (bottom) 848 day samples; left figures are for e-like and right for μ-like events. Solid lines show the MC no-oscillation prediction, and broken lines show the $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ oscillation prediction for the best-fit parameters.





$(n + \nu_e \to p + e^-)$

$\nu_\mu \not\to$

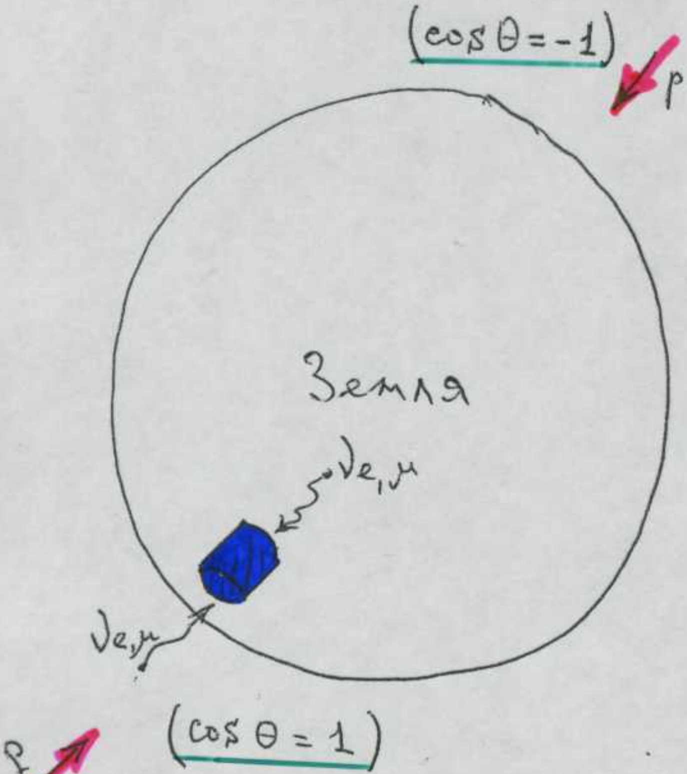
потеря части ν_e из-за осцилляций.

Поиск осцилляций при малых $L \sim 10\,м \div 1000\,м$ ничего не дал $(\delta m^2 < \dots) \Rightarrow L > 1 \div 10\,км$

Использование детектора Super Kamiokanda

(распад протона) для поиска осцилляций.

$$(\text{космич.})\ p + \text{ядро} \to \begin{matrix} \pi^- \to \mu^- \to \underline{\nu_\mu}\, e^- \bar{\nu}_e \\ \pi^+ \to \mu^+ \to \bar{\nu}_\mu\, e^+ \underline{\nu_e} \end{matrix} \Bigg\}\ e \text{ и } \mu \text{ — события в детекторе.}$$

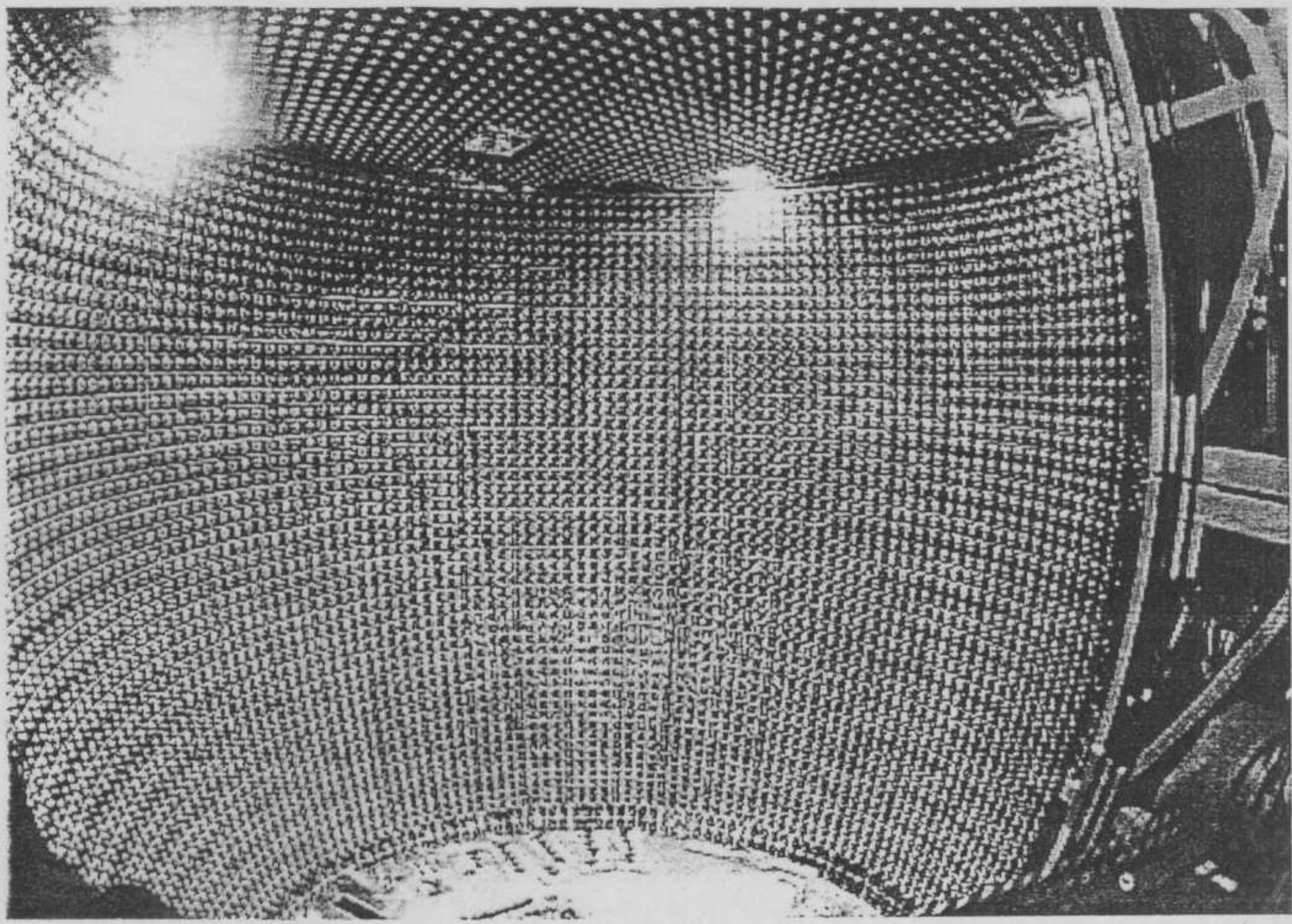


Регистрация ν по:

$\nu_e + N \to e + N'$

$\nu_\mu + N \to \mu + N'$

$E_\mu = 0.2 \div 10$, ГэВ.



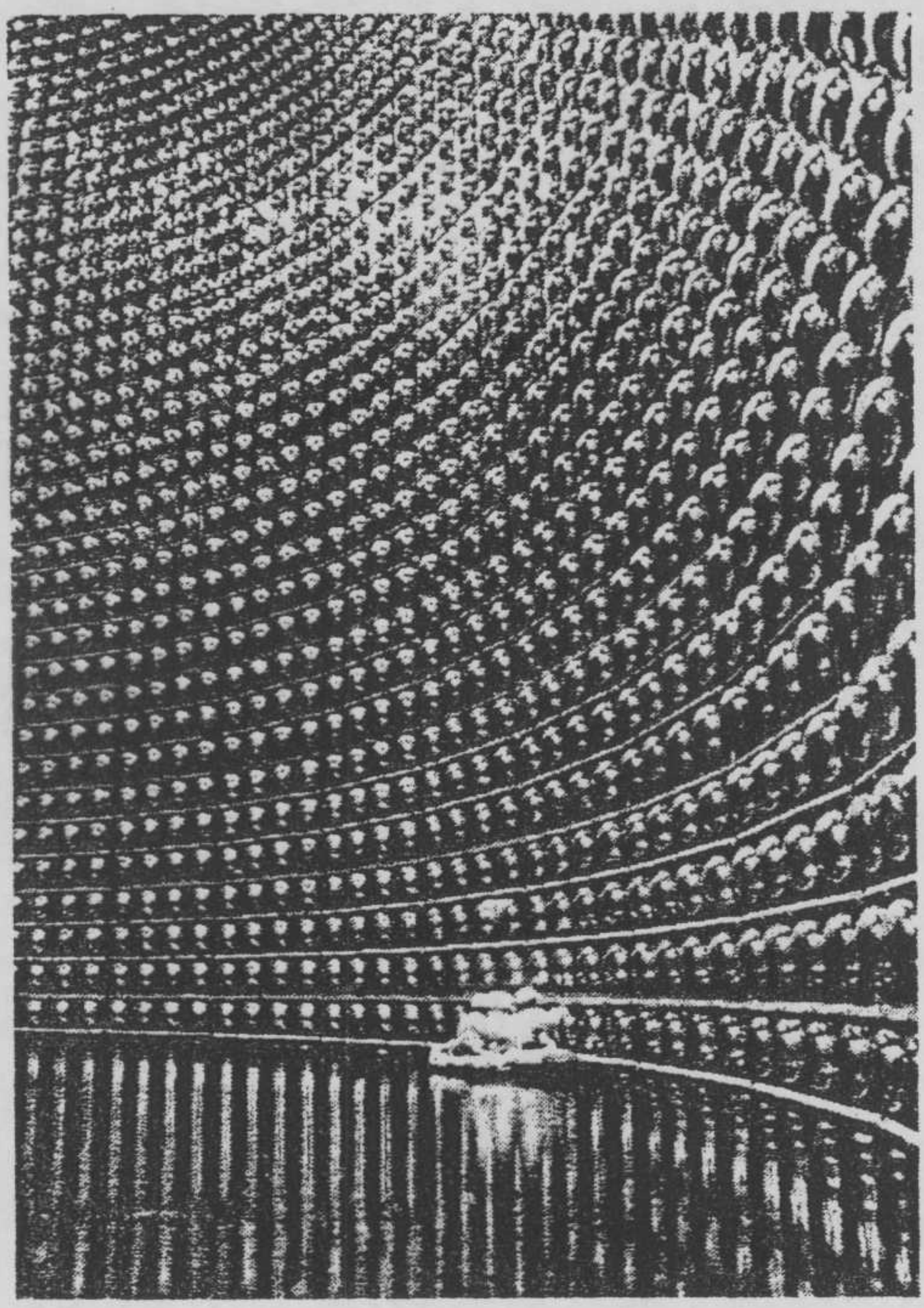
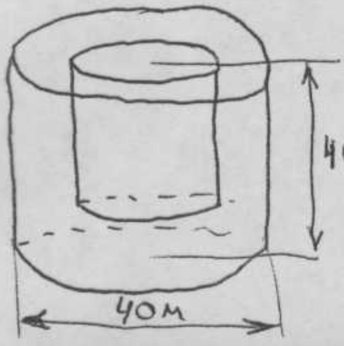


Figure 1. Photograph of the Super-Kamiokande detector during fill-up

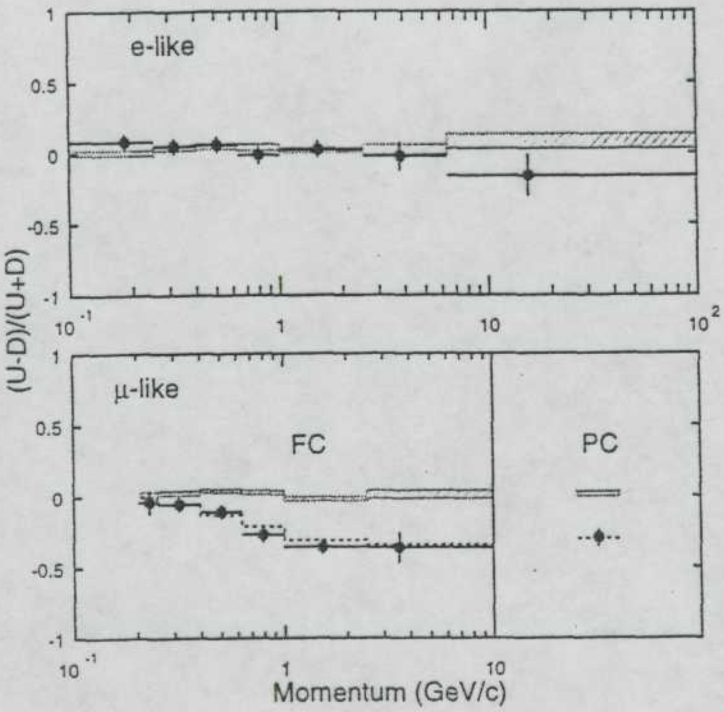


$V_{общ} = 50$ кТ, $V_{акт} = 22.5$ кТ

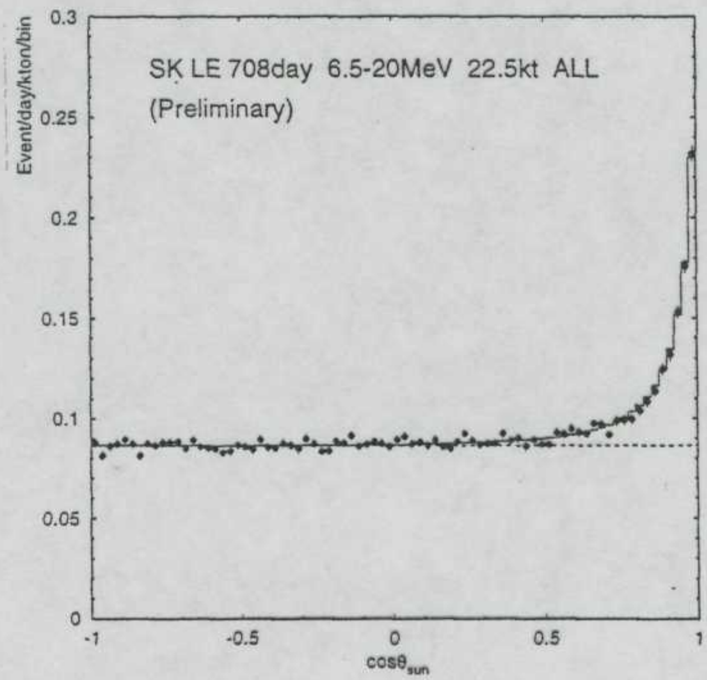
$N_{ФЭУ}^{внут} = 11150$ шт, $\varnothing$ ФК = 50 см.

$N_{ФЭУ}^{внеш} = 1885$ шт, $\varnothing$ ФК = 20 см.

Зависимость от энергии подтверждает осцилляции.



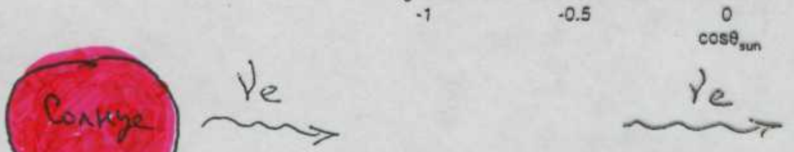
Исследование Солнечных ν_e. ($t \simeq 2$ года)

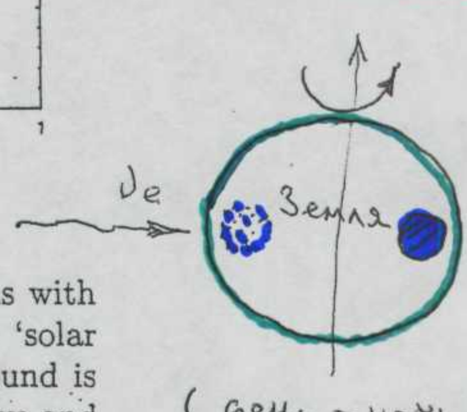


$N_{\nu_e} = 9530 \pm 180$ шт

$$R = \frac{N_\nu^{изм}}{N_\nu^{SSM}};$$

$$\boxed{R = 0.470 \pm 0.008 \pm 0.01}$$



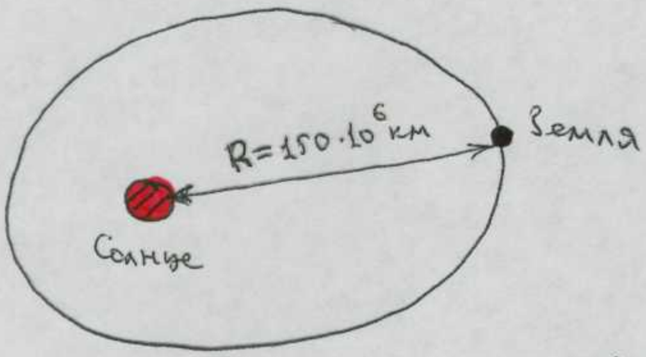


Angular distribution of electrons with respect to the direction of the Sun. The 'solar peak' at $\cos\theta_{\text{Sun}} = 1$ above the background is used to measure the solar ^{8}B neutrino flux and spectrum.

(день – ночь)

$$K = \frac{(\text{день} - \text{ночь})}{(\text{день} + \text{ночь})} = -0.029 \pm 0.017 \pm 0.013 \quad (\text{Зависимости нет})$$

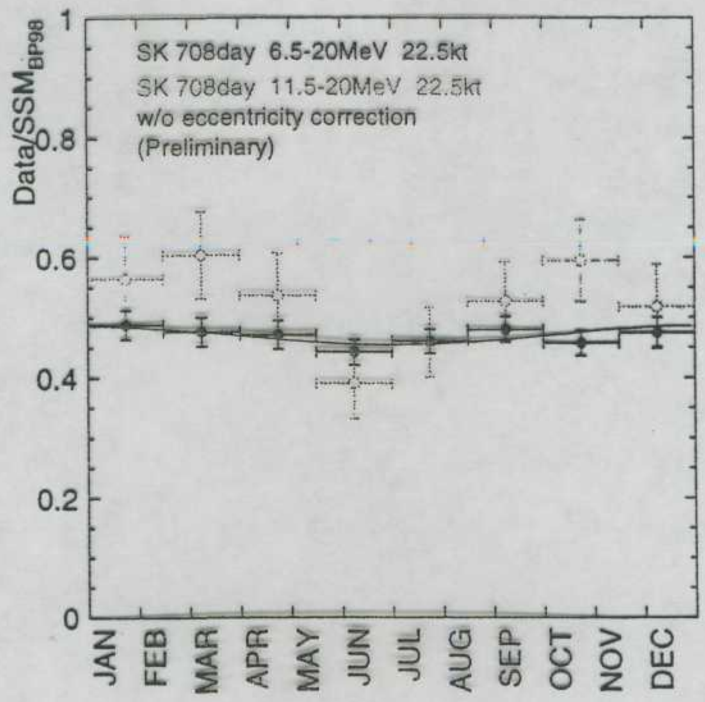
Предполагается исследование сезонных изменений N_{ν_e}



$R_З^{орб} = 1.5\cdot10^{13}$ см

$R_{Земли} = 6.4\cdot10^{8}$ см

$\Rightarrow$ большая чувствительность к малым δm^2



Есть указание на эффект для $E_\nu > 11.5$ МэВ

Планируемые эксперименты OPERA (2005 год начало)

IKARUS (LiAr)