

Нейтринные осцилляции.

Super-Kamiokande 1996-1998

Структура

1. Введение
2. Вакуумные осцилляции
3. Теоретическая основа эксперимента SK (1996-1998)
4. Устройство эксперимента
5. Полученные результаты
6. Заключение

Введение

- Нейтрино много, они безмассовые (?)
- Нейтрино куда-то пропадают
- Нейтрино одного типа переходит в другой тип, больше не безмассовые (!)

Вакуумные осцилляции

Физические состояния нейтрино: ν_e, ν_μ, ν_τ

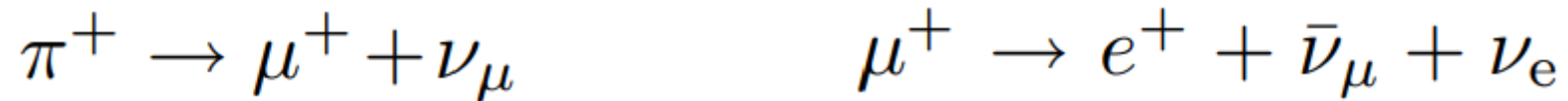
Массовые состояния нейтрино: ν_1, ν_2, ν_3

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos(\theta) & \sin(\theta) \\ -\sin(\theta) & \cos(\theta) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

$$P_{e \rightarrow \mu} = \sin^2(2\theta) \sin^2\left(\frac{1,27 \Delta m^2 L}{E}\right)$$

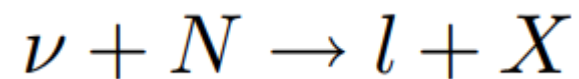
Теоретическая основа эксперимента SK (1996-1998)

В образовании электронных и мюонных нейтрино преобладают процессы



Ожидаемое отношение потоков $\nu_\mu/\nu_e \approx 2$

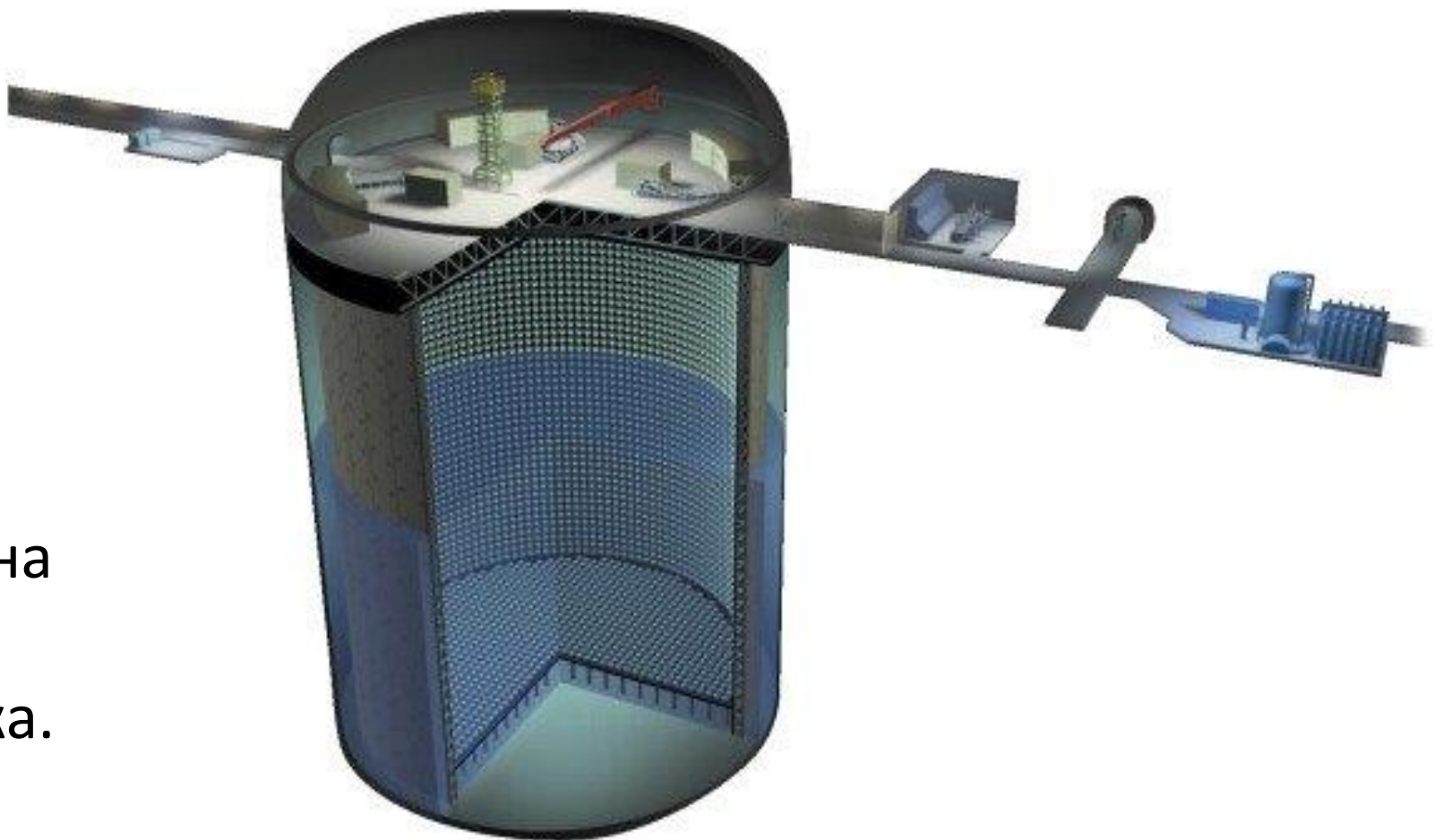
Взаимодействие нейтрино с ядром через заряженный ток



Устройство эксперимента

Super-Kamiokande
— это черенковский
детектор на 50
килотонн воды.

Детектор размещён в
японской лаборатории на
глубине в 1 км в
цинковой шахте Камиока.



Полученные результаты (1)

Super-Kamiokande собрал в общей сложности 4353 “полных” (FC) события и 301 “частичных” (PC) события при выдержке 535 дней.

События FC были разделены на «суб-ГэВ» и «мульти-ГэВ».

$$R \equiv (\mu/e)_{DATA}/(\mu/e)_{MC}$$

Полученные результаты (2)

	Data	Monte Carlo
sub-GeV		
single-ring	2389	2622.6
<i>e</i> -like	1231	1049.1
μ -like	1158	1573.6
multi-ring	911	980.7
total	3300	3603.3
$R = 0.63 \pm 0.03 (stat.) \pm 0.05 (sys.)$		
multi-GeV		
single-ring	520	531.7
<i>e</i> -like	290	236.0
μ -like	230	295.7
multi-ring	533	560.1
total	1053	1091.8
partially-contained	301	371.6
$R_{FC+PC} = 0.65 \pm 0.05 (stat.) \pm 0.08 (sys.)$		

Полученные результаты (3)

Асимметрия

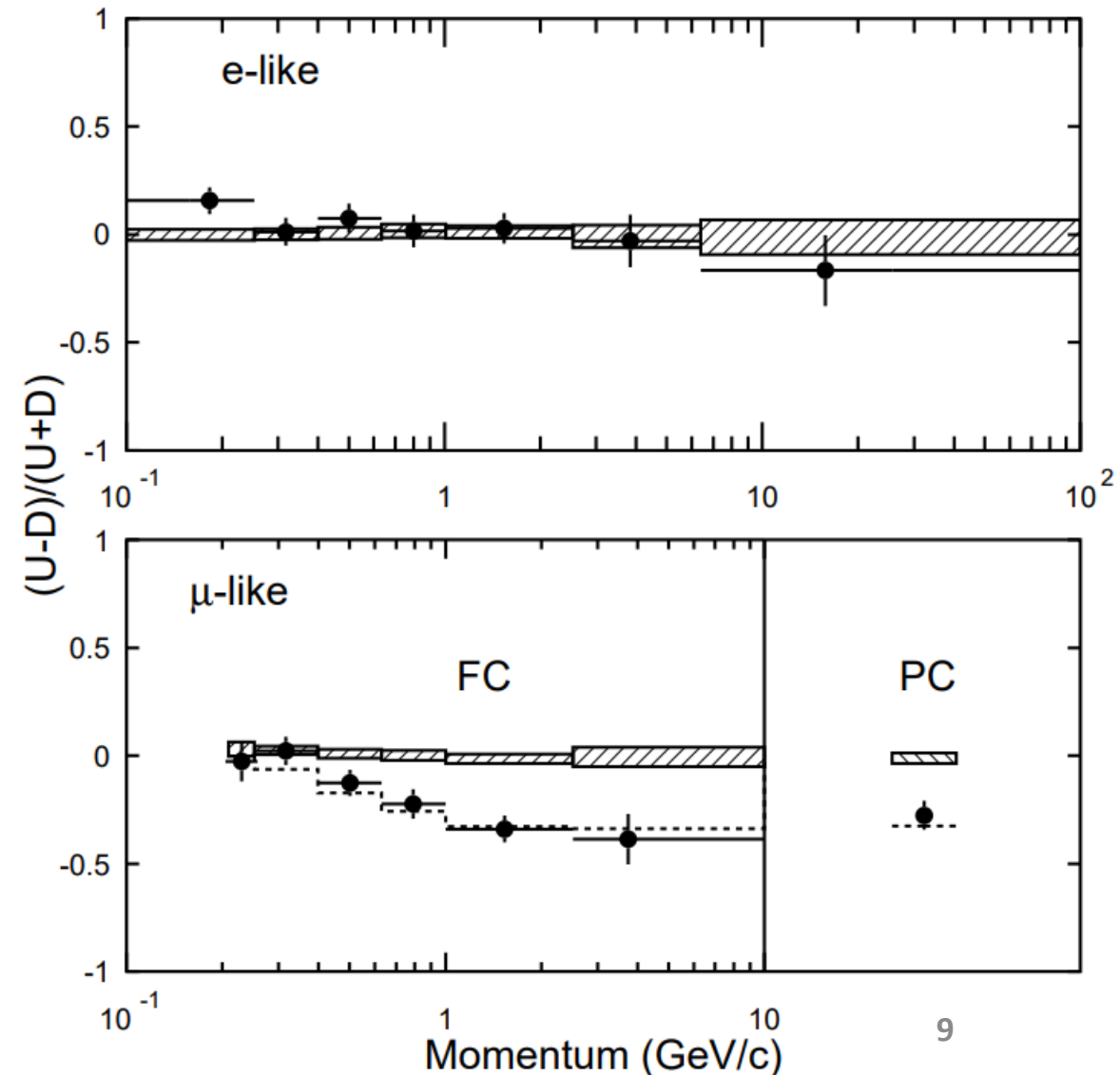
$$A = (U - D)/(U + D)$$

U — восходящие события ($-1 < \cos(\Theta) < -0.2$)

D — нисходящие события ($0.2 < \cos(\Theta) < 1$)

Асимметрия для мюонов с энергией multi-GeV

$$A = -0.296 \pm 0.048 \pm 0.01$$



Полученные результаты (4)

Определение χ^2 :

$$\chi^2 = \sum_{\cos\Theta, p} (N_{DATA} - N_{MC})^2 / \sigma^2 + \sum_j \epsilon_j^2 / \sigma_j^2$$

$$N_{MC} = \frac{\mathcal{L}_{DATA}}{\mathcal{L}_{MC}} \times \sum_{\text{MC events}} w$$

$$w = (1 + \alpha)(E_\nu^i / E_0)^\delta (1 + \eta_{s,m} \cos \Theta) \times f_{e,\mu}(\sin^2 2\theta, \Delta m^2, (1 + \lambda)L / E_\nu)$$

$$\times \begin{cases} (1 - \beta_s / 2) & \text{sub-GeV } e\text{-like} \\ (1 + \beta_s / 2) & \text{sub-GeV } \mu\text{-like} \\ (1 - \beta_m / 2) & \text{multi-GeV } e\text{-like} \\ (1 + \beta_m / 2)(1 - \frac{\rho}{2} \frac{N_{PC}}{N_\mu}) & \text{multi-GeV } \mu\text{-like} \\ (1 + \beta_m / 2)(1 + \frac{\rho}{2}) & \text{PC} \end{cases}$$

Полученные результаты (5)

Monte Carlo Fit Parameters	Best Fit	Uncertainty
α overall normalization	15.8%	(*)
δ E_ν spectral index	0.006	$\sigma_\delta = 0.05$
β_s sub-GeV μ/e ratio	-6.3%	$\sigma_s = 8\%$
β_m multi-GeV μ/e ratio	-11.8%	$\sigma_m = 12\%$
ρ relative norm. of PC to FC	-1.8%	$\sigma_\rho = 8\%$
λ L/E_ν	3.1%	$\sigma_\lambda = 15\%$
η_s sub-GeV up-down	2.4%	$\sigma_\eta^s = 2.4\%$
η_m multi-GeV up-down	-0.09%	$\sigma_\eta^m = 2.7\%$

Полученные результаты (6)

Наилучшее соответствие колебаниям

$$\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau :$$

$$\sin^2 2\theta = 1.0$$

$$\Delta m^2 = 2.2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

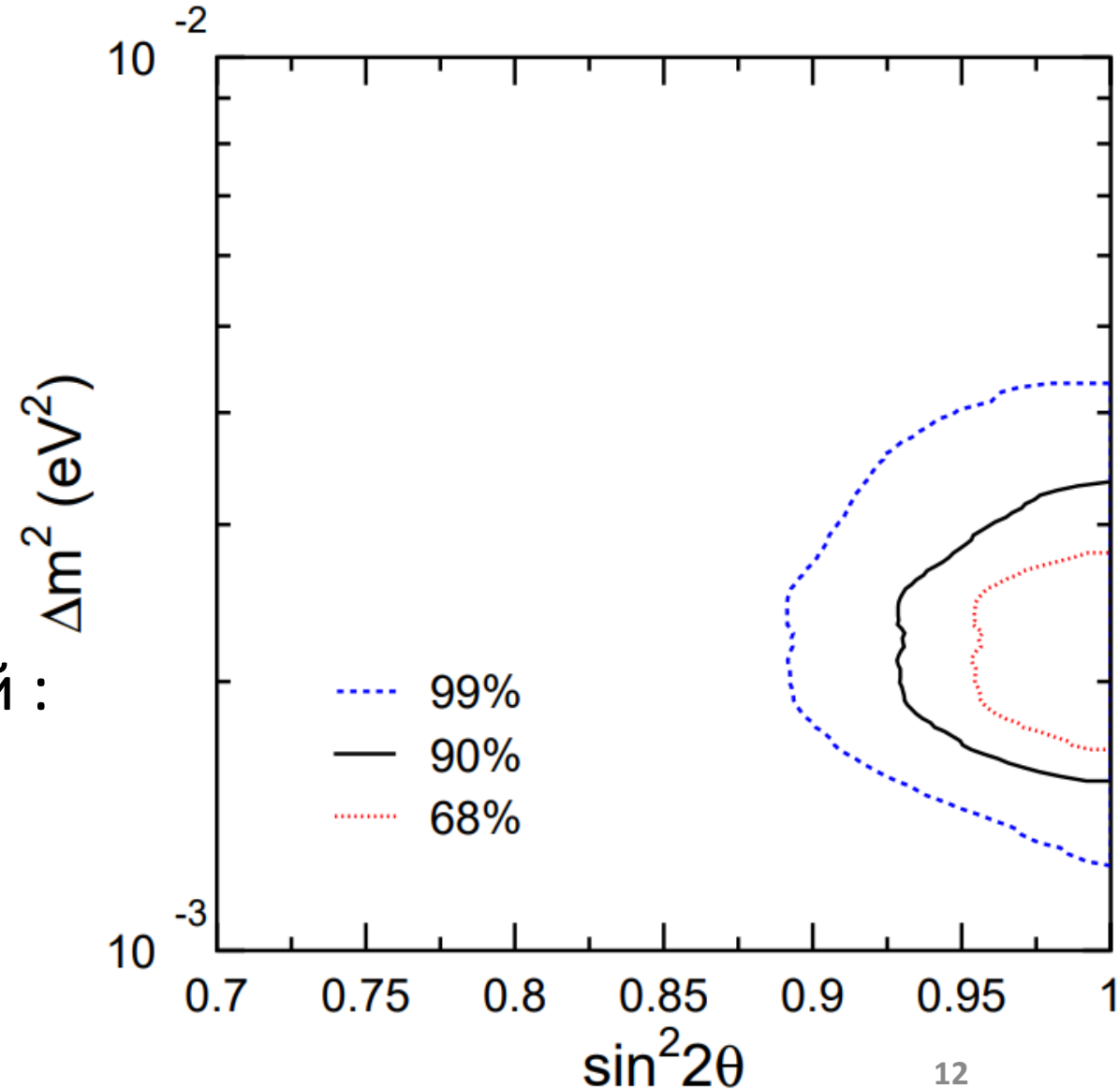
$$\chi_{min}^2 = 65.2/67 \text{ DOF}$$

В предположении отсутствия колебаний :

$$\sin^2 2\theta = 0$$

$$\Delta m^2 = 0$$

$$\chi^2 = 135/69 \text{ DOF}$$



Полученные результаты (7)

Колебания $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$

$$\sin^2 2\theta = 0.93, \Delta m^2 = 3.2 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\chi_{min}^2 = 87.8/67 \text{ DOF}$$

Измеренная: $A = -0.036 \pm 0.067 \pm 0.02$

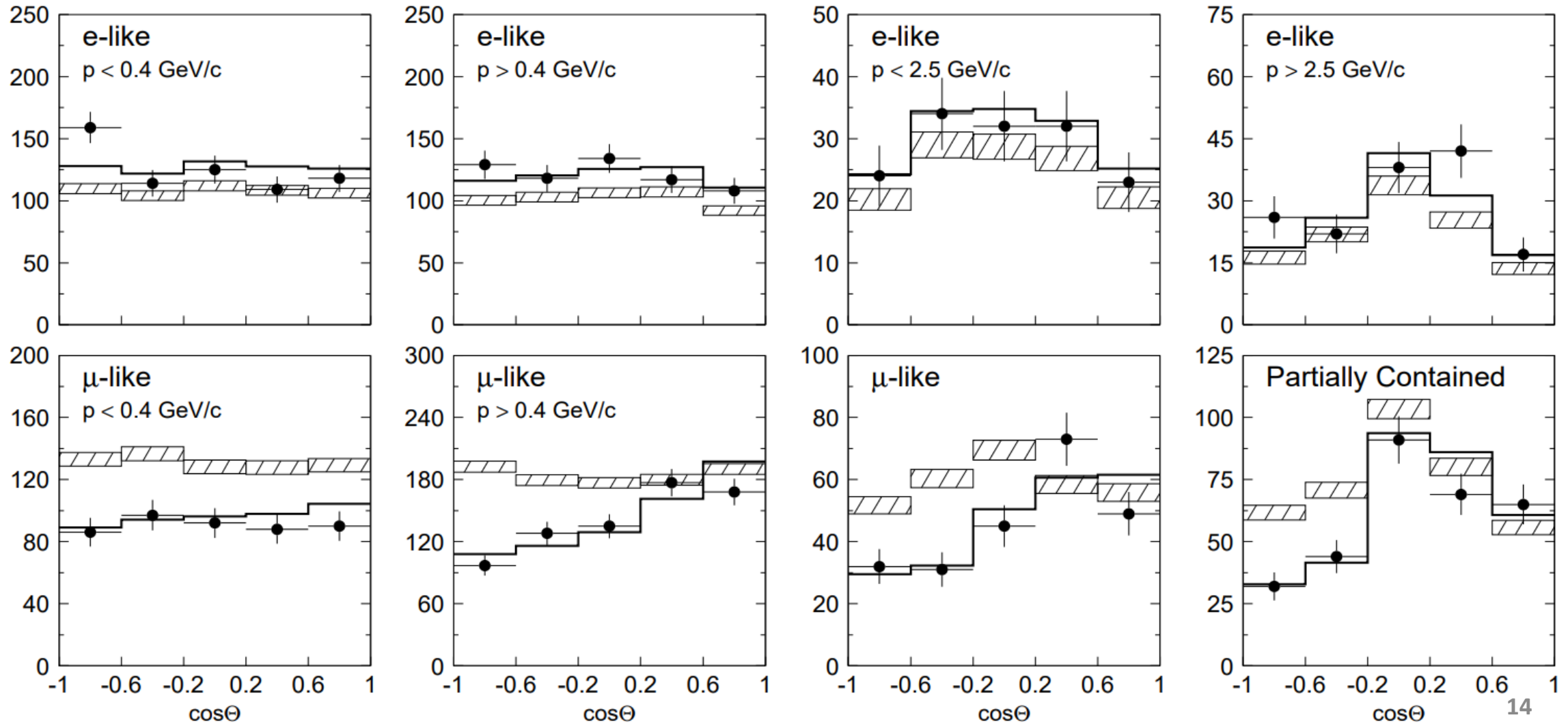
Полученная: $A = 0.205$

Гипотеза $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e$ не является предпочтительной, плохое соответствие.

Полученные результаты (8)

sub-GeV

multi-GeV



Заключение

Данные хорошо согласуются с осцилляциями $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$ с $\sin^2(2\theta) > 0,82$ и $5 * 10^{-4} < \Delta m^2 < 6 * 10^{-3} \text{ эВ}^2$ при уровне достоверности 90%. Сделан вывод, что полученные данные свидетельствуют о нейтринных осцилляциях.

