

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:  $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

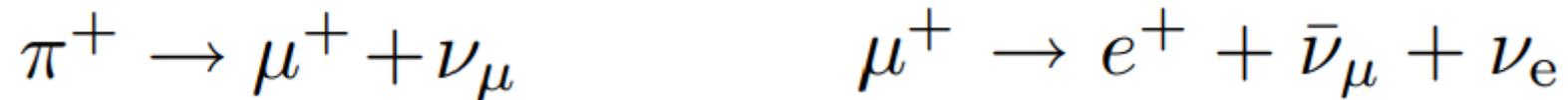
Массовые состояния нейтрино:  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$

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

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

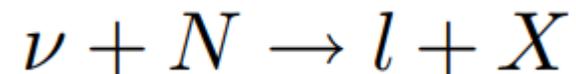
# Теоретическая основа эксперимента SK (1996-1998)

В образовании электронных и мюонных нейтрино преобладают процессы



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

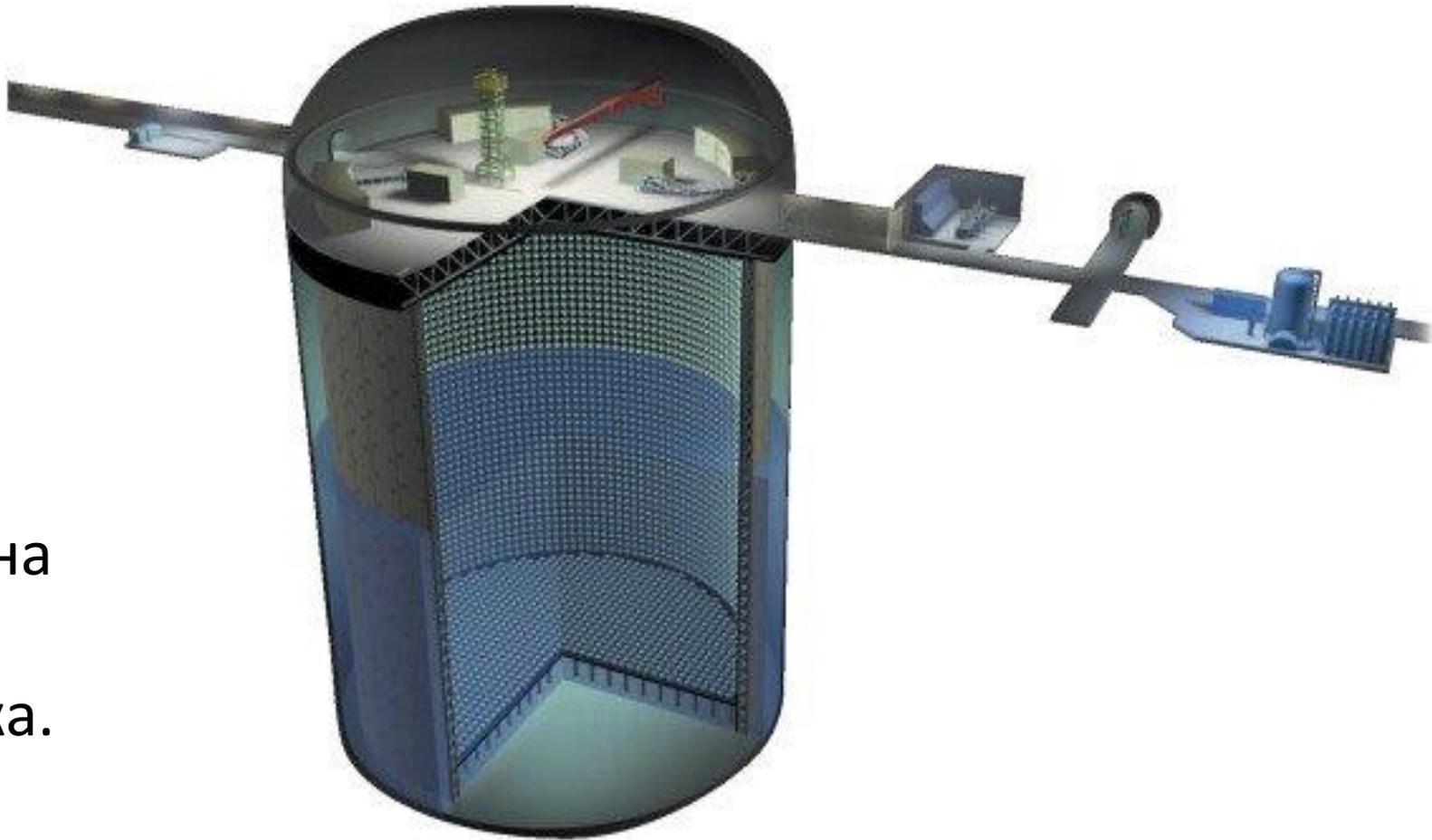
Взаимодействие нейтрино с ядром через заряженный ток



# 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
<i>μ</i> -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
<i>μ</i> -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

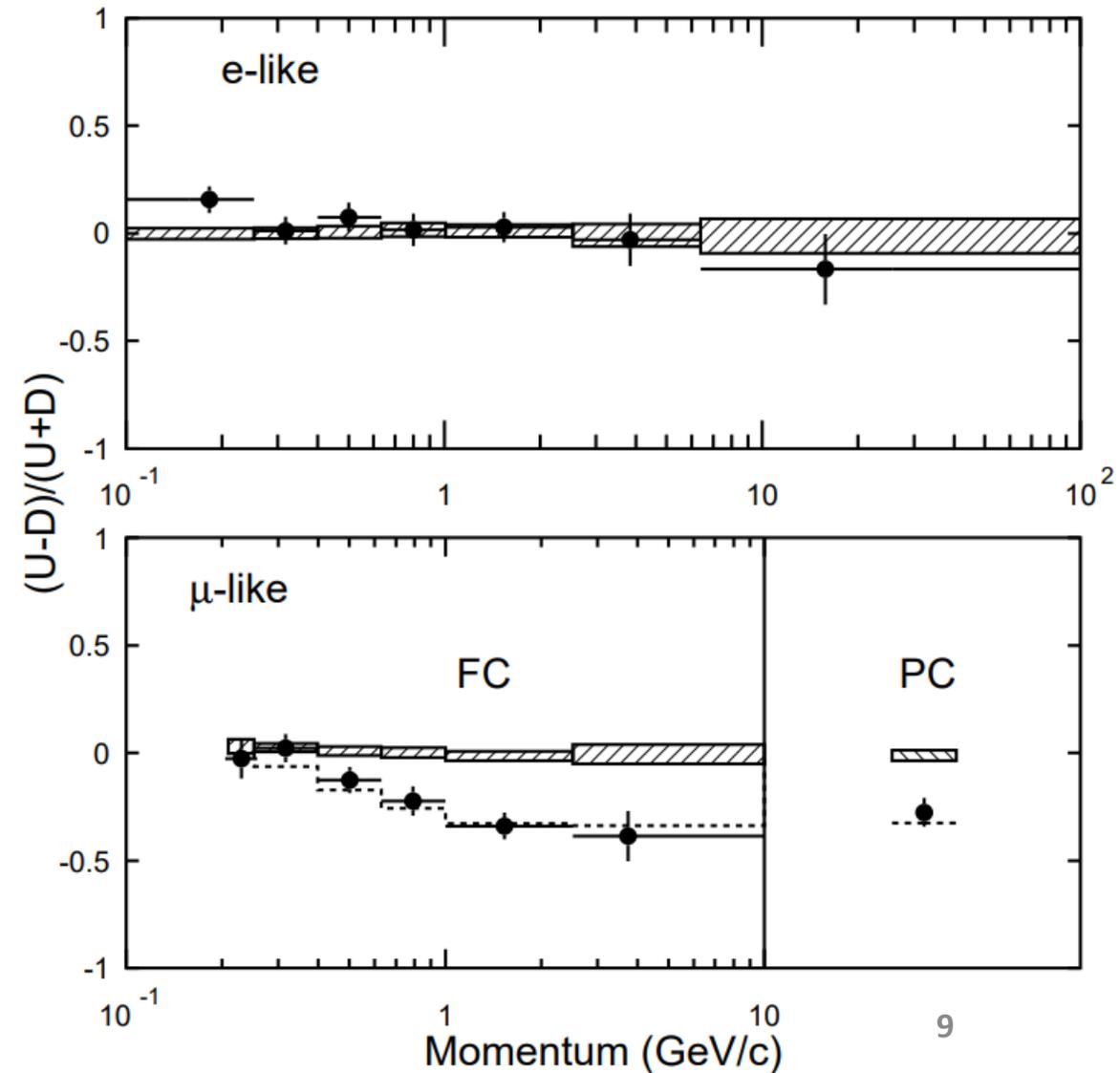
$$A = (U - D)/(U + D)$$

$U$  — 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  $\chi^2$  :

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

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

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

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

# Полученные результаты (5)

Monte Carlo Fit Parameters	Best Fit	Uncertainty
$\alpha$ overall normalization	15.8%	(*)
$\delta$ $E_\nu$ spectral index	0.006	$\sigma_\delta = 0.05$
$\beta_s$ sub-GeV $\mu/e$ ratio	-6.3%	$\sigma_s = 8\%$
$\beta_m$ multi-GeV $\mu/e$ ratio	-11.8%	$\sigma_m = 12\%$
$\rho$ relative norm. of PC to FC	-1.8%	$\sigma_\rho = 8\%$
$\lambda$ $L/E_\nu$	3.1%	$\sigma_\lambda = 15\%$
$\eta_s$ sub-GeV up-down	2.4%	$\sigma_\eta^s = 2.4\%$
$\eta_m$ multi-GeV up-down	-0.09%	$\sigma_\eta^m = 2.7\%$

# Полученные результаты (6)

Наилучшее соответствие колебаниям

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

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

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

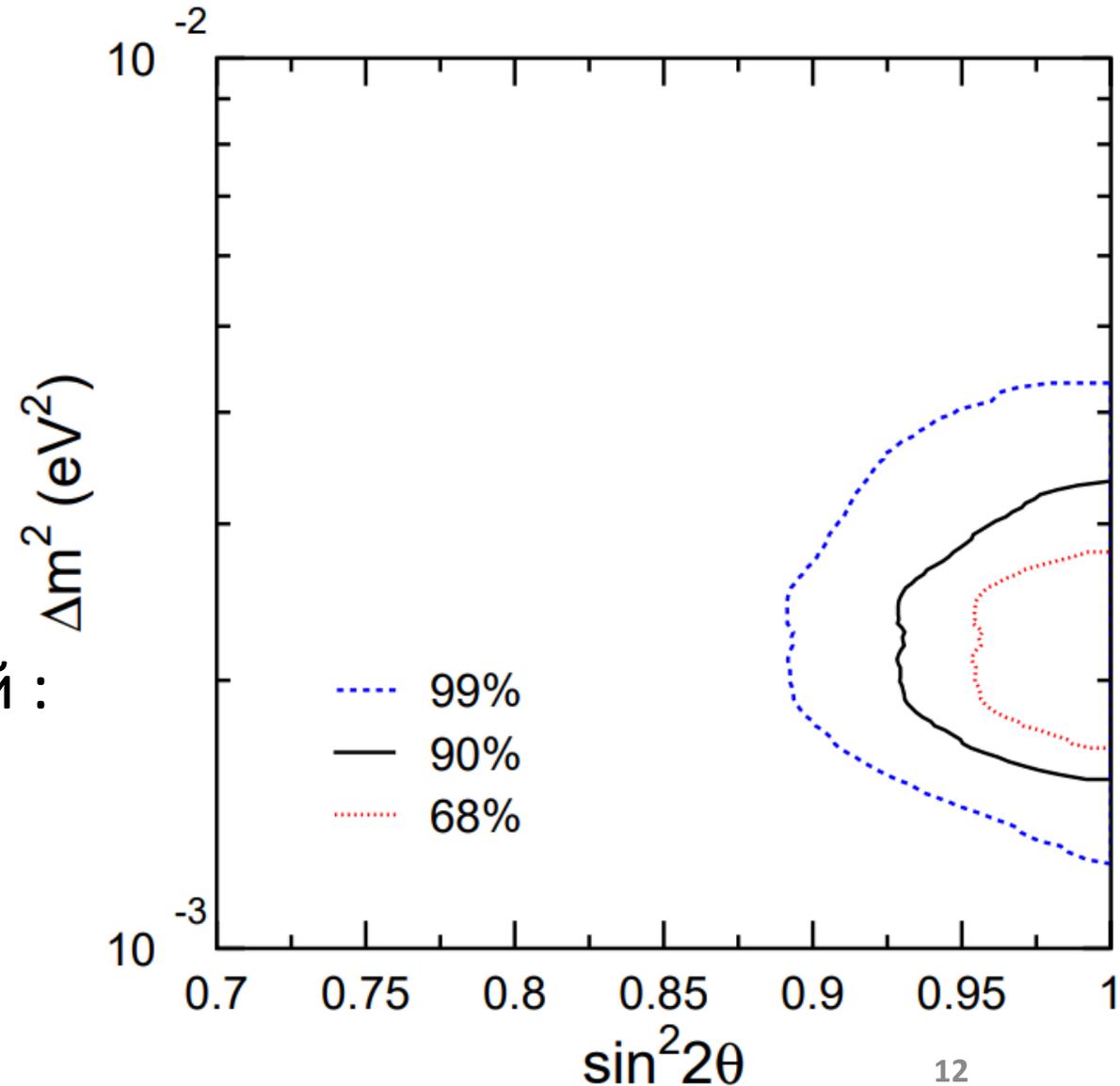
$$\chi^2_{min} = 65.2/67 \text{ DOF}$$

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

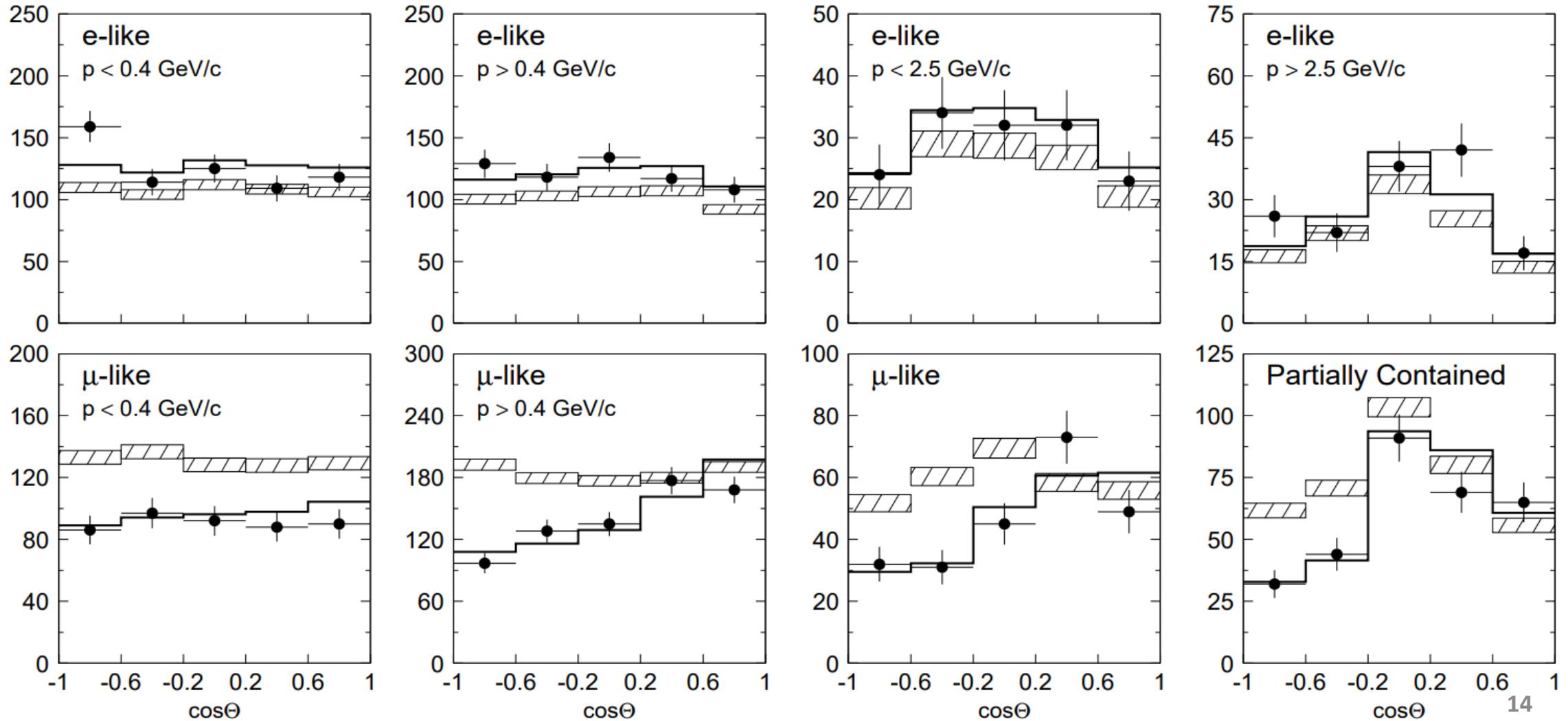
Полученная:  $A = 0.205$

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.



