

Влияние неопределённости аксиальной массы нуклона на расчёт числа квазиупругих нейтринных событий в детекторе Super-Kamiokande

Ольга Николаевна Петрова

Руководители:

к. ф.-м. н., К. С. Кузьмин,

к. ф.-м. н., В. А. Наумов

Лаборатория теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова
Объединённого института ядерных исследований,

Иркутский государственный университет

2012

Содержание

- 1 Детектор Super-Kamiokande
- 2 Квазиупругое рассеяние нейтрино на нуклоне
- 3 Атмосферные нейтрино низких энергий
- 4 Число событий в детекторе
- 5 Результаты
- 6 Дополнительные слайды

Детектор Super-Kamiokande

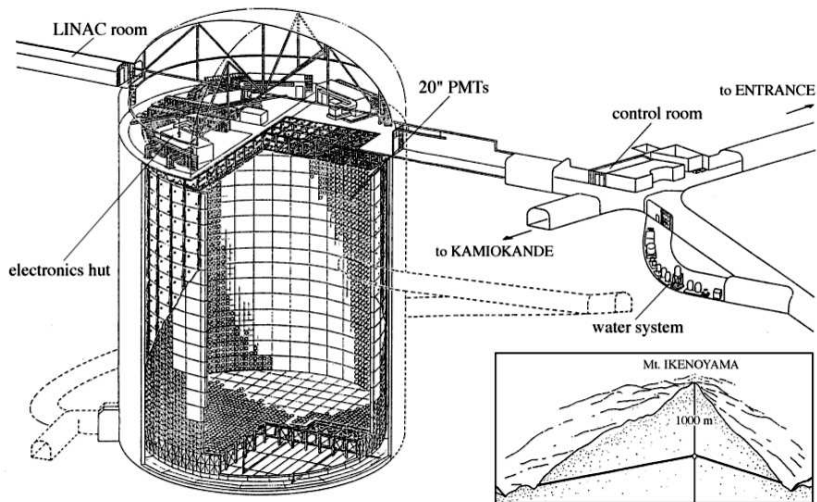


Рис. 1: Схема Super-Kamiokande

Квазиупругое рассеяние нейтрино на нуклоне

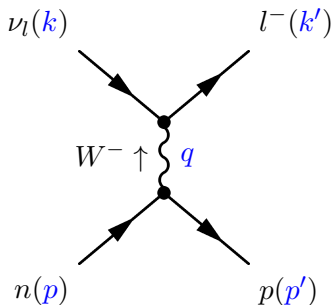


Рис. 2: $\nu_l + n \rightarrow l^- + p$

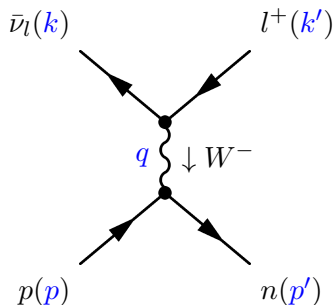


Рис. 3: $\bar{\nu}_l + p \rightarrow l^+ + n$

сечение взаимодействия:

$$d\sigma = \frac{G_F^2 M}{16\pi^2 (kp)} \left(1 - \frac{q^2}{M_W^2}\right)^{-2} L^{\alpha\beta} W_{\alpha\beta} \frac{d^3 \vec{k}'}{2k'_0}$$

Квазиупругое рассеяние нейтрино на нуклоне

$$d\sigma = \frac{G_F^2 M}{16\pi^2 (kp)} \left(1 - \frac{q^2}{M_W^2}\right)^{-2} L^{\alpha\beta} W_{\alpha\beta} \frac{d^3 \vec{k}'}{2k'_0}$$

лептонный тензор:

$$L^{\alpha\beta}(k, k') = \begin{cases} j^\alpha(k, k') j^{*\beta}(k, k') & \text{для нейтрино;} \\ \bar{j}^\alpha(k, k') \bar{j}^{*\beta}(k, k') & \text{для антинейтрино} \end{cases}$$

слабые лептонные токи:

$$j^\alpha(k, k') = \bar{u}(k') \gamma^\alpha \frac{1 - \gamma_5}{2} u(k),$$

$$\bar{j}^\alpha(k, k') = \bar{v}(k) \gamma^\alpha \frac{1 - \gamma_5}{2} v(k')$$

Квазиупругое рассеяние нейтрино на нуклоне

$$d\sigma = \frac{G_F^2 M}{16\pi^2 (kp)} \left(1 - \frac{q^2}{M_W^2}\right)^{-2} L^{\alpha\beta} W_{\alpha\beta} \frac{d^3 \vec{k}'}{2k'_0}$$

адронный тензор:

$$W_{\alpha\beta}(p, q) = \frac{1}{4} \int J_\alpha(p, p') J_\beta^*(p, p') \delta^4(k' + p' - k - p) \frac{d^3 p'}{2p'_0}$$

слабый адронный ток:

$$J_\alpha(p, p') = V_{ud}^{\text{CKM}} \bar{u}_p(p') \Gamma_\alpha(p, q) u_n(p)$$

разложение по базису:

$$\Gamma_\alpha(p, q) = \gamma_\alpha F_V + i\sigma_{\alpha\beta} \frac{q^\beta}{2M} F_M + \frac{q_\alpha}{M} F_S + \left(\gamma_\alpha F_A + \frac{p_\alpha + p'_\alpha}{M} F_T + \frac{q_\alpha}{M} F_P \right) \gamma_5$$

Слабые формфакторы нуклона

$$\Gamma_\alpha(p, q) = \gamma_\alpha F_V + i\sigma_{\alpha\beta} \frac{q^\beta}{2M} F_M + \frac{q_\alpha}{M} F_S + \left(\gamma_\alpha F_A + \frac{p_\alpha + p'_\alpha}{M} F_T + \frac{q_\alpha}{M} F_P \right) \gamma_5$$

C- и T-инвариантность адронного тока \Rightarrow

$$\text{скалярный } F_S = \text{тензорный } F_T = 0.$$

электромагнитные формфакторы Дирака и Паули:

$$F_V = \frac{G_E + x' G_M}{1 + x'}, \quad F_M = \frac{G_M - G_E}{1 + x'} \quad \text{где } x' = -\frac{q^2}{4M^2}$$

формфакторы Сакса:

$$G_E = G_E^p - G_E^n, \quad G_M = G_M^p - G_M^n$$

модель ВВВА(2007) для $G_E^{p,n}$ и $G_M^{p,n}$.

Слабые формфакторы нуклона

$$\Gamma_\alpha(p, q) = \gamma_\alpha F_V + i\sigma_{\alpha\beta} \frac{q^\beta}{2M} F_M + \frac{q_\alpha}{M} F_S + \left(\gamma_\alpha F_A + \frac{p_\alpha + p'_\alpha}{M} F_T + \frac{q_\alpha}{M} F_P \right) \gamma_5$$

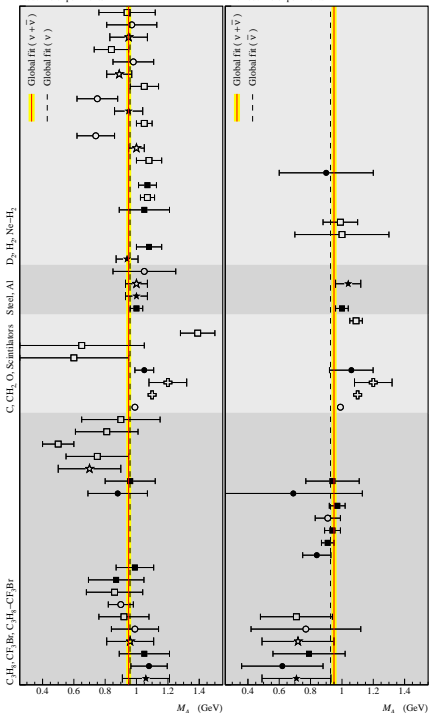
стандартная дипольная параметризация **аксиального** формфактора:

$$F_A(q^2) = \left(1 - \frac{q^2}{M_A^2} \right)^{-2} F_A(0).$$

частичное сохранение аксиального тока \Rightarrow

псевдоскалярный формфактор:

$$F_P(q^2) = \frac{2M^2}{m_\pi^2 - q^2} F_A(q^2).$$



Mann et al., ANL 1973

Barish et al., ANL 1975

Barish et al., ANL 1977

Miller et al., ANL 1982

Cnops et al., BNL 1978

Fanourakis et al., BNL 1980

Baker et al., BNL 1981

Kitagaki et al., BNL 1990

Kitagaki et al., FNAL 1983

Asratyan et al., FNAL 1984

Ammosov et al., FNAL 1987

Allasia et al., CERN BEBC 1990

Kustom et al., ANL 1969

Belikov et al., IHEP-ITEP 1981

Belikov et al., IHEP-ITEP 1982

Belikov et al., IHEP-ITEP 1985

Ahrens et al., BNL 1988

Arevalo et al., FNAL MiniBooNE 2010

Holder et al., CERN HLBC 1968

Lyubushkin et al., NOMAD 2009

Gran et al., K2K 2006

SK default

T2K default

Franzineti et al., CERN HLBC 1966

Young et al., CERN HLBC 1967

Orkin-Lecourtois, CERN HLBC 1967

Budagov et al., CERN HLBC 1969

Bonetti et al., CERN GGM 1977

Rollier et al., CERN GGM 1978

Armenise et al., CERN GGM 1979

Pohl et al., CERN GGM 1979

Makeev et al., IHEP SKAT 1981

Grabosch et al., IHEP SKAT 1988

Brunner et al., IHEP SKAT 1990

Обзор экспериментальных данных об аксиальной массе нуклона

среднемировое:

$$M_A = 0.95 \pm 0.013 \text{ ГэВ}$$

T2K

K2K:

$$M_A = 1.2 \pm 0.12 \text{ ГэВ}$$

Super-Kamiokande

MiniBooNE:

$$M_A = 1.348 \pm 0.018 \text{ ГэВ}$$

Спектр атмосферных нейтрино

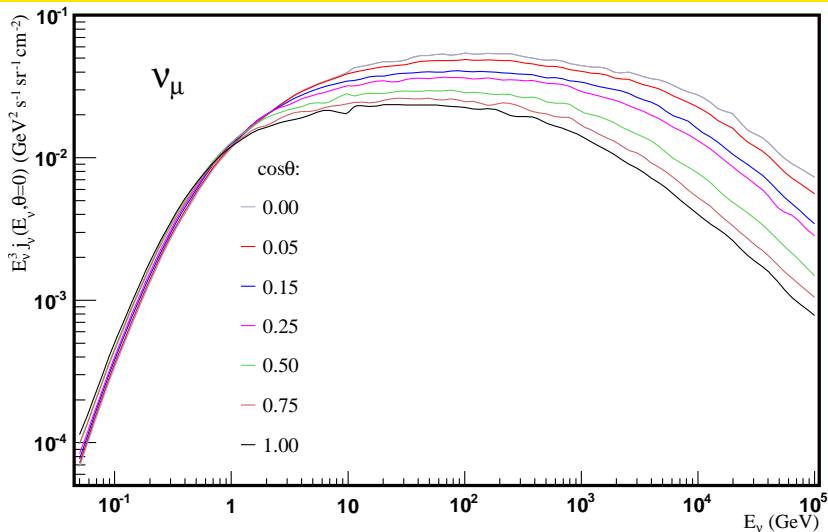


Рис. 4: BartolB(max)-спектры мюонных нейтрино для разных зенитных углов

Параметры осцилляций нейтрино

Таблица 1: Параметры осцилляций нейтрино при **нормальной** и **обратной** иерархии масс нейтрино

parameter	best fit	1σ	2σ	3σ
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	7.54	7.32 – 7.80	7.15 – 8.00	6.99 – 8.18
$\Delta m^2 [10^{-3} \text{eV}^2]^1$	2.43 –2.42	2.34 – 2.50 –(2.32 – 2.49)	2.26 – 2.58 –(2.25 – 2.56)	2.15 – 2.66 –(2.14 – 2.65)
$\sin^2 \theta_{12} [10^{-1}]$	3.07	2.91 – 3.25	2.75 – 3.42	2.59 – 3.59
$\sin^2 \theta_{23} [10^{-1}]$	3.98 4.08	3.72 – 4.28 3.78 – 4.43	3.50 – 4.75 3.55 – 6.27	3.30 – 6.38 3.35 – 6.58
$\sin^2 \theta_{13} [10^{-2}]$	2.45 2.46	2.14 – 2.79 2.15 – 2.80	1.81 – 3.11 1.83 – 3.13	1.49 – 3.44 1.50 – 3.47
δ	0.89 π 0.90 π	(0.45 – 1.18) π (0.47 – 1.22) π	0 – 2 π	0 – 2 π

$$^1 \Delta m^2 = m_3^2 - (m_1^2 + m_2^2)/2$$

Суммарный спектр атмосферных нейтрино

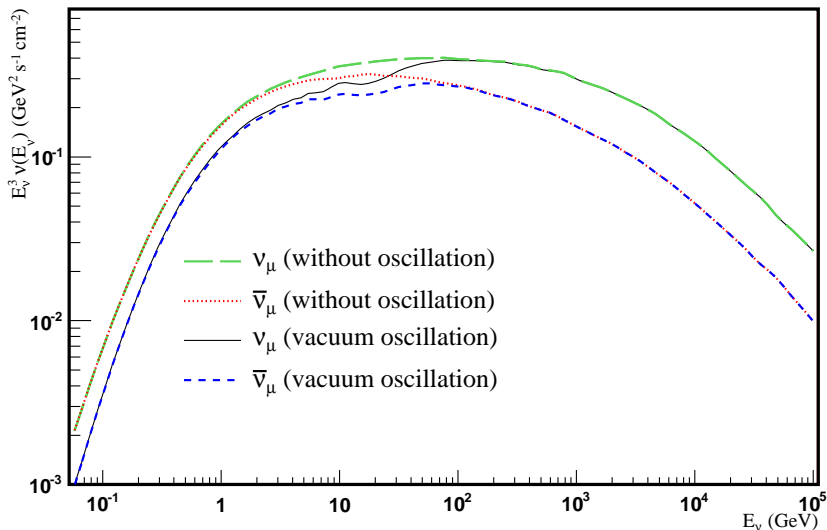


Рис. 5: Суммарные BartolB(max)-спектры мюонных нейтрино и антинейтрино

Число событий в детекторе

Число лептонов l от квазиупругого рассеяния нейтрино на нуклонах 1 килотонны воды за 1 год:

$$\frac{dN_l}{dp_l} dp_l = 2T \int \frac{d\sigma_{\bar{\nu}}}{dp_l} \bar{\nu}_l(E_\nu) dE_\nu dp_l + \\ + 8T \int \left[\frac{d\sigma_\nu^b}{dp_l} \nu_l(E_\nu) + \frac{d\sigma_{\bar{\nu}}^b}{dp_l} \bar{\nu}_l(E_\nu) \right] dE_\nu dp_l,$$

где $T = \frac{N_A}{18.02} \text{ кт} \cdot \text{год} = 1.055 \cdot 10^{39} \text{ с}$.

Число событий в детекторе

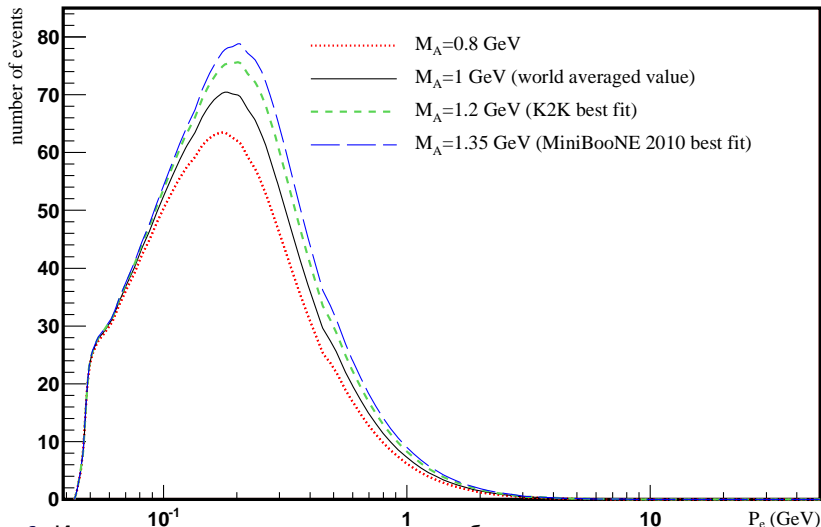


Рис. 6: Импульсные спектры электронов, образуемых квазиупругим рассеянием нейтрино в 1 кт воды Super-K за 1 год при разных M_A

Число событий в детекторе

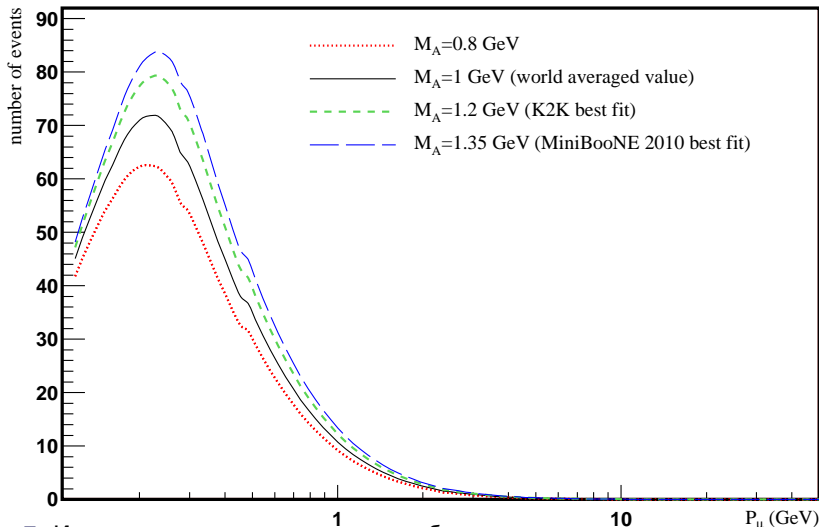


Рис. 7: Импульсные спектры мюонов, образуемых квазиупругим рассеянием нейтрино в 1 кт воды Super-K за 1 год при разных M_A

Эффект нейтринных осцилляций

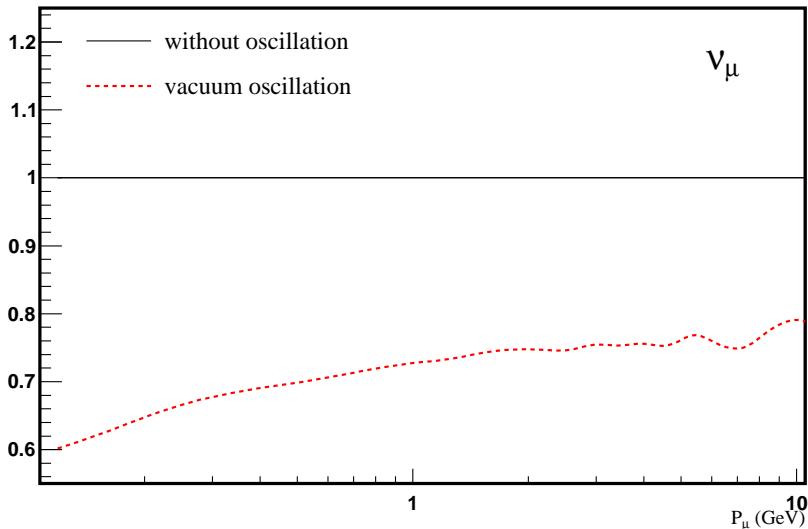


Рис. 9: Число мюонных событий с учётом осцилляций, отнесённое к расчёту без учёта осцилляций

Эффект нейтринных осцилляций

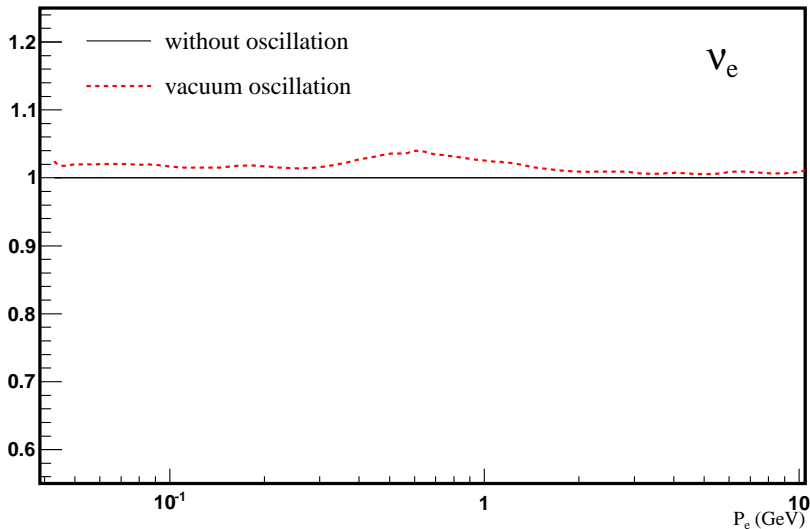


Рис. 10: Число электронных событий с учётом осцилляций, отнесённое к расчёту без учёта осцилляций

- Различие спектров, обусловленное осцилляциями нейтрино:
 - электронные спектры: $\lesssim 5\%$
 - мюонные спектры: $\sim 20 - 40\%$
- Отличие спектров, рассчитанных с разными значениями аксиальной массы, от расчёта с $M_A = 1$ ГэВ:
 - $M_A = 1.2$ ГэВ: $\approx 15\%$ — K2K, Super-Kamiokande
 - $M_A = 1.35$ ГэВ: $\approx 30\%$ — MiniBooNE

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!

Релятивистская ферми-газовая модель

$$d\sigma^b = \frac{G_F^2 M_t}{16\pi^2 (kp)} \left(1 - \frac{q^2}{M_W^2}\right)^{-2} L^{\alpha\beta} T_{\alpha\beta} \frac{d^3 \vec{k}'}{2k'_0}$$

$$T_{\alpha\beta}(p_{\text{lab}}, q) = \int f(\vec{p}, \vec{q}) W_{\alpha\beta}(p, q) d\vec{p}$$

$$f(\vec{p}, \vec{q}) = v_{\text{rel}}^{-1} \bar{n}_i(\vec{p}) [1 - n_f(\vec{p}')]]$$

$$v_{\text{rel}} = \frac{(kp)}{M_t E_\nu}$$

Спектр атмосферных нейтрино

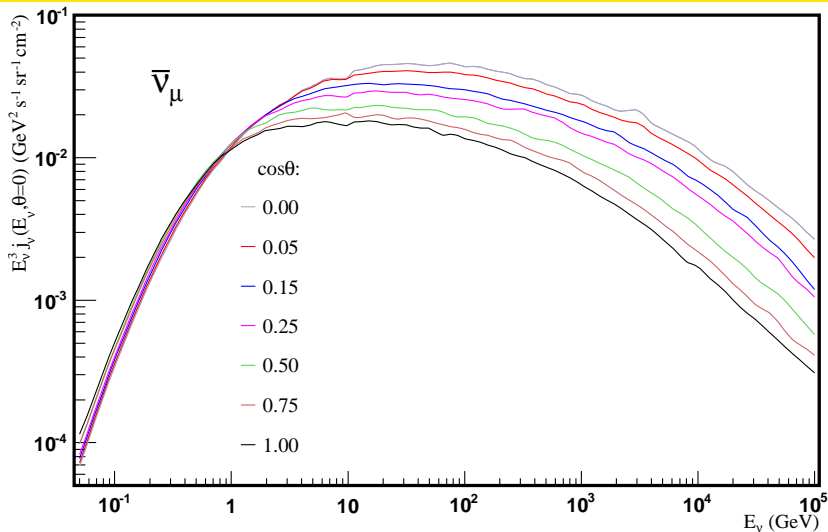


Рис. 11: BartolB(max)-спектры мюонных антинейтрино для разных зенитных углов

Спектр атмосферных нейтрино

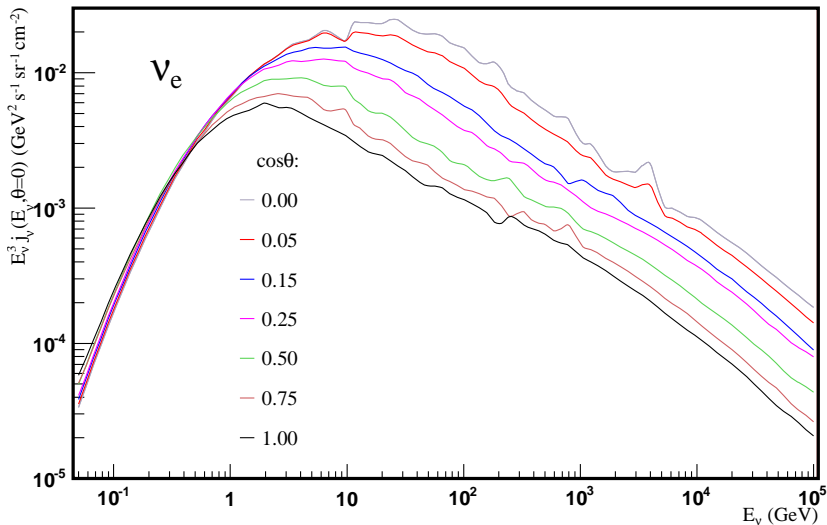


Рис. 12: BartolB(max)-спектры электронных нейтрино для разных зенитных углов

Спектр атмосферных нейтрино

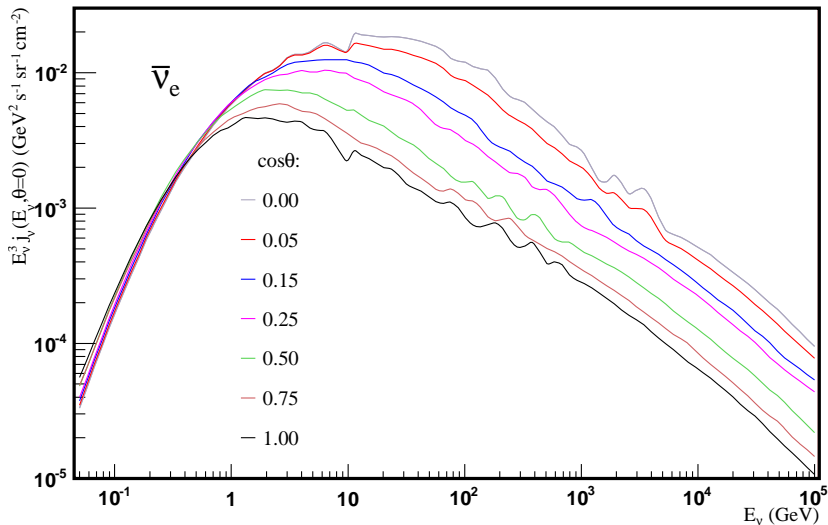


Рис. 13: BartolB(max)-спектры электронных антинейтрино для разных зенитных углов

Квантовомеханическая теория осцилляций

$$P_{\alpha\beta}(E_\nu, L) = \sum_{ij} V_{\alpha i} V_{\beta j} (V_{\alpha j} V_{\beta i})^* \exp\left(2\pi i \frac{L}{L_{ij}}\right)$$

$$L_{ij} = \frac{4\pi E_\nu}{\Delta m_{ij}^2}$$

$$V = O_{23} \Gamma_D O_{13} \Gamma_D^\dagger O_{12} \Gamma_M$$

$$\Gamma_D = \text{diag}(1, 1, e^{i\delta}), \quad \Gamma_M = \text{diag}(e^{i\phi_1}, e^{i\phi_2}, 1)$$

$$O_{12} = \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad O_{13} = \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix}, \quad O_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos \theta_{ij}$$

Параметры осцилляций нейтрино

Таблица 2: Параметры осцилляций нейтрино при **нормальной** и **обратной** иерархии масс нейтрино

parameter	best fit $\pm 1\sigma$	2σ	3σ
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	7.62 ± 0.19	$7.27 - 8.01$	$7.12 - 8.20$
$\Delta m_{31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$	$2.53^{+0.08}_{-0.10}$ $-(2.40^{+0.10}_{-0.07})$	$2.34 - 2.69$ $-(2.25 - 2.59)$	$2.26 - 2.77$ $-(2.15 - 2.68)$
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.320^{+0.015}_{-0.017}$	$0.29 - 0.35$	$0.27 - 0.37$
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.49^{+0.08}_{-0.05}$ $0.53^{+0.05}_{-0.07}$	$0.41 - 0.62$ $0.42 - 0.62$	$0.39 - 0.64$
$\sin^2 \theta_{13}$	$0.026^{+0.003}_{-0.004}$ $0.027^{+0.003}_{-0.004}$	$0.019 - 0.033$ $0.020 - 0.034$	$0.015 - 0.036$ $0.016 - 0.037$
δ	$(0.83^{+0.54}_{-0.64}) \pi$ $0.07 \pi^2$	$0 - 2\pi$	$0 - 2\pi$

²В этом случае разрешён весь диапазон $(0, 2\pi)$

Параметры осцилляций нейтрино

Таблица 3: Параметры осцилляций нейтрино при **нормальной** и **обратной** иерархии масс нейтрино

parameter	Fogli <i>et al.</i>	Schwetz <i>et al.</i>
$\Delta m_{21}^2 [10^{-5} \text{eV}^2]$	$7.58^{+0.22}_{-0.26}$	$7.59^{+0.20}_{-0.18}$
$\Delta m_{31}^2 [10^{-3} \text{eV}^2]$	$2.35^{+0.12}_{-0.09}$	$2.50^{+0.09}_{-0.16}$ $-(2.40^{+0.08}_{-0.09})$
$\sin^2 \theta_{12}$	$0.312^{+0.017}_{-0.016}$	$0.312^{+0.017}_{-0.015}$
$\sin^2 \theta_{23}$	$0.42^{+0.08}_{-0.03}$	$0.52^{+0.06}_{-0.07}$ 0.52 ± 0.06
$\sin^2 \theta_{13}$	0.025 ± 0.007	$0.013^{+0.007}_{-0.005}$ $0.016^{+0.008}_{-0.006}$

Угол смешивания θ_{13}

Таблица 4: Угол смешивания θ_{13} при **нормальной** и **обратной** иерархии масс нейтрино

experiment	$\sin^2 2\theta_{13}$	$\sin^2 \theta_{13}$
T2K	$0.11^{+0.11}_{-0.05}$	$0.028^{+0.019}_{-0.024}$
	$0.14^{+0.12}_{-0.06}$	$0.036^{+0.022}_{-0.030}$
MINOS	$0.041^{+0.047}_{-0.031}$	$0.010^{+0.012}_{-0.008}$
	$0.079^{+0.071}_{-0.053}$	$0.020^{+0.019}_{-0.014}$
Double Chooz	$0.086 \pm 0.041 \pm 0.030$	$0.022^{+0.019}_{-0.018}$
DayaBay	$0.092 \pm 0.016 \pm 0.005$	0.024 ± 0.005
RENO	$0.113 \pm 0.013 \pm 0.019$	0.029 ± 0.006

Угол смешивания θ_{13}

$$\sin^2 2\theta_{13} = \begin{cases} 0.086 \pm 0.0508 \\ 0.092 \pm 0.0177 \\ 0.113 \pm 0.0230 \end{cases} \rightarrow \theta_{13} = \begin{cases} 8.53^\circ & \text{Double Chooz} \\ 8.83^\circ & \text{DayaBay} \\ 9.82^\circ & \text{RENO} \end{cases}$$

$$0.03(0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34) \quad \text{T2K}$$

Суммарный спектр атмосферных нейтрино

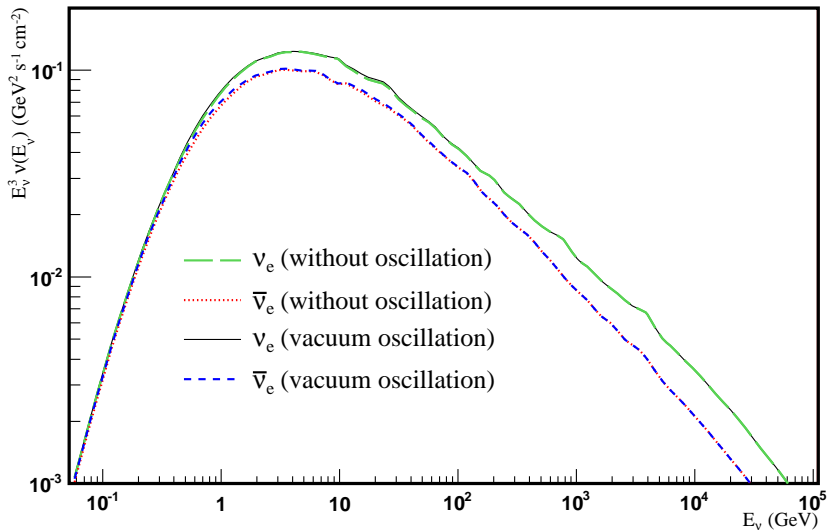


Рис. 14: Суммарные BartolB(max)-спектры электронных нейтрино и антинейтрино

Число событий в детекторе

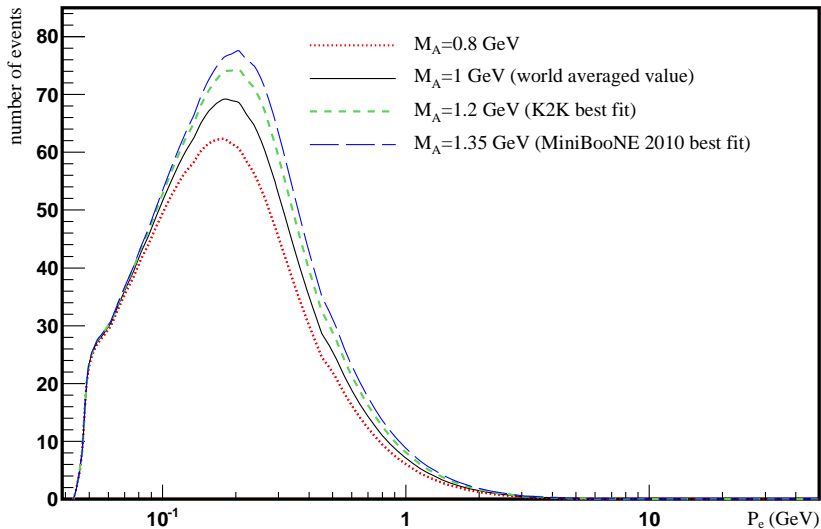


Рис. 15: Импульсные спектры электронов, образуемых квазиупругим

Число событий в детекторе

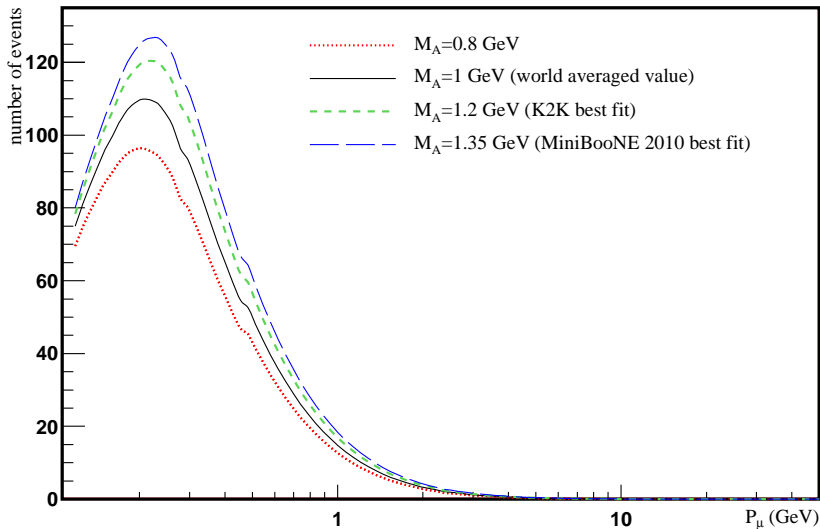


Рис. 16: Импульсные спектры мюонов, образуемых квазиупругим рассеянием

Влияние аксиальной массы на результат

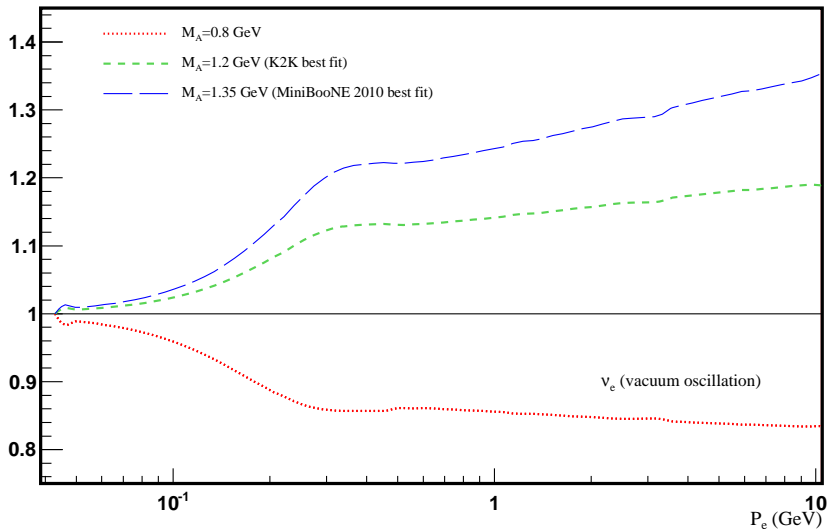


Рис. 17: Импульсные спектры электронов, отнесённые к расчёту с $M_A = 1$ ГэВ

Влияние аксиальной массы на результат

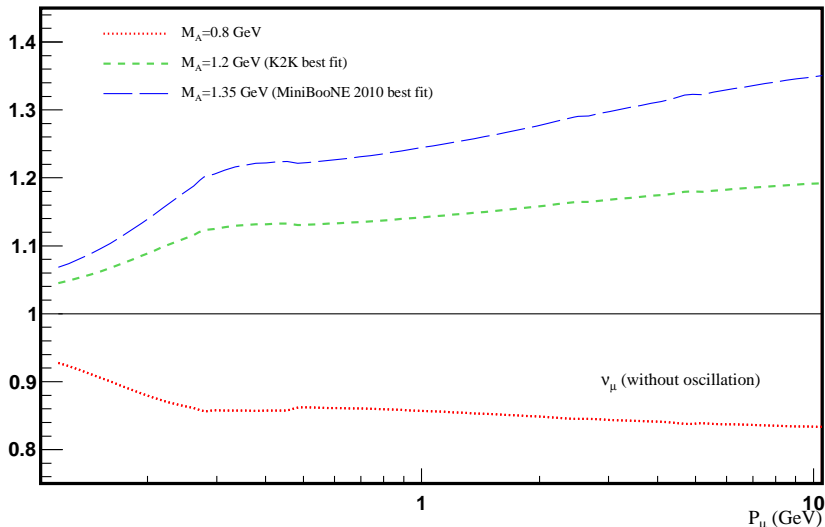


Рис. 18: Импульсные спектры мюонов, отнесённые к расчёту с $M_A = 1$ ГэВ без учёта осцилляций

Влияние аксиальной массы на результат

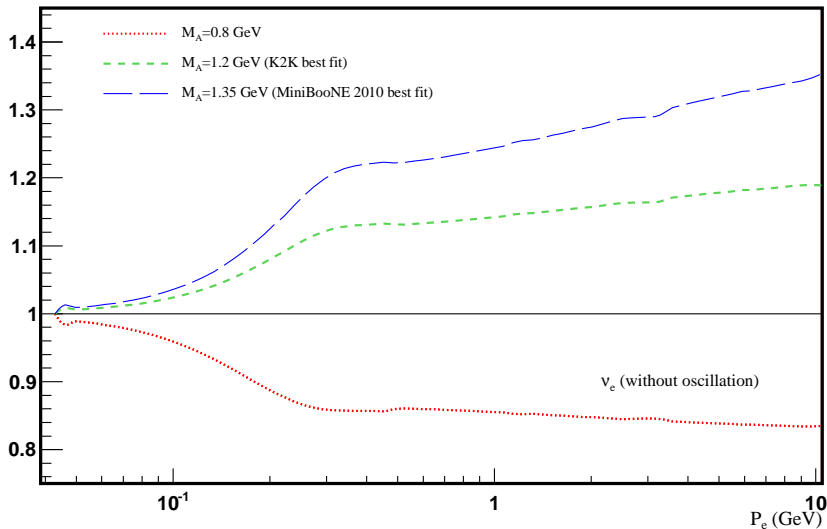


Рис. 19: Импульсные спектры электронов, отнесённые к расчёту с $M_A = 1$ ГэВ без учёта осцилляций