



МОДЕЛЬ ЭКСПЕРИМЕНТА ПО ПОИСКУ СТЕРИЛЬНЫХ НЕЙТРИНО

С. В. Силаева, В. В. Синев

2019 г.

Мотивация

Экспериментальные аномалии, которые связывают со стерильными нейтрино:

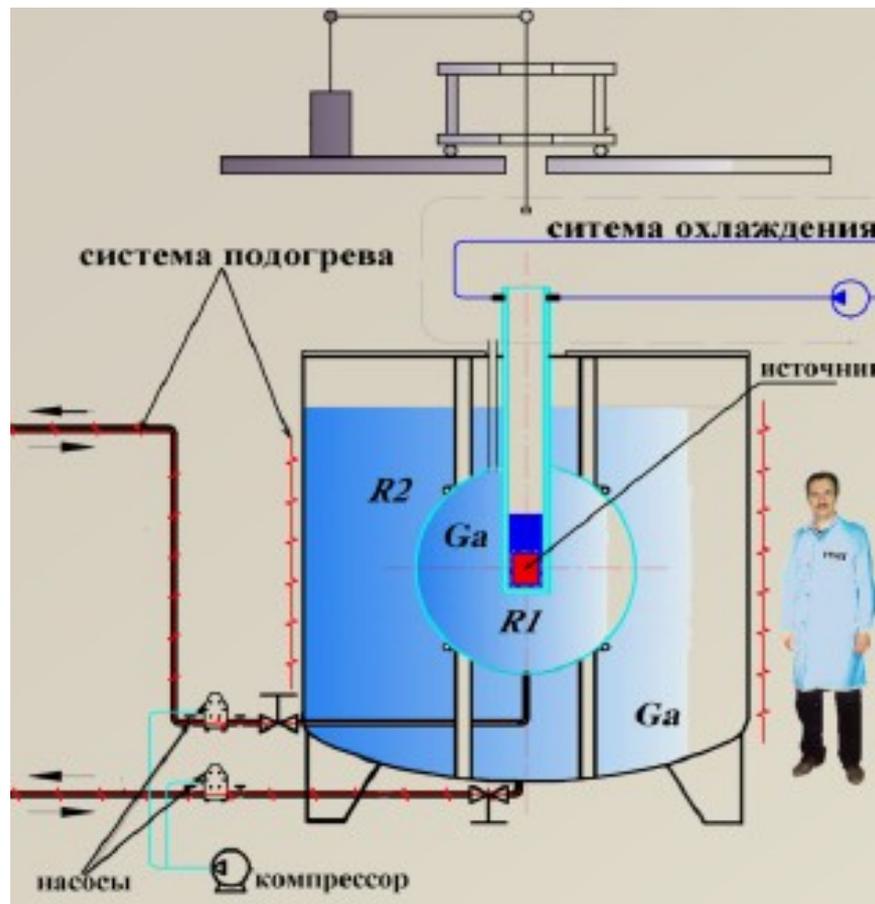
1. **(реакторная)** Новый спектр антинейтрино от ядерного реактора привел к пересмотру данных предыдущих экспериментов. G. Mention *et al.*, The Reactor Antineutrino Anomaly, Phys.Rev.D83:073006, 2011; arXiv:1101.2755 [hep-ex].
2. **(галлиевая)** Результаты калибровок галлиевых детекторов (SAGE, GALLEX). V. N. Gavrin *et al.*, Gallium experiments with artificial neutrino sources as a tool for investigation of transition to sterile states, arXiv:1006.2103 [nucl-ex].
3. **(ускорительная)** LSND эксперимент, затем MiniBOONE. C. Athanassopoulos *et al.*, Results on $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Neutrino Oscillations from the LSND Experiment, Phys. Rev. Lett. 81, 1774, 1998.

Цель работы

Изучение эффекта нахождения ложных осцилляций в экспериментах на реакторах. Определение необходимой статистики для уверенного обнаружения стерильных нейтрино.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ

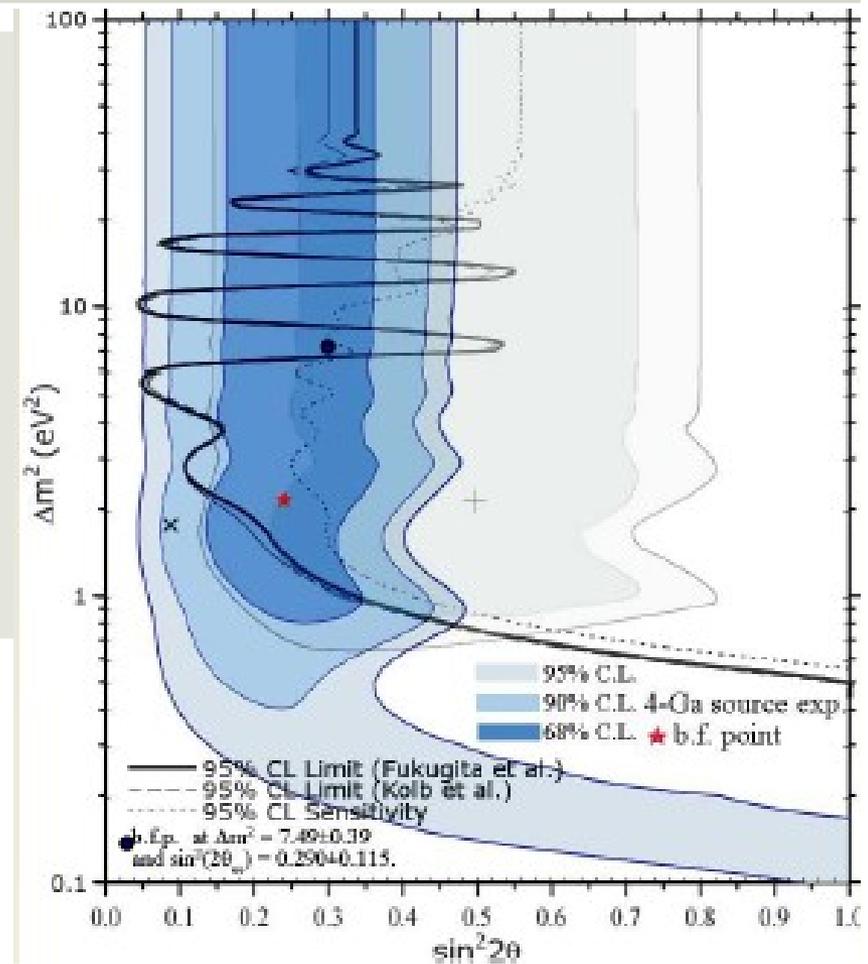
1. **BEST**, V. N. Gavrin *et al.*, БНО ИЯИ РАН.
2. **Neutrino-4**, A.P. Serebrov *et al.*, The first observation of effect of oscillation in Neutrino-4 experiment on search for sterile neutrino, arXiv:1809.10561 [hep-ex].
3. **DANSS**, M. Danilov *et al.*, *Recent results of the DANSS experiment*, arXiv:1809.10561 [hep-ex].



BEST – Baksan Experiment on Sterile Transitions

Поиск исчезновения электронных нейтрино через реакцию заряженных токов (CC): $\nu_e + {}^{71}\text{Ga} \rightarrow {}^{71}\text{Ge} + e^-$

Дефицит нейтрино в **Ga** экспериментах с источниками может быть реальным физическим эффектом неизвестного происхождения, такого как переход в стерильное нейтрино, или статистической флуктуацией (~5%).

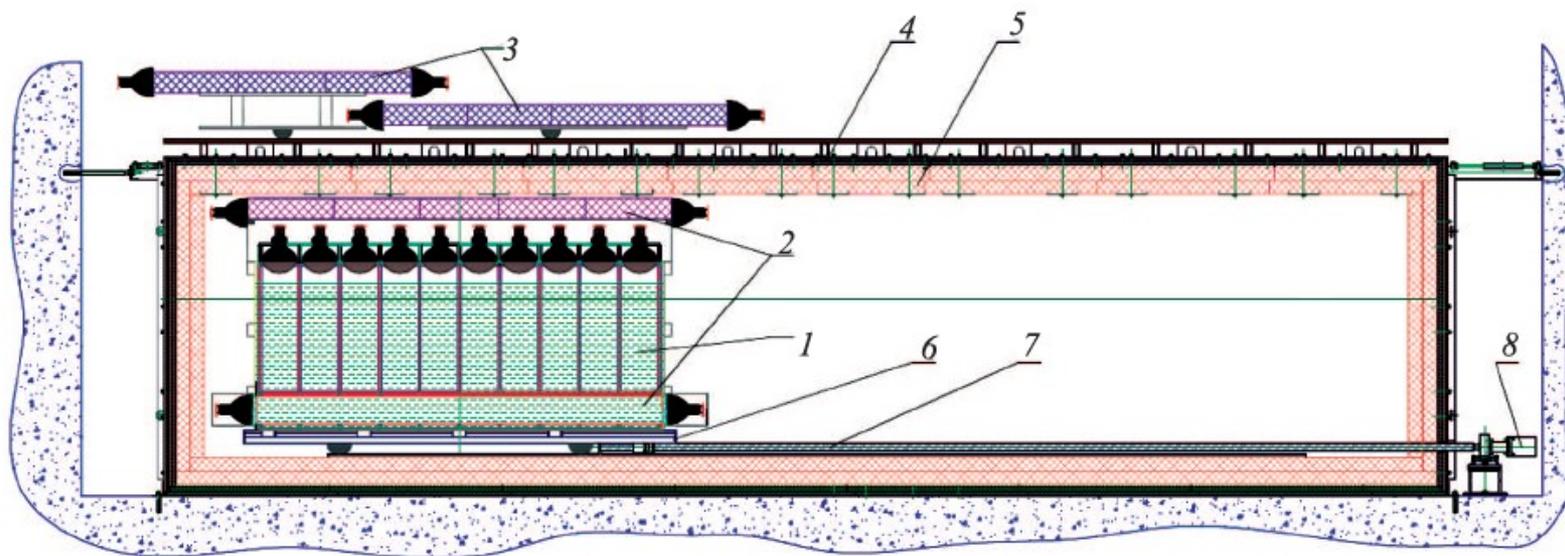


BEST – Baksan Experiment on Sterile Transitions

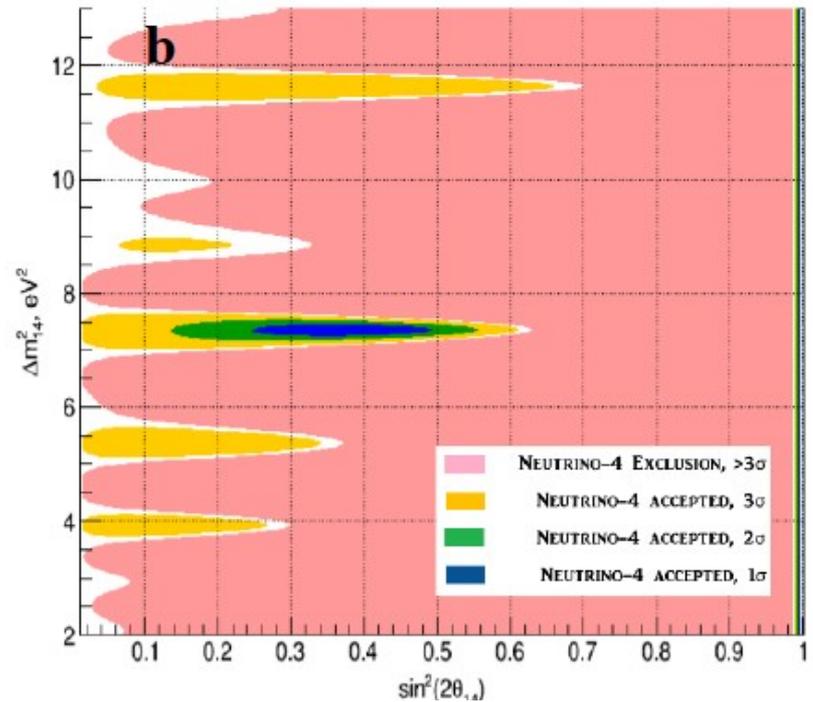
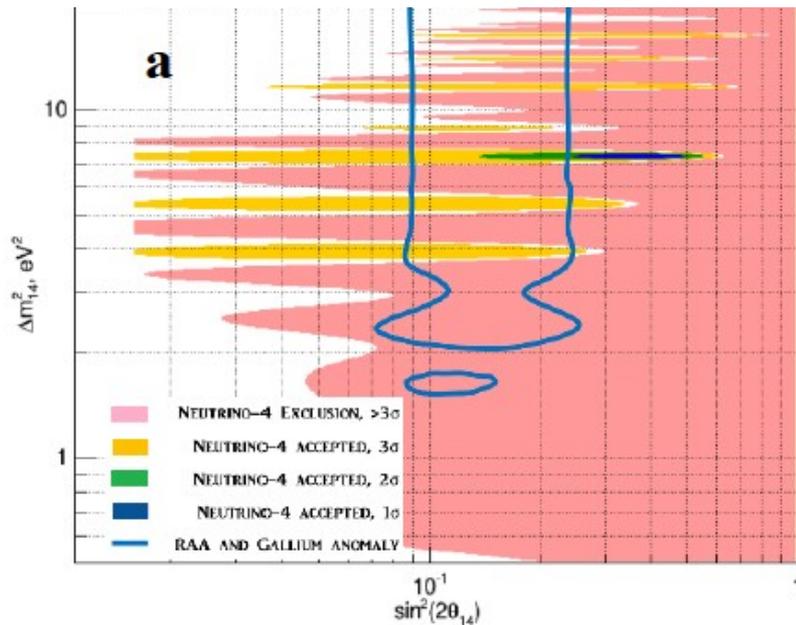
Наилучшая оценка при: $\Delta m^2 = 2.15 \text{eV}^2$ $\sin^2 2\theta = 0.24$

★ – указывает на точку наилучшей оценки (**best fit point**) для осцилляционных параметров исчезновения электронных антинейтрино в реакторных экспериментах.

NEUTRINO-4



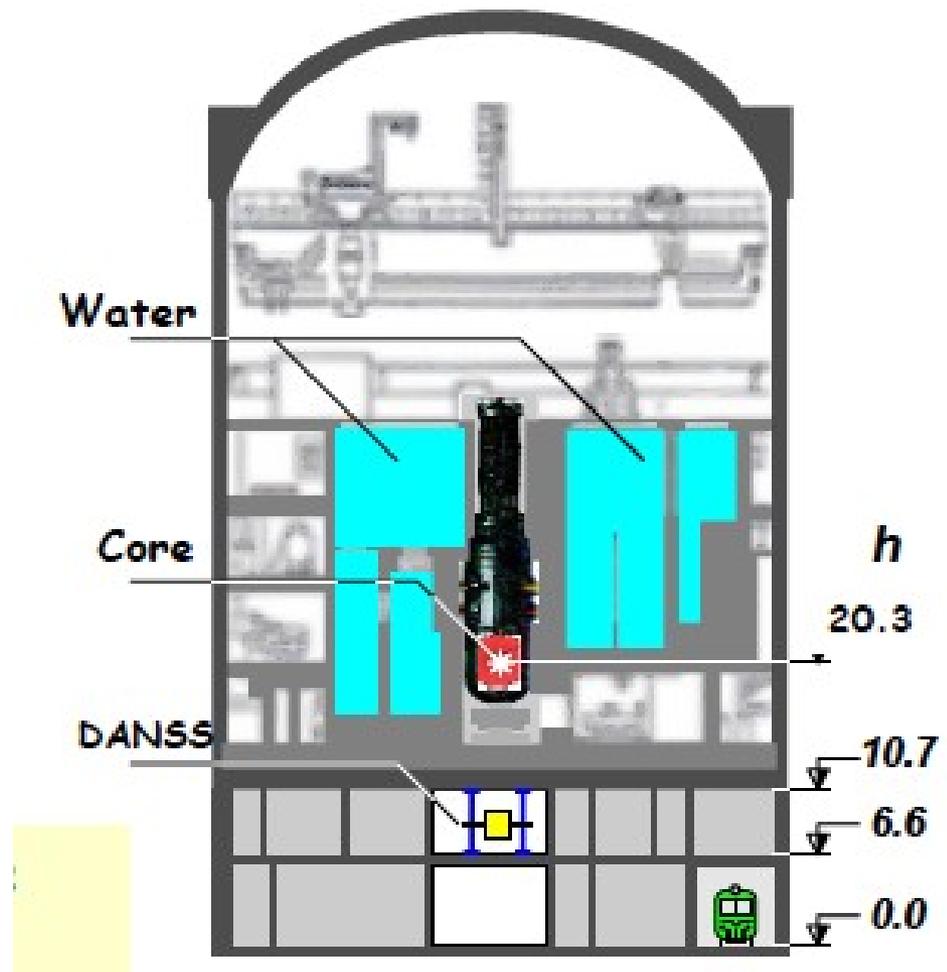
1. (Цветной онлайн) Общая схема установки. 1 – детектор реакторных антинейтрино, 2 – внутренняя активная защита, 3 – внешняя активная защита (“зонтик”), 4 – стальная и свинцовая пассивная защита, 5 – пассивная защита из полиэтилена, 6 – подвижная платформа, 7 – ходовой винт, 8 – шаговый двигатель



NEUTRINO-4

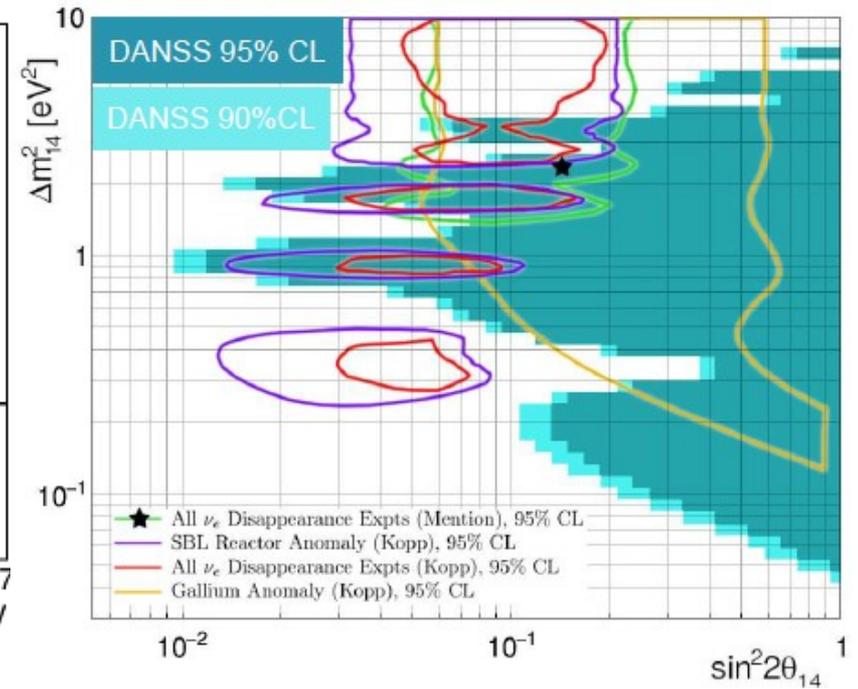
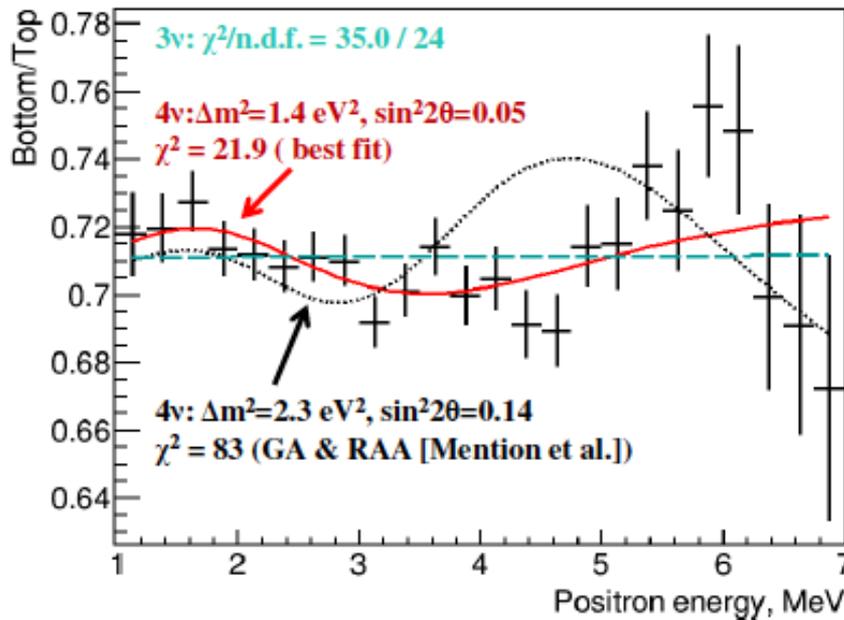
a - Ограничения на параметры осцилляций в стерильное состояние 99.73% CL (розовый), область допустимых значений параметров с 99.73% CL (желтый), область допустимых значений параметров с 95.45% CL (зеленый), область допустимых значений параметров с 68.30% CL (синий). **b** - Область вокруг центральных значений в линейном масштабе и значительно увеличенная.

Результаты анализа исключают область реакторной и Ga аномалии при более 99,7% CL ($>3\sigma$) при значениях $\Delta m^2_{14} = 7.34 \text{ eV}^2$ и $\sin^2 2\theta_{14} = 0.39$



DANSS at Kalinin Nuclear Power Plant

Нейтринный детектор DANSS, созданный физиками из ОИЯИ и ИТЭФ, основан на кремниевых фотоумножителях, которые будут регистрировать поток нейтрино, исходящий из реактора Калининской АЭС.



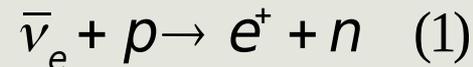
DANSS at Kalinin Nuclear Power Plant

В анализе используется только отношение позитронных спектров при различных расстояниях.

Моделирование наблюдаемого спектра реакторных антинейтрино

Спектр реакторных антинейтрино

В детекторе антинейтрино взаимодействует с ядрами водорода посредством реакции обратного бета-распада:



Энергетический порог реакции (1) составляет 1.806 МэВ. Энергия позитрона связана с энергией антинейтрино следующим образом:

$$E_n = T_e + E_{thr} + r_n$$

где E_n – энергия антинейтрино, T_e – кинетическая энергия позитрона, E_{thr} – порог реакции (1) и r_n – энергия отдачи нейтрона. Энергия нейтрона мала и в первом приближении ей можно пренебречь.

В эксперименте измеряется спектр позитронов реакции (1).

Моделирование наблюдаемого спектра реакторных антинейтрино

Моделирование спектра проводилось путем разыгрывания случайным образом событий по спектру, полученному в эксперименте Ровно-1991.

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta \times \sin^2 \left(1.27 \times \frac{\Delta m^2 [\text{eV}^2] L [\text{m}]}{E_{\bar{\nu}_e} [\text{MeV}]} \right)$$

При наличии осцилляций спектр позитронов в детекторе должен измениться в соответствии с теорией нейтринных осцилляций. Для электронного антинейтрино с энергией E_{ν} вероятность сохранить свой флэйвор на расстояния L от реактора

Длина осцилляций

Длина осцилляций определяется величиной параметра Δm^2 и энергией нейтрино:

$$L_{osc} = \frac{E_{\bar{\nu}} [MeV]}{1.27 \Delta m^2 [eV^2]}$$

В данной работе мы использовали спектр антинейтрино, полученный в работе [*], который переводился в спектр позитронов умножением на сечение реакции (1).

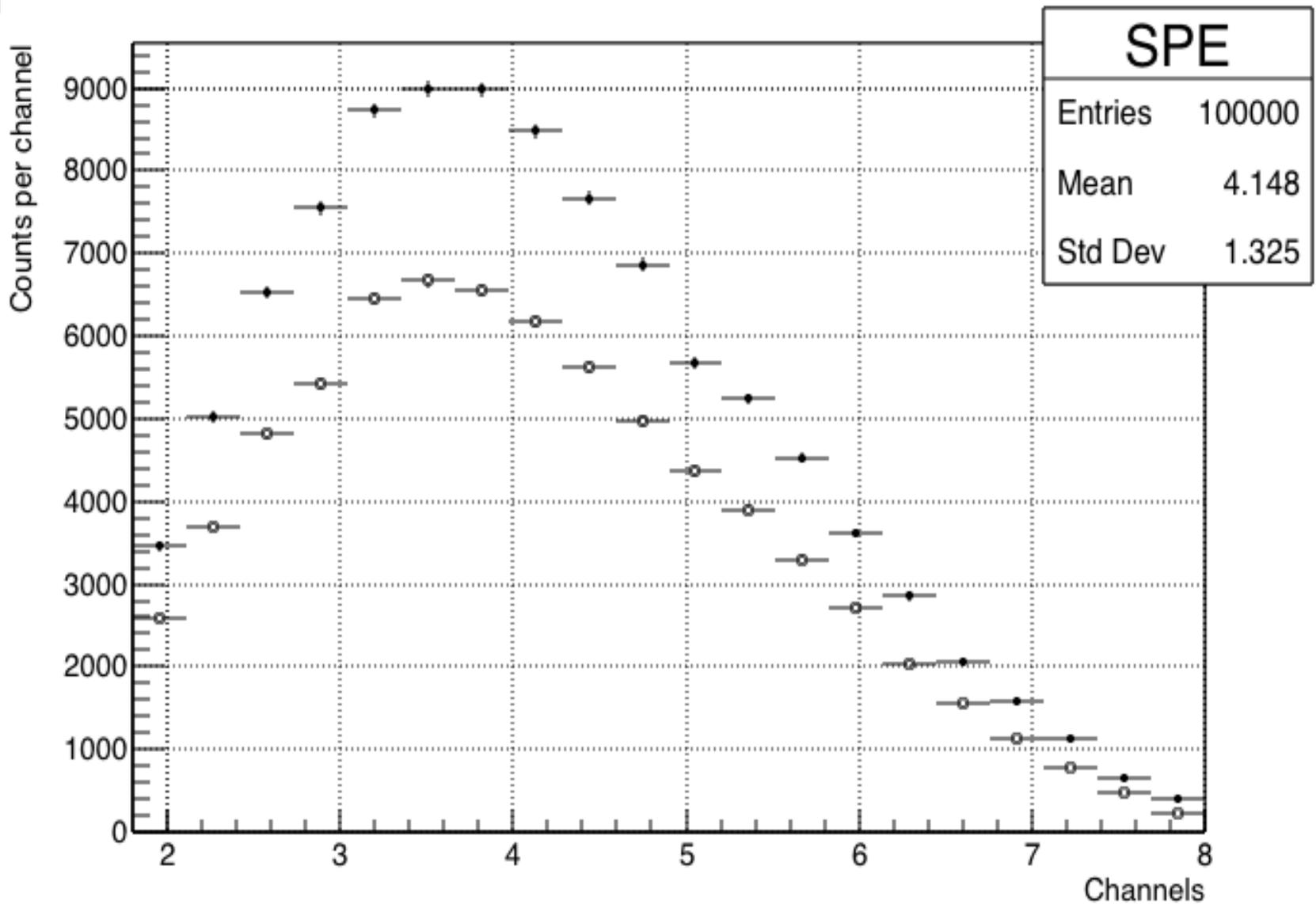
Сечение реакции (1) хорошо описывается формулой из работы [**]

$$\sigma_{\nu p} = 10^{-43} \rho_e E_e E_{\nu}^{-0.07056 + 0.02018 \ln E_{\nu} - 0.001953 \ln^3 E_{\nu}}, E_{\nu} = E_p - 1.293$$

Разыгрывалась заданная статистика для полученного позитронного спектра на заданных расстояниях (например, $N_1 = 100000$ и $N_2 = \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 \times N_1$ для другого расстояния).

[*] - В.В. Синев, Ядерная физика, т. 76, № 5, с. 578-584, 2013.

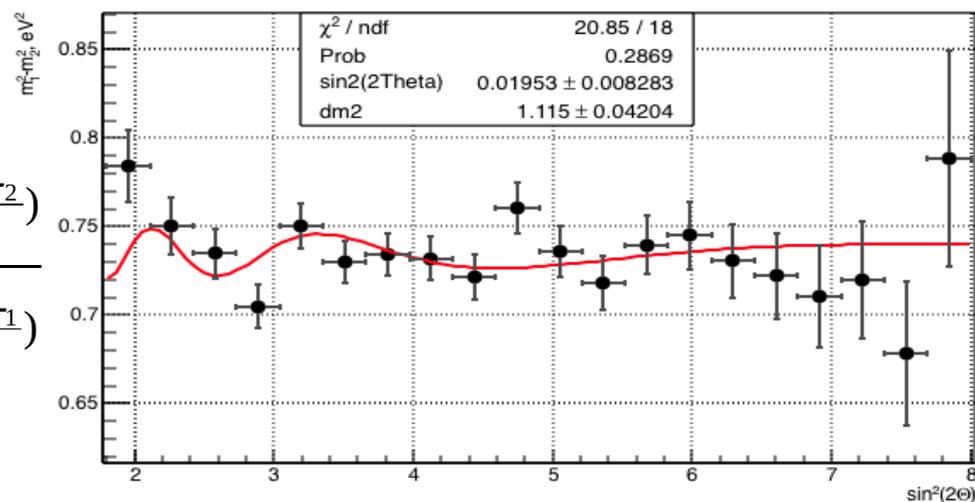
[**] - A. Strumia and F. Vissani, Phys. Lett. B 564, 42 (2003); astro-ph/0302055



Смоделированные спектры позитронов для двух расстояний. Черные точки для расстояния 12 м, белые точки – для расстояния 14 м

Без осцилляций

$$f_{12}(E_{\bar{\nu}}) = \frac{P(L_2)}{P(L_1)} = \frac{1 - \sin^2 2\theta \times \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L_2}{E_{\bar{\nu}}}\right)}{1 - \sin^2 2\theta \times \sin^2\left(1.27 \frac{\Delta m^2 L_1}{E_{\bar{\nu}}}\right)}$$



Отношение позитронных спектров.

Красная линия – результат подгонки отношения функцией f_{12} с заданными областями параметров

$\sin^2 2\theta \in [0.0, 0.1]$ и $\Delta m^2 \in [0.0, 10.0]$.

Метод χ^2

Анализ проводился методом χ^2 . Для этого строилась функция правдоподобия:

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(R_i - f_{12i}(\Delta m^2, \sin^2 2\theta))^2}{\sigma_i^2} + \frac{\left(\frac{I_1}{I_2} - \left(\frac{L_1}{L_2}\right)^2 \frac{P_1}{P_2}\right)^2}{\sigma_i^2},$$

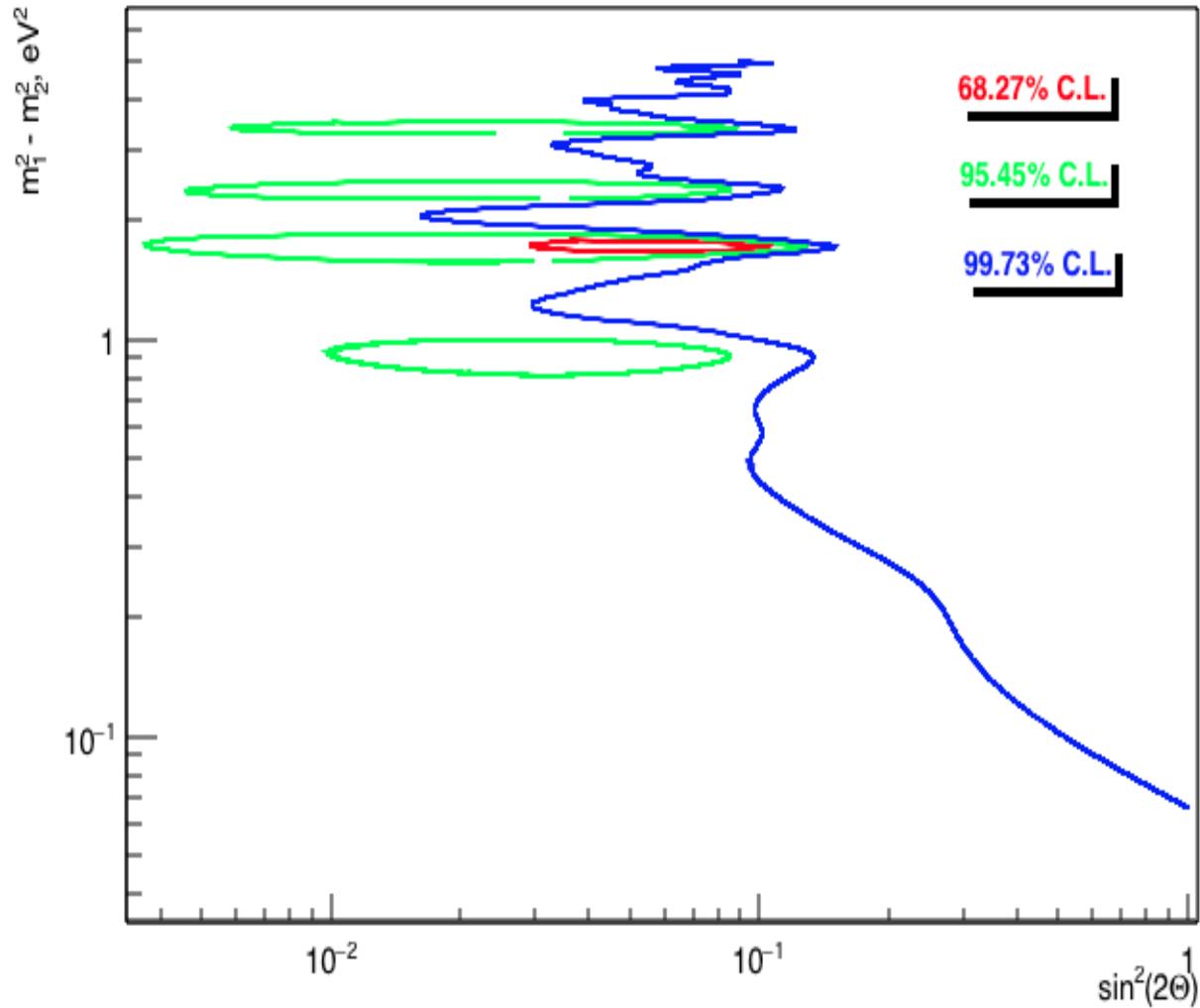
где R_i - отношение позитронных спектров для двух расстояний, $f_{12i}(\Delta m^2, \sin^2 2\theta)$ - подгоночное значение отношения для определенных значений осцилляционных параметров, σ_i^2 - экспериментальная погрешность в бине спектра, I_1 и I_2 - интегралы экспериментальных спектров, а P_1 и P_2 - интегралы осцилляционных функций.

Параметры осцилляций

$\Delta m^2, \text{эВ}^2$	$\sin^2 2\theta$
1.104	0.006
1.132	0.010
0.972	0.006
0.936	0.000
10.000	0.015
0.962	0.024
0.923	0.017
0.873	0.000
0.978	0.007
0.956	0.005

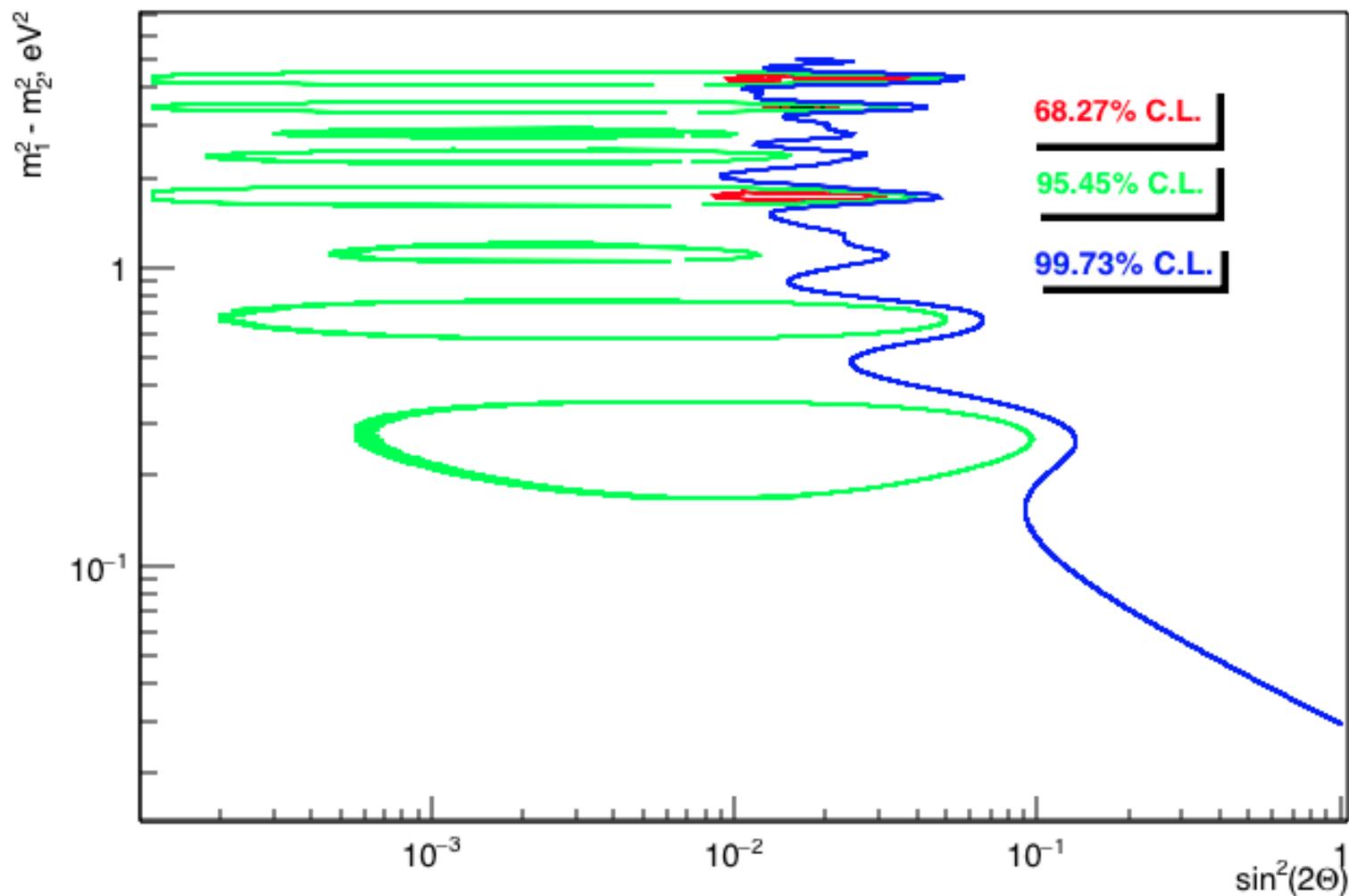
Границы параметров осцилляций

10^4 : no oscillations



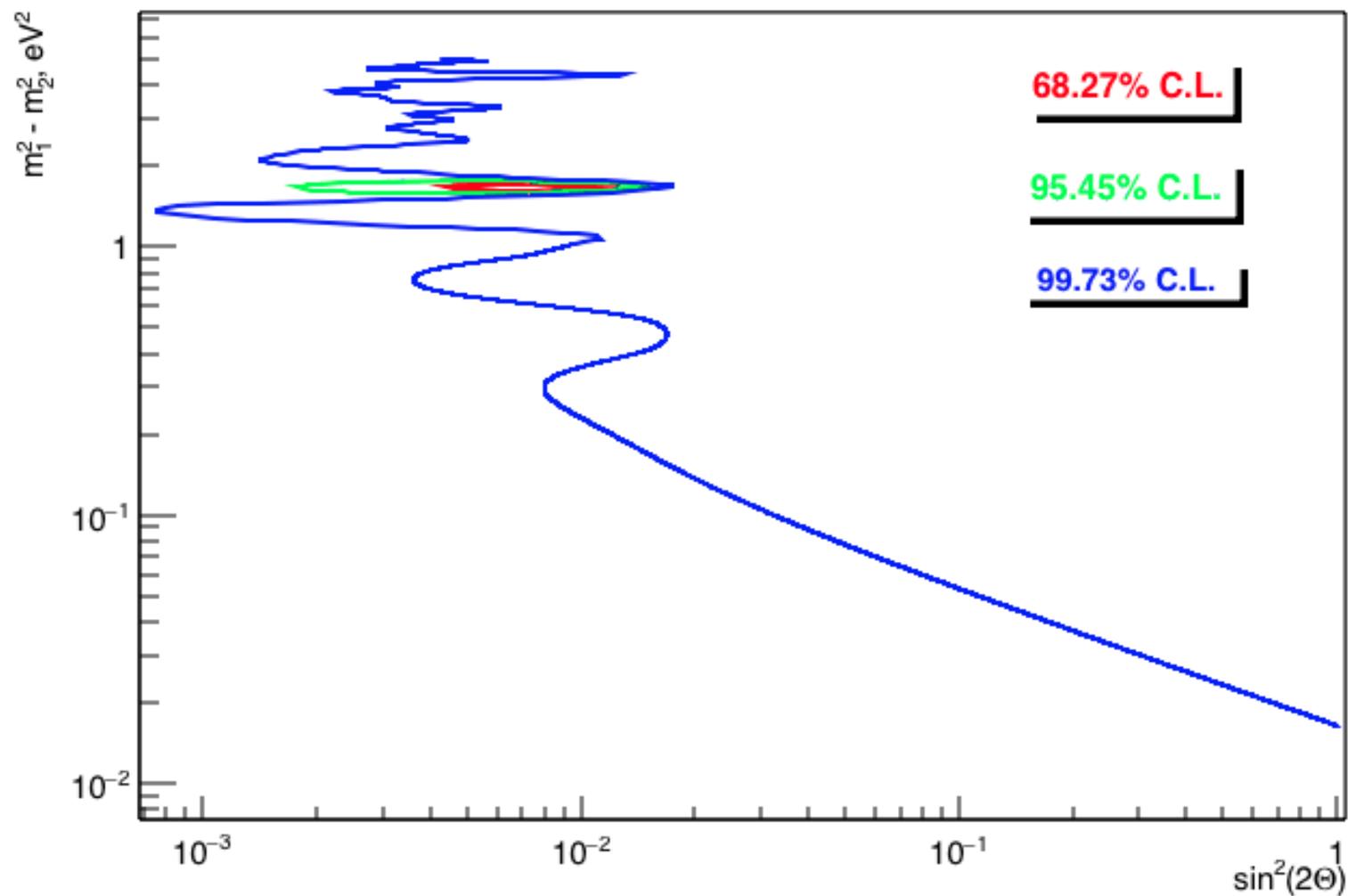
Границы параметров осцилляций

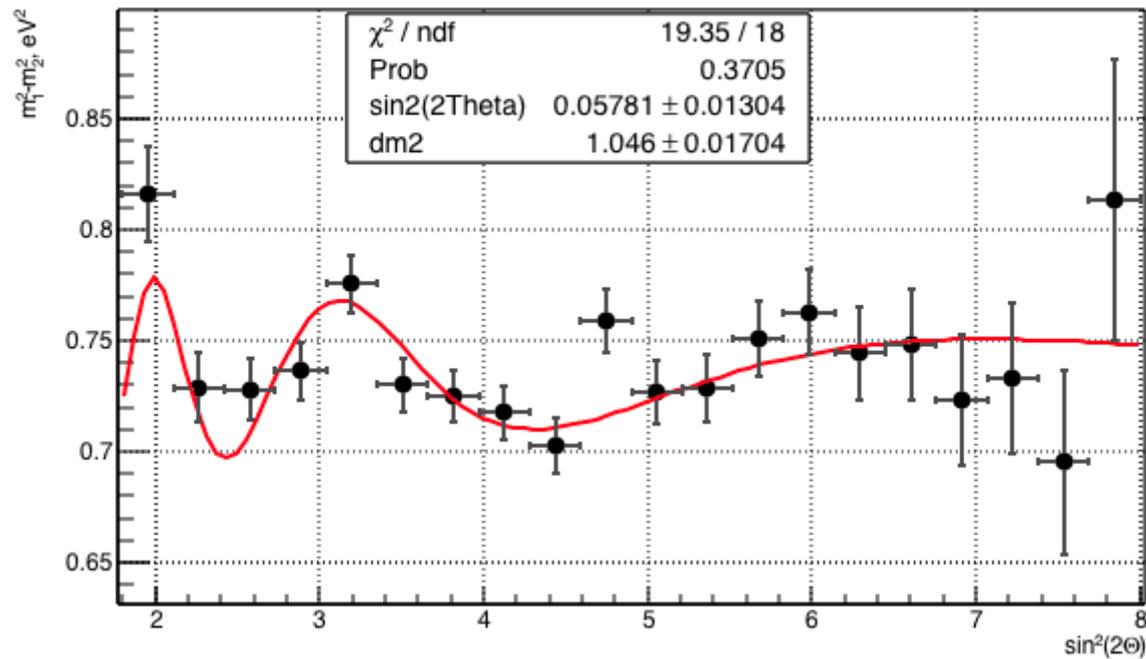
10^5 : no oscillations



Границы параметров осцилляций

10^6 : no oscillations





Моделирование спектров с осцилляциям:
 $\Delta m^2 = 1 \text{ эВ}^2$ и $\sin^2 2\theta = 0.05$

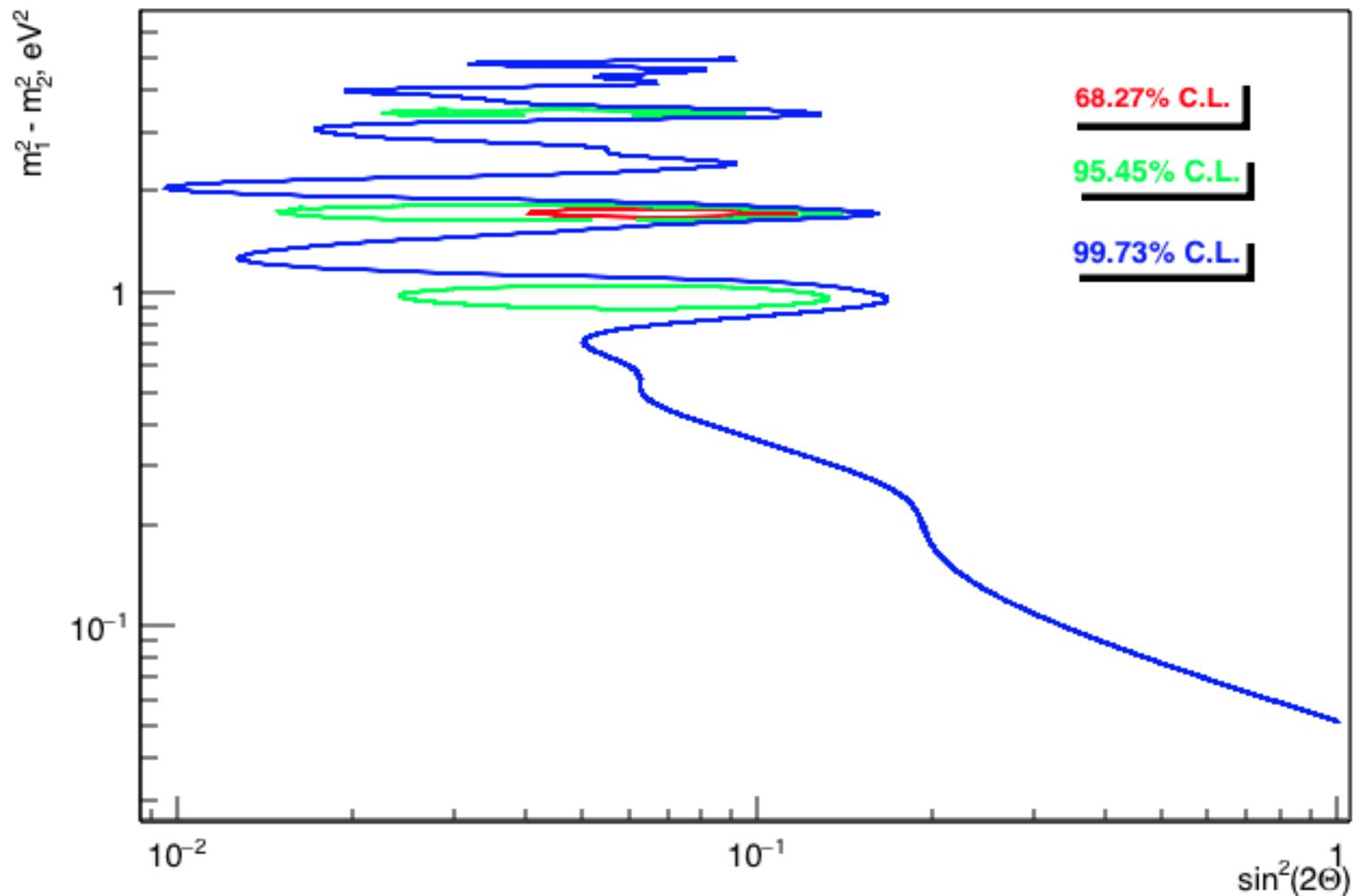
Красная линия – результат подгонки отношения функций с заданными областями параметров $\sin^2 2\theta \in [0.0, 0.1]$ и $\Delta m^2 \in [0.0, 10.0]$.

Параметры осцилляций

$\Delta m^2, \text{эВ}^2$	$\sin^2 2\theta$
1.031	0.047
1.022	0.050
0.993	0.047
0.991	0.046
1.053	0.042
0.986	0.068
0.974	0.055
1.005	0.037
0.991	0.045
0.994	0.049

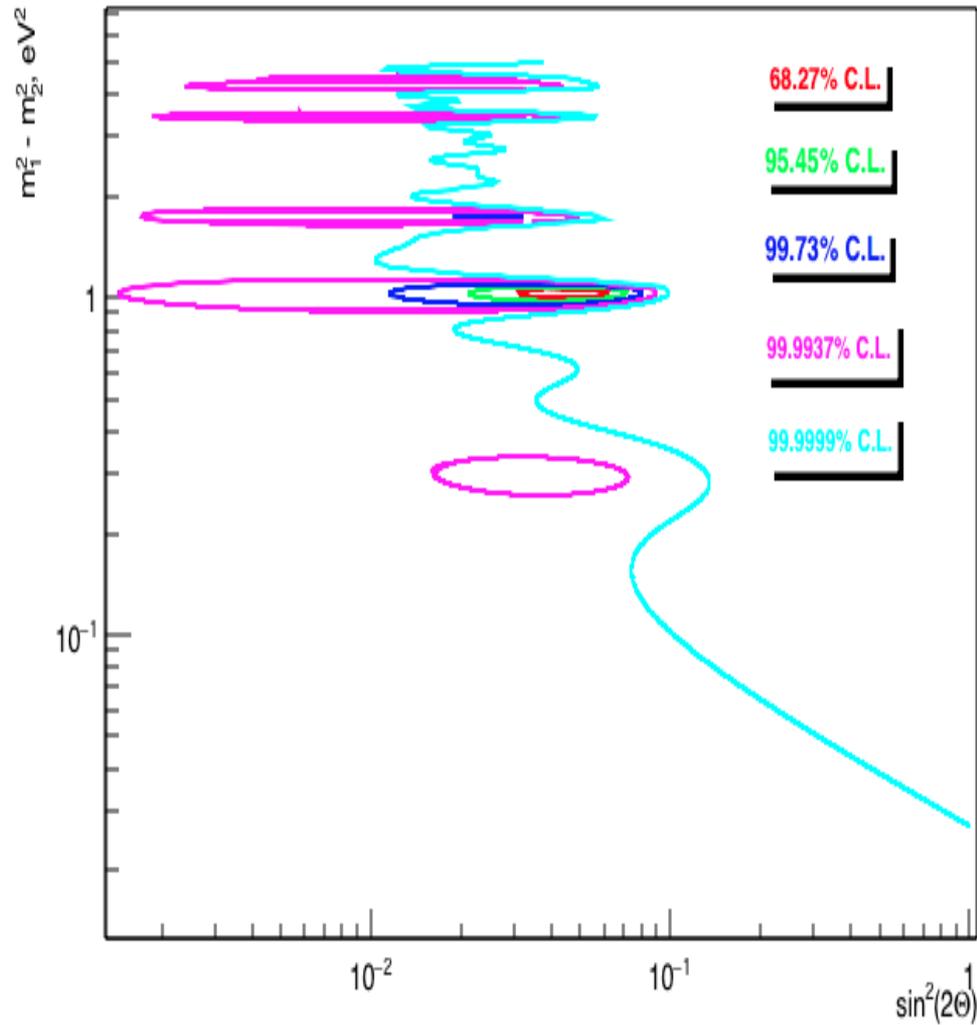
Границы параметров осцилляций

10^4 : oscillations



Границы параметров осцилляций

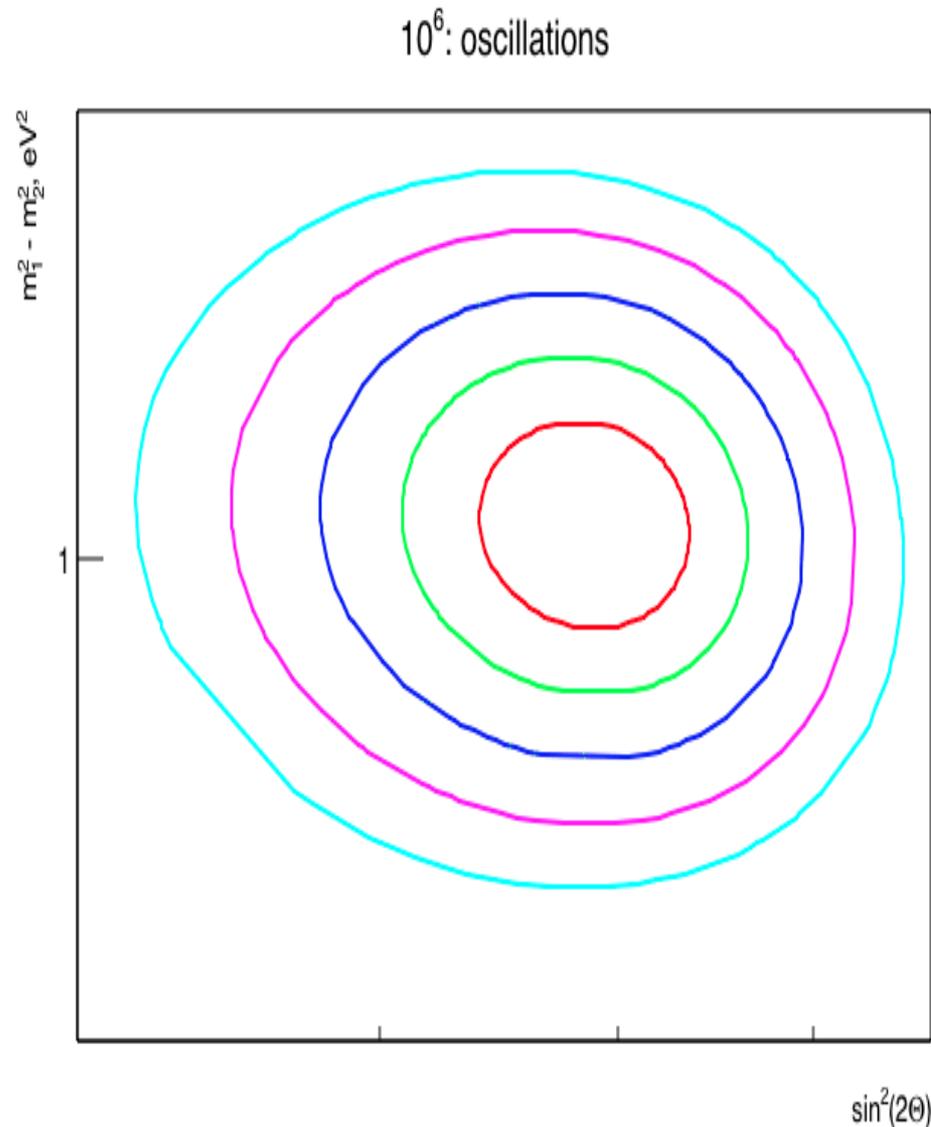
10^5 : oscillations



Границы параметров осцилляций

красная линия -
68.27% C.L. (1σ),
зеленая линия -
95.45% C.L. (2σ),
синяя линия - 99.73%
C.L. (3σ),

пурпурная линия -
99.9937% C.L. (4σ),
голубая линия -
99.999943% C.L. (5σ).



Заключение

При моделировании спектров с осцилляциями анализ показал, что при малой статистике ($\sim 10^4$ событий в спектре) осцилляции обнаруживаются на уровне достоверности 95% С.Л. Статистика не позволяет получить заложенные осцилляции на более высоком уровне достоверности. При статистике $\sim 10^5$ событий уровень достоверности увеличивается до величины, соответствующей четырем стандартным отклонениям, однако не достигает 5σ . Только при статистике $\sim 10^6$ событий удастся достичь величины 5σ .

Без осцилляций при любой статистике разрыв областей параметров осцилляций наступал при $2.5-3\sigma$. При этом найденные параметры осцилляций демонстрировали следующее поведение: с увеличением статистики параметр $\sin^2 2\theta$ уменьшался примерно до статистической погрешности, а параметр Δm^2 принимал случайные значения в области от 0.1 до 10 эВ².

Систематическая погрешность не принималась во внимание на данном этапе.

В реальном эксперименте к статической погрешности добавляется еще и систематическая, так что следует увеличивать статистику для обнаружения эффекта осцилляций на уровне достоверности в 5σ .