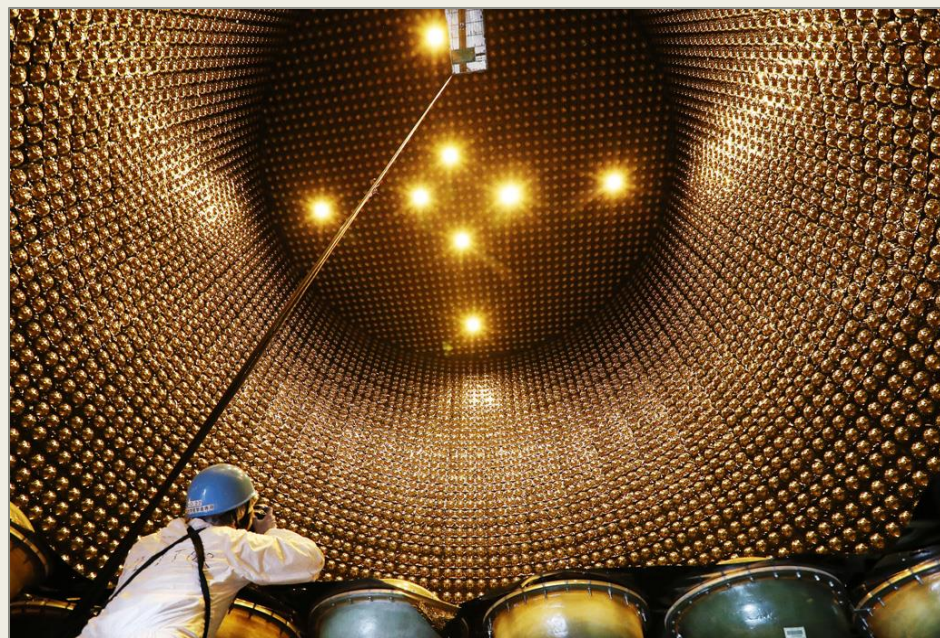


ОЦЕНКА ВОЗМОЖНОСТИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ  
НЕЙТРИННОЙ МАССОВОЙ ИЕРАРХИИ НА  
БАЙКАЛЬСКОМ ПОДВОДНОМ  
НЕЙТРИННОМ ТЕЛЕСКОПЕ

Работу выполнил:  
студент II курса Валентин Мекрюков  
Научный руководитель:  
г. н. с. ОТФ ИЯИ РАН, член-корр. РАН Горбунов Д.С.

# Введение



- Сегодня общепринятой является трёхнейтринная модель с осцилляциями между ароматовыми (флейворными) и массовыми состояниями;
- Идея нейтринных осцилляций принадлежит Бруно Понтекорво (1957);
- Экспериментальное подтверждение нейтринных осцилляций – эксперимент SuperKamiokande (1998);

# Описание нейтринных осцилляций

Флейворные состояния представляются как линейная комбинация массовых:

$$\begin{pmatrix} |\nu_e\rangle \\ |\nu_\mu\rangle \\ |\nu_\tau\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |\nu_1\rangle \\ |\nu_2\rangle \\ |\nu_3\rangle \end{pmatrix}$$

Преобразование соответствует повороту в унитарном пространстве волновых функций.

# Описание нейтринных осцилляций в вакууме

В собственной системе отсчёта:  $|\nu_i(t'_i)\rangle = e^{-im_it'_i} |\nu_i(0)\rangle$

В системе отсчёта детектора:  $|\nu_i(t)\rangle = e^{-i(E_it - p_iL)} |\nu_i(0)\rangle$

С учётом ультрарелятивистского характера нейтрино:

$$|\nu_i(t)\rangle = \exp\left(-i \frac{m_i^2}{2E} t\right) * |\nu_i(0)\rangle$$

# Описание нейтринных осцилляций в вакууме

Амплитуда вероятности осцилляций:

$$A(\alpha \rightarrow \beta) = \langle \nu_\beta(0) | \nu_\alpha(t) \rangle = \sum_{j=1}^3 U_{\alpha j} e^{-\frac{im_j^2 L}{2E_j}} U_{\beta j}^*$$

# Описание нейтринных осцилляций в вакууме

Вероятность осцилляций в зависимости от времени:

$$\begin{aligned} P(\alpha \rightarrow \beta) &= |A(\alpha \rightarrow \beta)|^2 = \\ &= \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \operatorname{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{4E} \right) \\ &\quad + 2 \sum_{i>j} \operatorname{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin \left( \frac{\Delta m_{ji}^2 L}{2E} \right) \end{aligned}$$

# Вид матрицы смешивания

**PMNS-матрица** (матрица Понтекорво-Маки-Накагава-Саката) – унитарная матрица смешивания лептонов.

Параметризуется тремя действительными углами смешивания и одной CP-нарушающей фазой.

$$U = C_{23}(\theta_{23}) * C_{13,\delta}(\theta_{13}, \delta) * C_{12}(\theta_{12})$$

# Случай вещества постоянной плотности

Вакуум

$$H = H_0$$

$$\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$$

$$U(\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta)$$

Вещество

$$H_{mat} = H_0 + V_e$$

$$\Delta M_{21}^2, \Delta M_{32}^2$$

$$U(\theta_{23}^m, \theta_{13}^m, \theta_{12}^m, \delta^m)$$



# Эффективная «добавка» к гамильтониану

$$V_e^f = \pm\sqrt{2}G_F N_e \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

$$V_e^m = U^\dagger V_e^f U$$

# Случай вещества постоянной плотности

Вакуум

$$H = H_0$$

$$\Delta m_{21}^2, \Delta m_{32}^2$$

$$U(\theta_{23}, \theta_{13}, \theta_{12}, \delta)$$

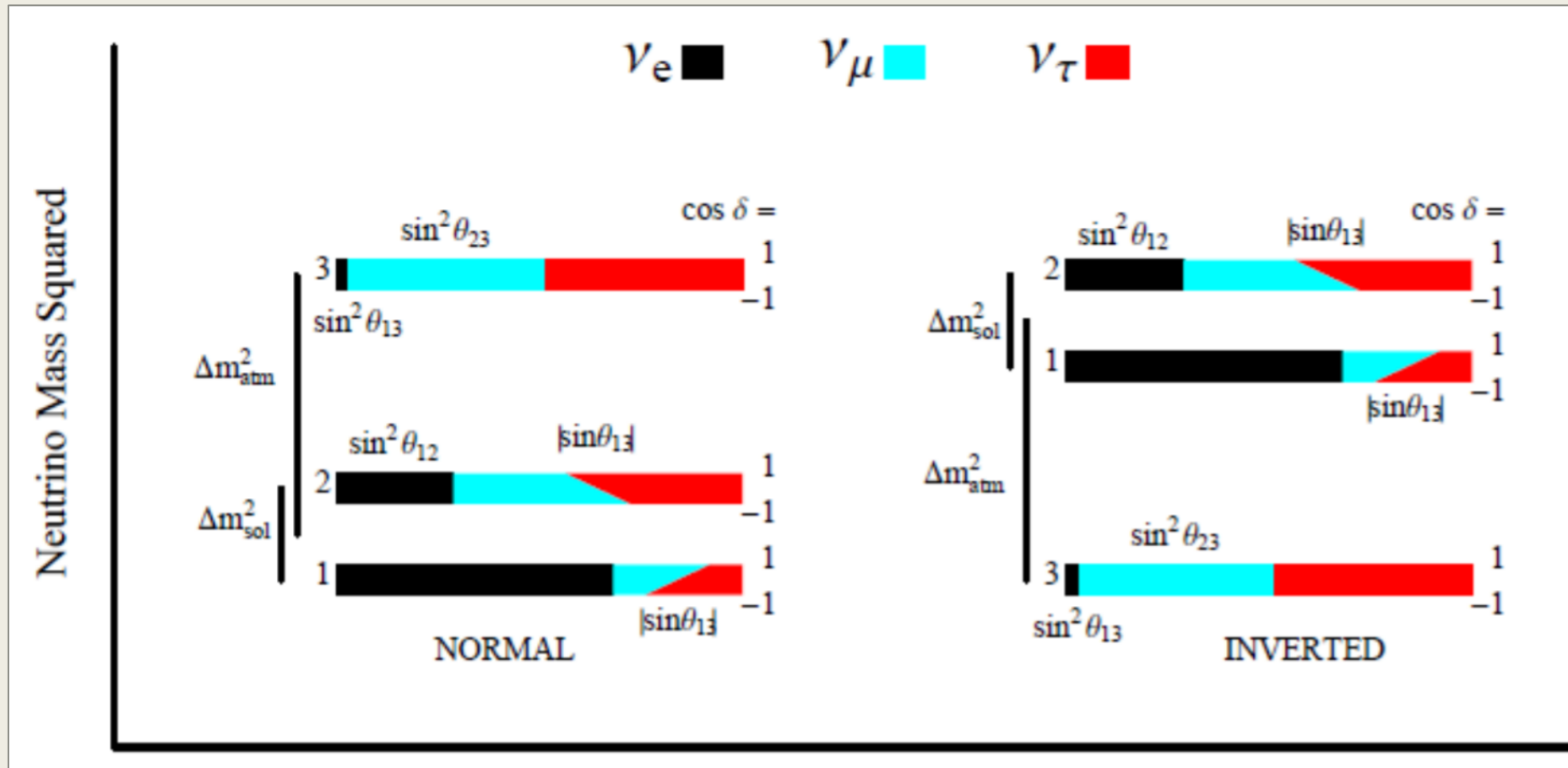
Вещество

$$H_{mat} = H_0 + V_e$$

$$\Delta M_{21}^2, \Delta M_{32}^2$$

$$U(\theta_{23}^m, \theta_{13}^m, \theta_{12}^m, \delta^m)$$

# Нейтринная массовая иерархия



# Идея эксперимента – изучение распределения атмосферных нейтрино по энергии и зенитному углу

Детектор – черенковский детектор  
нейтрино с энергиями в единицы-  
десятки ГэВ на географической позиции  
Байкальского подводного нейтринного  
телескопа.

Глубина расположения детектора  
– 1,1 км.

Эффективный объём – 1 Мт.



# Параметры эксперимента

В вычислениях использовались значения для среднегодового потока нейтрино без учёта осцилляций, полученные Хонда для детектора Камиоканде.

В качестве сечений взаимодействия приняты сечения глубоко неупругого рассеяния для нейтрино и для антинейтрино (порядка  $10^{(-39)}$  кв. см).

Параметры осцилляций		
Параметр	Иерархия нейтринных масс	
	Нормальная	Обратная
$ \Delta m_{21}^2 , \text{эВ}^2$	$7,39 * 10^{-5}$	$7,39 * 10^{-5}$
$ \Delta m_{32}^2 , \text{эВ}^2$	$2,528 * 10^{-3}$	$2,426 * 10^{-3}$
$\theta_{13}$	8,60	8,64
$\theta_{12}$	33,82	33,82
$\theta_{23}$	48,60	48,80
$\delta_{CP}$	221,0	282,0

# Число событий в данной области по энергии и углу

$$N_{ij,\alpha} = 2\pi N_A T \rho V_{eff} \int_{\cos(\theta_{i-1})}^{\cos(\theta_i)} d(\cos(\theta)) \int_{E_{\alpha,j-1}}^{E_{\alpha,j}} D_{\alpha}(E_{\alpha}, \theta) dE_{\alpha}$$

$$D_e(E_e, \theta) = \sigma_{\nu}(E_{\nu}) (\Phi_e(E_e, \theta) P_{ee} + \Phi_{\mu}(E_e, \theta) P_{\mu e}) \\ + \sigma_{\tilde{\nu}}(E_{\nu}) (\Phi_{\tilde{e}}(E_e, \theta) P_{\tilde{e}\tilde{e}} + \Phi_{\tilde{\mu}}(E_e, \theta) P_{\tilde{\mu}\tilde{e}})$$

# Принцип исследования статистической значимости

$$S_{ij,\alpha}^{NH} = \left| \frac{N_{ij,\alpha}^{NH} - N_{ij,\alpha}^{IH}}{\sqrt{N_{ij,\alpha}^{NH}}} \right|$$

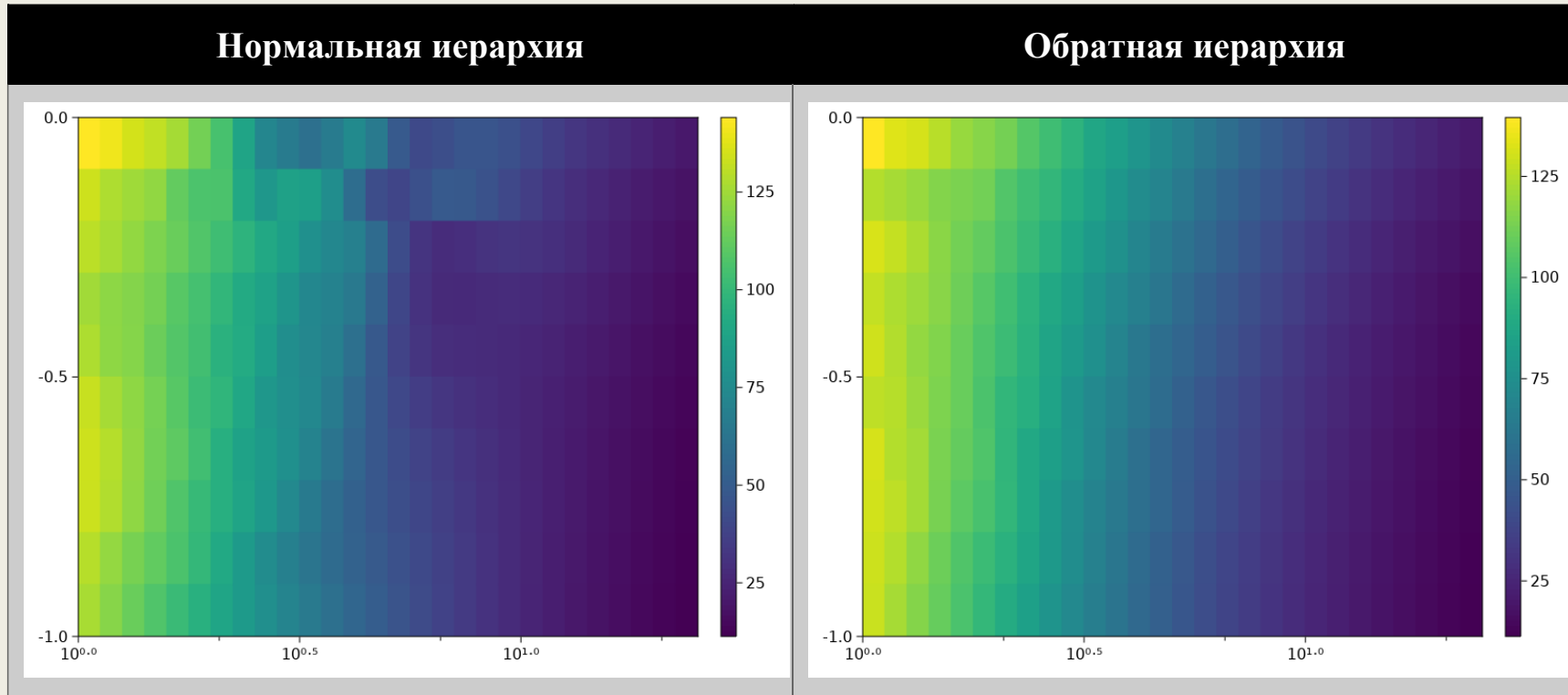
$$S_n^{NH} = \sum_{i=1}^n S_i \sqrt{\frac{N_i^{NH}}{\sum_{k=1}^n N_k^{NH}}}$$

# Неучтённые факторы

- систематические ошибки численного моделирования, в том числе численного интегрирования;
- систематические ошибки при реконструкции действительной энергии и зенитного угла для детектируемых нейтрино и экспериментальная неопределённость этих параметров;
- неопределённость параметров осцилляций: разностей квадратов масс, углов смешивания и CP-нарушающей фазы;
- неизвестный поток таонных атмосферных нейтрино;
- принципиальная ошибка численного интегрирования: суммирование по областям, имеющим разный знак асимметрии массовых иерархий

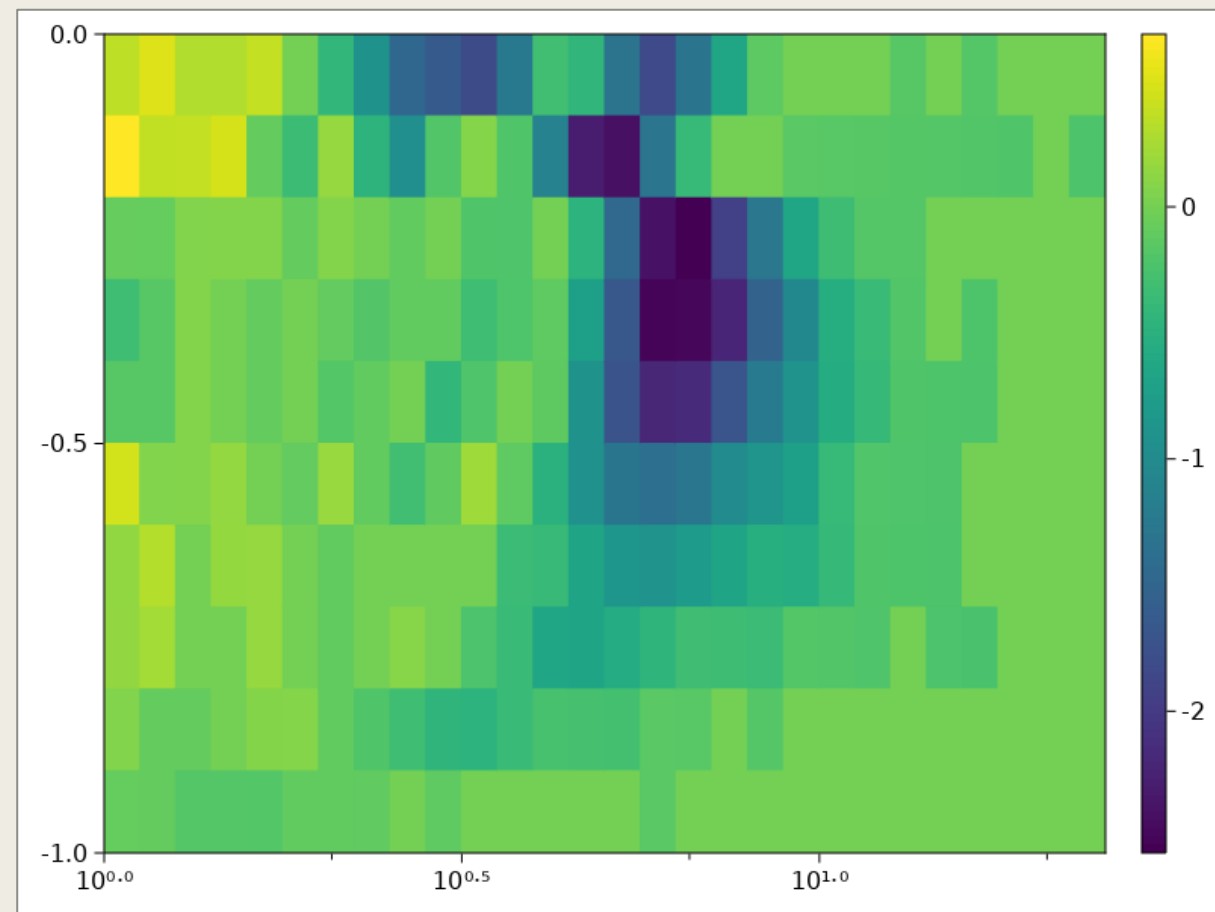


# Результаты и их обсуждение

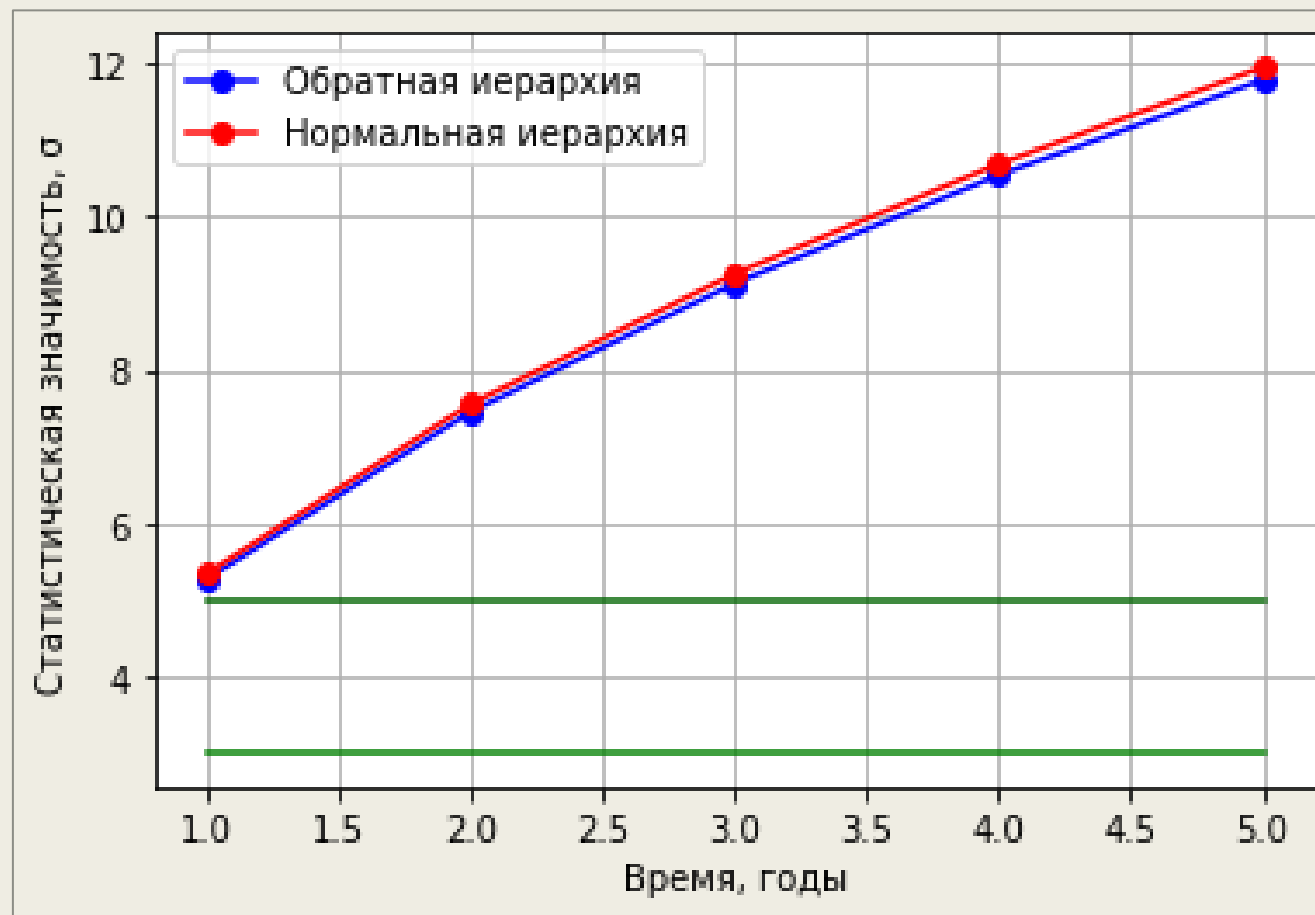


Графики 1. Зависимость числа событий регистрации электронного нейтрино от энергии и косинуса зенитного угла для одного года экспонирования детектора. По горизонтальной оси отложена энергия в гигаэлектронвольтах, по вертикальной – косинус зенитного угла. Цветом обозначено число событий.

Зависимость асимметрии массовых иерархий от энергии и косинуса зенитного угла для электронных нейтрино для одного года экспонирования детектора. По горизонтальной оси отложена энергия в гигаэлектронвольтах, по вертикальной – косинус зенитного угла. Цветом обозначена асимметрия.



# Верхняя оценка статистической значимости



# Заключение

Оценивалась возможность определения нейтринной массовой иерархии с использованием гипотетической модификации Байкальского подводного нейтринного телескопа.

Показано, что возможность определения нейтринной массовой иерархии на черенковском детекторе нейтрино с энергиями в единицы гигаэлектронвольт заслуживает рассмотрения.

- [1] The Reines-Cowan Experiments: detecting the Poltergeist // Los Alamos Science. – 1997 – №25.
- [2] B. Pontecorvo, Neutrino Experiments and the Problem of Conservation of Leptonic Charge // Zh. Eksp. Teor. Fiz. – 1967 – №53.
- [3] G. Danby. Observation of High-Energy Neutrino Reactions and the Existence of Two Kinds of Neutrinos / G. Danby, J-M. Gaillard, K. Goulianos, L. M. Lederman, N. Mistry, M. Schwartz, J. Steinberger // Phys. Rev. Lett. 9, 36 – Published 1 July 1962.
- [4] Y. Fukuda et al. Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos // Phys. Rev. Lett. 8, 81 – Published 24 August 1998.
- [5] B. Aharmim et al. Combined analysis of all three phases of solar neutrino data from the Sudbury Neutrino Observatory // Phys. Rev. C 88, 025501 – Published 1 August 2013.
- [6] A. Gando et al. Reactor on-off antineutrino measurement with KamLAND // Phys. Rev. D 88, 033001 – Published 2 August 2013.
- [7] P. Adamson et al. Precision Constraints for Three-Flavor Neutrino Oscillations from the Full MINOS+ and MINOS Dataset // Phys. Rev. Lett. 125, 131802 – Published 21 September 2020.
- [8] K. Abe et al. Atmospheric neutrino oscillation analysis with external constraints in Super-Kamiokande I-IV // Phys. Rev. D 97, 072001 – Published 3 April 2018
- [9] А. В. Буткевич. Результаты нейтринных экспериментов T2K и NOvA: упорядочивание масс нейтрино и CP-симметрия // ЖЭТФ, 2022, том 161, выпуск 4, стр. 515–522.
- [10] S. Aiello et al. Determining the Neutrino Mass Ordering and Oscillation Parameters with KM3NeT/ORCA (2021). ArXiv:2103.09885v2 [hep-ex].
- [11] E. K. Akhmedov, Soebur Razzaque and A. Yu. Smirnov. Mass hierarchy, 2-3 mixing and CP-phase with Huge Atmospheric Neutrino Detectors (2013). ArXiv:1205.7071v6 [hep-ph].
- [12] J. W. F. Valle. Neutrino physics overview (2006). ArXiv: 0608101v1 [hep-ph].
- [13] A. Yu. Smirnov. The MSW effect and Solar Neutrinos (2003). ArXiv: 0305106v1 [hep-ph].
- [14] H. W. Zaglauer and K. H. Schwarzer. The mixing angles in matter for three generations of neutrinos and the MSW mechanism (1987). The University of Munich preprint.
- [15] M. Honda et al. Atmospheric neutrino flux calculation using the NRLMSISE00 atmospheric model (2015). ArXiv:1502.03916 [astro-ph.HE].
- [16] Neurthino.jl: Neutrino oscillation probability calculator. URL: <https://github.com/KM3NeT/Neurthino.jl>