

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Московский физико-технический институт (государственный университет)

Факультет проблем физики и энергетики  
Кафедра фундаментальных взаимодействий и космологии

Выпускная квалификационная работа магистра по направлению 010900 «Прикладные  
математика и физика»

Анализ процессов взаимодействия нейтрино в  
веществе при энергиях около 1 ГэВ

Студент 383 группы  
Волков В. В.

Научный руководитель  
Куденко Ю. Г.

Москва  
2019

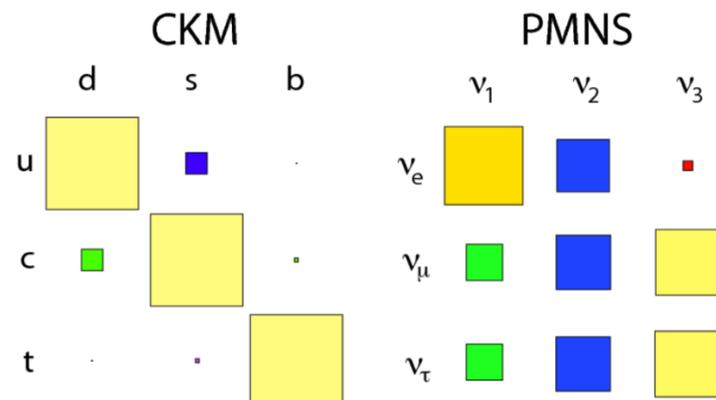
# Смешивание кварков и нейтрино

NuFIT 4.0 (2018)

|   | Normal Ordering (best fit)      |                               | Inverted Ordering ( $\Delta\chi^2 = 4.7$ ) |                               |
|---|---------------------------------|-------------------------------|--|-------------------------------|
|   | bfp $\pm 1\sigma$               | $3\sigma$ range               | bfp $\pm 1\sigma$                          | $3\sigma$ range               |
| without SK atmospheric data                       |                                 |                               |  |                               |
| $\sin^2 \theta_{12}$                              | $0.310^{+0.013}_{-0.012}$       | 0.275 $\rightarrow$ 0.350     | $0.310^{+0.013}_{-0.012}$                  | 0.275 $\rightarrow$ 0.350     |
| $\theta_{12}/^\circ$                              | $33.82^{+0.78}_{-0.76}$         | 31.61 $\rightarrow$ 36.27     | $33.82^{+0.78}_{-0.76}$                    | 31.61 $\rightarrow$ 36.27     |
| $\sin^2 \theta_{23}$                              | $0.580^{+0.017}_{-0.021}$       | 0.418 $\rightarrow$ 0.627     | $0.584^{+0.016}_{-0.020}$                  | 0.423 $\rightarrow$ 0.629     |
| $\theta_{23}/^\circ$                              | $49.6^{+1.0}_{-1.2}$            | 40.3 $\rightarrow$ 52.4       | $49.8^{+1.0}_{-1.1}$                       | 40.6 $\rightarrow$ 52.5       |
| $\sin^2 \theta_{13}$                              | $0.02241^{+0.00065}_{-0.00065}$ | 0.02045 $\rightarrow$ 0.02439 | $0.02264^{+0.00066}_{-0.00066}$            | 0.02068 $\rightarrow$ 0.02463 |
| $\theta_{13}/^\circ$                              | $8.61^{+0.13}_{-0.13}$          | 8.22 $\rightarrow$ 8.99       | $8.65^{+0.13}_{-0.13}$                     | 8.27 $\rightarrow$ 9.03       |
| $\delta_{CP}/^\circ$                              | $215^{+40}_{-29}$               | 125 $\rightarrow$ 392         | $284^{+27}_{-29}$                          | 196 $\rightarrow$ 360         |
| $\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$    | $7.39^{+0.21}_{-0.20}$          | 6.79 $\rightarrow$ 8.01       | $7.39^{+0.21}_{-0.20}$                     | 6.79 $\rightarrow$ 8.01       |
| $\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$ | $+2.525^{+0.033}_{-0.032}$      | +2.427 $\rightarrow$ +2.625   | $-2.512^{+0.034}_{-0.032}$                 | -2.611 $\rightarrow$ -2.412   |
| with SK atmospheric data                          |                                 |                               |  |                               |
|   |                                 |                               |  |                               |
| $\sin^2 \theta_{12}$                              | $0.310^{+0.013}_{-0.012}$       | 0.275 $\rightarrow$ 0.350     | $0.310^{+0.013}_{-0.012}$                  | 0.275 $\rightarrow$ 0.350     |
| $\theta_{12}/^\circ$                              | $33.82^{+0.78}_{-0.76}$         | 31.61 $\rightarrow$ 36.27     | $33.82^{+0.78}_{-0.75}$                    | 31.62 $\rightarrow$ 36.27     |
| $\sin^2 \theta_{23}$                              | $0.582^{+0.015}_{-0.019}$       | 0.428 $\rightarrow$ 0.624     | $0.582^{+0.015}_{-0.018}$                  | 0.433 $\rightarrow$ 0.623     |
| $\theta_{23}/^\circ$                              | $49.7^{+0.9}_{-1.1}$            | 40.9 $\rightarrow$ 52.2       | $49.7^{+0.9}_{-1.0}$                       | 41.2 $\rightarrow$ 52.1       |
| $\sin^2 \theta_{13}$                              | $0.02240^{+0.00065}_{-0.00066}$ | 0.02044 $\rightarrow$ 0.02437 | $0.02263^{+0.00065}_{-0.00066}$            | 0.02067 $\rightarrow$ 0.02461 |
| $\theta_{13}/^\circ$                              | $8.61^{+0.12}_{-0.13}$          | 8.22 $\rightarrow$ 8.98       | $8.65^{+0.12}_{-0.13}$                     | 8.27 $\rightarrow$ 9.03       |
| $\delta_{CP}/^\circ$                              | $217^{+40}_{-28}$               | 135 $\rightarrow$ 366         | $280^{+25}_{-28}$                          | 196 $\rightarrow$ 351         |
| $\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$    | $7.39^{+0.21}_{-0.20}$          | 6.79 $\rightarrow$ 8.01       | $7.39^{+0.21}_{-0.20}$                     | 6.79 $\rightarrow$ 8.01       |
| $\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$ | $+2.525^{+0.033}_{-0.031}$      | +2.431 $\rightarrow$ +2.622   | $-2.512^{+0.034}_{-0.031}$                 | -2.606 $\rightarrow$ -2.413   |

$$V_{CKM} \sim \begin{pmatrix} 1 & 0.2 & 0.005 \\ 0.2 & 1 & 0.04 \\ 0.005 & 0.04 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_{PMNS} \sim \begin{pmatrix} 0.8 & 0.5 & ? \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \\ 0.4 & 0.6 & 0.7 \end{pmatrix}$$





# Исследование осцилляций

Гамильтониан для осцилляций в вакууме:

$$\mathbb{H}_3^{\text{vac}}(E) = \frac{1}{2E} \left( \mathbb{R}_{3,\theta} \mathbb{M}_3^2 \mathbb{R}_{3,\theta}^\dagger \right)$$

$$\mathbb{A}_3 \equiv \text{diag}(V_{\text{CC}}, 0, 0)$$

Гамильтониан для нейтрино в веществе имеет вид:

$$\rho = 3 \text{ g cm}^{-3}$$

$$\mathbb{H}_3^{\text{matt}}(E) = \mathbb{H}_3^{\text{vac}}(E) + \mathbb{A}_3$$

$$n_e = Y_e \rho / [(m_p + m_n)/2]$$

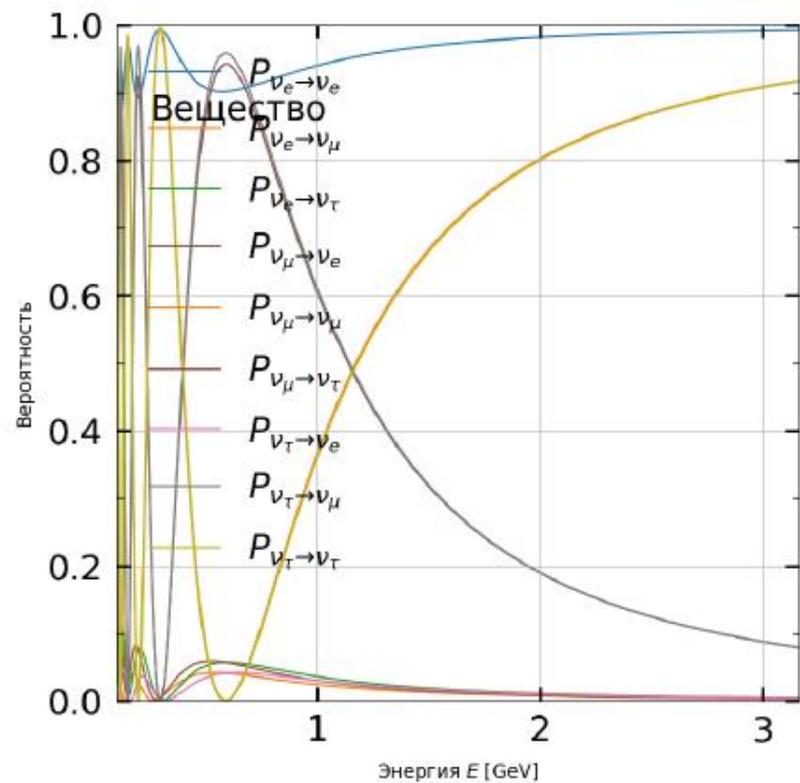
$$\mathbb{V}_3 \equiv V_{\text{CC}} \epsilon_3$$

$$\mathbb{H}_3^{\text{NSI}}(E) = \mathbb{H}_3^{\text{vac}}(E) + \mathbb{A}_3 + \mathbb{V}_3$$

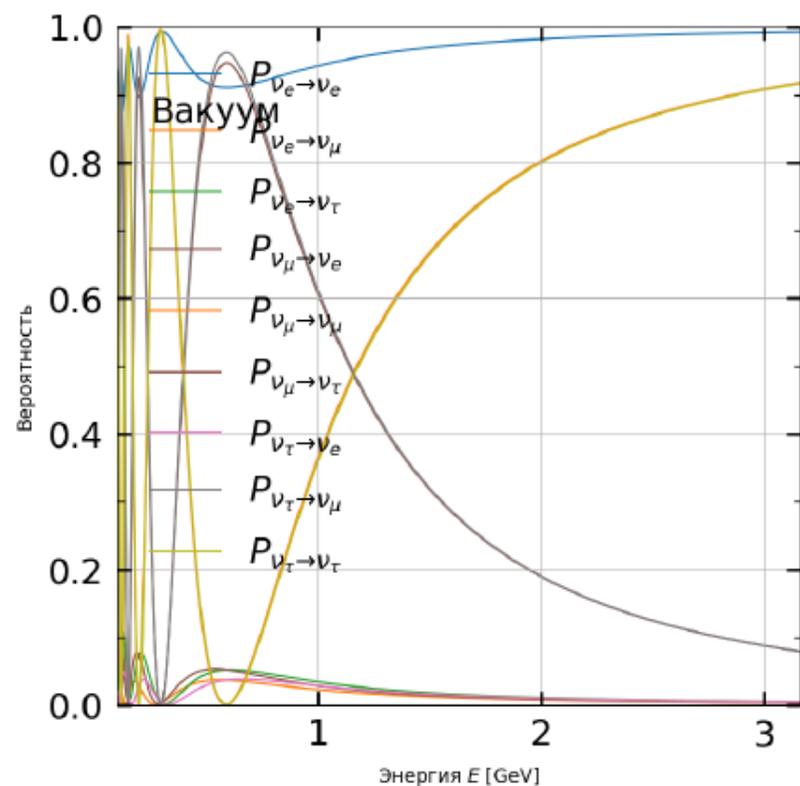
$$\epsilon_3 = \begin{pmatrix} \epsilon_{ee} & \epsilon_{e\mu} & \epsilon_{e\tau} \\ \epsilon_{e\mu}^* & \epsilon_{\mu\mu} & \epsilon_{\mu\tau} \\ \epsilon_{e\tau}^* & \epsilon_{\mu\tau}^* & \epsilon_{\tau\tau} \end{pmatrix}$$

$$\epsilon_{ee}^u = -\epsilon_{e\mu}^u = 0.01, \quad \epsilon_{\mu\mu}^u = 0.2, \quad \epsilon_{e\tau}^u = \epsilon_{\mu\tau}^u = \epsilon_{\tau\tau}^u = 0. \quad \epsilon_{\alpha\beta}^e = 0. \quad \epsilon_{ee} = -\epsilon_{e\mu} = 0.06, \quad \epsilon_{\mu\mu} = 1.2, \\ \epsilon_{e\tau} = \epsilon_{\mu\tau} = \epsilon_{\tau\tau} = 0.$$

# Результаты

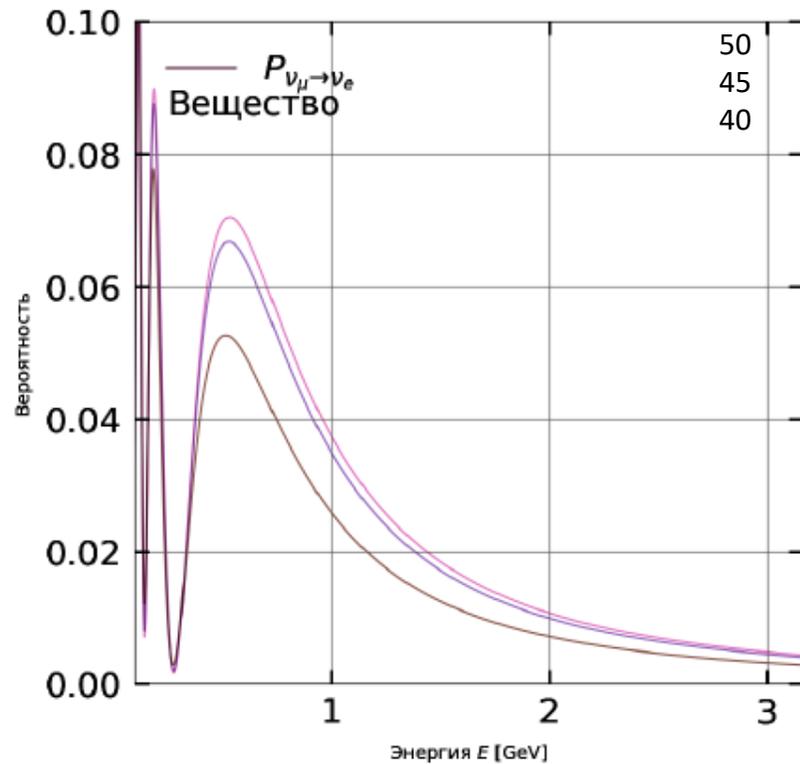


Вероятность осцилляций в зависимости от энергии для T2K (NO) в веществе для всех типов нейтрино

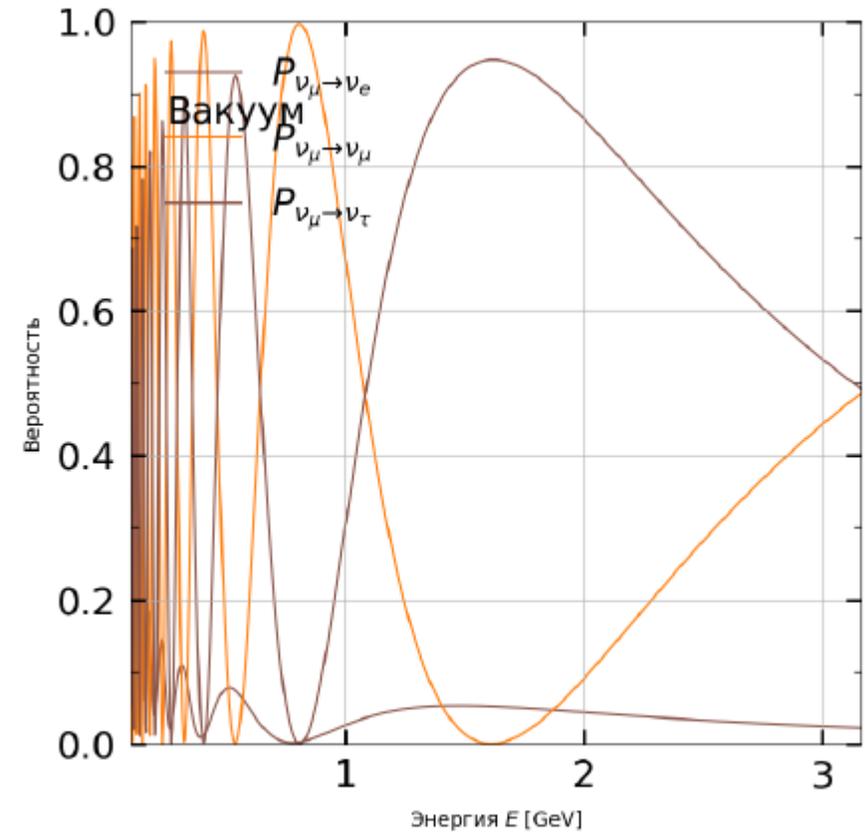


Вероятность осцилляций в зависимости от энергии для T2K (NO) в вакууме для всех типов нейтрино

# Результаты

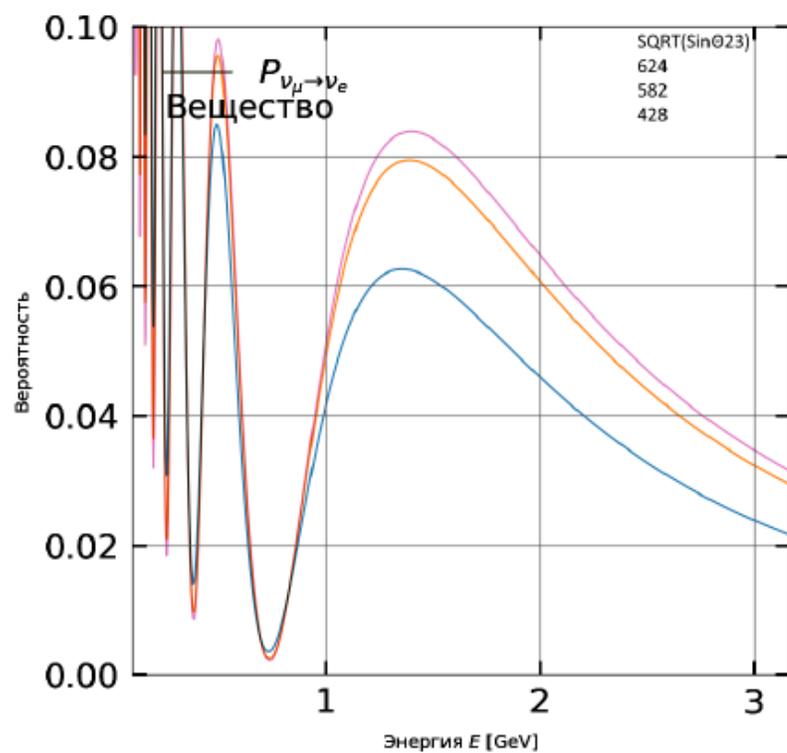


Вероятность осцилляций в зависимости от энергии для T2K (NO) в веществе для разных углов  $\theta_{23}$

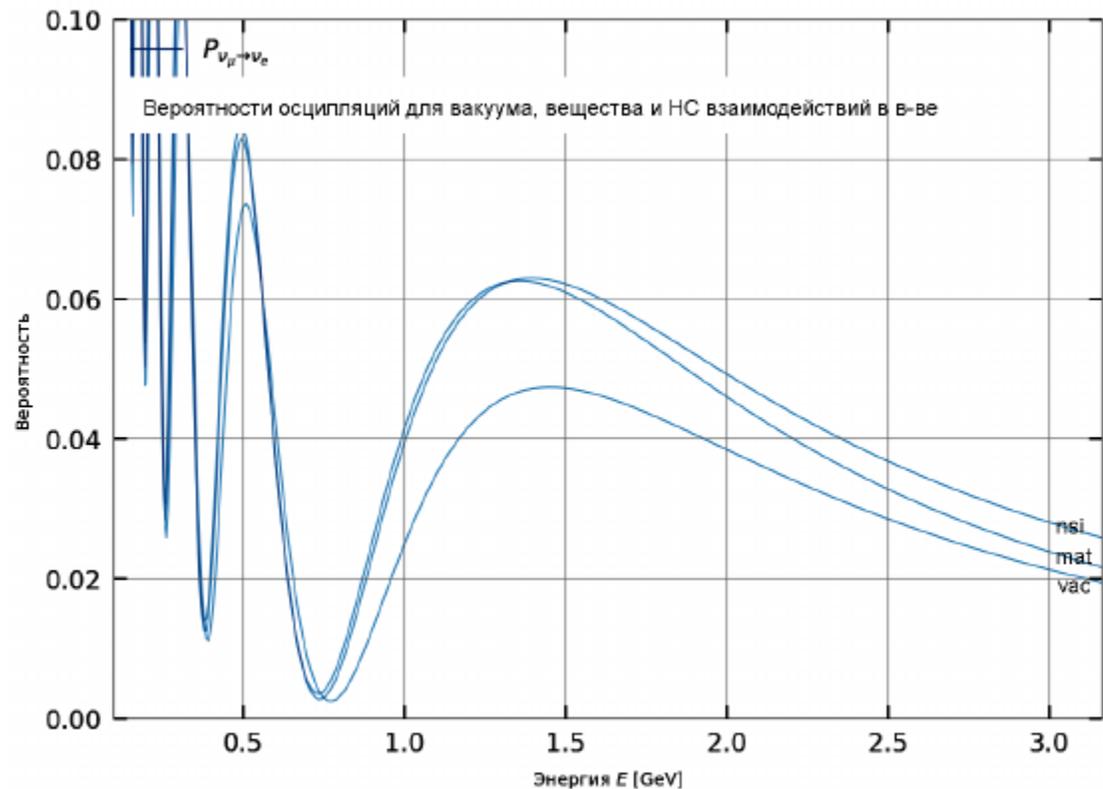


Вероятность осцилляций в зависимости от энергии для NOvA (NO) в вакууме

# Результаты

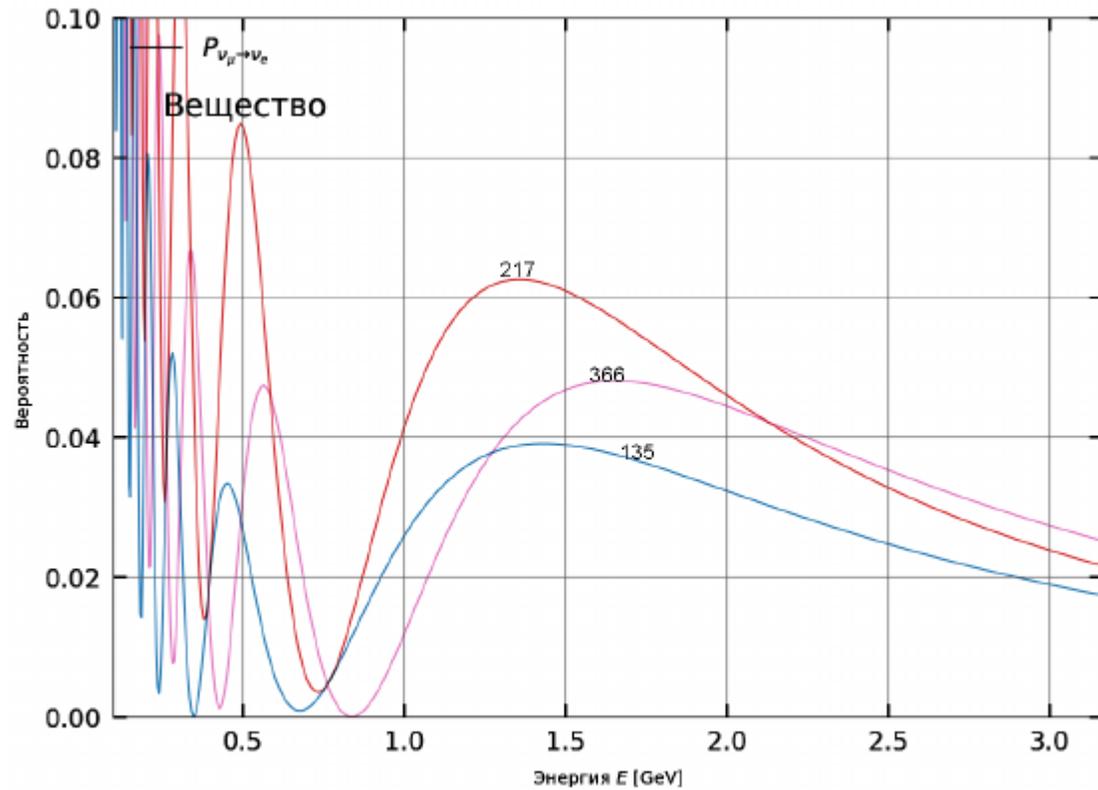


Вероятность осцилляций в зависимости от энергии для NOvA (NO) в веществе для разных углов  $\theta_{23}$

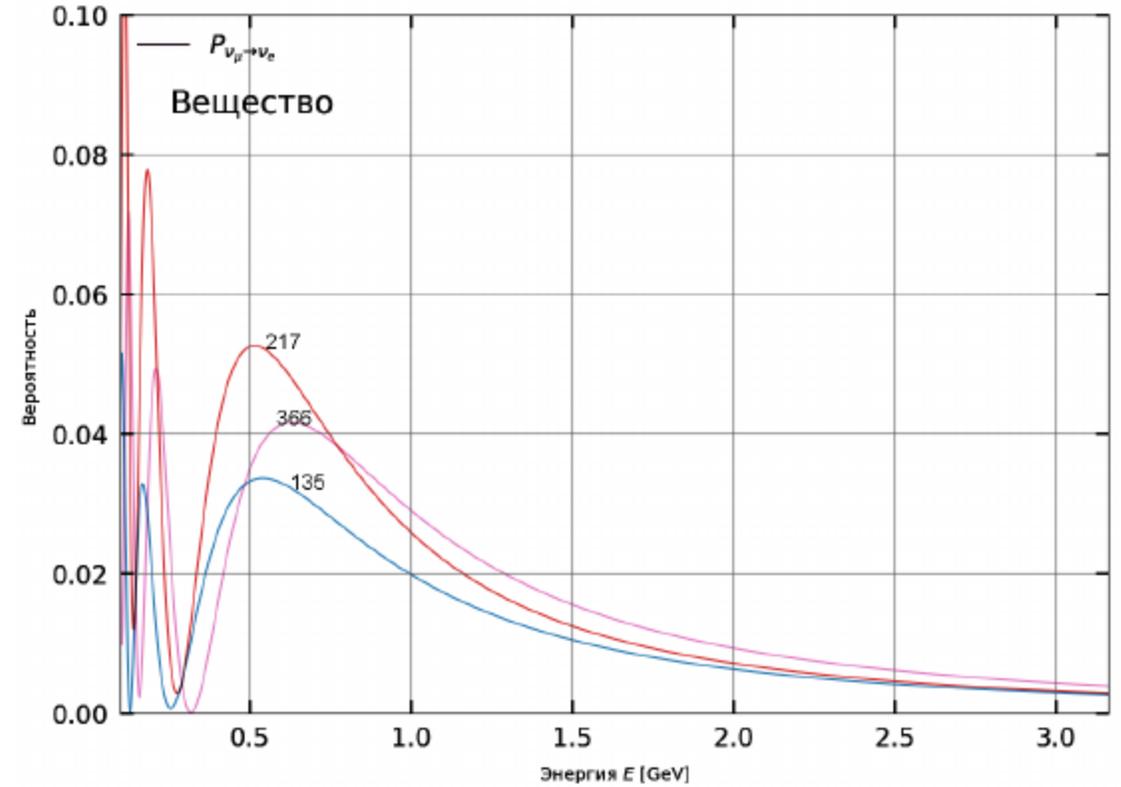


Сравнение вероятностей для NOvA в вакууме, материи, материи с NSI

# Результаты

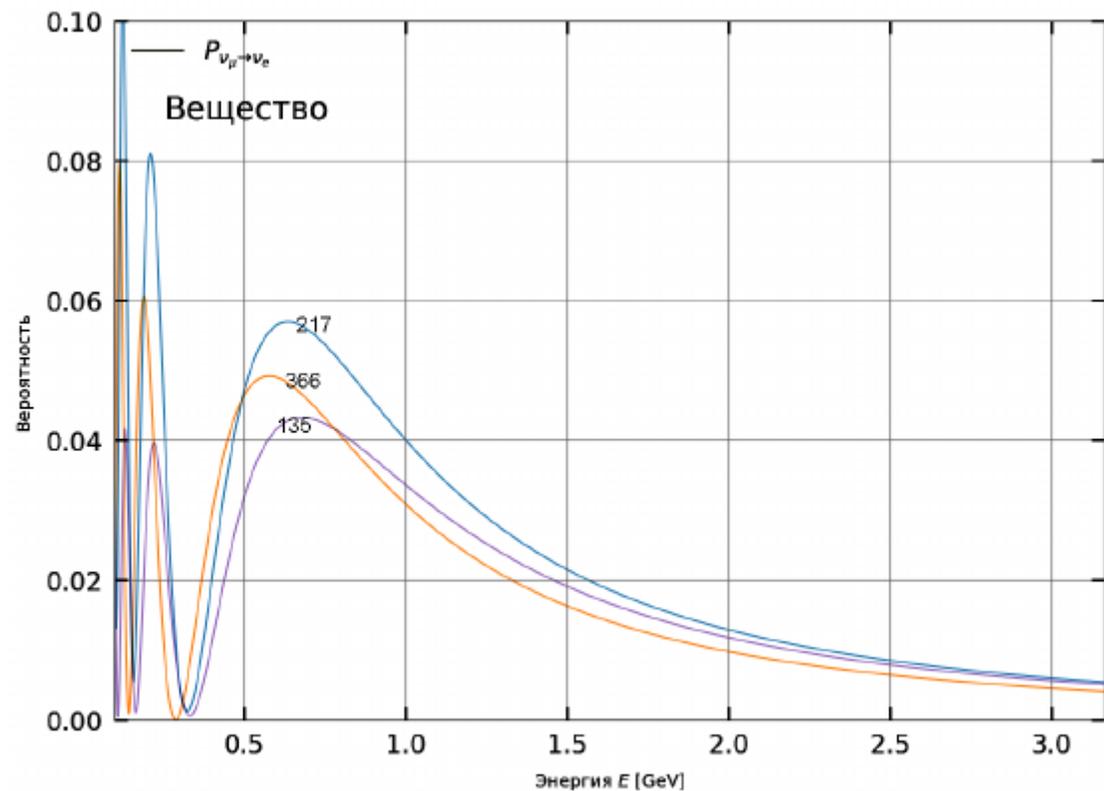


Вероятность осцилляций NOvA для разных значений  $\delta_{CP}$  (NO) 135 217 366

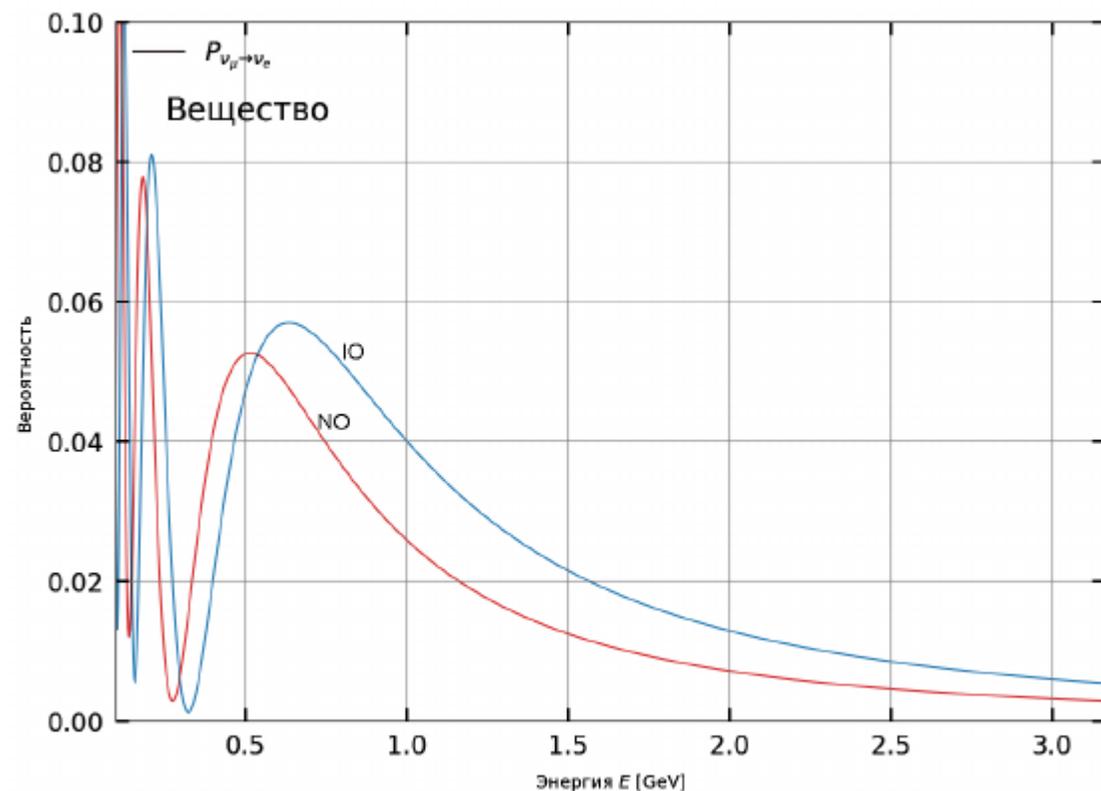


Вероятность осцилляций T2K для разных значений  $\delta_{CP}$  (NO) 135 217 366

# Результаты

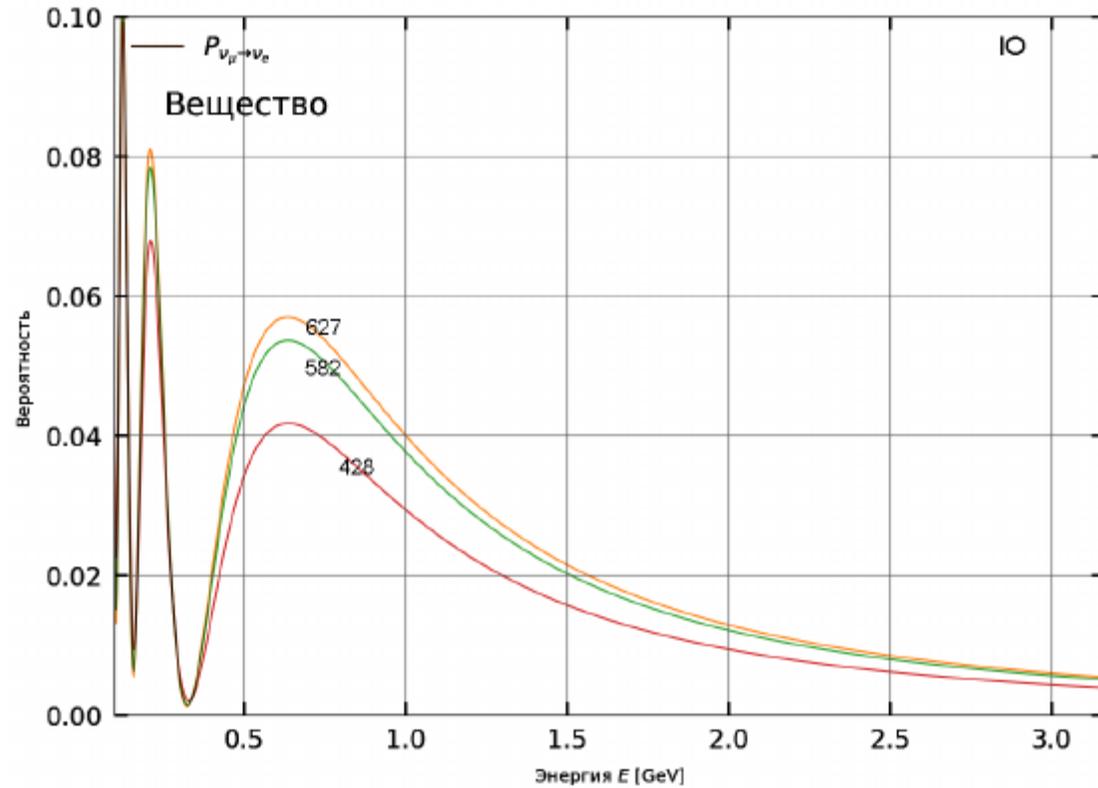


Вероятность осцилляций Т2К для разных значений  $\delta_{CP}$  (IO) 135 217 366

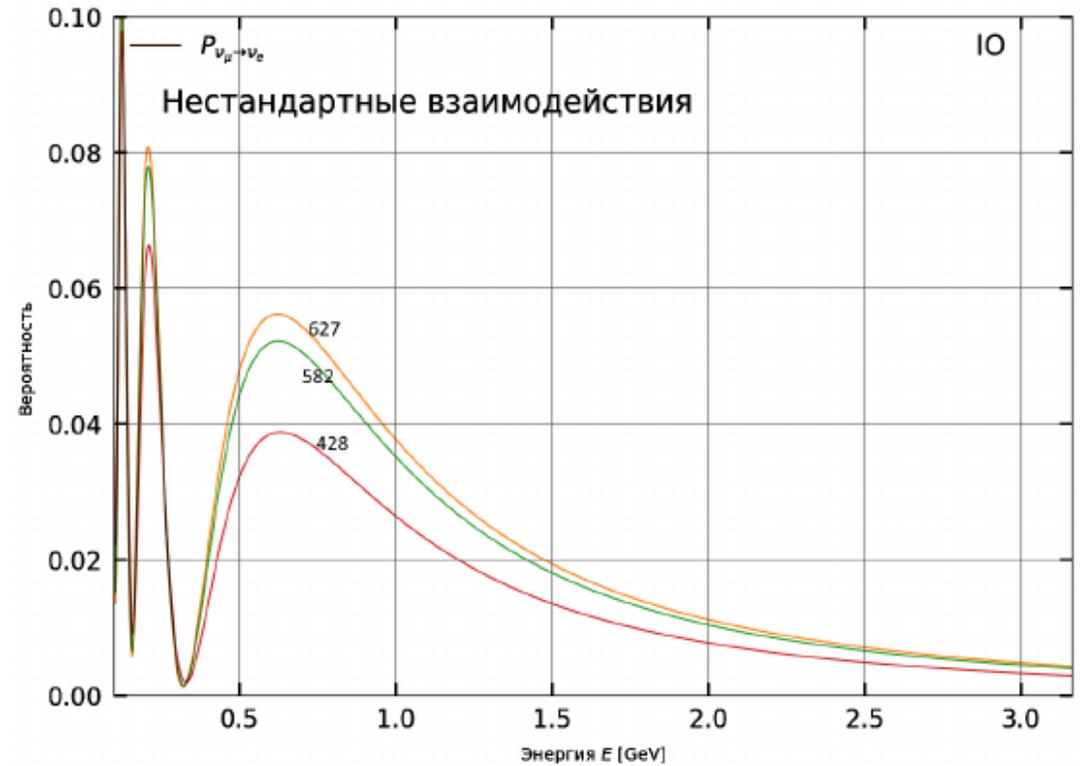


Сравнение вероятностей для Т2К для нормальной и обратной иерархий

# Результаты

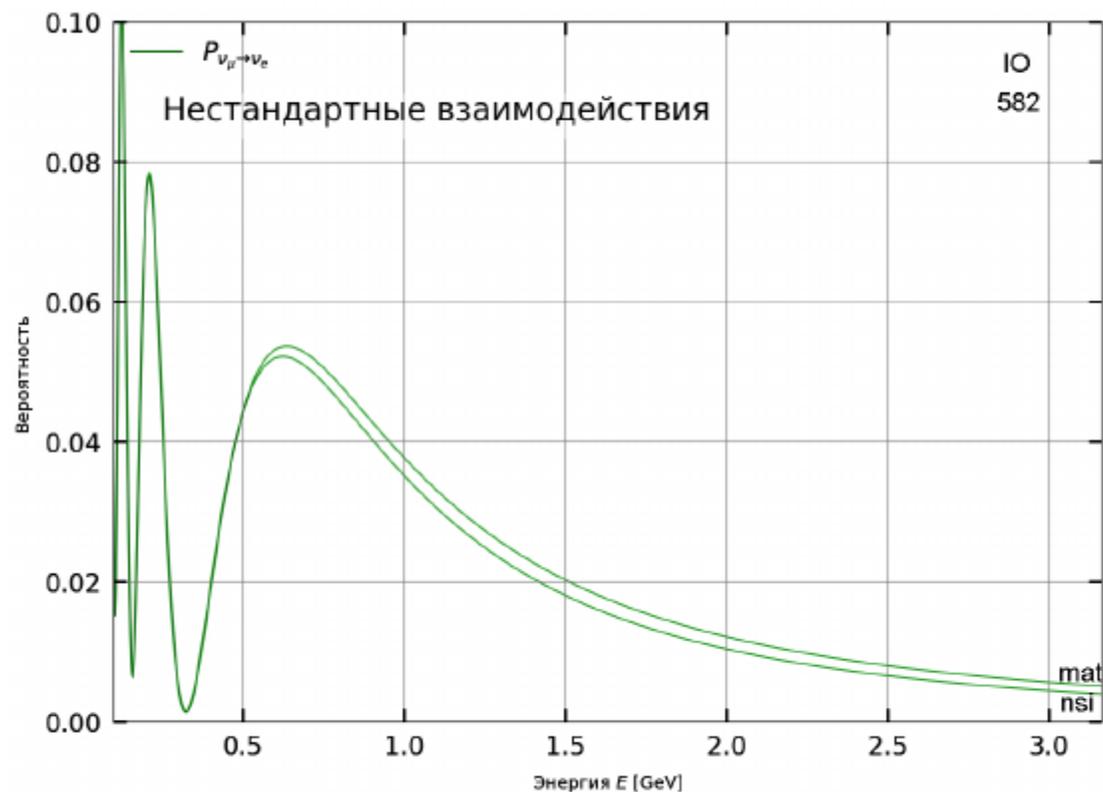


Сравнение вероятности осцилляций для разных значений  $\theta_{23}$  (IO) T2K

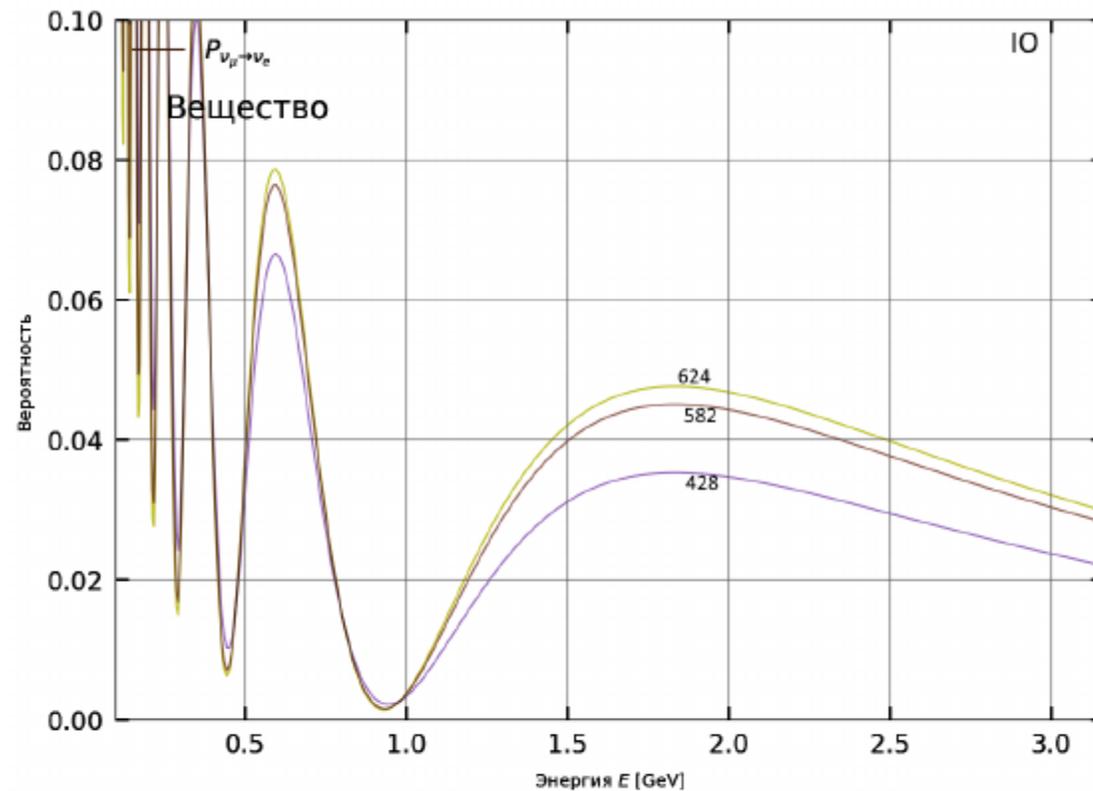


Сравнение вероятности осцилляций для материи с учетом NSI для разных значений  $\theta_{23}$  (IO) T2K

# Результаты

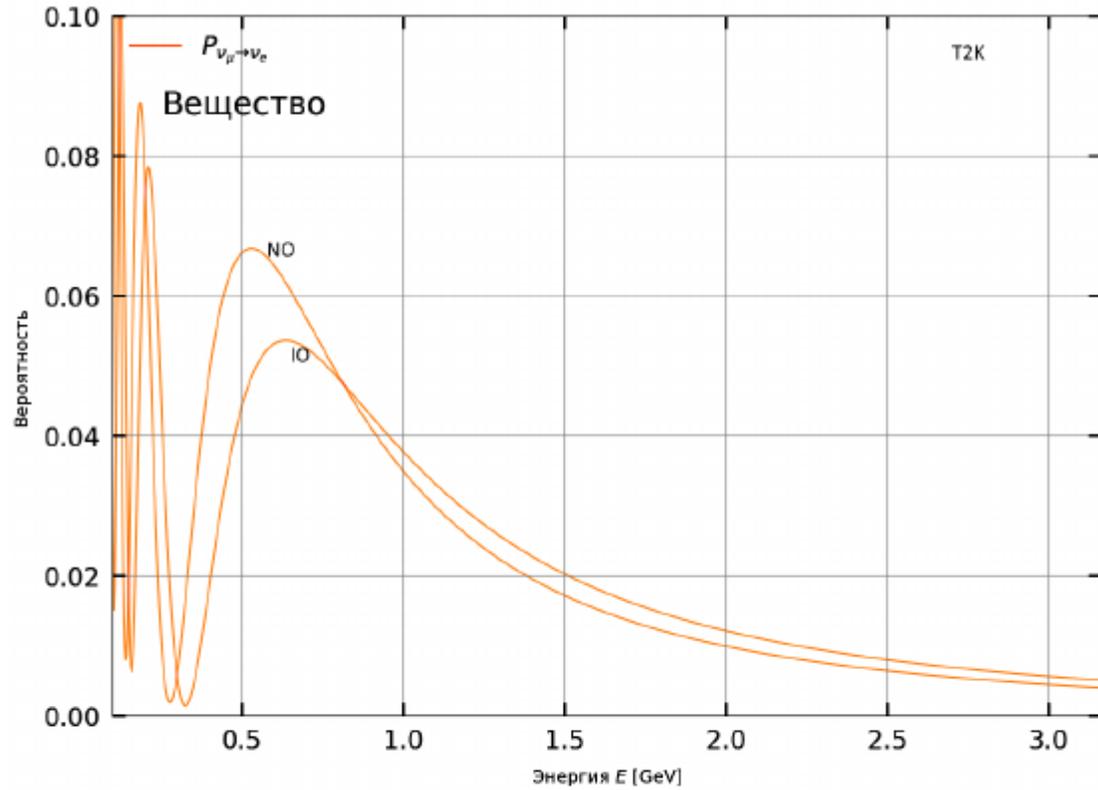


Сравнение вероятности осцилляций для материи с учетом NSI и без. T2K (IO)

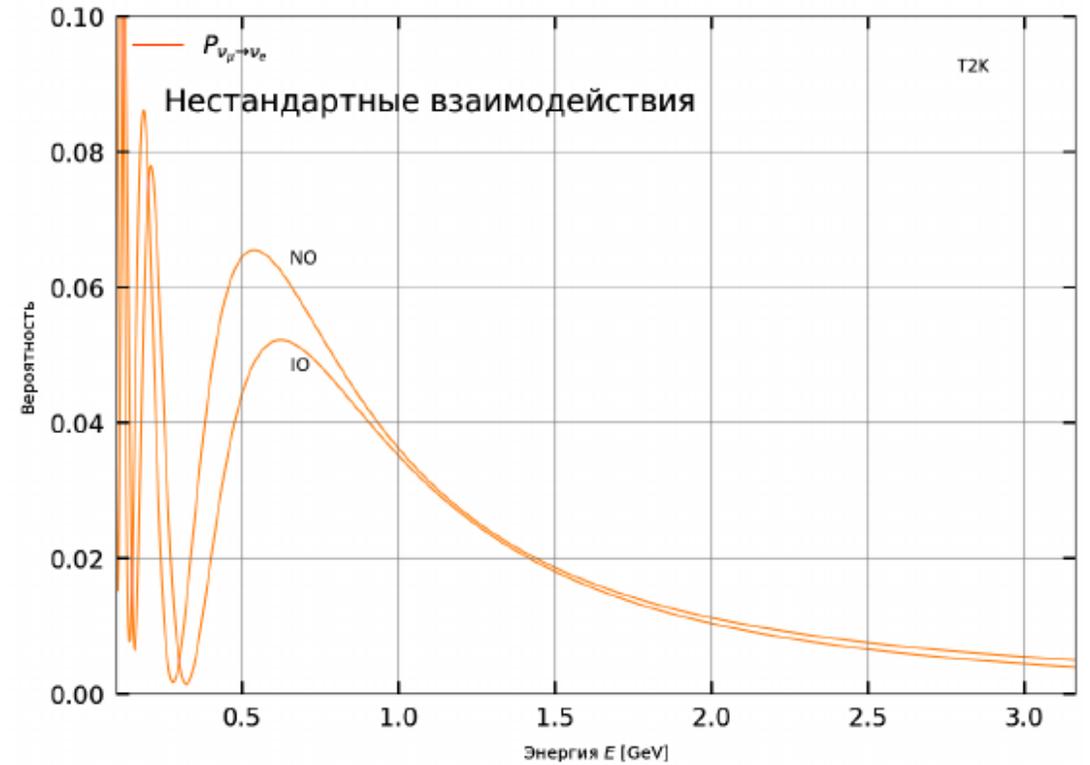


Сравнение вероятности осцилляций для материи с учетом NSI для разных значений  $\theta_{23}$  (IO) NOvA

# Результаты

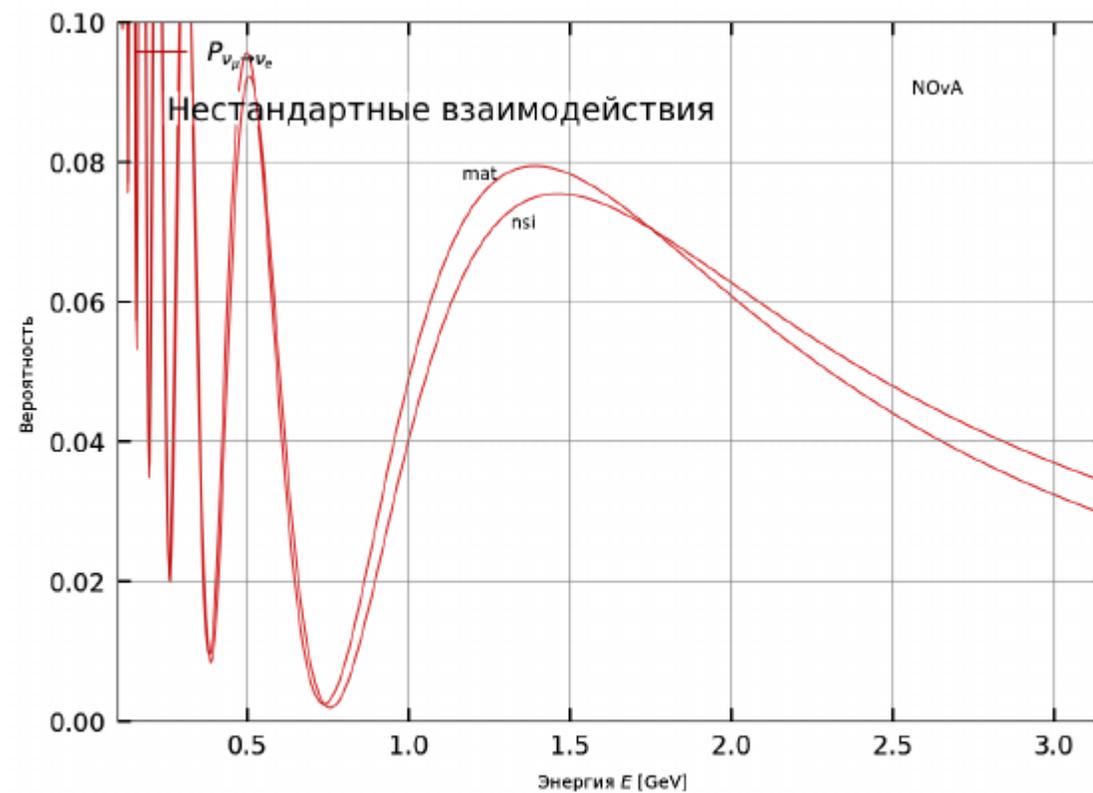
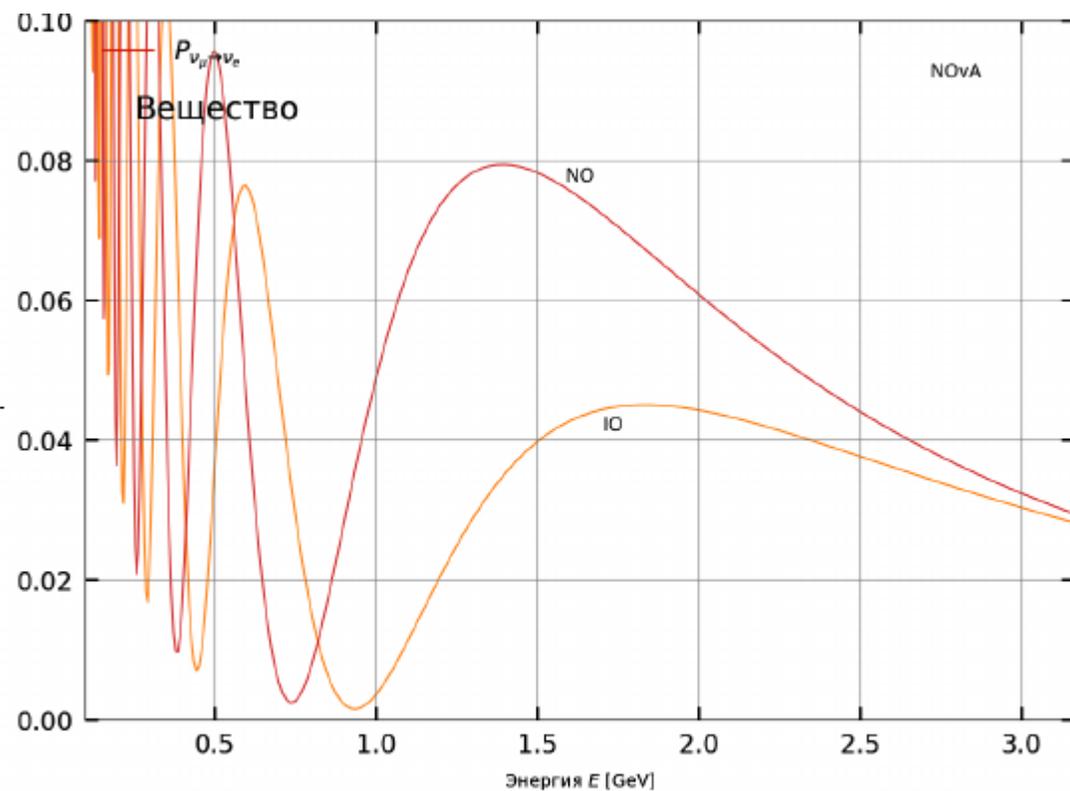


Сравнение вероятности осцилляций в материи для нормальной и обратной иерархий T2K



Сравнение вероятности осцилляций в материи для нормальной и обратной иерархий T2K с учетом NSI

# Результаты



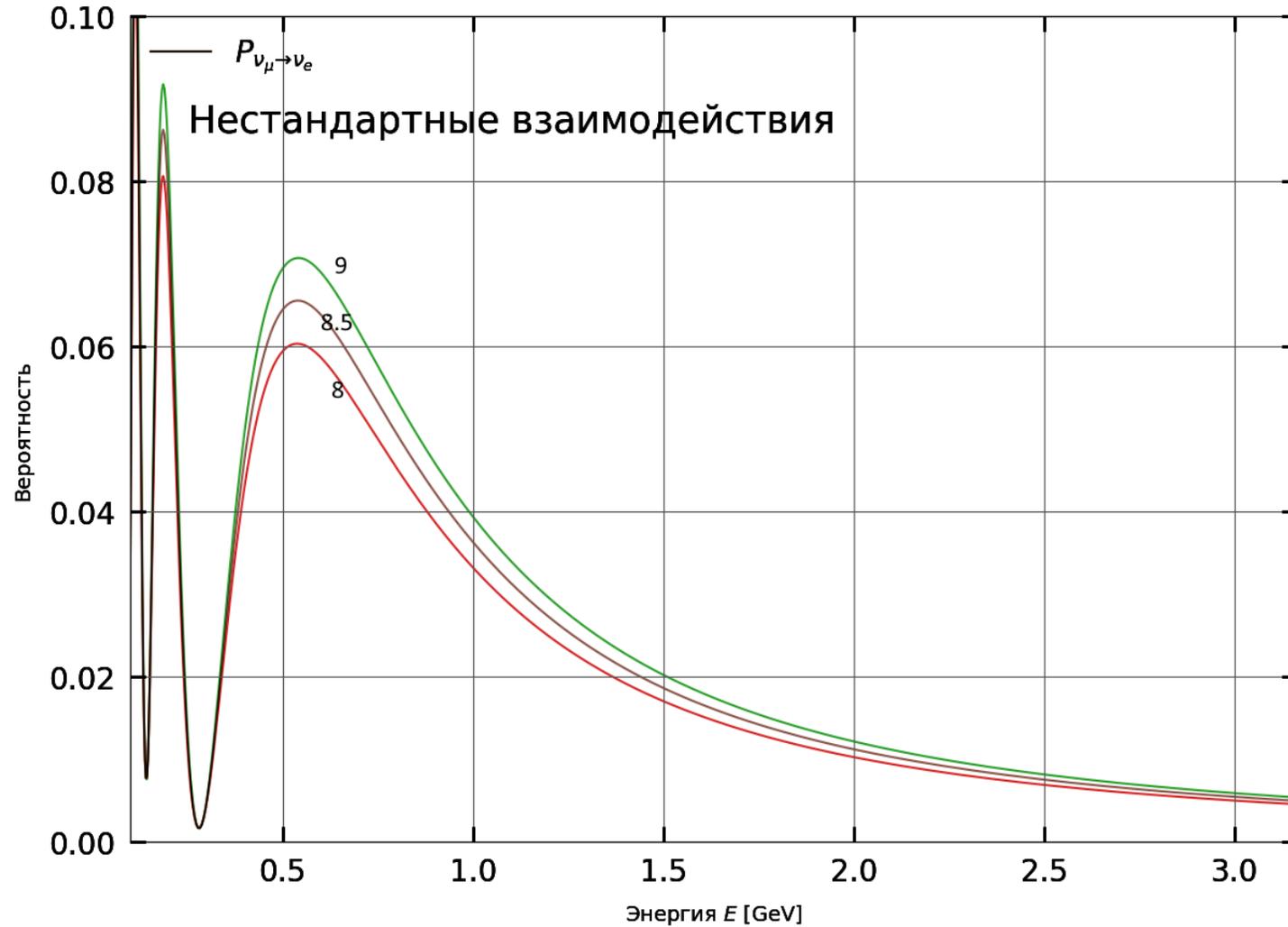
..... Сравнение вероятности осцилляций в материи для IO и NO NOvA

Сравнение вероятности осцилляций в материи для нормальной и обратной иерархий T2K и для материи с учетом NSI

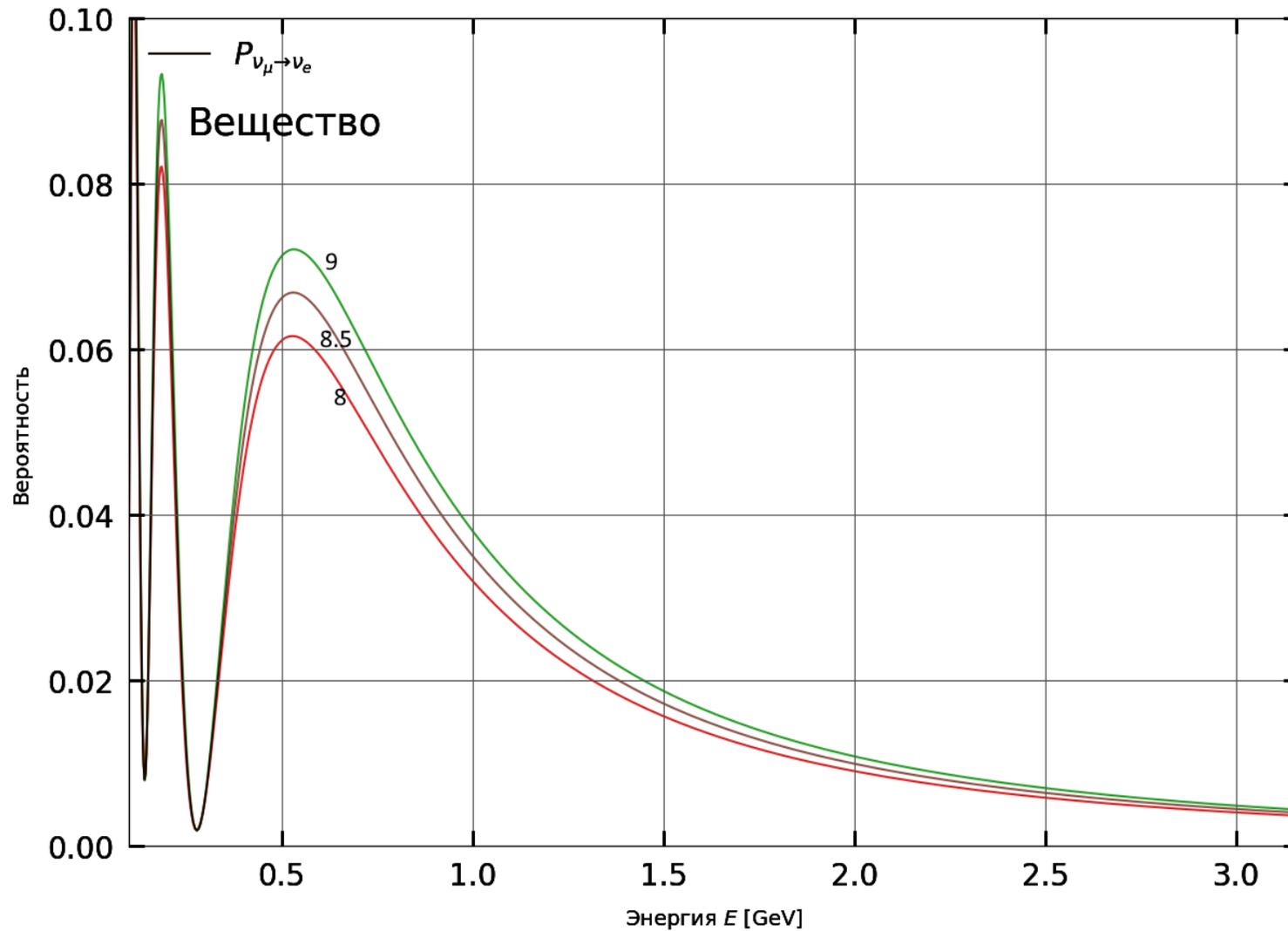
Спасибо за внимание!

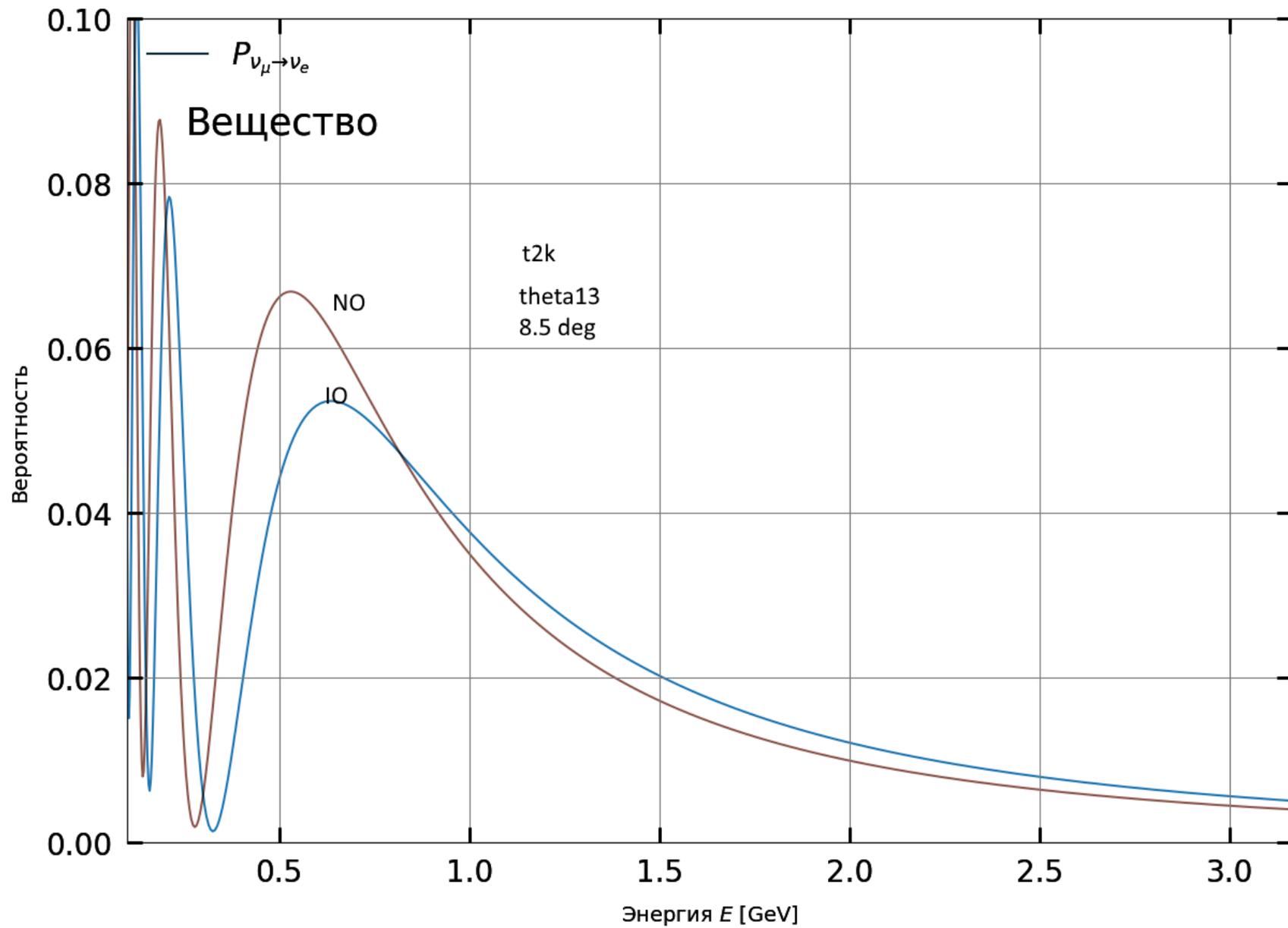
Backup

# Theta13 t2k NO NSI

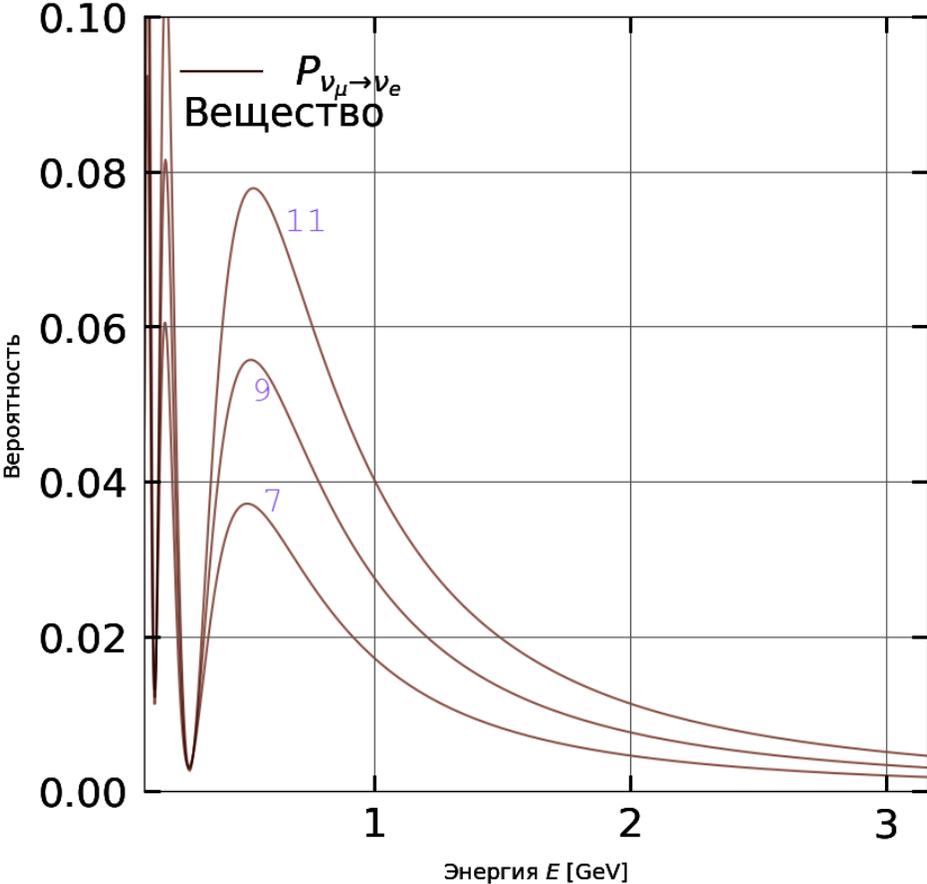


# Theta13 t2k NO mat





# Theta13 t2k



# MSW

Амплитуда получившихся осцилляций:

$$\sin^2 2\theta = \frac{\left(\frac{\Delta m^2}{2E}\right)^2 \sin^2 2\theta_0}{\left(\frac{\Delta m^2}{2E} \cos 2\theta_0 - \sqrt{2} G_F N_e\right)^2 + \left(\frac{\Delta m^2}{2E}\right)^2 \sin^2 2\theta_0} \quad (64)$$

Отметим важнейшую вещь. Данное выражение имеет особую точку, в которой происходит резонанс со значением

$$\sin^2 2\theta = 1 \quad (65)$$

Он получается при выполнении условия:

$$\sqrt{2} G_F N_e = \frac{\Delta m^2}{2E} \cos 2\theta_0$$

# MSW резонанс

Можно сделать следующие выводы. MSW резонанс происходит в следующих случаях:

- 1) Диагональные элементы гамильтониана во флейворном базисе исчезают,
- 2) разница энергий между тяжелыми и легкими состояниями минимальна
- 3) частота флейворных осцилляций минимальна, или длина осцилляций велика,
- 4) угол смешивания в веществе равен  $\pi/4$ ,
- 5)  $\sin 2\theta_m$  велик

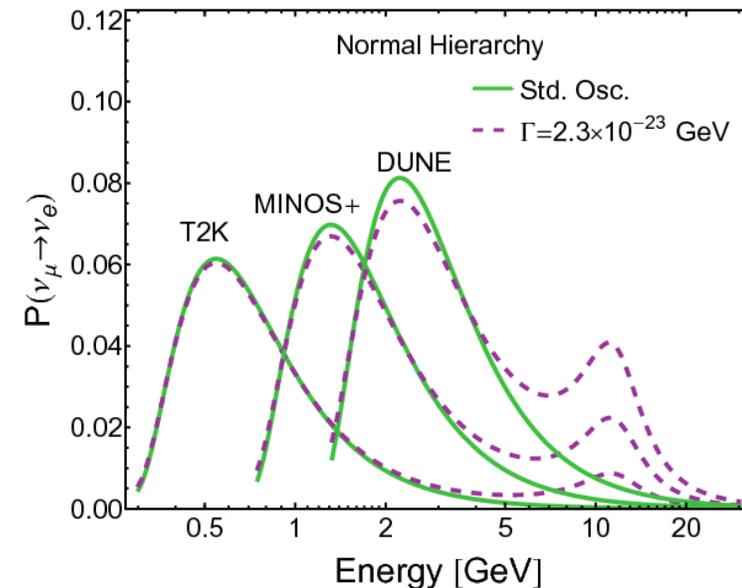
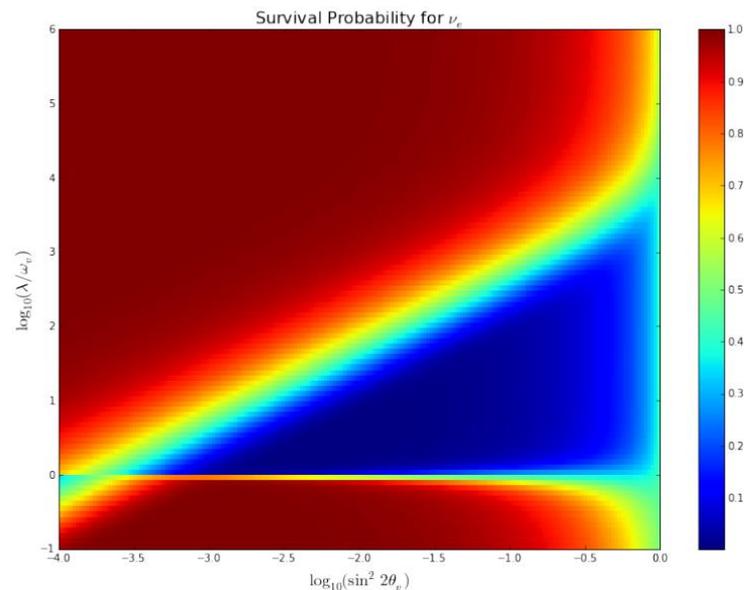


Рис. 5. Треугольник выживания