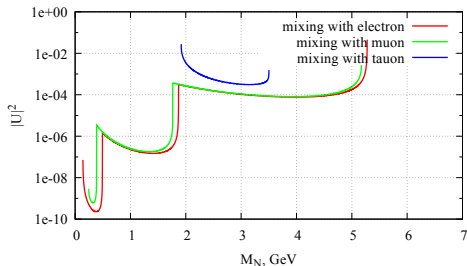


МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М.В. ЛОМОНОСОВА

ФИЗИЧЕСКИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра физики частиц и космологии

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКА СТЕРИЛЬНЫХ
НЕЙТРИНО В НЕЙТРИННОМ
ЭКСПЕРИМЕНТЕ С ДЛИННОЙ БАЗОЙ DUNE



Научный руководитель
Горбунов Д. С.

Выполнил
студент 243м гр.
Краснов И. В.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

$$\mathcal{L} = i\bar{N}_I\gamma^\mu\partial_\mu N_I - \left(\frac{1}{2}M_N\bar{N}_I^c N_I + \hat{Y}_{\alpha I}\bar{L}_\alpha\tilde{H}N_I + h.c.\right), \quad (1)$$

Почему стерильные нейтрино?

- Перенормируемое расширение СМ
- Объяснение осцилляций активных нейтрино
- Объяснение различия масштабов масс между активными нейтрино и другими частицами СМ
- Кандидат на роль частиц темной материи
- Возможность объяснения барионной асимметрии вселенной



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

$$\Gamma(N \rightarrow \pi^0 \nu_\alpha) = \frac{|U_\alpha|^2}{32\pi} G_F^2 f_\pi^2 M_N^3 \left(1 - \frac{M_\pi^2}{M_N^2}\right)^2 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(N \rightarrow H^+ l_\alpha^-) = & \frac{|U_\alpha|^2}{16\pi} G_F^2 |V_H|^2 f_H^2 M_N^3 \left(\left(1 - \frac{M_l^2}{M_N^2}\right)^2 - \right. \\ & \left. - \frac{M_H^2}{M_N^2} \left(1 + \frac{M_l^2}{M_N^2}\right) \right) \times \\ & \times \sqrt{\left(1 - \frac{(M_H - M_l)^2}{M_N^2}\right) \left(1 - \frac{(M_H + M_l)^2}{M_N^2}\right)} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\Gamma(N \rightarrow \eta \nu_\alpha) = \frac{|U_\alpha|^2}{32\pi} G_F^2 f_\eta^2 M_N^3 \left(1 - \frac{M_\eta^2}{M_N^2}\right)^2 \quad (4)$$

$$\Gamma(N \rightarrow \eta' \nu_\alpha) = \frac{|U_\alpha|^2}{32\pi} G_F^2 f_{\eta'}^2 M_N^3 \left(1 - \frac{M_{\eta'}^2}{M_N^2}\right)^2 \quad (5)$$



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

$$\begin{aligned} \Gamma(N \rightarrow \rho^+ l_\alpha^-) &= \frac{|U_\alpha|^2}{8\pi} \frac{g_\rho^2}{M_\rho^2} G_F^2 |V_{ud}|^2 M_N^3 \times \\ &\times \left(\left(1 - \frac{M_l^2}{M_N^2}\right)^2 + \frac{M_\rho^2}{M_N^2} \left(1 + \frac{M_l^2 - 2M_\rho^2}{M_N^2}\right) \right) \times \\ &\times \sqrt{\left(1 - \frac{(M_\rho - M_l)^2}{M_N^2}\right) \left(1 - \frac{(M_\rho + M_l)^2}{M_N^2}\right)} \quad (6) \end{aligned}$$

$$\Gamma(N \rightarrow \rho^0 \nu_\alpha) = \frac{|U_\alpha|^2}{16\pi} \frac{g_\rho^2}{M_\rho^2} G_F^2 M_N^3 \left(1 + 2 \frac{M_\rho^2}{M_N^2}\right) \left(1 - \frac{M_\rho^2}{M_N^2}\right)^2, \quad (7)$$

$$H \in \{\pi^+, K^+, D^+, D_s, B^+, B_s, B_c\}$$

$$\Gamma(N \rightarrow \nu_\alpha \bar{\nu}_\beta \nu_\beta) = \frac{G_F^2 M_N^5}{192\pi^3} |U_\alpha|^2 \quad (8)$$



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

$$\Gamma(N \rightarrow l_{\alpha\neq\beta}^- l_{\beta}^+ \nu_{\beta}) = \frac{G_F^2 M_N^5}{192\pi^3} |U_{\alpha}|^2 (1 - 8x_l^2 + 8x_l^6 - x_l^8 - 12x_l^4 \log x_l^2), \quad x_l = \frac{\max[M_{l_{\alpha}}, M_{l_{\beta}}]}{M_N} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Gamma(N \rightarrow \nu_{\alpha} l_{\beta}^- l_{\beta}^+) = & \frac{G_F^2 M_N^5}{192\pi^3} |U_{\alpha}|^2 \left[(C_1(1 - \delta_{\alpha\beta}) + C_3\delta_{\alpha\beta}) \times \right. \\ & \times \left((1 - 14x_l^2 - 2x_l^4 - 12x_l^6) \sqrt{1 - 4x_l^2} + \right. \\ & \left. \left. + 12x_l^4(x_l^4 - 1)L \right) + \right. \\ & \left. + 4(C_2(1 - \delta_{\alpha\beta}) + C_4\delta_{\alpha\beta}) \times \left(x_l^2(2 + 10x_l^2 - \right. \right. \\ & \left. \left. - 12x_l^4) \sqrt{1 - 4x_l^2} + 6x_l^4(1 - 2x_l^2 + 2x_l^4)L \right) \right], \end{aligned} \quad (10)$$

$$L = \log \left[\frac{1 - 3x_l^2 - (1 - x_l^2) \sqrt{1 - 4x_l^2}}{x_l^2(1 + \sqrt{1 - 4x_l^2})} \right], \quad x_l \equiv \frac{M_l}{M_N}$$



Физика стерильных нейтрино

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

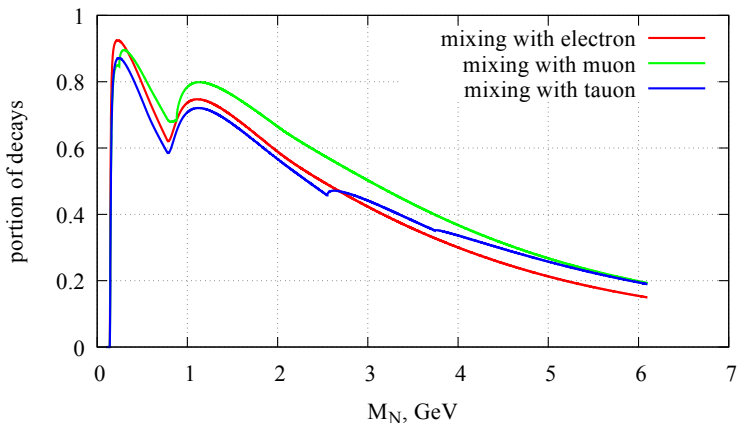


Рис. 1: График зависимости суммарного вклада двухчастичных распадов стерильных нейтрино в общую ширину распада в зависимости от их массы. Различные кривые соответствуют случаю смешивания стерильного нейтрино только с электронным нейтрино (красный), только с мюонным нейтрино (зеленый), только с τ -нейтрино (синий).



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

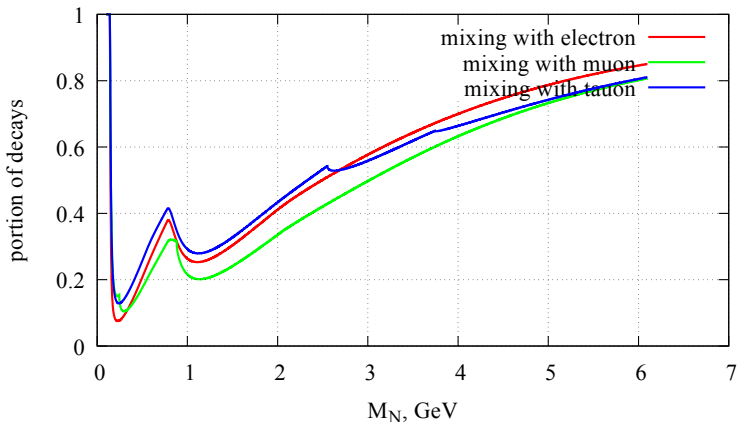


Рис. 2: График зависимости суммарного вклада трехчастичных распадов стерильных нейтрино в общую ширину распада в зависимости от их массы. Различные кривые соответствуют случаю смешивания стерильного нейтрино только с электронным нейтрино (красный), только с мюонным нейтрино (зеленый), только с τ -нейтрино (синий).



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

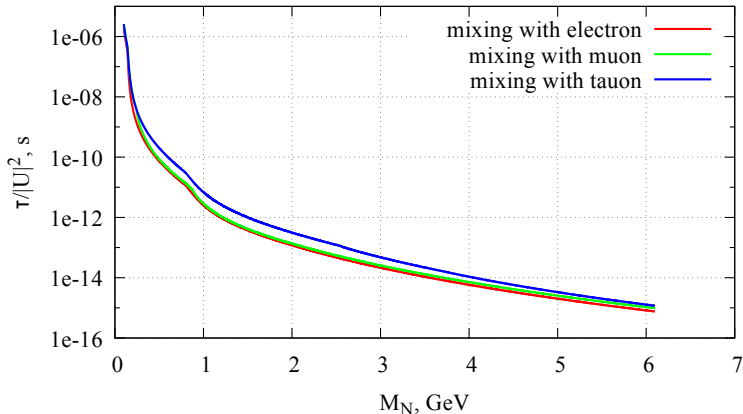


Рис. 3: График зависимости отношения времени жизни стерильного нейтрино к квадрату его угла смешивания с активным нейтрино. Различные кривые соответствуют случаю смешивания стерильного нейтрино только с электронным нейтрино (красный), только с мюонным нейтрино (зеленый), только с τ - нейтрино (синий).



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

$$\begin{aligned} Br(H^+ \rightarrow l^+ N) = & \tau_H \frac{G_F^2 M_N^2 M_H f_H^2}{8\pi} |V_H|^2 |U_\alpha|^2 \times \\ & \times \left(1 - \frac{M_N^2}{M_H^2} + 2 \frac{m_l^2}{M_H^2} + \frac{m_l^2}{M_N^2} \left(1 - \frac{m_l^2}{M_H^2} \right) \right) \times \\ & \times \sqrt{\left(1 + \frac{M_N^2}{M_H^2} - \frac{m_l^2}{M_H^2} \right)^2 - 4 \frac{M_N^2}{M_H^2}} \end{aligned} \quad (11)$$



Способы поиска стерильных нейтрино

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

**Способы
поиска
стерильных
нейтрино**

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

- Прямой поиск (в ускорительных экспериментах)
- Поиск рентгеновского сигнала распада стерильных нейтрино- частиц темной материи
- Космологические указания, например соотношения распространенности первичных элементов



Эксперимент DUNE

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

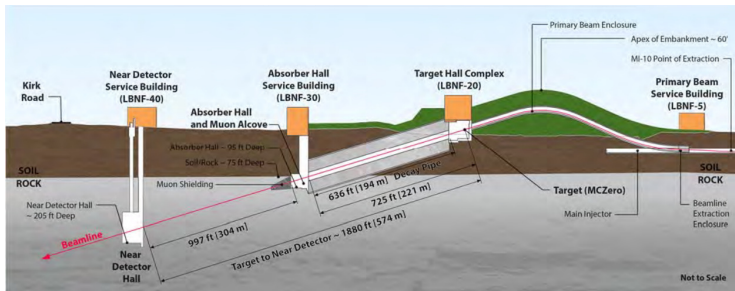


Рис. 4: План расположения построек зала с мишенью, ближнего детектора и проч.



Эксперимент DUNE

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

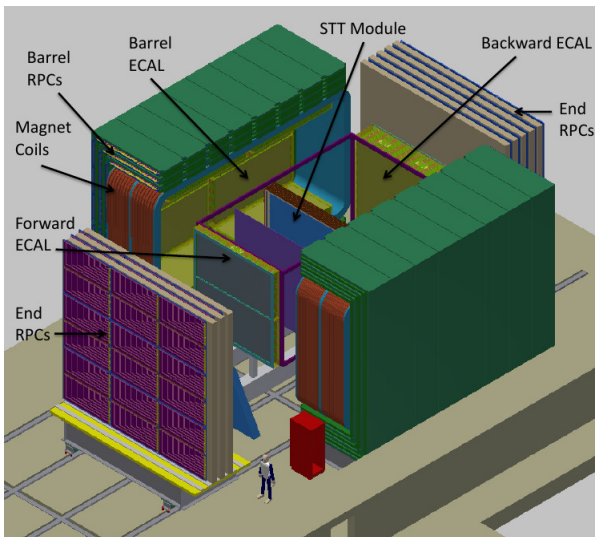


Рис. 5: План устройства ближнего детектора.



Эксперимент DUNE

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

**Эксперимент
DUNE**

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

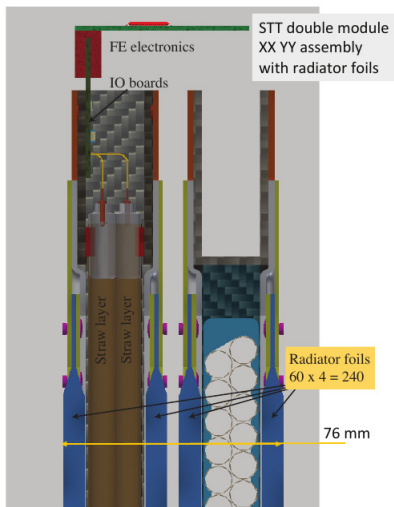


Рис. 6: Устройство отдельно взятого модуля трэкера.



Поиск стерильных нейтрино на DUNE

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

$$N_N^{decays} = N_{POT} M_{pp} \frac{\Delta I}{\tau_N} \sum_{Q,H} \chi_Q \xi_{Q,H} \zeta_H \frac{M_N}{\langle p_L^N \rangle}, \quad (12)$$

$$\chi_Q(E) \equiv \frac{\sigma_{pA \rightarrow Q}(E)}{\sigma_{pA}^{total}(E)} \approx \frac{\sigma_{pp \rightarrow Q}(E)}{\sigma_{pp}^{total}(E)}, \quad (13)$$

$$\xi_{Q,H} \equiv \text{Br}(Q \rightarrow H) \text{Br}(H \rightarrow N \dots), \quad (14)$$

$$\zeta_H = \left(\frac{2}{\pi} \frac{\langle p_{T_{crit}}^N \rangle}{\langle p_L^N \rangle} \frac{\langle p^N(H^+ \rightarrow l^+ N) \rangle}{\langle p_{T_{max}}^N(H^+ \rightarrow l^+ N) \rangle} \right)^2. \quad (15)$$



Поиск стерильных нейтрино на DUNE

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

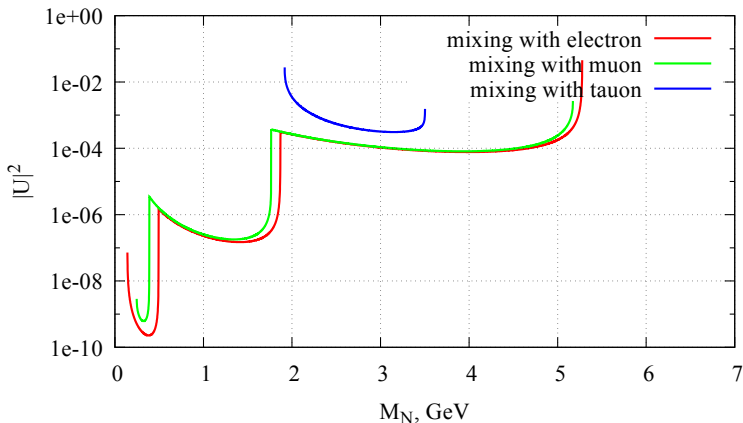


Рис. 7: График зависимости чувствительности эксперимента DUNE к “чистым” каналам распада стерильных нейтрино от массы стерильного нейтрино. Мерой регистрации выбрано 3 события за 10 лет работы детектора.



Поиск стерильных нейтрино на DUNE

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

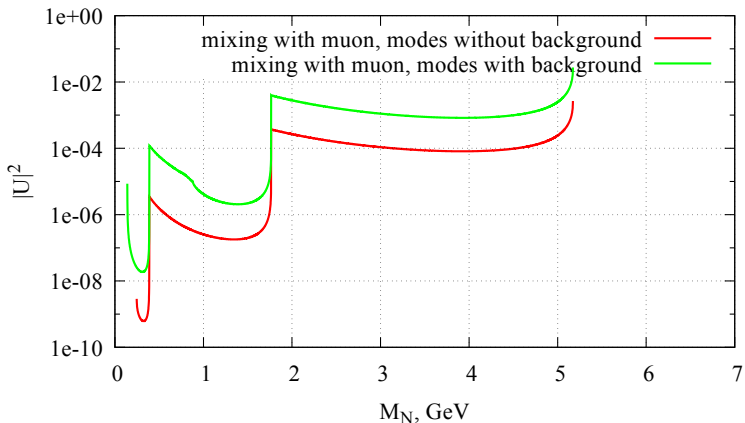


Рис. 8: Сравнительный график зависимости чувствительности эксперимента DUNE к “чистым” каналам распада стерильных нейтрино и каналам распада, имеющим фон, от массы стерильного нейтрино.



Дополнительные возможности поиска

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

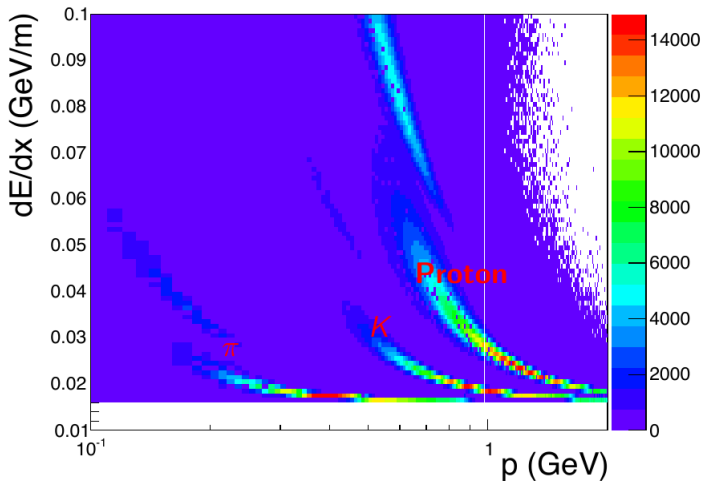


Рис. 9: Смоделированные потери на ионизацию разных частиц в ближнем детекторе.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

Сделана новая оценка чувствительности эксперимента DUNE к параметрам стерильных нейтрино:

- Обновлено значения используемых экспериментальных данных
- Сделаны поправки на уточненные параметры эксперимента
- Рассмотрены дополнительные возможности поиска



Заклучение

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заклучение

Дополнитель-
ные
материалы

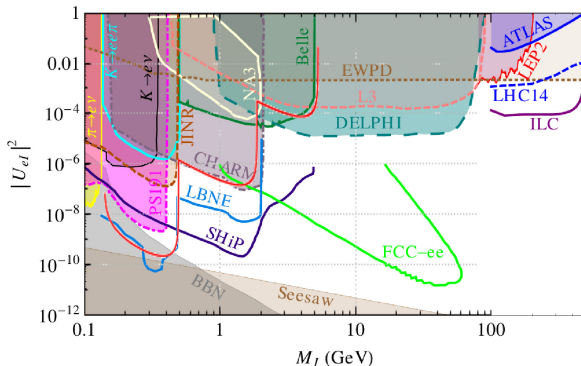


Рис. 10: Ограничения некоторых текущих и планирующихся экспериментов на смешивание стерильного нейтрино с электронным. Красная линия соответствует нашему ограничению.

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

Спасибо за внимание!



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

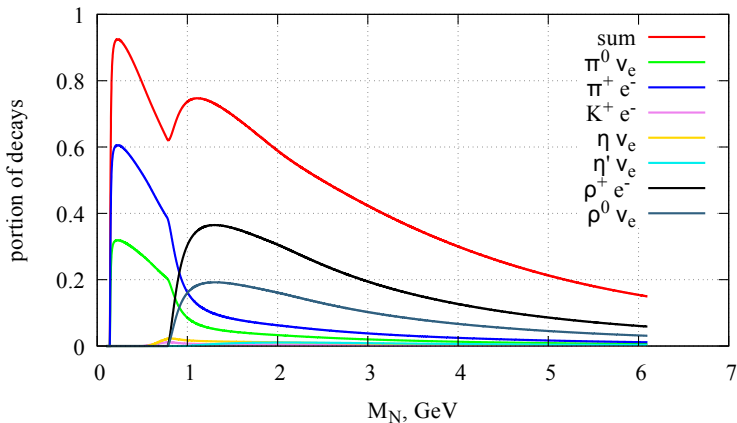


Рис. 11: График зависимости вклада конкретных двухчастичных мод распада стерильного нейтрино в общую ширину распада в зависимости от его массы. Различные кривые соответствуют разным модам распада. Стерильное нейтрино смешивается только с электронным нейтрино.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

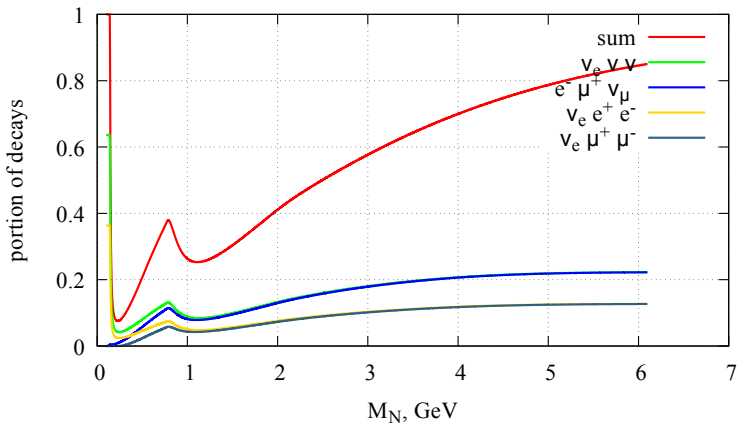


Рис. 12: График зависимости вклада конкретных трехчастичных мод распада стерильного нейтрино в общую ширину распада в зависимости от его массы. Различные кривые соответствуют разным модам распада. Стерильное нейтрино смешивается только с электронным нейтрино.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

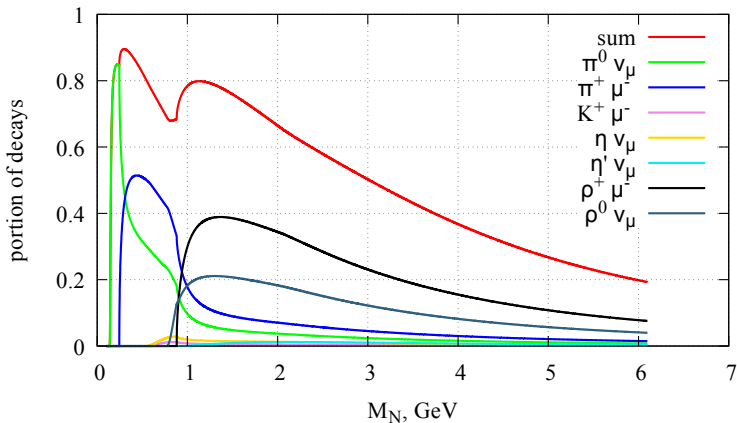


Рис. 13: График зависимости вклада конкретных двухчастичных мод распада стерильного нейтрино в общую ширину распада в зависимости от его массы. Различные кривые соответствуют разным модам распада. Стерильное нейтрино смешивается только с мюонным нейтрино.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

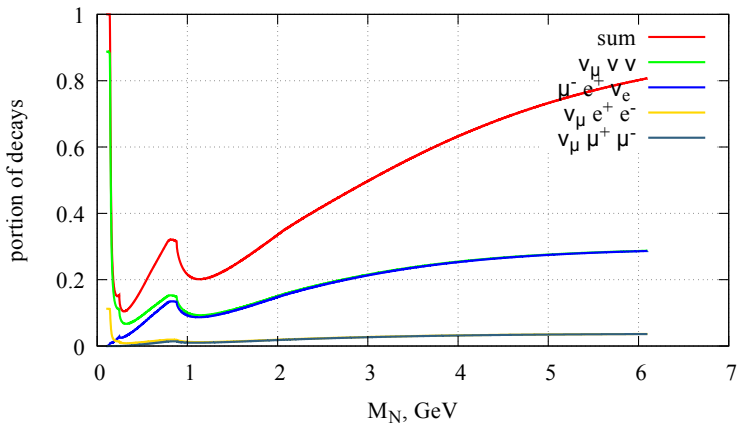


Рис. 14: График зависимости вклада конкретных трехчастичных мод распада стерильного нейтрино в общую ширину распада в зависимости от его массы. Различные кривые соответствуют разным модам распада. Стерильное нейтрино смешивается только с мюонным нейтрино.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

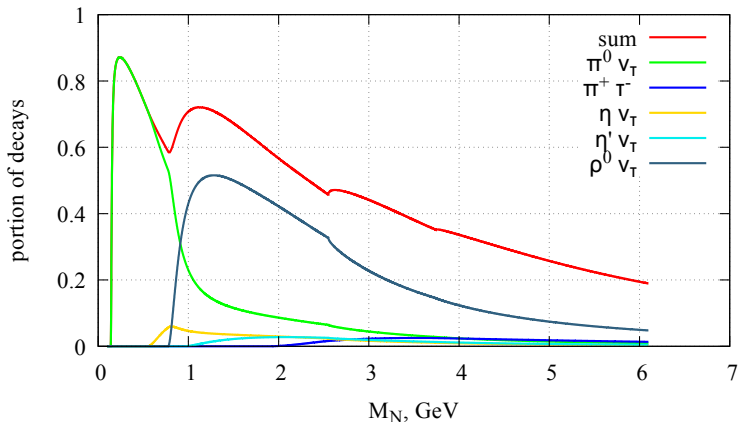


Рис. 15: График зависимости вклада конкретных двухчастичных мод распада стерильного нейтрино в общую ширину распада в зависимости от его массы. Различные кривые соответствуют разным модам распада. Стерильное нейтрино смешивается только с τ -нейтрино.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнительные
материалы

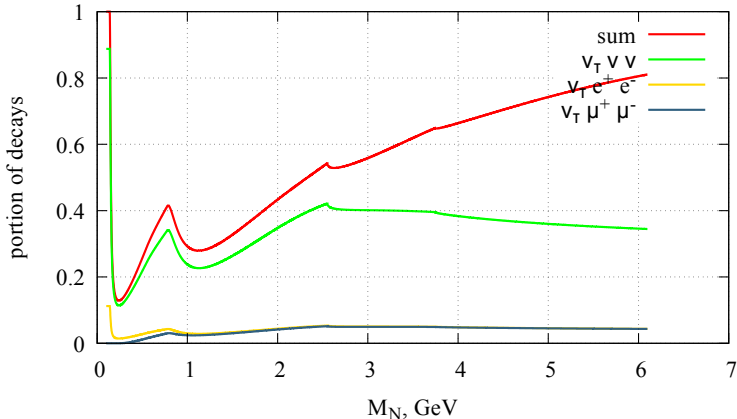


Рис. 16: График зависимости вклада конкретных трехчастичных мод распада стерильного нейтрино в общую ширину распада в зависимости от его массы. Различные кривые соответствуют разным модам распада. Стерильное нейтрино смешивается только с τ -нейтрино.



Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

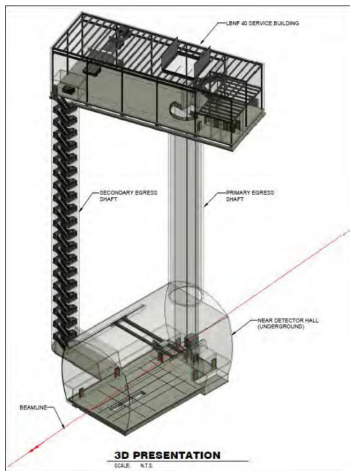


Рис. 17: Смоделированная 3D модель зала ближнего детектора.



Дополнительные материалы

Введение

Физика
стерильных
нейтрино

Способы
поиска
стерильных
нейтрино

Эксперимент
DUNE

Поиск
стерильных
нейтрино с
помощью
ближнего
детектора
DUNE

Заключение

Дополнитель-
ные
материалы

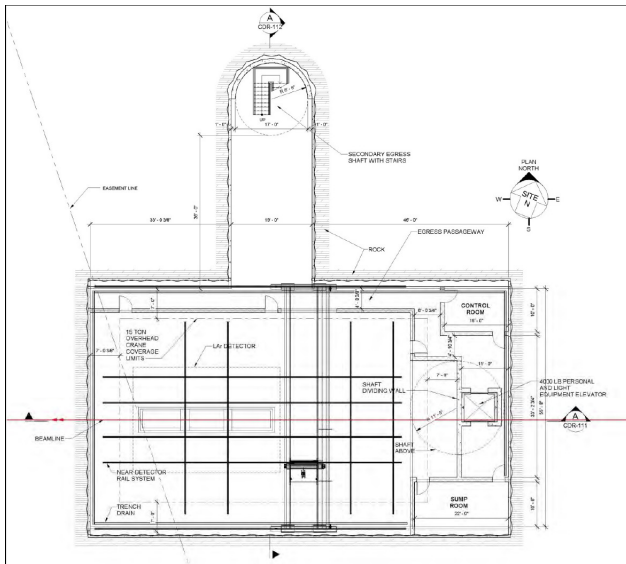


Рис. 18: План зала ближнего детектора.