

Seesaw-расширения Стандартной модели: хиггсовский сектор, тёмная материя и проблема естественности

Казаркин Дмитрий ^{1,2}

совместно с Дубинин М.Н.¹, Федотова Е.Ю.¹

¹НИИ ядерной физики имени Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

²МГУ имени М.В. Ломоносова, Москва

Летняя Школа Фонда «БАЗИС» – 2026

«Физика фундаментальных взаимодействий», 3–14 августа 2026 г.

Проблема масс нейтрино и естественность

Seesaw Type I

$$\mathbf{M}_I = \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D^T & M_M \end{pmatrix}$$

$$m_\nu = -m_D M_M^{-1} m_D^T$$

Реализуется при

- $M_M \sim 10^{15}$ ГэВ;
- Или $Y_D < 10^{-6}$;
- Сценарий со стерильным нейтрино темной материи ($m_s \sim \mathcal{O}$ (кэВ) требует тонкой настройки

Inverse Seesaw (ISS)

$$\mathbf{M}_{ISS} = \begin{pmatrix} 0 & m_D & 0 \\ m_D^T & 0 & M_R \\ 0 & M_R^T & \mu \end{pmatrix}$$

$$m_\nu = m_D (M_R \mu^{-1} M_R^T) m_D^T$$

Альтернативный вариант:

- $\mu \sim$ кэВ
- $M_R \sim$ ТэВ
- Естественно в смысле 'т Хофта
- Сценарий темной материи требует «выборочного» подавления смешивания

Стерильное нейтрино как тёмная материя

Параметр смешивания

$$U_{\text{DM}}^2 = \sum_{\alpha} |\Theta_{\alpha 1}|^2$$

$$\Gamma_{N_1 \rightarrow \gamma \nu} = \frac{27\alpha_{\text{EM}}}{4\pi} \Gamma_{N_1 \rightarrow 3\nu}$$

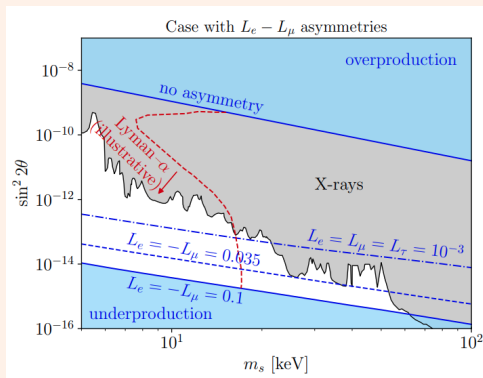
Ограничения eROSITA,

NuSTAR: $U^2 < 10^{-11}$

- ν MSM: требует тонкой настройки параметризации Y_D
- ISS (p, p+1): требует иерархичность юкавских констант Y_R

Пространство параметров:

(fig. from 2507.20659 [hep-ph])



Лево-правая симметричная модель (LRSM)

Калибровочная группа

$$\mathcal{G}_{LR} = SU(3)_c \times SU(2)_L \times SU(2)_R \times U(1)_{B-L}$$

Поле	Представление
$L_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ l_L \end{pmatrix}$	$(1, 2, 1, -1)$
$L_R = \begin{pmatrix} \nu_R \\ l_R \end{pmatrix}$	$(1, 1, 2, -1)$
$\chi_L = \begin{pmatrix} \delta_L^+ \\ \delta_L^0 \end{pmatrix}$	$(1, 2, 1, 2)$
$\chi_R = \begin{pmatrix} \delta_R^+ \\ \delta_R^0 \end{pmatrix}$	$(1, 1, 2, 2)$

Массовая матрица в (D)LRSM

$$\mathbf{M}_{\text{ISS}} = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 & Y_D v_{EW} & 0 \\ Y_D^T v_{EW} & 0 & Y_R v_R \\ 0 & Y_R^T v_R & \mu \end{pmatrix}$$

- $\Lambda(M_R) = v_R \sim \text{ТэВ}$
- $\Lambda(\mu) \sim \text{кэВ}$

LRSM + μ -член дают калибровочную реализацию ISS (3, q).

1 ISS vs seesaw type I (ss1):

- ISS: Позволяет получить малые массы нейтрино при масштабе $\sim \text{ТэВ}$
- ISS: Малый параметр μ защищён симметрией ('т Хофт), ss1: большой масштаб либо малые юкавы
- ISS: неминимален, ss1: минимален
- ISS: дираковские HNL, ss1: майорановские HNL

2 Сценарий тёмной материи:

- ISS (p, p+1): Масса темной материи m_{DM} ассоциирована с масштабом μ
- ISS(2,3) даёт $U_{\text{DM}}^2 < 10^{-11}$ без тонкой настройки и $m_{\text{light}} < 10^{-8}$ эВ, но Y_R иерархична.

3 Реализация в LRSM:

- Модель с дублетами Хиггса (D)LRSM воспроизводит структуру ISS
- Модель с триплетом Хиггса (T)LRSM воспроизводит структуру seesaw I+II

Работа выполнена при поддержке фонда БАЗИС, грант № 23-2-2-19-1