

23 июля / вторник

когда	что	где
08:00–09:00	Завтрак	Столовая, 1 этаж
09:00–10:20	Линейные ускорители электронов Никифоров Данила Алексеевич, к.ф.-м.н., научный сотрудник, ИЯФ СО РАН, Новосибирск	Зал «Книга», здание столовой, 2 этаж
10:20–10:30	Перерыв	
10:30–11:50	Накопительные кольца электронов Баранов Григорий Николаевич, к.ф.-м.н., старший научный сотрудник, ИЯФ СО РАН, Новосибирск	Зал «Книга», здание столовой, 2 этаж
11:50–12:10	Кофе-брейк	Веранда
12:10–13:30	Рентгеновское и гамма излучение как инструмент исследования Зубавичус Ян Витаутасович, д. ф.-м. н., заместитель директора по научной работе ЦКП «СКИФ», Новосибирск	Зал «Книга», здание столовой, 2 этаж
13:30–14:30	Обед	Столовая, 1 этаж
14:30–15:50	Физика ароматов (часть 1) Пахлов Павел Николаевич, член-корреспондент РАН, ведущий научный сотрудник, профессор, НИУ ВШЭ, Москва	Зал «Книга», здание столовой, 2 этаж
15:50–17:10	Практика 2 Ратников Федор Дмитриевич, к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник, НИУ ВШЭ, Москва	Аудитории Учебного корпуса Филиала МГУ в Сарове, 2 этаж
17:10–17:30	Кофе-брейк	Веранда
17:30–19:00	Доклады/Постеры (часть 1)	Зал «Книга», здание столовой, 2 этаж
19:00–20:00	Ужин	Столовая, 1 этаж
20:00–21:30	Культурно-развлекательная программа	Площадка Технопарка «Саров»



НЦФМ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ЦЕНТР
ФИЗИКИ И МАТЕМАТИКИ

Доклады участников школы, вторник, 23.07, 17:30-19:00			
1.	17:35	Абед Набиль	Исследование поперечной динамики интенсивного пучка электронов с энергией до 30 кэВ для различных применений
2.	17:42	Бармин Валерий Владимирович	Определение закономерностей формирования наносекундных импульсов фотопроводящим полупроводниковым коммутатором (ФППК)
3.	17:49	Батов Андрей Алексеевич	Разработка двухсекционного линейного ускорителя электронов S-диапазона для прикладных применений
4.	17:56	Бобылев Дмитрий Алексеевич	Динамика пучка в «малом» накопительном кольце НЦФМ
5.	18:03	Быков Сергей Андреевич	Стендовый: Разработка и оптимизация быстрых сканирующих магнитов для получения заданного поля облучения выведенным пучком ионов:
6.	18:10	Владимиров Михаил Владиславович	Стендовый: Транспорт электронов в фотокатодах как отклик на индуцирующий фотоэффект лазерный импульс
7.	18:17	Власов Максим Андреевич	Рождение пар заряженных лептонов на перспективных коллайдерах.
8.	18:24	Волков Михаил Игоревич	Обработка изображений оптического переходного излучения и излучения Вавилова-Черенкова, полученных с ПЗС-матрицы
9.	18:31	Зотов Антон Александрович	Исследование матричных фотоприемников для системы регистрации жестких гамма-квантов
10.	18:38	Зубанков Александр Александрович	Измерение выходов нейтронов вперед с помощью прототипа высоко-гранулярного времяпролетного нейтронного детектора HGND от электромагнитной диссоциации и ядерной реакции в столкновениях $\text{Xe} + \text{CsI}@3,8 \text{ АГэВ}$ в эксперименте BM@N
11.	18:45	Казаркин Дмитрий Михайлович	МЕХАНИЗМ КАЧЕЛЕЙ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ В ЛЕВО-ПРАВО СИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ
12.	18:52	Колокольчиков Сергей Дмитриевич	Исследование спин-орбитальной динамики для исследования ЭДМ
Доклады участников школы, среда, 24.07, 18:30-20:00			
13.	18:35	Королев Петр Сергеевич	Возбуждение мультипольных переходов в кварконии жестким закрученным излучением
14.	18:42	Николайчук Илья Юрьевич	Струнные Методики Измерений Магнитных Полей Элементов Кольцевых Ускорителей
15.	18:49	Савченко Елена Михайловна	Массы трижды тяжёлых тетракварков в Релятивистской Кварковой Модели
16.	18:56	Сингатулина Наталия Шавкатовна	Стендовый: Компактный ускорительный источник быстрых нейтронов для радиационного тестирования перспективных материалов
17.	19:03	Суханов Иван Сергеевич	Полулептонные распады очарованных мезонов в возбужденные состояния легких мезонов.
18.	19:10	Федоров Вячеслав Васильевич	Оптимизация и восстановление огибающей пучка с помощью генетического алгоритма
19.	19:17	Фролова Елена	ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИСТОЧНИКА ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ НА

			ОСНОВЕ ОБРАТНОГО КОМПТОНОВСКОГО РАССЕЯНИЯ
20.	19:24	Фурсова Надежда Юрьевна	Наработка медицинских изотопов на ускорителях электронов
21.	19:31	Худова Анна Сергеевна	Исследование дважды тяжелых барионов в приближении Борна-Оппенгеймера
22.	19:38	Чуйкина (Саров)	Обзор низкотемпературных детекторов рентгеновского и гамма-излучения сверхвысокого разрешения
23.	19:45	Шнырков Олег Дмитриевич	Исследование фрактальной структуры лиственных и хвойных деревьев с помощью моделирования экспериментов по малоугловому рассеянию нейтронов

МЕХАНИЗМ КАЧЕЛЕЙ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ В ЛЕВО-ПРАВО СИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ

Д. М. Казаркин^{1,2}, М. Н. Дубинин¹, Е. Ю. Федотова¹
kazarkin@theory.sinp.msu.ru

¹ Научно-исследовательский институт ядерной физики им. Д. В. Скобельцына
Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

² Физический факультет Московского государственного университета им. М. В. Ломоносова, Москва

Наблюдение нейтринных осцилляций указывает на ненулевые массы нейтрино, что является убедительным доказательством новой физики за пределами Стандартной модели (СМ). Согласно СМ левокиральные и правокиральные фермионы представлены в дублетах и синглетах соответственно, что приводит к нарушению четности. Естественным обобщением на масштабе высоких энергий, теоретически мотивированным идеей Великого объединения взаимодействий, является лево-правая симметрия (LR-симметрия), в которой лево- и правокиральные фермионы равноправны, а наблюдаемое нарушение четности при низких энергиях объясняется спонтанным нарушением LR-симметрии, [1]. Кроме того, такие модели обладают набором привлекательных следствий:

1. предоставляют источники нарушения четности, что может объяснить наблюдаемую барионную асимметрию Вселенной,
2. реализуют механизм «качелей» (seesaw), объясняющий наличие малых масс у нейтрино и явление нейтринных осцилляций,
3. предсказывают наличие новых тяжелых частиц-кандидатов для описания темной материи (ТМ), стабильность которых обеспечивается нечетностью относительно дискретных симметрий модели, см. [2].

В нашей работе мы сконцентрировали внимание на т.н. минимальной лево-правой симметричной модели (Minimal Left-Right-Symmetric Model, MLRSM) с калибровочной группой $SU(3)_c \times SU(2)_R \times SU(2)_L \times U(1)_{B-L}$, которая нарушается до $SU(3)_c \times U(1)_{em}$ благодаря нетривиальной структуре вакуумных средних расширенного хиггсовского сектора, [3]. В рамках рассматриваемой модели исследуются допустимые наборы параметров расширенного хиггсовского потенциала с «настройкой» на наблюдаемый бозон Хиггса с массой 125 ГэВ и учетом имеющихся экспериментальных ограничений на массу дополнительных нестандартных хиггсовских бозонов и новых массивных векторных бозонов $W_R^\pm$ и Z_R . Для выявленных параметрических сценариев осуществляются численные вычисления реликтовой плотности частиц ТМ, приводятся контуры на плоскости свободных параметров, при которых реализуется наблюдаемое значение относительной плотности ТМ на уровне 25%.

Литература

1. G. Senjanovic and R. N. Mohapatra, “Exact Left-Right Symmetry and Spontaneous Violation of Parity”, Phys. Rev. D, vol. 12, p. 1502, 1975.
2. P. S. Bhupal Dev, R. N. Mohapatra and Y. Zhang, “Naturally stable right-handed neutrino dark matter”, JHEP, vol. 11, p. 077, 2016.
3. K. Kiers, M. Assis and A. A. Petrov, “Higgs sector of the left-right model with explicit CP violation”, Phys. Rev. D, vol. 71, p. 115015, 2005.

«МЕХАНИЗМ КАЧЕЛЕЙ И ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ В ЛЕВО-ПРАВО СИММЕТРИЧНОЙ МОДЕЛИ»

Казаркин Д.М.^{1,2}, М.Н. Дубинин ², Е.Ю. Федотова ²

¹ МГУ им. М.В. Ломоносова, Москва

² НИИЯФ им. Д.В. Скобельцына МГУ, Москва

Выполнен по программе Национального центра по физике и математике в рамках проекта «Физика частиц и космология»

2024

Почему необходимо расширять СМ?

- **Наличие темной материи** → может быть представлена новыми элементарными частицами за рамками СМ.

$$\Omega_{DM,0}h^2 = 0.120 \pm 0.001 \quad [Planck\ 2018\ results]$$

- **Преобладание вещества над антивеществом** (Барионная асимметрия Вселенной) → 3 условия Сахарова (В-нарушение, С и CP-нарушение, отклонение от теплового равновесия)

$$Y_{B,0} = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{s} \sim 10^{-10} - 10^{-11}$$

- **Наблюдение нейтринных осцилляций** → в СМ нет теоретического механизма генерации малых масс нейтрино

$$m_\nu \lesssim 0.2\text{ eV}$$

Лево-правая симметрия и ее нарушение

Калибровочная группа LR-модели:

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

где $\mathcal{P}$ -дискретная симметрия между $L \longleftrightarrow R$.

Этапы спонтанного нарушения симметрии:

- 1 Нарушение $\mathcal{P}$ -симметрии на масштабе $M_{\mathcal{P}} \sim M_{GUT} \sim 10^{15}$ GeV за счет приобретения вакуумного среднего (VEV) у хиггсовского синглетного поля $\eta = (1, 1, 1, 0)$

- 2 Нарушение $SU(2)_R \times U(1)_{B-L} \xrightarrow[M_R \sim \mathcal{O}(1 \text{ TeV})]{\langle \Delta_R \rangle} U(1)_Y \times \mathbb{Z}_2$

хиггсовским правым триплетом $\Delta_R = (1, 3, 1, 2)$

- 3 Электрослабое нарушение на масштабе $M_{W,Z}$ за счет би-дублета Хиггса $\Phi = (1, 2, 2, 0)$ и левого триплета $\Delta_L = (1, 1, 3, 2)$:

$$SU(2)_L \times U(1)_Y \xrightarrow{\langle \Phi \rangle, \langle \Delta_L \rangle} U(1)_{em}$$

$$\langle \Phi \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} k_1 & 0 \\ 0 & k_2 \end{pmatrix}, \quad \sqrt{k_1^2 + k_2^2} = 246 \text{ GeV}$$

Хиггсовский сектор

Теория содержит 14 бозонов Хиггса.

- 4 нейтральных скаляра, H_0^0 (ассоциируемый с наблюдаемым бозоном Хиггса H , $M_h = 125$ GeV), H_1^0 , H_2^0 , H_3^0 ,
- 2 нейтральных псевдоскаляра A_1^0 , A_2^0 ,
- 4 заряженных бозона $H_1^\pm$, $H_2^\pm$,
- 4 дважды заряженных бозона $H_L^{\pm\pm}$, $H_R^{\pm\pm}$.

"VEV seesaw relation"

$$v_L = \gamma \frac{k_1^2 + k_2^2}{v_R}, \quad \text{где } \gamma \equiv \frac{\beta_2 k_1^2 + \beta_1 k_1 k_2 + \beta_3 k_2^2}{(2\rho_1 - \rho_3)(k_1^2 + k_2^2)},$$

Параметрический сценарий

α_3	ρ_1	ρ_2	ρ_3	λ_1	λ_2	λ_3
0.01	0.1	0.3	0.9	$\lambda_{SM} = 0.118$	0.01	0.1

Таблица: Выбор констант самодействия для потенциала

Массы хиггсовских бозонов

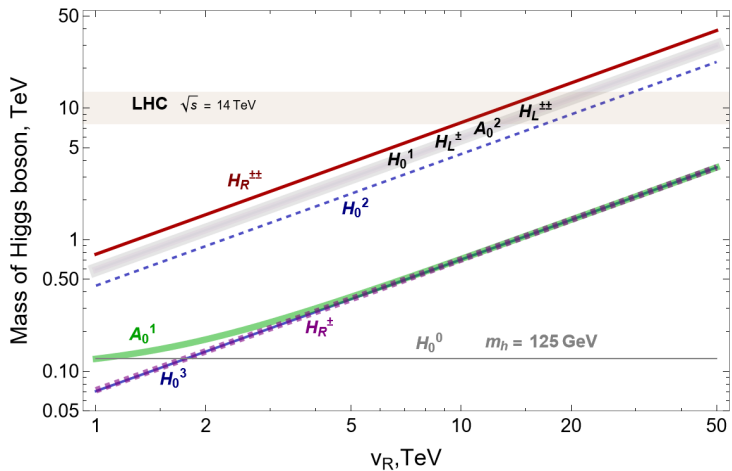


Рис.: Массы бозонов хиггса в LRSM (массы H_3^0 , A_2^0 , $H_1^{\pm}$, $H_1^{\pm\pm}$ на рисунке совпадают)

Массы новых калибровочных бозонов

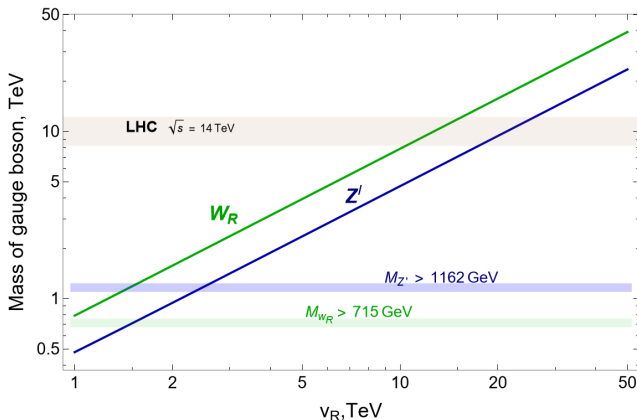


Рис.: Масса Z_R - синяя наклонная линия и масса W_R - красная сплошная наклонная линия. Горизонтальные линии - экспериментальные границы. Получено в приближении $v_R \gg k_1, k_2$

Связь с теорией Великого объединения

Теория великого объединения, основанная на модели $SO(10)$ предсказывает LR-симметрию, т.к. $G_{LR} \subset SO(10)$. Это позволяет рассматривать фермионные триплеты,

$$\underbrace{(1_c, 3_L, 1_R, 0_{(B-L)})}_{\equiv \psi_1} \oplus \underbrace{(1_c, 1_L, 3_R, 0_{(B-L)})}_{\equiv \psi_2} \subset 45_F,$$

которые содержат кандидатов в холодную ТМ - майорановские фермионы $\chi_{1,2}^0 = \psi_X^0 + (\psi_X^0)^c$, а $\chi_{1,2}^\pm = \psi_X^\pm - (\psi_X^\mp)^c$ - дираковские заряженные фермионные пары.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}_{\text{int}} = & -g_R \left(\overline{\chi_i^+} W_R^+ \chi_i^0 + h.c. \right) - e \overline{\chi_i^+} A \chi_i^+ \\ & - g_R \cos \phi_0 \overline{\chi_i^+} Z_R \chi_i^+ + e \tan \theta_W \overline{\chi_i^+} Z \chi_i^+, \end{aligned}$$

Стерильные нейтрино

Модель содержит тяжелые нейтральные лептоны (HNL или стерильные нейтрино) $N_{1,2,3}$, массы $\leftrightarrow$ seesaw-механизм (seesaw II).
Массовая матрица 6×6 нейтрино имеет вид

$$\mathcal{M} = \begin{pmatrix} f_{VL} & Yk_+ \\ Y^T k_+ & f_{VR} \end{pmatrix} \quad f_L = f_R = f, \quad Y = Y^T \quad (L \leftrightarrow R)$$

$$M_N \sim f_{VR} \quad m_\nu \sim f_{VL} + \frac{k_+^2}{v_R} Y f Y^T$$

Смешивание $|\theta_{mix}|^2 \sim (k_+/v_R)^2 \ll 1$ самое легкое стерильное нейтрино может выступать в роли частицы темной материи, [?]. Для квазистабильности ($\tau_N > H_0^{-1} \sim 10^{17}$ секунд) масса $M_{N_{dm}} \sim \mathcal{O}(\text{кэВ})$.

Недостатком такой модели является недоступные к наблюдениям хиггсовские и калибровочные бозоны из-за слишком большого $v_R \sim 10^4 \text{ ТэВ}$.

Темная материя в LRSM

В LRSM нет однозначных кандидатов на роль темной материи. Мы выделяем возможности

- ТэВ-ной холодной ТМ ($\Omega_{L,R}$), представленной компонентами χ_1^0 и χ_2^0 фермионных триплетов. Каждая из двух компонент стабилизирована дискретной симметрией $U(1)_{B-L} \rightarrow \mathbb{Z}_2$, $\mathcal{Z} = (-1)^{3(B-L)}$;
- кэВ-ной теплой ТМ (Ω_{warm}), представленной самым легким из стерильных нейтрино N_1 . Квазистабильна на космологических масштабах времени из-за $|\theta_{mix}|^2 \ll 1$. Требуется тяжелых W_R, Z_R бозонов.
- трехкомпонентной темной материи: случай 1 + случай 2 [in progress]

Реликтовая плотность ТМ

$$\Omega_{DM} = \underbrace{\Omega_L + \Omega_R}_{\text{MicrOMEGAs num. calc.}} + \Omega_{warm}, \quad \Omega_{warm} \sim |\theta|_{mix}^2 M_{N_1}$$

Имеющиеся результаты для ТэВ-ной ТМ в LRSM

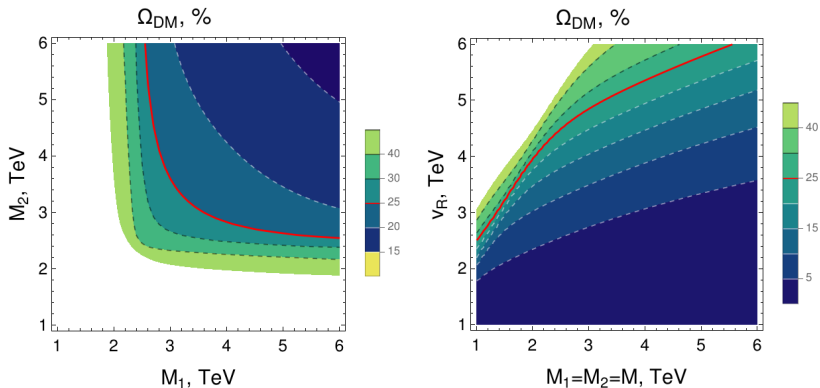


Рис.: Реликтовая плотность темной материи χ_0^1 и χ_0^2 на плоскости параметров $M_1 - M_2$ (слева) и на плоскости $M - v_R$, где $M = M_1 = M_2$ (справа). Здесь мы предполагаем, что все N_i достаточно тяжелые и не дают вклада в Ω_{DM} .

Заключение и результаты

- Детально рассмотрена модель с LR-симметрией, выделен спектр новых гипотетических частиц (скалярные и векторные бозоны), построен параметрический сценарий с позитивной феноменологией для коллайдерных экспериментов.
- Модель приводит к генерации майорановских масс у стерильных и активных нейтрино (механизм seesaw II)
- В рамках LRSM рассмотрены возможные кандидаты на роль темной материи: кэВ-ное стерильное нейтрино с малыми углами смешивания, тяжелые майорановские фермионы, компоненты левого и правого фермионного триплета, стабилизированные за счет остаточной дискретной $\mathbb{Z}_2$ симметрии после нарушения $U(1)_{B-L}$.

Спасибо за внимание