Министерство науки и высшего образования Российской Федерации

Федеральное государственное автономное учреждение

высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ» (НИЯУ МИФИ)

УДК 539.12.01

## ОТЧЁТ

## О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

## ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВАНИЯ И КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЯВЛЕНИЯ МНОГОЗАРЯДНЫХ ЧАСТИЦ

Научный руководитель д.ф.-м.н., профессор

\_\_\_\_\_ М. Ю. Хлопов

Выполнил

\_\_\_\_\_Д. О. Сопин

Москва 2022

# Оглавление

1	Введен	ние	2
2	Модел	ь с 4-я поколениями	2
	2.1	Приближение равных масс	7
	2.2	Различные массы	9
3	WTC		11
4	Заклю	чение	12
Спис	сок исп	ользованных источников	13

## 1 Введение

Наблюдаемый избыток вещества над антивеществом не может быть объяснён при помощи теории, включающей закон сохранения барионного числа. В частности, это невозможно при использовании теории возмущений в рамках Стандартной Модели (СМ). Однако ещё в 80-х годах XX века были получены теоретические указания на существование необходимых процессов в теориях с SU(2) симметрией за пределами данного подхода [1; 2].

Эффект электрослабого несохранения барионного числа должен быть учтён при анализе космологических следствий расширений СМ как неизбежный сопутствующий фактор. Также в некоторых моделях с его помощью удаётся объяснить наблюдаемое соотношение плотностей скрытой массы и барионной материи [3—5]. В частности, это возможно сделать в теориях, предсказывающих существование связанных состояний новых частиц, "тёмных атомов".

В данной работе рассмотрены несколько расширений СМ в контексте генерации барионной асимметрии. Раздел 2 посвящён модели, включающей в себя новое тяжёлое поколение фермионов. В разделе 3 рассмотренна техницветовая модель (WTC) с произвольным электрическим зарядом техникварков и технилептонов.

## 2 Модель с 4-я поколениями

Соотношение плотностей скрытой массы и барионной материи может быть определено с исползованием термодинамического подхода, развитого в работе [6]. Ключевую роль в рассмотрении занимают сфалеронные переходы - электрослабые процессы, нарушаюцие законы сохранения барионного и лептонного чисел.

Свойства частиц 4-го поколения рассмотрены в работах [7-12] и кратко отображены в таблице 1. Отличительной чертой новых кварков U, D и лептонов N, E является аналогичный электрическому *y*-заряд. Его сохранение ведёт к стабильности тяжёлых кварка U и нейтрино N а также к возникновению новых барионного и лептонного чисел, FB и FL соответственно.

				Новое	Новое
Частица	Macca	Заряд q	Заряд у	лептонное	барионное
				ЧИСЛО	число
U	$\sim 1$ ТэВ	$\frac{2}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
D	$\sim 1$ ТэВ	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0	$\frac{1}{3}$
Е	$\sim 1$ ТэВ	-1	1	1	0
N	$\sim 50$ ГэВ	0	1	1	0

Таблица 1 — Основные свойства частиц 4-ого поколения.

Особый интерес представляет связанное состояние - "ANO-helium"  $\bar{U}\bar{U}\bar{U}\bar{N}He$ , "ядро"которого состоит из стабильных тяжёлых анти-кварков. AHO-гелий является кандидатом на роль частицы-переносчика скрытой массы. Основной вклад в энергетическую плотность данного связанного состояния должно давать "ядро а потому справедливо приближение:

$$\Omega_{DM} \approx \Omega_{\text{ANO-He}} \approx \Omega_{\bar{U}\bar{U}\bar{U}}.$$
 (1)

Здесь также предполагается, что АНО-гелий является единственным носителем скрытой массы.

Каждой частице СМ может быть сопоставлен химический потенциал:

- $\mu_{uL/R}, \mu_{dL/R}$ для всех левых/правых кварков типа и и d соответственно;
- $\mu_{eL/R}$  для всех заряженных лептонов;
- $\mu = \sum_{i} \mu_{\nu_{i}L}, \, \mu_{\nu_{i}R}, \, i=e, \, \mu, \, \tau$ для левых/правых нейтрино;
- *μ<sub>W</sub>* для *W*<sup>-</sup>. Химический потенциал нейтральных векторных бозонов считается пренебрежимо малым;
- $\mu_0$  и  $\mu_-$  для хиггсовского дублета.

Аналогично могут быть введены химические потенциалы новых частиц:

•  $\mu_{UL/R}$ ,  $\mu_{DL/R}$  - для левых/правых тяжёлых кварков U и D, соответственно.

•  $\mu_{NL/R}$  и  $\mu_{EL/R}$  - для левых/правых тяжёлых лептонов N и E соответственно.

Если в среде установленно термодинамическое равновесие, то некоторые из них могут быть связаны за счёт слабого взаимодействия:

• для любого правого фермиона типа "i"

$$\mu_{iR} = \mu_{iL} \pm \mu_0; \tag{2}$$

• для частиц "i"с проекцией изоспина -1/2 и соответствующих им частиц "j"с проекцией изоспина +1/2

$$\mu_i = \mu_j + \mu_W. \tag{3}$$

Наконец, может быть введено уравнение сфалеронного перехода:

$$3(\mu_{uL} + 2\mu_{dL}) + \mu + (\mu_{UL} + 2\mu_{DL}) + \mu_{NL} = 0.$$
(4)

Необходимая для дальнейшего рассмотрения плотность барионного числа, определённая как

$$B = \frac{6}{gT^2} \sum_{i} \frac{1}{3} (n_i - n_{\bar{i}}) = \sum_{i} \frac{1}{3} \sigma_i \left(\frac{m_i}{T}\right) \mu_i,$$
(5)

где суммирование производится по всем кваркам. Каждый из них несёт барионное число равное 1/3, что отражено коэффициентом перед избытком плотности разложенным в ряд Тейлора по малой величине  $\frac{\mu_i}{T}$ . Коэффицент  $\frac{6}{aT^2}$  отражает выбранную нормировку.

Величина, представляющая собой статистический вес для массивной частицы

$$\sigma(z) = \frac{6}{4\pi^2} \int_0^\infty dx \ x^2 \cosh^{-2}\left(\frac{1}{2}\sqrt{x^2 + z^2}\right),\tag{6}$$

меняется в пределах [1;0] при изменении аргумента от нуля к бесконечности. Аналогично могут быть введены плотности лептонного числа L, плотности барионного и лептонного чисел 4-го поколения FB и FL, электрического и y зарядов Q и Y, а также проекции изоспина  $I_3$ .

Используя данные определения, возможно получить систему уравнений на химические потенциалы:

$$B = \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot (2 + \sigma_t)(\mu_{uL} + \mu_{uR}) + \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot 3 \cdot (\mu_{dL} + \mu_{dR}) =$$
(7)  
=  $(10 + 2\sigma_t)\mu_{uL} + 6\mu_W$ ,

$$L = \Sigma(\mu_{\nu_{i}L} + \mu_{\nu_{i}R} + \mu_{iL} + \mu_{iR}) =$$
  
= 4\mu + 6\mu\_{W}, (8)

$$FB = \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot \sigma_U(\mu_{UL} + \mu_{UR}) + \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot \sigma_D(\mu_{DL} + \mu_{DR}) =$$
(9)  
= 2(\sigma\_U + \sigma\_D)\mu\_U + 2\sigma\_D\mu\_U + (\sigma\_U - \sigma\_D)\mu\_Q

$$FL = \sigma_E(\mu_{EL} + \mu_{ER}) + \sigma_N(\mu_{NL} + \mu_{NR}) =$$
  
= 2(\sigma\_N + \sigma\_E)\mu\_{NL} + 2\sigma\_E\mu\_W + (\sigma\_N - \sigma\_E)\mu\_0. (10)

Условия электро- и у- нейтральности:

$$Q = 0 = \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot (2 + \sigma_t)(\mu_{uL} + \mu_{uR}) - \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot 3 \cdot (\mu_{dL} + \mu_{dR}) + \frac{2}{3} \cdot 3 \cdot \sigma_U(\mu_{UL} + \mu_{UR}) - \frac{1}{3} \cdot \sigma_D(\mu_{DL} + \mu_{DR}) - \frac{1}{3} \cdot (\mu_{eL} + \mu_{eR}) - \sigma_E(\mu_{EL} + \mu_{ER}) - 4\mu_W - 2\mu_-,$$

$$Y = 0 = -\frac{1}{3} \cdot 3 \cdot \sigma_U(\mu_{UL} + \mu_{UR}) - \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot \sigma_D(\mu_{DL} + \mu_{DR}) + \frac{1}{3} \cdot 3 \cdot \sigma_D(\mu_{DL} + \mu_{DR$$

где массами всех частиц, кроме t-кварка можно пренебречь по сравнению с температурой среды.

Следует учесть, что температура закалки сфалеронных переходов T может быть как больше температуры электрослабого фазового перехода (ЭСФП)  $T_c$ , так и меньше её. В случае, если  $T < T_c$ , закалка происходит в нарушенной фазе, когда

$$\mu_0 = 0. \tag{13}$$



Рисунок 1 — Зависимости отношения плотностей скрытой массы и барионного вещества в случае закалки сфалеронных переходов до ЭСФП.

Если же  $T > T_c$ , то все частицы оказываются безмассовыми. Кроме того, может быть наложено условие равенства нулю суммарного изоспина:

$$I_{3} = 0 = \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot 3 \cdot (\mu_{uL} - \mu_{DL}) + \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot (\mu_{\nu_{iL}} - \mu_{eL}) - 4\mu_{W} - (\mu_{0} + \mu_{-}) + \frac{1}{2} \cdot 3 \cdot (\sigma_{U}\mu_{UL} - \sigma_{D}\mu_{DL}) + \frac{1}{2}(\sigma_{N}\mu_{NL} - \sigma_{E}\mu_{EL}).$$
(14)

Последнее уравнение системы пожет быть получено из приближения, что вся барионная плотность во Вселенной обеспечивается протонами. В таком случае

$$B = \frac{6}{gT^2} \frac{\rho_c \Omega_b}{m_p},\tag{15}$$

$$-\frac{FB}{B} \approx \frac{m_p}{3m_U} \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}.$$
(16)

Рассматриваемая система уравнений может быть решена относительно любой пары плотностей. Следовательно, можно найти  $B \pm L$ ,  $FB \pm FL$ ,



Рисунок 2 — Зависимости отношения плотностей скрытой массы и барионного вещества в случае закалки сфалеронных переходов после ЭСФП.

 $\frac{FB}{L}$ и т.д. как функции масс, температуры и коэффициента

$$k = \frac{m_p}{3m_U} \frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}.$$
(17)

Введу грамозкости, точные выражения для них не представлены в данной работе.

#### 2.1 Приближение равных масс

Среди возможных решений представленной системы уравнений наиболее интересны отношения плотностей  $\frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}$  и  $\frac{L}{B}$ . С их помощью возможно установить ограничения на массы новых частиц.

Пусть, в первом приближении, массы тяжёлых фермионов U, D и E равны между собой:

$$m_E = m_D = m_U = m. \tag{18}$$

В таком случае, отношение плотности скрытой массы к плотности барионного вещества во Вселенной является функцией лишь от общей массы частиц 4-го поколения *m* и температуры закалки сфалеронных переходов *T*. Эти зависимости представлены на рис. 1 и рис. 2, если закалка проис-



Рисунок 3 — Зависимость абсолютного значения отношения плотностей лептонного и барионного чисел в случае, если скрытая масса полностью обеспечивается АНО-гелием. *Правая панель:* закалка сфалеронных переходов происходит до ЭСФП. Левая панель: закалка сфалеронных переходов происходит после ЭСФП.

ходит до и после ЭСФП соответственно.

В обоих случаях данная величина быстро убывает с ростом массы mили с уменьшением температуры закалки T. Однако, оказывается возможным подобрать такие значения этих параметров, при которых величина отношения совпадает с эксперементальными данными [13].

Тогда отношение плотностей лептонного и барионного чисел является функцией от тех же переменных (см. рис. 3). Абсолютное значение данной величины растёт как  $\frac{1}{\sigma_U}$ . Заметный эффект от избытка антилептонов возникает на стадии нуклеосинтеза только в том случае, если  $-\frac{L}{B} \sim 10^7 - 10^8$ [14]. Такие значения соответствуют массам тяжелых кварков около  $m \sim 5-8$  ТэВ (для разных температур закалки сфалеронных переходов), когда скрытая масса не может быть обеспечена только АНО-гелием (рис. 1 и рис. 2).

### 2.2 Различные массы

Можно оценить зависимость отношения плотностей скрытой массы и барионной материи от разницы масс тяжёлых частиц. Для этого необходимо

- в предположении, что m<sub>U</sub> < m<sub>D</sub>, m<sub>E</sub> выбрать "реперные"массу и температуру закалки сфалеронных переходов. При увеличении увеличении параметра m<sub>U</sub>/T<sub>\*</sub> соотношение плотностей будет уменьшаться аналогично тому, как показано на рис. 1 и 2;
- задать приращение статистического веса для *D*-кварка: *d* и тяжёлого электрона *E*: *e* как

$$d, e = \sigma\left(\frac{m_{D,E}}{T}\right) - \sigma\left(\frac{m_U}{T_*}\right).$$
(19)

На рис. 4 изображены зависимости соотношения плотностей лептонного и барионного чисел, а также плотностей скрытой массы и барионной материи от указанных параметров при закалке *до* и после ЭСФП. "Реперные"величины выбраны, соответственно,  $m_U = 1,5$  ТэВ и  $T_* = 200$  ГэВ. График охватывает разницы масс  $m_{D,E} - m_U$  в пределах  $[0, \infty]$ . Красной точкой отмечены результаты, полученные в приближении равных масс.

Отношение  $\frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}$  оказывается сильно зависящим от массы *D*-кварка. При изменении же массы тяжёлого электрона *E* оно остаётся почти постоянным. В обоих случаях, однако, отношение плотностей при заданной температуре закалки сфалеронных переходов уменьшается с ростом разницы масс.

Такой характер зависимости позволяет ослабить нижнюю оценку массы АНО-гелия. Риск перепроизводства частиц-переносчиков скрытой массы, не позволяющий *U*-кварку иметь малую массу, может быть исключён введением достаточно тяжёлого *D*-кварка.

Абсолютная величина отношения  $\frac{L}{B}$  увеличивается не сильно по сравнению с результатом, полученным в приближении равных масс: всего в  $\sim 1.5$  раза.



Рисунок 4 — Зависимость отношения плотностей лептонного и барионного чисел (*слева*) и отношения плотностей скрытой массы и барионного вещества (*справа*) от разницы масс тяжёлых фермионов. Верхний ряд: закалка сфалеронных переходов происходит до ЭСФП. Нижсний ряд: закалка сфалеронных переходов происходит после ЭСФП. Красная точка соответствует значению, полученному в приближении равных масс.

## 3 WTC

В рамках данного подхода может быть рассмотрено техницветовое (WTC) расширение СМ. Соответствующий анализ был произведён в работах [3— 5]. Авторы указывают, однако, что заряд техникварков выберается достаточно произволно. Может быть рассмотрен сценарий, при котором для дитехнекваркового состояния  $\bar{U}\bar{U}$  он принимает значения  $Q_{\bar{U}\bar{U}} = -2n$ . В таком случае составная частица "X-helium" $\bar{U}\bar{U}(He)_n$  является кандидатом на роль частицы-переносчика скрытой массы.

Рассмотрен случай закалки сфалеронных переходов до ЭСФП, соответствующий фазовому переходу 1-го рода. Система уравнений на химические потенциалы аналогична представленной в [3]. Использовано дополнительное условие на химический потенциал бозона Хиггса  $\mu_0 = 0$ , следующее из техникваркового состава данной частицы.

При решении системы уравнений на химические потенциалыбожет быть получено выражение вида

$$\frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b} = \frac{a}{b - Q_{\bar{U}\bar{U}}} \cdot \left(\sigma\left(\frac{m_{\zeta}}{T_*}\right) - \sigma\left(\frac{m_{\nu'}}{T_*}\right)\right),\tag{20}$$

где параметры a и b представляют собой функции от масс частиц и температуры закалки сфалеронных переходов  $T_*$ .  $\zeta$  и  $\nu'$  - технилептоны.

Таким образом, отношение плотностей скрытой массы и барионной материи в модели техницвета обратнопропорционально заряду ядра X-гелия.

Из данного выражения также видно, что приближение равных масс неприменимо в том виде, в каком оно использовано в работах [3—5]. В случае, если  $m_{\zeta} = m_{\nu'}$ , соотношение плотностей скрытой массы к барионной материи обращается в нуль. Потому данное условие должно быть исключено из рассмотрения.

На рис. (5) представленны массовые зависимости данного отношения в приближении равных масс. Использовано предположение нулевой массы технинейтрино  $m_{\nu'} = 0$ , дающее наибольшее возможное значение отношения (20). Температура закалки сфалеронных переходов оценивается в 200 ГэВ [15].



Рисунок 5 — Зависимость отношения плотностей скрытой массы и барионного вещества в рамках WTC модели от массы технифермионов для разных зарядов техникваркового ядра АНО-гелия. a)  $Q_{\bar{U}\bar{U}} = 2$ ; б)  $Q_{\bar{U}\bar{U}} = 4$ ; в)  $Q_{\bar{U}\bar{U}} = 6$ .

## 4 Заключение

Сфалеронные переходы - электрослабые процессы, нарушающие законы сохранения барионного и лептонного чисел, должны быть учтены при рассмотрении космологических предсказаний расширений СМ.

В моделях "тёмных атомов"сфалеронные переходы могут стать ключём к объяснению соотношения плотностей скрытой массы и барионной материи.

Модель, предсказывающая существование сверхтяжёлого 4-го поколения фундаментальных частиц, несущих новый заряд y, не является исключением. Предполагая, что носителем скрытой массы является связанное состояние, АНО-гелий  $\bar{U}\bar{U}\bar{N}He$ , удаётся найти зависимости отношений плотностей  $\frac{\Omega_{DM}}{\Omega_b}$  и  $\frac{L}{B}$  от масс частиц и температуры закалки сфалеронных переходов. Более того, удаётся подобрать значения этих параметров, при котором достигается согласие между теорией и наблюдениями.

В рамках же WTC модели удаётся найти зависимость отношения плотностей скрытой массы и барионного вещества от заряда техничастиц.

#### Список используемых источников

- Manton N. S. Topology in the Weinberg-Salam Theory // Phys. Rev. D. - 1983. - T. 28. - C. 2019.
- Klinkhamer F. R., Manton N. S. A saddle-point solution in the Weinberg-Salam theory // Physical Review D. - 1984. - T. 30. - C. 2212-2220.
- 3. Gudnason S. B., Kouvaris C., Sannino F. Dark matter from new technicolor theories // Physical Review D. 2006. Нояб. Т. 74, № 9.
- Khlopov M. Y., Kouvaris C. Composite dark matter from a model with composite Higgs boson // Physical Review D. — 2008. — Сент. — Т. 78, № 6.
- Khlopov M. Y., Kouvaris C. Strong interactive massive particles from a strong coupled theory // Physical Review D. - 2008. - Mapt. - T. 77, № 6.
- Harvey, Turner. Cosmological baryon and lepton number in the presence of electroweak fermion-number violation. // Physical review. D, Particles and fields. - 1990. - T. 42 10. - C. 3344-3349.
- Khlopov M. Y. New symmetries in microphysics, new stable forms of matter around us. - 2006.
- Belotsky K., Khlopov M., Shibaev K. Stable quarks of the 4th family? // Horizons in World Physics. T. 265. — Hauppauge NY : NOVA Publishers, 2009. — C. 19—47 ; — e-Print: arXiv: 0806.1067 [astro-ph].
- Effects of new long-range interaction: Recombination of relic Heavy neutrinos and antineutrinos / K. M. Belotsky [и др.] // Grav.Cosm.Suppl. T. 11. – Cosmion2004. 2005. – C. 27–33 ; – e-Print Archive: astro-ph/0504621.

- Belotsky K. M., Khlopov M. Y., Shibaev K. I. Composite Dark Matter and its Charged Constituents // Gravitation and Cosmology. T. 12. — International Conference on Gravitation, Cosmology, Astrophysics, Nonstationary Gas Dynamics, dedicated to 90th anniversary of K.P. Staniukovich. Moscow : (KPS 06), 03.2006. — C. 1—7 ; — e-PrintArchive: astro-ph/0604518.
- Belotsky K., Khlopov M., Shibaev K. Stable matter of 4th generation: hidden in the universe and close to detection? // Particle Physics at the Year of 250th Anniversary of Moscow University. — WORLD SCIENTIFIC, 10.2006.
- Possible manifestations of the existence of a fourth-generation neutrino / Y. Golubkov [и др.] // Journal of Experimental and Theoretical Physics Letters. — 1999. — Март. — Т. 69.
- 13. Planck 2018 results: VI. Cosmological parameters / N. Aghanim [и др.] // Astronomy Astrophysics. — 2020. — Сент. — Т. 641.
- 14. A new constraint on primordial lepton flavour asymmetries / V. Domcke [и др.]. 2022.
- Kuzmin V., Shaposhnikov M., Rubakov V. A. On the Anomalous Electroweak Baryon Number Nonconservation in the Early Universe // Physics Letters B. - 1985. - T. 155. - C. 36.