

ТЕМНЫЕ КОМПОНЕНТЫ ВСЕЛЕННОЙ МЕДЛЕННО ПРОЯСНЯЮТСЯ

*В. В. Бурдюжа**

*Астрокосмический центр Физического института им. П. Н. Лебедева Российской академии наук
117997, Москва, Россия*

Поступила в редакцию 17 июня 2015 г.

Темный сектор Вселенной начинает проясняться шаг за шагом. Если темная энергия есть вакуумная энергия, то 123 порядка этой энергии редуцируются обычными физическими процессами. Долгие годы эти необъясненные порядки называли кризисом физики. До введения в физику голографического принципа и энтропийной силы «кризис» действительно был. Вакуумная энергия тратилась на создание новых квантовых состояний в течение всей жизни Вселенной, но в первоначальный период ее эволюции более эффективно редуцировали вакуумную энергию (78 порядков) вакуумные конденсаты, образованные фазовыми переходами, поскольку Вселенная при расширении теряла высокую симметрию. Важные проблемы физической космологии могут быть решены, если кварки, лептоны и калибровочные бозоны — составные частицы. В составной модели находит объяснение темная материя, частично или вся состоящая из псевдоголдстоуновских бозонов фамилонного типа с массой 10^{-5} – 10^{-3} эВ. В этой модели три поколения элементарных частиц необходимы обязательно. Кроме того, эта модель реализует три релятивистских фазовых перехода в среде из фамилонных на различных красных смещениях, образуя крупномасштабную структуру темной материи, которую «повторили» барионы. Мы предсказываем обнаружение динамики темной энергии, обнаружение фамилонных как частиц темной материи и развитие спектроскопии темной среды из-за вероятного наличия в ней темных атомов. Другие точки зрения на темные компоненты Вселенной также кратко обсуждаются.

DOI: 10.7868/S0044451017020000

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	416	4. Заключение	425
2. Темная энергия	417	Литература	426
3. Темная материя	421		

1. ВВЕДЕНИЕ

В понимании темных компонент Вселенной (ими являются темная энергия (DE) и темная материя (DM)) возник некоторый прогресс. Темные компоненты составляют 95% полной плотности Вселенной. У барионов только 5%. Вероятно, наша Вселенная — часть вечно растущего фрактала (мультиверса). С мультиверсом появились некоторые сложности [1], и в первую очередь необходимо экзаменовать нашу Вселенную, которая, вероятно, протуннелировала с осциллирующего режима на фридмановский режим в момент рождения [2]. Вероятно, тем-

ная энергия Вселенной — вакуумная энергия, уравнение состояния которой $w \equiv p/\rho = -1$. Эксперимент «Планк» для этого отношения дает значение $w = -1.006 \pm 0.045$, а для плотности темной энергии $\Omega_{DE} \approx 0.69$. Кроме того, в этом эксперименте темная энергия не изменялась [3], что удивительно. Здесь мы подчеркнем, что вакуумная энергия Вселенной должна эволюционировать во времени (такой же вывод сделан и работе [4]). В нашей работе [5] было показано, как редуцируются кризисные порядки темной энергии, если темная энергия — вакуумная энергия (непонимание редукции 123 порядков темной энергии многие годы называли кризисом физики). Мы обсудим более детально эти расчеты и

* E-mail: burdyuzh@asc.rssi.ru

экспериментальную проверку моделей темной энергии.

В отношении темной материи ситуация менее ясная ($\Omega_{DM} \approx 0.26$ [3]), так как ее хорошее объяснение просто отсутствует, хотя имеются веские причины полагать, что часть темной среды состоит из фамилонов [6]. В среде из фамилонов, создаваемых кварками и лептонами всех поколений, должны были произойти фазовые переходы при различных температурах, когда выделяются различные масштабы фрактальной природы и образуется крупномасштабная структура темной материи. Благодаря гравитации барионы могли повторить эту картину, образуя галактики, скопления галактик и даже сверхскопления. Мы предлагаем составную модель элементарных частиц, в которой лептоны и кварки — не фундаментальные частицы.

Вероятно, атомы из темных частиц могут также образоваться. Оценки для энергии некоторых переходов темного водорода и темного позитрония (e^+e^-) будут сделаны. Мы упомянем и о темном магнитном атоме — монополиуме (g^+g^-). Также будут обсуждены другие модели темной материи и их экспериментальная проверка.

Заметим для ясности, что $\Omega = \rho_i/\rho_{cr}$ — безразмерная плотность компонент Вселенной, нормированная на критическую плотность ρ_{cr} . Кроме того, может представить интерес разбиение эволюции Вселенной на эпохи в стандартной космологической модели:

$$BB \rightarrow dS \rightarrow RD \rightarrow MD \rightarrow dS \rightarrow \dots$$

Здесь BB — момент рождения ($T \sim 10^{32}$ К), далее де-ситтеровская стадия (инфляция), потом эпоха излучения (RD), затем эпоха вещества (MD). Сейчас — ускоренное расширение (снова де-ситтеровская стадия).

Каждую эпоху сопровождали важные физические процессы. После рождения, вероятно в симметричное состояние, был квантовый режим эволюции, потом инфляция (генерация начальных возмущений в ее течении [7]), фазовые переходы, снова разогрев, рождение частиц, нуклеосинтез и т. д. Вселенная остывает, и на красном смещении ($z \sim 1100$) имеет место рекомбинация. В этот момент (конец радиационно-доминированной эпохи) Вселенная просветляется, и ее возраст составлял тогда всего 400000 лет. Картинка микроволнового неба дает нам распределения яркости от сферы последнего рассеяния. Сейчас ($z = 0$) температура микроволнового неба $T \approx 2.7$ К — до такой температуры Вселенная остыла.

После рекомбинации была эпоха вещества. В течение эпохи вещества (практически это весь возраст Вселенной — $13.8 \cdot 10^9$ лет) из первоначальных возмущений развились все наблюдаемые барионные структуры и структуры темной материи, про которые пока ничего не известно. До красного смещения $z \approx 0.7$ из-за влияния гравитации, Вселенная расширялась с замедлением. И уже почти $7 \cdot 10^9$ лет Вселенная расширяется с ускорением, т. е. снова де-ситтеровская стадия. Дальнейшая эволюция Вселенной не менее интересна, но мы не будем здесь ее обсуждать, отметим только, что Вселенная в течение эпохи вещества имела еще период вторичной ионизации, когда зажглись квазары ($z \approx 11$).

Но вернемся к темным компонентам, последние обзоры по которым можно найти в работах [8, 9]. В данном обзоре также описываются вероятные модели DE и DM, которые, по мнению автора, наиболее адекватны для космологии.

2. ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ

Чтобы избежать путаницы, в данном тексте темная энергия, вакуумная энергия, космологическая константа и Λ -член — одинаковые понятия. Проблема космологической константы (проблема Λ -члена) существовала многие годы, так как понимание ее редукции на 123 порядка отсутствовало [10]. Проблему называли даже кризисом физики. Действительно, до введения в физику голографического принципа [11] и энтропийной силы [12] этот кризис существовал, поскольку имело место непонимание такой огромной редукции. Как известно, космологическая константа была введена Эйнштейном [13] в его полевые уравнения как свойство пространства, чтобы сохранить статическую Вселенную:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} Rg_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = -8\pi G_N T_{\mu\nu}. \quad (1)$$

100 лет назад этим уравнением А. Эйнштейн как бы переписал правила нашего физического мира. Но не все было так гладко. Фридман [14] показал, что статическое решение эйнштейновского уравнения (1) — неустойчиво и малейшая флуктуация плотности материи приведет к коллапсу или вечному расширению. Тогда Эйнштейн отказался от Λ -члена, поскольку стало известно, что Вселенная расширяется.

Много позже, в 1947 г., в письме Леметра к Эйнштейну [15] идея космологической константы показала аббату-математику Леметру гениальной. Он

интерпретировал ее как плотность вакуумной энергии, т. е. Λ -член это — вакуумная энергия Вселенной. Если мы переставим Λ -член в правую сторону уравнения Эйнштейна (1), то это будет форма энергии, которую и назвали темной энергией. Мы полагаем, что темную энергию необходимо ассоциировать с вакуумной энергией. Вакуум с уравнением состояния $p = -\rho$ есть стабильное состояние квантовых полей без возбуждения волновых мод (неволновые моды — конденсаты). Следовательно, вакуум Вселенной состоит из конденсатов квантовых полей, которые при расширении разжижаются и, конечно, флуктуируют. Плотность энергии современного вакуума при красном смещении $z = 0$ существенно отличается от значения плотности энергии при рождении Вселенной, т. е. при $z = \infty$:

$$\rho_{DE} \sim \begin{cases} 10^{-47} \text{ ГэВ}^4, & z = 0, \\ 10^{76} \text{ ГэВ}^4, & z = \infty. \end{cases}$$

Здесь мы имеем 123 порядка разницы в плотности вакуумной энергии, которые были редуцированы в результате довольно специфических физических процессов в течение эволюции Вселенной. Вероятно, наша Вселенная родилась, протуннелировав с осциллирующего режима на фридмановский режим [2] и стала расширяться. В течение ее расширения (эволюции) возникают новые микросостояния. Чтобы сконструировать пространство новых квантовых состояний, необходимо использовать идеи Фока [16].

Но можно пойти другим путем. При расширении Вселенной возникает энтропийная сила, из-за присутствия которой потери энергии неизбежны. Источником энергии может быть только вакуумная энергия. Энтропийная сила F как микроскопическая сила была предложена Верлинде [12]:

$$F\Delta x = T\Delta S, \quad \text{или} \quad F \sim T \frac{\partial N}{\partial x}, \quad (2)$$

где ΔS — изменение энтропии на перемещении Δx , N — информация о голографической системе в битах. В космологии идея энтропийной силы была уже применена в работе [17] для тех же «кризисных» целей, но неудачно. Хотя само наличие энтропийной силы позволяет говорить об энергии ($F\Delta x$), которая в данном случае отбирается у вакуумной энергии при расширении Вселенной. Таким образом, необходимо применить идеи голографии более корректно, т. е. формально только в классическом режиме. Малдасена отметил [18], что вся информация о гравитационной системе закодирована на ее границе. Тогда в голографическом пределе плотность вакуумной энергии Вселенной имеет вид [19]

$\rho_{DE} \leq 3M_{Pl}^2/8\pi R^2$, где M_{Pl} — масса Планка. Кроме того, Бекенштейн показал [20], что энтропия (число микросостояний) черной дыры равна 1/4 площади горизонта событий, выраженных в планковских единицах. Идея о подобии термодинамики черной дыры в специальных координатах термодинамике де-ситтеровской Вселенной, принадлежащая Хокингу [21], оказалась очень полезной, как и идея Джекобсона [22], по которой гравитация на макроскопической шкале есть проявление вакуумной термодинамики. Попробуем использовать эти идеи для решения проблемы Λ -члена.

Наша Вселенная после рождения [2] прошла квантовую стадию своей эволюции, когда голографические идеи нельзя использовать, так как голография — классическое явление. Вероятно, в первоначальном режиме наша Вселенная потеряла высокую симметрию, дополнительные размерности, четность, но в то же время родился весь сонм частиц, в том числе и темных. Конечно, переходный режим между квантовым и классическим режимом также был. При резком охлаждении после рождения Вселенной при потере высокой симметрии произошел ряд фазовых переходов, конденсаты которых компенсировали 78 порядков вакуумной энергии [5, 23], поскольку в положительную плотность вакуумной энергии образующиеся конденсаты вносили отрицательные вклады. В ранней Вселенной могла иметь место следующая цепочка фазовых переходов:

$$\begin{aligned} E_{Pl} &\xrightarrow{10^{19} \text{ ГэВ}} D_4 \times [SU(5)]_{SUSY} \xrightarrow{10^{16} \text{ ГэВ}} \\ &\xrightarrow{10^{16} \text{ ГэВ}} D_4 \times [U(1) \times SU(2) \times SU(3)]_{SUSY} \xrightarrow{10^5-10^{10} \text{ ГэВ}} \\ &\xrightarrow{10^5-10^{10} \text{ ГэВ}} D_4 \times U(1) \times SU(2) \times SU(3) \xrightarrow{100 \text{ ГэВ}} \\ &\xrightarrow{100 \text{ ГэВ}} D_4 \times U(1) \times SU(3) \xrightarrow{0.265 \text{ ГэВ}} D_4 \times U(1). \end{aligned}$$

При этом могла реализоваться потеря огромных порядков вакуумной энергии. Конечно, цепочка фазовых переходов могла быть более сложной.

Таким образом, фазовые переходы в ранней Вселенной могли погасить более 78 порядков вакуумной энергии:

$$\frac{\rho_{Pl}}{\rho_{QCD}} \sim \left(\frac{M_{Pl}}{M_{QCD}} \right)^4 = \left(\frac{1.22 \cdot 10^{19}}{0.265} \right)^4 \approx \approx 4.5 \cdot 10^{78}. \quad (3)$$

Из них два последних фазовых перехода могли погасить 10 порядков вакуумной энергии. К счастью, два последних конденсата в данной цепочке можно посчитать в рамках Стандартной модели [5]. Один

из них — хиггсов конденсат в теории электрослабого взаимодействия (ρ_{EW}), другой — кварк-глюонный конденсат в квантовой хромодинамике (ρ_{QCD}). При массе Хиггса $m_H = 125$ ГэВ для хиггсова конденсата получаем

$$\rho_{EW} = -\frac{m_H^2 m_W^2}{2g^2} - \frac{1}{128\pi^2} \times (m_H^4 + 3m_Z^4 + 6m_W^4 - 12m_t^4) \approx -(100 \text{ ГэВ})^4. \quad (4)$$

Для кварк-глюонного конденсата имеем

$$\rho_{QCD} = -\left(\frac{b}{32}\right) \langle 0 | (\alpha_s/\pi) G_{ik}^a G_a^{ik} | 0 \rangle \approx \approx -(265 \text{ МэВ})^4. \quad (5)$$

Тогда

$$\frac{\rho_{EW}}{\rho_{QCD}} = \left(\frac{100}{0.265}\right)^4 \approx 2 \cdot 10^{10}.$$

На момент начала последнего фазового перехода Вселенная имела плотность порядка 10^{-2} ГэВ⁴, или 10^{16} г/см³. К настоящему времени ($z = 0$) вакуумная энергия должна уменьшиться еще в $\rho_{QCD}/\rho_{DE} \approx (0.265/1.8 \cdot 10^{-12})^4 \approx 5 \cdot 10^{44}$ раз, чтобы погасить все 123 порядка (в квантовом режиме Вселенная уже потеряла 78 порядков вакуумной энергии, как мы уже отметили).

Как получить потери вакуумной энергии на 44 порядка и какой процесс «виноват» в этом? Мы имеем физическую основу — энтропийную силу, возникающую при расширении Вселенной, и утверждение Хокинга о подобии термодинамики де-ситтеровской Вселенной термодинамике черной дыры. Кроме того, авторы работы [19] утверждают, что энтропия Вселенной ограничивается ее поверхностью, измеренной в планковских единицах: $S \leq \pi R^2 M_{Pl}^2$. Эта поверхность служит голографическим экраном. Тогда в голографическом пределе плотность вакуумной энергии Вселенной связана с энтропией простейшей формулой $\rho = 3M_{Pl}^4/8S$, которая для расчетов в классическом режиме имеет вид

$$\rho(z) [\text{ГэВ}^4] = \frac{3}{8} M_{Pl}^4 \left(\frac{R_{QCD}}{R(z)}\right)^2. \quad (6)$$

При $z = 0$ мы имеем $\rho(0) = 0.375 \cdot 10^{-47}$ ГэВ⁴, если $R(0) = 10^{28}$ см. В классическом режиме эволюции за $4 \cdot 10^{17}$ с вакуумная энергия могла быть редуцирована в $(3/8)(10^{28}/3 \cdot 10^4)^2 \approx 4 \cdot 10^{46}$ раз. Если взять начало классической (фридмановской) эволюции на размере $3 \cdot 10^5$ см, то будем иметь совпадение редукции вакуумной энергии с «требуемым» значением, т. е. $(3/8)(10^{28}/3 \cdot 10^5)^2 \approx 4 \cdot 10^{44}$. Отметим, что здесь

имеет место некоторый произвол в оценках, так как мы не знаем, как долго был переходный режим. С другой стороны, это почти точное совпадение не может быть случайным.

Здесь важно сделать некоторые замечания относительно голографии. Общая теория относительности обеспечивает яркий пример голографической теории, а существование горизонта во Вселенной дает сильный аргумент в пользу голографического приближения в космологии. Рост информационной энтропии Вселенной при расширении очевиден. Существование голографического предела [24] ограничивает число степеней свободы (число микросостояний), которые могут существовать в ограниченном объеме. Оба размера, $R_{QCD} = 3 \cdot 10^5$ см и $R = 10^{28}$ см, могут быть причинными горизонтами в голографической термодинамике Вселенной. Эйнштейновские уравнения получаются из пропорциональности энтропии горизонту событий с учетом фундаментальной связи Клаузиуса $dS = dQ/T$, в которой dS — изменение энтропии, dQ — изменение потока энергии через горизонт, T — температура Унру, видимая ускоренным наблюдателем внутри горизонта [20]. В де-ситтеровской Вселенной горизонт событий совпадает с кажущимся горизонтом. Некоторые космологические модели обходятся без горизонта событий, но кажущийся горизонт существует всегда. В заключение этого раздела отметим, несколько фактов, связанных с космологической константой.

1) Уже на планковской шкале трехмерные топологические дефекты (кротовые норы) гравитационного вакуумного конденсата [5] уменьшили первоначальный Λ_0 -член Λ_0 :

$$\Lambda_{QF} = \Lambda_0 - (\kappa \hbar^2 / 768 \pi^2) c_3^2. \quad (7)$$

Здесь c_3 — константа и $\kappa = (10^{19})^{-2}$. Кроме того, этот конденсат мог зафиксировать начало времени нашей Вселенной [25].

2) Суперсимметрия нарушается, если и только если космологическая константа — положительная величина.

3) Много лет назад Зельдович [26] пытался найти вакуумную энергию Вселенной в терминах нулевых колебаний, используя полученную им формулу из фундаментальных констант:

$$\rho_\Lambda [\text{г/см}^3] = G_N m^6 c^2 \hbar^{-4}. \quad (8)$$

Его попытки были безуспешны, так как он подставлял в эту формулу массы электрона или протона. Но если подставить массу π -мезона, тогда ситуации меняется. На это обратил мое внимание

Н. С. Кардашёв¹). Киральная КХД-симметрия — не точная симметрия, и появление псевдо-голдстоуновских бозонов (π -мезонов в нашем случае) — физическое проявление нарушения этой симметрии. Если среднюю массу π -мезонов подставить в формулу (8) и взять значение константы Хаббла $H_0 = 70.5 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}/\text{Мпс}$, то мы получим отношение $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda/\rho_{cr} \approx 0.73$. Таким образом, относительное содержание вакуумной компоненты было зафиксировано в очень ранней Вселенной. Заметим, что астрофизические параметры слегка «плывут» от одного космического эксперимента к другому. Сейчас, после получения результатов со спутника «Планк», имеем $H_0 = 69 \text{ км}\cdot\text{с}^{-1}/\text{Мпс}$ и $\Omega_\Lambda \approx 0.69$. Мы же использовали в своих расчетах величины Ω_Λ и астрофизические параметры 7-летнего эксперимента WMAP [27].

4) Если гравитация на макроскопической шкале — это энтропийная сила [22], то гравитация не есть фундаментальное взаимодействие, что в свое время отмечал Сахаров [28], но у него были, конечно, другие аргументы.

5) Зависимость вакуумной энергии от расстояния (формула (6)) — новый момент в вакуумной термодинамике Вселенной. Это нестандартный взгляд, поскольку традиционно-вакуумная энергия с уравнением состояния $w = -1$ не должна меняться. Но, во-первых, наблюдения дают $w \neq -1$, хотя различие очень мало (см. Введение), во-вторых, голографический подход и энтропийная сила, на которых построена наша концепция снятия «проклятия» с космологической постоянной, также далеки от общепринятого физического стандарта.

Приведем несколько абсолютных значений плотности вакуумной энергии, которые следуют из наших расчетов, чтобы показать ее эволюцию [5]: $\rho_\Lambda \approx 0.375 \cdot 10^{-47} \text{ ГэВ}^4$ при $z = 0$, $\rho_\Lambda \approx 31 \cdot 10^{-47} \text{ ГэВ}^4$ при $z = 5$ и $\rho_\Lambda \approx 197 \cdot 10^{-47} \text{ ГэВ}^4$ при $z = 10$. Эти значения корректны, если и только если темная энергия есть чисто вакуумная энергия. В работе [5] представлены сделанные нами расчеты плотности вакуумной энергии вплоть до красного смещения $z = 10^{11}$ (возраст Вселенной был тогда всего $t = 0.003 \text{ с}$). Зависимость плотности вакуумной энергии от красного смещения — приблизительно квадратичная. Хороший обзор по проблеме темной энергии можно найти в недавней работе [29].

Окончательно, от планковского времени до настоящего вакуумная (темная) энергия Вселенной эволюционировала. Вселенная потеряла в этой фор-

ме энергии примерно $123 (4 \cdot 10^{78} \times 4 \cdot 10^{44})$ порядка в течение $4 \cdot 10^{17} \text{ с}$ в процессе создания новых микросостояний при ее расширении (в квантовом режиме фазовые переходы были более эффективны в этой редукции). Таким образом, кризис физики, связанный с космологической константой, который держался многие десятилетия, может быть преодолен. В процессе решения этой проблемы гравитационный эфир для термодинамического описания гравитации был введен в работе [30], хотя энтропийная сила [12], с нашей точки зрения, — более наглядна в космологии. В работе [31] кризисную проблему космологической константы уже называют старой, так как проблемы есть и в новой модели с гравитационным эфиром.

Имеются и другие модели темной энергии. Простейшим кандидатом на роль темной энергии может быть экстремально маломассивное скалярное поле ϕ с эффективным потенциалом $V(\phi)$. При медленном уменьшении поля ϕ его постоянная потенциальная энергия может быть ответственна за создание поздней инфляции, которая, вероятно, наблюдается сегодня (хотя существуют сомнения в факте наличия поздней инфляции). В начальной инфляции, за которую ответственно скалярное поле, почти никто не сомневается. Теоретическое объяснение наблюдаемому ускоренному расширению Вселенной могут дать эффекты от модификации общей теории относительности [32]. Кроме того, более тщательная обработка данных со спутника «Планк» (третья версия их результатов [3]) показала, что уравнение состояния темной энергии совпадает с результатами первой версии, т. е. $w = -1.006 \pm 0.045$. Это окончательно указывает на то, что темная энергия не есть чистая вакуумная энергия, а имеет малую примесь, вероятно, скалярного поля (см. дискуссию об этом и в работе [33]).

Эксперименты с темной энергией готовят многие группы. В эксперименте «Архимед» [34] (итальянская группа) вакуум Вселенной будет взвешен, используя эффект Казимира. В США готовится сразу несколько экспериментов по этой тематике [35] и даже существует международный консорциум DES (обзоры по проблеме темной энергии [36]). Наконец, в работе [37] можно найти обсуждение различных моделей современного ускоренного расширения Вселенной. Кроме того, автор работы [37] дает новое определение вакуума: это «полностью когерентное состояние, включая все фоковские состояния Вселенной». Мы ожидаем интригующее десятилетие для полного прояснения проблемы темной энергии и, конечно, подтверждения ее эволюции.

¹) Частное сообщение.

3. ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ

Частицы темной материи — это частицы, сечение столкновений которых на 20–25 порядков меньше сечения столкновений барионов. Еще в тридцатых годах швейцарский астрофизик Фриц Цвики, работавший в то время в США на большом телескопе, открыл, что скопление галактик Coma не может быть связано гравитационно без присутствия дополнительной массы. Впоследствии эту массу назвали темной материей. Много позже наличие темной материи было подтверждено из наблюдений кривых вращения галактик и непосредственно при помощи гравитационного линзирования. Совсем недавно стало ясно, что темная материя во Вселенной — более обильная ($\Omega_{DM} \approx 0.26$), чем видимая — барионная ($\Omega_b \approx 0.05$). В космологии возникла новая ветвь — космология темной материи. Вероятно, темная материя — это смесь различных частиц, таких как нейтрино, аксионы, правые нейтрино и темные атомы с их различным процентным вкладом в полную плотность. Предположений по составу темной материи очень много.

Сразу хотелось бы представить нашу модель темной материи, которая поможет решить важные вопросы физики и космологии. Эта составная модель элементарных частиц, которая включает в состав темной материи фамилоны (фамилоны — сорт аксионов). Наша модель объясняет необходимость наличия в Стандартной модели (СМ) трех поколений частиц и выделенных масштабов во Вселенной, а также фрактальное распределение материальных компонент. Заметим, что СМ физики элементарных частиц не является полным описанием природы. Вероятно, она дает хорошие результаты при энергиях до десятков тераэлектронвольт. Скорее всего, новая физика потребует для объяснения темной материи.

Наблюдательные данные говорят, что барионная крупномасштабная структура образовалась на красных смещениях $z \approx 6-8$ или даже ранее [38]. Для СМ в космологии (Λ CDM) существование барионных структур на этих красных смещениях — трудность, так как очень мало времени для первичных возмущений развиться до наблюдаемых структур на фоне расширяющейся Вселенной. Если барионные структуры образовались на красных смещениях $z > 10$, то ключевую роль должны играть частицы темной материи, которые могли подготовить среду для конденсации барионов. В стандартной космологической модели одной из компонент темной материи может быть легкая частица с массой 10^{-5} эВ (ак-

Таблица

Частица	Преонный состав	Электрический заряд
Позитрон	+++	+1
Нижний кварк	-□□	-1/3
Верхний антикварк	--□	-2/3
Электронное антинейтрино	□□□	0
W ⁺	+++000	+1

сион), практически не взаимодействующая с частицами обычной материи. Аксионы все еще не открыты из-за их сверхслабого взаимодействия с барионами и лептонами. Частицы темной материи (в нашем случае фамилоны) на конкретной стадии эволюции Вселенной в результате релятивистских фазовых переходов потеряли свою остаточную $U(1)$ -симметрию и образовали крупномасштабную структуру темной материи, тем самым подготовив среду для конденсации барионов, которая впоследствии стала крупномасштабной (уже барионной) структурой Вселенной. Только критический феномен (фазовый переход) мог создать фрактальную структуру в распределении возмущений плотности в темной материи.

Сделаем несколько замечаний, почему мы обращаемся к составной модели. В СМ физики элементарных частиц имеют место 12 частиц (24 с античастицами), которые образуют повторяющуюся картину, заставляя предположить, что они не являются фундаментальными частицами, а состоят из более мелких частиц — преонов. Известно, что до открытия на Большом адронном коллайдере (БАК) бозона Хиггса СМ не была полной [39, 40]. Мы знаем, что тяжелые кварки распадаются на самые легкие (u, d), так как во втором и третьем поколениях кварки тяжелее, чем в первом. Кварки третьего поколения (t, b) — тяжелее кварков второго (c, s). Подобная картина у лептонов. У электрона есть тяжелые партнеры — мюон и таон, и в СМ есть также три сорта нейтрино. Конечно, можно говорить о распаде тяжелых лептонов на легкие ($\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$), но такие распады до сих пор пока не наблюдались. Пределы для массы любой частицы могут быть найдены в последней публикации Particle Data Group [41]. Слабым намеком на то, что элементарные частицы

есть составные объекты, может быть радиоактивный распад ядер. Следовательно, возникает интерес рассмотреть составную (преонную) модель более детально. Следуя работам [42, 43], все элементарные частицы можно описать в преонной версии согласно таблице (ее полная версия есть в работе [6]). Выборочный пример представлен в таблице, в которой предполагается, что имеется несколько типов преонов: преон «+» с электрическим зарядом $+1/3$ и преон «0» без электрического заряда; антипреон «-» имеет электрический заряд $-1/3$, а нейтральный антипреон обозначен «□». Формально, уже предложена субпреонная модель, в которой даже преоны — составные частицы [44]. Кроме того, возникает естественный вопрос, почему в СМ имеются три поколения частиц, когда можно обойтись первым поколением, чьи частицы — наблюдаемая барионная Вселенная. В преонной модели второе и третье поколения частиц — возбужденные состояния частиц первого поколения (частицы второго и третьего поколения нестабильны). Тогда частицы второго и третьего поколений должны состоять из комбинаций тех же самых преонов и антипреонов, что и частицы первого поколения. Конечно, преоны и антипреоны есть фермионы. Те же самые строительные блоки могли образовать и глюоны. Преоны не наблюдались экспериментально, хотя попытки их наблюдать были. На внутреннюю структуру кварков, лептонов и калибровочных бозонов может указать, во-первых, четвертое поколение частиц, во-вторых, редкие распады лептонов $\mu^- \rightarrow e^- + \gamma$, также как и некоторые тонкие эксперименты (например, измерение магнитного момента мюона). Модернизация БАК привела к увеличению энергии протонного пучка и намного увеличила вероятность обнаружения событий на меньших масштабах, что и требуется для поиска преонов.

Вернемся к нашей версии темной материи. Авторы работ [45, 46] рассматривали темную материю как газ псевдоголдстоуновских бозонов, в котором может иметь место фазовый переход при сверхнизких температурах по сравнению с коллайдерными температурами. Псевдоголдстоуновские бозоны (в число которых входят фамилоны) возникают при нарушении непрерывной симметрии вакуума. Фамилонная симметрия — горизонтальная симметрия, нарушаемая конденсатом Хиггса [46]. Нарушение фамилонной симметрии проявляется в различных значениях масс частиц трех поколений. Для нас важен факт, что фамилоны обладают остаточной $U(1)$ -симметрией, которая имеет место, если некоторые голдстоуновские степени свободы не переда-

ются векторным состояниям. Свойства любых псевдоголдстоуновских бозонов (их четыре вида), так же как псевдоголдстоуновских бозонов фамилонного типа, зависят от реализации голдстоуновских мод. Эти моды могут возникнуть как от фундаментальных хиггсовских полей [46], так и от коллективных возбуждений гетерогенного непертурбативного вакуумного конденсата, который в нашем случае более сложный, чем кварк-глюонный конденсат. Такая возможность реализуется в теориях, в которых лептоны, кварки и калибровочные бозоны — составные объекты, т. е. в преонной модели элементарных частиц.

Рассмотрим простейшую бозон-фермион-преонную модель левокиральных кварков и лептонов. Основные элементы этой модели — киральные фермионные преоны U_L^α, D_L^α и скалярные преоны кваркового $\varphi_a^{i\alpha}$ и лептонного χ_l^α типов. Тогда в нашей модели внутренняя структура элементарных частиц будет следующей:

$$\begin{aligned} u_{La}^i &= U_L^\alpha \varphi_a^{i\alpha}, & u_{La}^i &= (u_L^i, c_L^i, t_L^i), \\ d_{La}^i &= D_L^\alpha \varphi_a^{i\alpha}, & d_{La}^i &= (d_L^i, s_L^i, b_L^i), \\ \nu_{Ll}^i &= U_L^\alpha \chi_l^\alpha, & \nu_{Ll}^i &= \nu_{Le}, \nu_{L\mu}, \nu_{L\tau}, \\ l_{Ll}^i &= D_L^\alpha \chi_l^\alpha, & l_{Ll}^i &= (e_L, \mu_L, \tau_L). \end{aligned} \quad (9)$$

В случае лептокварка (сильно взаимодействующая частица) наша модель дает

$$(LQ)_{al} = \varphi_a^{i\alpha} \chi_l^\alpha. \quad (10)$$

Заметим, что лептокварки (LQ) — это скалярные или векторные (гипотетические пока что) бозоны, несущие как барионное (B), так и лептонное (L) числа. В выражениях (9) и (10) i — цветовой индекс квантовой хромодинамики, $a, b, c = 1, 2, 3$ и $l, m, r = 1, 2, 3$ — числа кварковых и лептонных поколений, α — метакрасной индекс, соответствующий новому метакраснодинамическому взаимодействию, который связывает преоны в кварки и лептоны. Внутри кварков и лептонов метаглюонные поля $G_{\mu\nu}^\omega$ и скалярные преонные поля, $\varphi_a^{i\alpha}$ и χ_l^α , находятся в состоянии конфайнмента. По своей физической природе этот эффект подобен конфайнменту кварков и глюонов внутри адронов, что обеспечивает существование непертурбативных метаглюонных и преонных конденсатов. Эти конденсаты описываются следующей связью:

$$\langle 0 | (\alpha_{mc} / \pi) G_{\mu\nu}^\omega G_{\mu\nu}^{\mu\nu} | 0 \rangle \sim \Lambda_{mc}^4, \quad (11)$$

$$\langle 0 | \varphi_a^{i\alpha} \varphi_b^{i\alpha} | 0 \rangle = V_{ab} \sim -\Lambda_{mc}^2, \quad (12)$$

$$\langle 0 | \chi_l^\alpha \chi_m^\alpha | 0 \rangle = V_{lm} \sim -\Lambda_{mc}^2. \quad (13)$$

Здесь Λ_{mc} — энергетическая шкала преонного конфайнмента, V_{ab} , V_{lm} — конденсатные матрицы. Конденсаты (11) и (12) вместе с глюонными $\langle 0 | \alpha_c / \pi G_{\mu\nu}^a G_a^{\mu\nu} | 0 \rangle$ и кварковыми $\langle 0 | \bar{q}_L q_R + \bar{q}_R q_L | 0 \rangle$ конденсатами обеспечивают механизм создания масс кварков всех трех поколений.

В работе [47] мы иллюстрировали механизм создания масс для частиц всех трех поколений специальной фигурой, там же мы обсуждали детально структуру конденсатных матриц. В рамках этой теории темная материя — система фамилонных коллективных возбуждений гетерогенного непертурбативного вакуума, состоящая из трех подсистем: фамилонов верхнекваркового типа, фамилонов нижнекваркового типа, фамилонов лептонного типа. Малые массы фамилонов есть результат сверхслабого взаимодействия голдстоуновских полей с непертурбативными вакуумными конденсатами. Значения этих масс ограничиваются астрофизическими и лабораторными данными: $m_{astrophys} \sim 10^{-5} - 10^{-3}$ эВ; $m_{laborat} < 10$ эВ.

На стадиях космологической эволюции, далеких по времени от кварконизации и лептогенеза ($T \ll \ll \Lambda_{mc}$) тяжелые нестабильные фамилоны уже отсутствуют. Судьба же каждой подсистемы фамилонов низкой энергии критически зависит от знака квадрата массы покоя, создаваемой взаимодействием фамилонов с кварковыми конденсатами. Эффект образования масс фамилонов формально соответствует появлению массовых членов в лагранжиане голдстоуновских полей. Из общего рассмотрения можно предположить, что массовые члены могут возникать как с «правильными», так и с «неправильными» знаками. Знак массовых членов предопределяет судьбу остаточной симметрии голдстоуновских полей. В случае неправильного знака, при низких температурах $T < T_c \sim m_{familons} \sim \sim 0.1 - 10^5$ К, образуется голдстоуновский конденсат, когда симметрия фамилонного газа спонтанно нарушается. Как показано в наших работах [6, 47], для комплексного скалярного поля квадрат масс был отрицательным как для верхней, так и для нижней кварк-фамилонной подсистемы:

$$\begin{aligned} m_{f(u)}^2 &= -\frac{1}{24u^2} \langle 0 | \frac{\alpha_s}{\pi} G_{\mu\nu}^n G_n^{\mu\nu} | 0 \rangle \frac{(m_t - m_c)^2}{m_c m_t}, \\ m_{f(d)}^2 &= -\frac{1}{24u^2} \langle 0 | \frac{\alpha_s}{\pi} G_{\mu\nu}^n G_n^{\mu\nu} | 0 \rangle \frac{(m_b - m_s)^2}{m_b m_s}. \end{aligned} \quad (14)$$

Здесь u — среднее значение скалярного поля в конденсате. Это означает, что при $T < T_c \sim |m_f|$ псевдоголдстоуновский вакуум неустойчив. При $T = T_c$ в газе псевдоголдстоуновских бозонов дол-

жен происходить релятивистский фазовый переход в состояние со спонтанно нарушенной симметрией $U(1)$. Подсистема из лептонных фамилонов также неустойчива и в ней происходит релятивистский фазовый переход, но здесь мы сталкиваемся с неизученным лептонным конденсатом (или возможно с лепто-кварковым конденсатом).

Фазовый переход в космологическом фамилонном газе — фазовый переход первого рода с широкой областью сосуществования фаз. Цифровое моделирование такого фазового перехода показало, что чередование высокосимметричной и низкосимметричной фаз имело место во Вселенной с контрастом плотности $\delta\rho/\rho \sim 0.1$. В период сосуществования фаз [47] характеристический масштаб такой блочно-фазовой структуры определяется размером горизонта на время релятивистского фазового перехода, т. е., другими словами, может образоваться крупномасштабная структура темной материи. Поскольку имеются три фамилонные подсистемы, наша модель дает возможность реализовать три релятивистских фазовых перехода. Следовательно, часть темной материи, состоящая из псевдоголдстоуновских бозонов фамилонного типа, есть многокомпонентная гетерогенная система, эволюционирующая сложным термодинамическим путем. Ее состав содержит девять частиц с различными массами. В течение эволюции эта система подверглась трем релятивистским фазовым переходам, которые имели место при различных температурах. Конечно, термодинамическая температура фамилонного газа может и не совпадать с термодинамической температурой других подсистем Вселенной. В современную эпоху этот факт может проявить себя в том, что температура фамилонного газа (как части темной материи) может отличаться от температуры реликтового излучения.

Таким образом, предложенная модель однозначно связана с преонной моделью элементарных частиц, которая имеет хорошие перспективы экспериментальной проверки на коллайдерах. Нет сомнений, что нашей модели может быть дан экспериментальный статус только после открытия фамилонов. Авторы работы [48] уже обсуждали возможный поиск составных частиц на БАК до его модернизации на основании изучения двойной мюонной (\dimuon) моды при pp -столкновениях на компактном мюонном солениоде (CMS). После приобретения экспериментального статуса наша модель будет неизбежно принята в космологии, так как проясняется не только роль поколений частиц, но и их количество. Для возможности структурирования Вселенной необхо-

димы, по крайней мере, три поколения частиц: первое поколение частиц дает наблюдаемый барионный мир, второе и третье поколения (их наличие) дают всю или часть темной материи. В этой модели второе и третье поколения есть возбуждение первого поколения. Только в преонной модели частиц фрактальность в распределении материальных компонент Вселенной, обусловленная фазовыми переходами, найдет естественное объяснение. В преонной модели три выделенные масштаба Вселенной могут также найти естественное объяснение (галактики, скопления галактик и сверхскопление галактик), поскольку фазовые переходы происходили на разных красных смещениях.

Напомним, что аксионы возникли в хорошо мотивированном расширении СМ, чтобы решить давно стоящую СР-проблему. Они являются также кандидатами на роль темной материи вместе со слабо взаимодействующей массивной частицей (WIMP) из суперсимметричных теорий (нейтралино). В Калифорнийском университете были предприняты попытки решения проблемы темной материи и опубликована «Белая книга» о результатах [49]. В некоторых теориях [50] фаворитом является смешанная нейтрино-аксионная модель (этой точки зрения придерживается и автор данного обзора). Отметим, что большие усилия прикладываются к поиску аксионов. Уже создана аксионная обсерватория [51], так же как и Центр изучения аксионов [52] (напомним еще раз, что фамилонны — это сорт аксионов).

Вернемся к составной модели или, более точно, к вероятному обнаружению скалярного лепто-кварка на БАК (см. формулу (10)). Недавно авторы работы [53] отметили, что CMS-коллаборация наблюдала аномальные события в pp -столкновениях при $\sqrt{s} = 8$ ТэВ, которые можно интерпретировать, как образование скалярного лепто-кварка (трехцветного бозона). Разумеется, этот в высшей степени интересный результат вызвал шквал статей на эту тему, поскольку наличие лепто-кварков есть простейшее расширение СМ. Они также появляются в таких расширениях СМ, как Великое объединение $SU(5)$ [54], в моделях техницвета [55] и, как уже отмечалось, в составных моделях [56].

Здесь мы ограничимся отчетом только самой CMS-коллаборации [57] и работой [58], автор которой исследовал возможное обнаружение лепто-кварков на БАК. Но заметим, что в работе [47] мы также отмечали вероятное обнаружение лепто-кварков. Авторы работы [53] даже оценили массу лепто-кварка ($m_{LQ} \approx 650$ ГэВ) как возможного кандидата для объяснения наблюдаемых явлений в CMS-эк-

перименте [56] и обсудили модели, в которых лепто-кварк распадается на частицы темной материи и лептонные джеты. Важное замечание сделано в работе [59]. Обнаруженные в эксперименте «IceCube» нейтрино с энергией $\sim 10^{15}$ эВ могут тестировать или могут быть даже связаны с лепто-кварками, что конечно — интригующий момент (на такие нейтрино есть ссылка в Заключение).

Интересные указания на возможный след темной материи был недавно найден и в работах [60,61]. Обнаруженная рентгеновская линия (3.55 кэВ) не совпадает ни с одной известной спектральной линией любого барионного атома. В этом диапазоне их просто нет. Аксионоподобная частица (ее распад в магнитном поле) может обеспечить простейшее объяснение наблюдаемой линии: это может быть распад правого нейтрино на левое нейтрино и гамма-квант [62]. Но если может реализоваться атомная темная материя, то она может естественно объяснить эту линию без использования WIMP-парадигмы. Рентгеновская линия 3.55 кэВ, например, может быть линией сверхтонкого расщепления темного водорода [63] — аналог линии 21 см основного состояния атомарного водорода:

$$\Delta E = \frac{8}{3} (\alpha')^4 \frac{m_e^2 m_p^2}{m_h^3} = 3.55 \text{ кэВ}. \quad (15)$$

Здесь $m_h = m_e + m_p$ и m_h, m_e, m_p — массы темного водорода, темного электрона и темного протона. Авторы работы [63] предполагают, что масса темного водорода m_h может лежать в области 350–1300 ГэВ, постоянная тонкой структуры α' — в области 0.1–0.6, а $m_p/m_e = 10^2$ – 10^4 . Эти величины удовлетворяют уравнению (15). Уже существует несколько интерпретаций этой рентгеновской линии [64]. Если линия 3.55 кэВ — действительно линия сверхтонкого расщепления темного водорода, то естественно ожидать обнаружения линий L_α и H_α темного водорода (так же как и других сильных линий). Из простейших энергетических оценок энергия L_α -перехода водорода будет около 6.17 ГэВ, энергия H_α -перехода около 1.14 ГэВ. Энергии аннигиляции темного электрона и темного позитрона трудно предсказать, но они могут быть около 308.5 ТэВ в случае двухфотонной аннигиляции. Для темного позитрония (чисто кулоновская система) наши оценки дают: $L_\alpha^{Ps} \approx 3.1$ ГэВ и $H_\alpha^{Ps} \approx 0.58$ ГэВ. Сверхтонкий переход в основном состоянии ($1^3S_1 \rightarrow 1^1S_0$) имеет энергию около 508.3 кэВ. Здесь возникает любопытная возможность объяснить эксцесс в гамма-спектре (1–3 ГэВ) от галактического центра L_α -линией темного по-

зитрония. L_α -линию обычного позитрония (2431 \AA) невозможно наблюдать в направлении галактического центра нашей Галактики из-за сильного поглощения в УФ-диапазоне [65]. Вероятно, можно ожидать развития спектроскопии темной среды и, как следствие, негравитационного обнаружения темной матери. Здесь ключевую роль могут играть темные атомы — позитрониум и монополиум [66, 67]. В этой связи важно напомнить о «забытых» магнитных зарядах, которые могли образовать магнитный атом — монополиум (g^+g^-) и даже своеобразный магнитный мир в ранние космологические эпохи [67].

Недавно искусственные магнитные заряды были обнаружены в лабораториях [68, 69], хотя такая их интерпретация и не была однозначной. Но, как уже отмечалось, в ранние космологические эпохи простейший магнитный атом — монополиум — мог быть образован. Если энергия двухфотонной аннигиляции легкого магнитного атома равна примерно 2.4 ГэВ, то энергия его орто-пара-перехода составляет около 282 кэВ. Вероятно, вновь образовавшиеся легкие (дираковские) реликтовые магнитные атомы могут быть наблюдаемыми в центре галактик и их скоплений, образуя рекомбинационно-аннигиляционный спектр. Существует также возможность рождения магнитных зарядов (g^+g^-) в сверхсильных магнитных полях в магнитосферах молодых пульсаров. Аннигиляция тяжелых (хофт-поляковских) магнитных монополей могла образовать космические лучи сверхвысоких энергий [67].

Отметим важные работы в России. В апреле 2015 г. сотрудниками ИЯИ (Москва) и ОИЯИ (Дубна), а также ряда российских научных организаций, входящих в коллаборацию «Байкал», был развернут и введен в эксплуатацию уникальный экспериментальный комплекс — глубоководный нейтринный телескоп «Дубна» на озере Байкал. Он является первым кластером создаваемого нейтринного телескопа Baikal-GVD (Gigaton Volume Detector). Черенковский детектор предназначен для исследования потока нейтрино высоких энергий. И, конечно, регистрация тяжелых монополей здесь также предусмотрена. Обзор их ранних результатов можно найти в работах [70, 71]. Нельзя не упомянуть о другом важном эксперименте, теперь уже в ЦЕРНе, тестовый сеанс установки которого был проведен в июле 2016 г. Здесь речь идет о поиске массивного фотона, который может возникнуть в темном секторе Вселенной. Для непосредственного поиска массивного фотона установку запустят уже в 2016 г. [72].

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В экспериментах по темной энергии динамика последней должна быть обнаружена, $\rho_\Lambda = \rho_\Lambda(t)$, но явный результат может быть виден только на «больших» красных смещениях. Например, нужно сравнить значения темной энергии при $z = 1$ и $z = 2$ (предсказанная разница — около 4). При малых красных смещениях, $z < 1$, разница в значениях плотности вакуумной энергии будет практически необнаружима. Эффекты присутствия вакуумной энергии могут быть измерены в лаборатории (атомная интерферометрия [73]). Некоторые эффекты, связанные с вакуумной эволюцией, уже обсуждались в работе [74], в которой предложена бегущая Λ 'CDM-космология и дан новый взгляд на космологическую инфляцию и на огромную энтропию от распада первичного вакуума.

Возникает непростой вопрос о вакуумной стабильности. В работе [25] мы ввели в СМ условие вакуумной стабильности. Взаимная компенсация положительных и отрицательных вкладов в плотность вакуумной энергии в режиме суперсимметрии запрещена условием стабильности. При массе Хиггса $m_H \approx 125 \text{ ГэВ}$ для стабильности вакуума вплоть до планковского масштаба требуется новая физика [75], в которой должна реализоваться асимптотическая безопасность вакуума СМ [76]. Абсолютно стабильный вакуум мог бы возникнуть, если бы масса Хиггса была $m_H > 129 \text{ ГэВ}$ [77], и, вероятно, мы живем в метастабильном вакууме. Отметим, что прибор DESI (Dark Energy Spectroscopic Instrument) будет установлен в США в национальной обсерватории Kitt Peak к 2018 г. для исследования влияния темной энергии на расширение Вселенной. Будут получены оптические спектры десятков миллионов галактик и квазаров, охватывая «ближнюю» Вселенную до 10^9 световых лет с трехмерным картированием. Современная техника уже позволяет это сделать. Динамической релаксации темной энергии (доказательство концепции) была посвящена работа [78], в которой текущее ускоренное расширение Вселенной также реализуется.

В экспериментах по темной материи мы ожидаем подтверждения нейтрально-аксионовой (смешанной) модели темной материи при наличии некоторых ограничений [79]. Вероятно, нейтрально и аксионы — основные компоненты, хотя правые нейтрино должны быть в составе темной материи, так же как и темные атомы. Вся загадка состоит в процентном составе компонент темной материи. Высока вероятность обнаружения следующего фундаменталь-

ного уровня материи. Составные модели частицы Хиггса обеспечивают элегантное решение проблемы иерархии. Для унификации калибровочной связи создана даже составная модель правого t -кварка [80]. Как уже отмечалось, СМ не является окончательной версией полного описания природы, и, скорее всего, требуется новая физика для объяснения состава темной материи. Следует ожидать также развития спектроскопии темных атомов — позитрониума, монополиума и других.

Идентификация частиц темной материи имеет высочайший научный приоритет. В нескольких десятках экспериментов по всему миру ищутся частицы темной материи, от эксперимента CDEX в Китае до эксперимента COUPP-60 Чикагского университета в Канаде. Эти эксперименты делятся на эксперименты прямого и косвенного обнаружения частиц темной материи. Эксперимент коллаборации CoGeNT даже имеет, пока что не подтвержденный, результат обнаружения WIMP с массой около 10 ГэВ [81]. Массы частиц, составляющих темную материю, могут лежать в области от 10^{-15} до 10^{15} ГэВ, а сечение взаимодействия с нуклонами и сечение их аннигиляции в частицы СМ может занимать область 10^{-76} – 10^{-41} см².

Вообще-то нельзя забывать и о проверке гравитации, при которой могут возникнуть неожиданности. Прояснение природы темных компонент Вселенной — главный научный вызов. В настоящее время и это есть некий тест нашего понимания физики высоких энергий. Все эксперименты как с темной энергией, так и с темной материей — очень затратные, и только международные коллаборации могут осуществить их на высоком уровне. Мы имеем еще несколько новых интересных проектов: для более «чистых» экспериментов с бозоном Хиггса будут созданы хиггсовские фабрики [82], готовятся эксперименты для поиска частиц с дробным зарядом [83]. Повторюсь, что в программу лаборатории нейтринной астрофизики высоких энергий (коллаборация «Байкал») входит также поиск магнитных зарядов (монополей) [70]. Интригующая новость пришла от коллабораций ATLAS и CMS: на БАК обнаружены бозоны с энергией 750 ГэВ («бозоны Гомера») в виде эксцесса в двухфотонном канале [84]. Не менее интересна другая новость о нейтрино высоких энергий (37 событий с $E > 60$ ТэВ и 3 события с $E > 10^{15}$ эВ). Эти события обнаружены коллаборациями Ice Cube и Antares [85]. Китайский электрон-позитронный коллайдер (БЕРСИ) выдал мировой рекорд по светимости, порядка 10^{33} см⁻²·с⁻¹ (см. коллайдерный новостной портал по частицам

www.interactions.org). Окончательно заметим, что наличие войдов в крупномасштабном распределении темной материи, предсказанное нами в работе [47] было недавно обнаружено в работе [86].

Автор благодарен Г. М. Верешкову за плодотворные дискуссии и совместные работы. Автор также благодарит рецензентов за важные замечания.

ЛИТЕРАТУРА

1. A. Vilenkin and J. Zhang, arXiv:1403.1599.
2. V. Burdyuzha, O. Lalakulich, Yu. Ponomarev, and G. Vereshkov, Phys. Rev. D **55**, R7340 (1997).
3. P. Ade, N. Aghanim, M. Arnaud et al., accepted by A&A, arXiv:1606.05120.
4. I. Dymnikova, arXiv:gr-qc/0010016.
5. В. Бурдюжа, УФН **180**, 439 (2010); *Астроном. Ж.* **89**, 1 (2012); V. Burdyuzha, J. Mod. Phys. **4**, 1185 (2014).
6. В. Бурдюжа, *Астроном. Ж.* **91**, 423 (2014); V. Burdyuzha, J. Mod. Phys. **5**, 1963 (2014).
7. A. Starobinskiy, Phys. Lett. B **91**, 99 (1980).
8. F. Queiroz, arXiv:1605.08788.
9. M. J. Mortonson, D. H. Weinberg, and M. White, *Particle Physics Booklet*, Springer, Berlin (2014).
10. S. Weinberg, Rev. Mod. Phys. **61**, 1 (1989).
11. G. Hooft, arXiv:hep-th/0003004.
12. E. Verlinde, J. High Energy Phys. **1104**, 29 (2011).
13. A. Einstein, *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte* (1917), p. 142.
14. A. Friedmann, Z. Phys. **10**, 377 (1922).
15. J. Luminet, *Essais de Cosmologie*, Seuil, Paris (1997), Letter of G. Lemaitre to A. Einstein (3 Oct. 1947).
16. V. Fock, Z. Phys. **75**, 622 (1932).
17. A. Ali and A. Tawfik, arXiv:1301.3508.
18. J. Maldacena, Adv. Theor. Math. Phys. **2**, 231 (1998).
19. C. Balazs and I. Szapidi, arXiv:hep-th/0603133.
20. J. Bekenstein, Phys. Rev. D **7**, 2333 (1973).
21. S. Hawking, Comm. Math. Phys. **43**, 199 (1975).
22. T. Jacobson, Phys. Rev. Lett. **75**, 1260 (1995).
23. R. Bousso, TASI Lectures **40**, 607 (2008).

24. W. Fischler and L. Susskind, arXiv:hep-ph/9806039.
25. V. Burdyuzha and G. Vereshkov, *Astrophys. Space Sci.* **305**, 235 (2006).
26. Я. Б. Зельдович, *УФН* **133**, 479 (1981).
27. E. Komatsu, K. M. Smith, J. Dunkley et al., *Astrophys. J. Suppl. Ser.* **192**, 18 (2011).
28. А. Д. Сахаров, *ДАН* **12**, 1040 (1968).
29. J. Frieman, M. Turner, and D. Huterer, *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* **46**, 385 (2008).
30. N. Afshordi, arXiv:0807.2639.
31. A. Narimani, D. Scott, and N. Afshordi, arXiv:1406.0479.
32. M. Trodden, arXiv:1212.6399.
33. J.-F. Zhang, J.-J. Geng, and X. Zhang, *J. Cosmol. Astropart. Phys.* **10**, 044 (2014).
34. E. Calloni, S. Caprara, M. De Laurentis et al., arXiv:1409.6974.
35. F. Abdala, J. Annis, D. Bacon et al., arXiv:1209.2451.
36. B. Dinda and A. Sen, arXiv:1504.03920.
37. H. Ziaeeepour, arXiv:1411.0620.
38. A. Omont, P. Petitjean, S. Guilloteau et al., *Nature* **382**, 428 (1996).
39. G. Aad, B. Abbott, J. Abdallah et al., *Phys. Lett. B* **710**, 49 (2012).
40. S. Chatrchyan, V. Khachatryan, A. Sirunyan et al., *Phys. Lett. B* **710**, 26 (2012).
41. J. Beringen, J. Arguin, R. Barnett et al., *Phys. Rev. D* **86**, 01001 (2012).
42. M. Shupe, *Phys. Lett.* **86**, 87 (1979).
43. H. Harari, *Phys. Lett.* **86**, 83 (1979).
44. O. E. Evnin, arXiv:hep-th/9711433.
45. D. Groom, M. Aguilar-Benitez, C. Amsler et al., *Europ. Phys. J. C* **15**, 1 (2000).
46. Z. Berezhiani, A. Sakharov, and M. Khlopov, *Nucl. Phys.* **55**, 1918 (1992).
47. V. Burdyuzha, G. Vereshkov, O. Lalakulich, and Yu. Ponomarev, *Astron. Astrophys. Trans.* **23**, 453 (2004).
48. G. Bayatian, A. Kumar, S. Beri et al., *J. Phys. G* **34**, 995 (2007).
49. S. Malik, Ch. McCabe, H. Araujo et al., arXiv:1409.4075.
50. K. Bae, H. Baer, and A. Lessa, arXiv:1306.2986.
51. E. Armengaud, F. Avignone, M. Betz et al., arXiv:1401.3233.
52. J. Kim, Y. Semertzidis, and S. Tsujikawa, arXiv:1409.2497.
53. F. Queiroz, K. Sinha, and A. Strumia, *Phys. Rev. D* **91**, 035006 (2015).
54. H. Georgi and S. Glashow, *Phys. Rev. Lett.* **32**, 438 (1974).
55. E. Farhi and L. Susskind, *Phys. Rep.* **74**, 277 (1981).
56. B. Schrempp and F. Schrempp, *Phys. Lett. B* **153**, 101 (1985).
57. CMS Collaboration, CMS PAS EXO-12-04.
58. B. Gripaios, *J. High Energy Phys.* **2**, 045 (2010).
59. B. Dutta, Yu. Gao, T. Li et al., arXiv:1505.00028.
60. E. Bulbul, M. Markevitch, A. Foster et al., arXiv:1402.2301.
61. A. Boyarsky, O. Ruchayskiy, D. Iakubovskiy, and J. Franse, arXiv:1402.4119.
62. M. Viel, Talk on workshop *Cosmology from Baryons at High Redshifts*, 18–21 August (2014), Trieste (Italy); arXiv:1506.05476.
63. J. Cline, Ya. Farzan, Z. Liu et al., *Phys. Rev. D* **89**, 121302 (2014).
64. B. Dutta, I. Gogoladze, R. Khalid, and Q. Shafi, arXiv:1407.0863.
65. V. Burdyuzha, V. Kauts, and N. Yudin, *Astron. Astrophys.* **255**, 459 (1992).
66. V. Burdyuzha and V. Charugin, *J. Mod. Phys.* **6**, 1833 (2015).
67. В. В. Бурдюжа, ЖЭТФ (статья направлена в редакцию), 2016.
68. M. Ray, E. Ruokkoski, S. Kandel et al., *Nature* **505**, 657 (2014).
69. G. Chen, arXiv:1602.02230.
70. Г. В. Домогацкий, *УФН* **181**, 984 (2011).
71. A. D. Avrorin, A. V. Avrorin, V. M. Aynutdinov et al., arXiv:1512.01198.
72. J. L. Feng, B. Fornal, I. Galon et al., arXiv:1608.03591.
73. R. Adler, H. Muller, and M. Perl, arXiv:1101.5262.

74. J. Sola and A. Gomez-Valent, *Int. J. Mod. Phys. D* **24**, 1541003 (2015).
75. W. Chao, M. Gonderinger, and M. Ramsey-Musolf, arXiv:1210.0491.
76. F. Bezrukov, M. Kalmykov, B. Kniehl, and M. Shaposhnikov, arXiv:1205.2893.
77. G. Altarelli, arXiv:1206.1476.
78. L. Alberte, P. Creminelli, A. Khmel'nitsky et al., arXiv:1608.05715.
79. E. Dudes, L. Heurtire, and Y. Mambrini, arXiv:1404.1927.
80. J. Barnard, T. Gherghetta, T. Ray, and A. Spray, arXiv:1409.7391.
81. J. Davis, Ch. McCabe, and C. Boehm, arXiv:1405.0495.
82. S.-E. Ge, H.-J. He, and R.-Q. Xiao, arXiv:1603.03385.
83. G. Bashindzhagyan and N. Korotkova, arXiv:1601.04004.
84. P. Ko and T. Nomura, arXiv:1601.02490.
85. J. Avva, K. Bechtol, T. Chesebro et al., arXiv:1605.03525.
86. L. Xie, L. Gao, and Qi Guo, arXiv:1401.6459.