

его периферию. Эти струи проходят, не останавливаясь, сквозь горячее газовое гало и падают на диск. Согласно современным моделям [23], холодные потоки должны доминировать в маломассивных (относительно тёмной массы скоплений и групп галактик) гало на всех красных смещениях, начиная с  $z = 5-6$ . Это означает, что эффективной аккреции газа извне непосредственно на *центр* диска не было ни на каком этапе эволюции галактики. Таким образом, сценарий построения галактических дисков "inside-out" в его классической формулировке конфликтует сейчас не только с наблюдениями, но и с космологической теорией. Явно наступает время для его кардинального пересмотра.

Наши исследования дисков галактик частично поддержаны грантами РФФИ 07-02-00792 и 07-02-00229.

## Список литературы

1. Makarov D, Karachentsev I *Proc. Int. Astron. Union* **3** 370 (2008); arXiv:0801.0043
2. Караченцев И Д, Макаров Д И *Астрофиз. бюлл.* **63** 320 (2008) [Karachentsev I D, Makarov D I *Astrophys. Bull.* **63** 299 (2008)]; arXiv:0812.0689
3. Bell E F, de Jong R S *Astrophys. J.* **550** 212 (2001)
4. Засов А В, Хоперсков А В, Тюрина Н В *Письма в Астрон. журн.* **30** 653 (2004) [Zasov A V, Khoperskov A V, Tyurina N V *Astron. Lett.* **30** 593 (2004)]
5. Засов А В и др. *Письма в Астрон. журн.* **28** 599 (2002) [Zasov A V et al. *Astron. Lett.* **28** 527 (2002)]
6. Bizyaev D, Mitronova S *Astrophys. J.* **702** 1567 (2009)
7. Засов А В, Хоперсков А В, Сабурова А С, готовится к печати
8. Dutton A A et al. *Astrophys. J.* **654** 27 (2007)
9. Naim A et al. *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **274** 1107 (1995)
10. Paunzen E, Netopil M *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **371** 1641 (2006)
11. Wyse R F G *Proc. Int. Astron. Union* **4** 179 (2009); arXiv:0809.4516
12. Zemp M *Mod. Phys. Lett. A* **24** 2291 (2009)
13. Kazantzidis S et al. *Astrophys. J.* **700** 1896 (2009)
14. Tosi M, astro-ph/0308463
15. Feltzing S, Holmberg J, Hurley J R *Astron. Astrophys.* **377** 911 (2001)
16. Jørgensen B R *Astron. Astrophys.* **363** 947 (2000)
17. Chiappini C, Matteucci F, Gratton R *Astrophys. J.* **477** 765 (1997)
18. Gil de Paz A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **173** 185 (2007)
19. Thilker D A et al. *Astrophys. J. Suppl.* **173** 538 (2007)
20. Azzollini R, Beckman J E, Trujillo I *Astron. Astrophys.* **501** 119 (2009)
21. Binney J, Nipoti C, Fraternali F *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **397** 1804 (2009)
22. Dekel A, Birnboim Y *Mon. Not. R. Astron. Soc.* **368** 2 (2006)
23. Dekel A et al. *Nature* **457** 451 (2009)

PACS numbers: **95.35.+d, 95.36.+x, 98.80.Cq**  
DOI: 10.3367/UFNr.0180.201004j.0439

## Тёмные компоненты Вселенной

В.В. Бурдюжа

### 1. Тёмная энергия

Новой космологической парадигмой является мультиверс — вечно растущий фрактал, состоящий из большого числа частей (вселенных) с различными константами связи, массами частиц и другими константами природы. Наша Вселенная, возраст которой около

14 млрд лет, — одна из них. За этот период Вселенная прошла тернистый путь: инфляция, разогрев (reheating), эра излучения, эра вещества и вот теперь вакуум-доминированная эра. Вселенная расширяется с ускорением начиная с момента, когда красное смещение достигло значения  $z \sim 0,7$  (при больших  $z$  расширение происходило с замедлением)<sup>1</sup>. Не менее любопытен состав нашей Вселенной: барионный компонент составляет всего 4% от полной плотности  $\Omega_{\text{tot}}$ , тёмная материя ( $\Omega_{\text{DM}}$ ) — 23% полной плотности, тёмная энергия ( $\Omega_{\text{DE}}$ ) — около 73% полной плотности:

$$\Omega_{\text{tot}} = \Omega_{\text{b}} + \Omega_{\text{DM}} + \Omega_{\text{DE}} = 0,04 + 0,23 + 0,73,$$

$$\Omega_i = \frac{\rho_i}{\rho_{\text{cr}}}, \quad \rho_{\text{cr}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N},$$

где  $H_0$  — постоянная Хаббла,  $G_N$  — гравитационная постоянная.

К сожалению, мы до сих пор точно не знаем физической природы этих компонент, и поэтому они для нас — тёмные, хотя существует более десяти моделей для каждой из них. С очень большой вероятностью можно предполагать, что тёмная энергия — это вакуум. В этом случае космологическая константа,  $\Lambda$ -член, вакуумная энергия и тёмная энергия — понятия эквивалентные. Но в любом случае лучше обратиться к истокам, т.е. к уравнениям Эйнштейна

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

Эйнштейн ввёл  $\Lambda$ -член как свойство пространства. Если поставить  $\Lambda$ -член в правую часть уравнений, то он уже будет представлять собой вид энергии, который и был назван тёмной энергией:

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

Современное значение плотности тёмной энергии (DE)

$$\rho_{\text{DE}} = \rho_{\Lambda} \sim 10^{-47} \text{ ГэВ}^4 \approx 0,7 \times 10^{-29} \text{ г см}^{-3},$$

если  $H_0 = 70,5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ . (3)

В планковскую эпоху плотность этого вида энергии имела значение

$$\rho_{\Lambda} \sim 2 \times 10^{76} \text{ ГэВ}^4 (\approx 0,5 \times 10^{94} \text{ г см}^{-3})$$

при  $M_{\text{Pl}} = 1,2 \times 10^{19} \text{ ГэВ}$ , (4)

которое на 123 порядка превышает плотность наблюдаемой тёмной энергии. Эта необъяснимая разница в 123 порядка породила кризис физики, хотя, конечно, было сделано много предложений по его преодолению (см. обзоры [1–5])<sup>2</sup>.

Здесь уместно напомнить определение вакуума и его свойства. В классической физике вакуум — мир без частиц и этот мир — плоский, в квантовой физике — это вакуумные конденсаты, возникающие в процессе релятивистских фазовых переходов, в геометрической физике вакуум — это состояние, в котором геометрия простран-

**В.В. Бурдюжа.** Астрокосмический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, Москва, РФ  
E-mail: burdyuzh@asc.rssi.ru

<sup>1</sup> Сейчас красное смещение  $z = 0$ , в момент рождения Вселенной  $z = \infty$ .

<sup>2</sup> Свежий взгляд на проблему космологической константы дан в недавнем обзоре [5].

ства-времени не деформирована. В более общем виде определение вакуума следующее: вакуум — это стабильное состояние квантовых полей без возбуждения волновых мод (неволновые моды представляют собой конденсаты). Уравнение состояния вакуума  $p = -\rho$ . Отсюда, обозначая  $w \equiv p/\rho$ , имеем:

- если  $w = -1$ , то это собственно вакуум;
- если  $w > -1$ , то это квинтэссенция (скалярное поле);
- если  $w < -1$ , то это фантомная энергия.

Последние наблюдения космического аппарата WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) [6] дают оценку  $-0,14 < 1 + w < 0,12$  на уровне достоверности (CL) 95 %. В этой же работе на основе измерений авторов получено новое (более точное) значение постоянной Хаббла:  $H_0 \sim 70,5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$ .

Вакуум во Вселенной (как следует из его определения) представляет собой комбинацию большого числа взаимно связанных вакуумных подсистем: гравитационный конденсат, хиггсовский конденсат, кварк-глюонный конденсат. Другие конденсаты с энергиями в области  $265 \text{ ГэВ} < E < 10^{19} \text{ ГэВ}$ , к сожалению, не изучены. Вопрос состоит в том, как они скоординированы и с каким весом входят в полную энергию вакуума, которую можно определить как

$$A = A_{\text{QF}} + A_{\text{GVC}}, \quad (5)$$

где  $A_{\text{QF}}$  — конденсаты квантовых полей,  $A_{\text{GVC}}$  — гравитационный вакуумный конденсат — новая вакуумная структура [7], включающая в себя топологические дефекты с различной размерностью: кротовые норы (трёхмерные дефекты), микромембраны (двумерные дефекты), микроструны (одномерные дефекты) и точечные дефекты-монополи. Конечно, микродефекты с более высокой размерностью также присутствуют в этом конденсате. Трёхмерные микродефекты (кротовые норы) дают явный вклад в полную плотность энергии вакуума, т.е. ренормируют  $A$ -член:

$$A = A_0 - \frac{\kappa \hbar^2 c_3^2}{768\pi^2}, \quad (6)$$

здесь  $\kappa$  — гравитационная константа в единицах, в которых  $c = 1$ ,  $\hbar = 1$ ;  $c_3$  — коэффициент параметризации функции  $\mu(a)$  (подробности можно найти в работе [7]). Формула (6) даёт первое указание на наличие компенсационного механизма в вакууме нашей Вселенной, так как трёхмерные топологические дефекты уменьшают  $A$ -член. Конденсаты других квантовых полей при понижении температуры также вносили отрицательные вклады в положительную плотность энергии вакуума (Вселенная теряла симметрию при понижении температуры, образуя конденсаты). Компенсационная гипотеза впервые, по-видимому, была высказана А. Долговым.

Следует отметить глубокий смысл наблюдаемой "малости" космологической константы. Вселенная с большим отрицательным  $A$  никогда не станет макроскопической (для того чтобы придать физический смысл этим утверждениям можно привлечь к рассмотрению  $A$ -антигравитацию). Во вселенной с большим положительным  $A$  будут отсутствовать сложные ядерные, химические и биологические структуры (поскольку мало времени для их образования).

Но продолжим обсуждение компенсационной гипотезы и следов релятивистских фазовых переходов,

вероятная цепочка которых могла быть следующей:

$$\begin{aligned} P &\xrightarrow{10^{19} \text{ ГэВ}} D_4 \times [\text{SU}(5)]_{\text{SUSY}} \xrightarrow{10^{16} \text{ ГэВ}} \\ &\xrightarrow{10^{16} \text{ ГэВ}} D_4 \times [\text{U}(1) \times \text{SU}(2) \times \text{SU}(3)]_{\text{SUSY}} \xrightarrow{\sim(10^5-10^{10}) \text{ ГэВ}} \\ &\xrightarrow{\sim(10^5-10^{10}) \text{ ГэВ}} D_4 \times \text{U}(1) \times \text{SU}(2) \times \text{SU}(3) \xrightarrow{100 \text{ ГэВ}} \\ &\xrightarrow{100 \text{ ГэВ}} D_4 \times \text{U}(1) \times \text{SU}(3) \xrightarrow{0,15 \text{ ГэВ}} D_4 \times \text{U}(1), \quad (7) \end{aligned}$$

где только два последних фазовых перехода могут быть конкретизированы, так как они хорошо исследованы (это ускорительные энергии):

$$A_{\text{QF}} = A_{\text{EW}} + A_{\text{QCD}}; \quad \rho_{\text{QF}} = -\rho_{\text{EW}} - \rho_{\text{QCD}}. \quad (8)$$

Электрослабый (EW) фазовый переход происходил при температуре около 100 ГэВ и сопровождался появлением хиггсовского конденсата, который также внёс свой вклад в уменьшение энергии вакуума:

$$\rho_{\text{EW}} = -\frac{m_{\text{H}}^2 m_{\text{W}}^2}{2g^2} - \frac{1}{128\pi^2} (m_{\text{H}}^4 + 3m_{\text{Z}}^4 + 6m_{\text{W}}^4 - 12m_{\text{t}}^4). \quad (9)$$

Первый член в правой части (9) — плотность энергии квазиклассического хиггсовского конденсата, второй — поляризация вакуума квантовыми полями,  $m_{\text{H}}$ ,  $m_{\text{Z}}$ ,  $m_{\text{W}}$  и  $m_{\text{t}}$  — соответственно массы бозона Хиггса, Z- и W-бозонов и t-кварка,  $g$  — константа связи. Бозонный вклад в формуле (9) отрицательный, а фермионный (t-кварк) — положительный. Так как значения всех констант (за исключением массы бозона Хиггса) известны, то можно вывести условие вакуумной стабильности: в Стандартной модели (СМ) взаимная компенсация положительных и отрицательных вкладов в плотность вакуумной энергии запрещена условием стабильности! Таким образом, утверждение об уменьшении вакуумной энергии при понижении симметрии в ходе эволюции Вселенной вследствие релятивистских фазовых переходов связано с условием стабильности вакуума и, вероятно, носит абсолютный характер. Если принять массу бозона Хиггса  $m_{\text{H}} \sim 2m_{\text{W}} \sim 160 \text{ ГэВ}$ , то тогда

$$\rho_{\text{EW}} \sim -(120 \text{ ГэВ})^4 \quad (10)$$

и остаётся мало сомнений в том, что хиггсовский бозон будет обнаружен на Большом адронном коллайдере.

Непертурбативный кварк-глюонный конденсат как элемент теории включён в СМ. Исследование уравнений квантовой хромодинамики (КХД) показало, что феномен конфайнмента имеет место, если квантовые корреляторы кварк-глюонных полей не являются нулевыми. Кварк-глюонный конденсат — система взаимно коррелированных непертурбативных флуктуаций, возникающих в результате квантово-топологических туннельных переходов между вырожденными состояниями глюонного вакуума [8]. Плотность энергии этого конденсата

$$\rho_{\text{QCD}} = -\frac{b}{32} \left\langle 0 \left| \frac{\alpha_s}{\pi} G_{ik}^a G_a^{ik} \right| 0 \right\rangle, \quad (11)$$

где  $b = 9 + 8T_g(m_{\text{u}} + m_{\text{d}} + 0,8m_{\text{s}}) \approx 9,6$ ,  $T_g = (1,5 \text{ ГэВ})^{-1}$  — характеристический пространственно-временной масштаб флуктуаций;  $m_{\text{u}}$ ,  $m_{\text{d}}$ ,  $m_{\text{s}}$  — массы u-, d- и s-кварков. Главный энергетический параметр кварк-

глюонного конденсата

$$u^4 = \left\langle 0 \left| \frac{\alpha_s}{\pi} G_{ik}^a G_a^{ik} \right| 0 \right\rangle \approx (360 \text{ МэВ})^4.$$

Согласно современной парадигме кварк-глюонный конденсат имеет несколько фазовых состояний, в каждом из которых флуктуации обладают собственной специфической микроструктурой. В результате имеем

$$\rho_{\text{QCD}} = -\frac{b}{32} u^4 \approx -(265 \text{ МэВ})^4. \quad (12)$$

Только кварк-адронный фазовый переход гасит более 10 порядков ( $120^4/0,265^4 \sim 4 \times 10^{10}$ ) от величины полного гашения вакуумной энергии (более 78 порядков) вакуумными конденсатами:

$$\left( \frac{M_{\text{Pl}}}{M_{\text{QCD}}} \right)^4 = \left( \frac{1,2 \times 10^{19}}{0,265} \right)^4 \approx 4,5 \times 10^{78}. \quad (13)$$

Таким образом, вполне вероятно, что Вселенная потеряла более 78 порядков за первые  $10^{-5}$  с своей эволюции. КХД-фазовый переход был последним в череде фазовых переходов и явился в некотором роде реперной точкой, и дело здесь вот в чём. Киральная симметрия  $SU(3)_L \times SU(3)_R$  не была точной, а псевдоголдстоуновские бозоны представляют собой физическую реализацию нарушения этой симметрии<sup>3</sup> при  $E \sim 265$  МэВ. Д.А. Киржниц много лет назад обратил моё внимание на тот факт, что  $\pi$ -мезоны — это псевдоголдстоуновские бозоны. Тогда  $\pi$ -мезоны как легчайшие частицы октета псевдоголдстоуновских состояний характеризуют основное состояние. В данном случае вакуум — основное состояние. Я.Б. Зельдович более 40 лет назад [9] из соображений размерности выписал формулу для подсчёта  $A$ -члена (слегка модифицированную Н.С. Кардашёвым), согласно которой космологическая постоянная представляет собой энергию нулевых колебаний квантовых полей, т.е. энергию вакуума:

$$A = 8\pi G_N^2 m_\pi^6 h^{-4} [\text{см}^{-2}], \quad \rho_A = G_N m_\pi^6 c^2 h^{-4} [\text{г см}^{-3}], \quad (14)$$

и тогда вакуумный конденсат последнего фазового перехода можно вычислить:

$$\Omega_A = \frac{\rho_A}{\rho_{\text{cr}}} = \frac{A c^2}{3H_0^2}, \quad \rho_{\text{cr}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G_N}. \quad (15)$$

При средней массе  $\pi$ -мезонов  $m_\pi = 138$  МэВ и  $H_0 = 70,5 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  имеем  $\Omega_A \approx 0,73$ . Последнее значение практически совпадает со значением наблюдаемой безразмерной плотности энергии вакуума  $\Omega_A \approx 0,726 \pm 0,015$ , которое получено коллаборацией WMAP [6]. То есть можно сказать, что вакуумная энергия в то мгновение ( $10^{-5}$  с) "закалилась" после резкой компенсации конденсатами квантовых полей. Но осталось ещё "погасить" (в течение около 14 млрд лет) почти 44 порядка, для того чтобы достичь сегодняшнего значения плотности вакуумной (тёмной энергии)

$$\rho_{\text{DE}} \sim (1,8 \times 10^{-12} \text{ ГэВ})^4 \left( \left( \frac{0,15}{1,8} \times 10^{-12} \right)^4 \sim 5 \times 10^{43} \right). \quad (16)$$

Вакуумная энергия за этот огромный период времени должна была изменяться, так как Вселенная расширялась, генерировала новые квантовые состояния, т.е. тратила энергию. Но в этот период скорость изменения вакуумной энергии была в  $10^{57}$  раз меньше, чем скорость её изменения в квантовый период эволюции. Для того чтобы понять "последние" изменения вакуумной энергии от 0,15 ГэВ до  $1,8 \times 10^{-12}$  ГэВ обратимся к введённому 'т Хофтом [10] голографическому принципу<sup>4</sup>, согласно которому "физика" трёхмерной системы может быть описана теорией, действующей на её двумерной границе. Используя анти-де-ситтеровское пространство-время, Х. Малдасена и Э. Виттен показали, что описание Вселенной теорией суперструн соответствует её описанию квантовой теорией поля, действующей на её границе. Однако этот пример неубедителен, так как наше пространство-время — де-ситтеровское. Но исследуем этот вопрос глубже, так как существует голографический предел числа степеней свободы, которые могут существовать внутри ограниченной поверхности. Дж. Бекенштейн [11] показал, что энтропия чёрных дыр пропорциональна  $1/4$  площади горизонта событий, выраженной в планковских единицах. И если нашу Вселенную ограничить и измерить это "ограничение", как предлагают в работе [12], также в планковских единицах, то тогда в голографическом пределе плотность вакуумной энергии во Вселенной будет выражаться простой формулой:

$$\rho_{\text{DE}} = \frac{3M_{\text{Pl}}^4}{8S}, \quad (17)$$

где  $S \leq \pi R^2 M_{\text{Pl}}^2$  — энтропия Вселенной. Если  $R = 10^{28}$  см, то тогда  $\rho_{\text{DE}} \sim 10^{-57}$ . В этой формуле энтропия пропорциональна  $1/4$  площади "поверхности" Вселенной. Вообще-то это определение — всего лишь предположение Фишлера–Сасскинда (Fischler–Susskind), называемое голографическим [12]. Важно также обсудить границы применимости голографического подхода и показать, как "гасится" оставшиеся 44 порядка. Как отметил 'т Хофт [10], энтропийное ограничение даёт верхний предел средней плотности энергии Вселенной. Физика здесь следующая: новые квантовые степени свободы рождаются с увеличением площади хаббловского горизонта и их непрерывное пополнение требует некой энергии (подробности голографического подхода для космологии даны в работе [12], в которой отмечается, что общая теория относительности (ОТО) — яркий пример голографической теории). Однако голографический подход является правомерным до тех пор, пока применима ОТО. Квантовая теория в её настоящем виде — не голографическая теория. Используя эти "аргументы", проведём численную оценку. Вероятно, голографический подход можно применить после серии релятивистских фазовых переходов, с момента "заковки" вакуумной энергии при  $E \sim 150$  МэВ,  $t \sim 10^{-5}$  с,  $R \sim 3 \times 10^5$  см (где  $R$  — причинный горизонт в то мгновение). Сейчас размер Вселенной составляет  $R \sim 10^{28}$  см, и вакуумная энергия вследствие возникновения новых квантовых состояний потеряла около 45 порядков,

$$\left( \frac{10^{28}}{3 \times 10^5} \right)^2 \approx 10^{45}, \quad (18)$$

<sup>3</sup> Начало КХД-фазового перехода происходило при  $E \sim 265$  МэВ, а окончание — при  $E \sim 150$  МэВ.

<sup>4</sup> Все прежние физические принципы: Паули, эквивалентности, относительности, неопределённости Гейзенберга и др. приводили к явному прогрессу физики.

или даже больше, если причинный горизонт был менее  $10^5$  см в момент "закалки".

Суммируя вышесказанное, отметим, что в период ранней эволюции Вселенной при уменьшении энергии от  $10^{19}$  ГэВ до 150 МэВ конденсаты квантовых полей компенсировали 78 порядков плотности вакуумной энергии всего за  $10^{-5}$  с. Затем за 14 млрд лет ( $\approx 4 \times 10^{17}$  с) вакуумная компонента за счёт рождения новых квантовых состояний при расширении Вселенной потеряла ещё 45 порядков. То есть 123 порядка вакуумной энергии теряются в обычных физических процессах.

Но обсудим некоторые соображения, связанные с "крамольными" утверждениями о том, что термодинамика чёрных дыр является следствием тепловой природы вакуума Минковского и что уравнение Эйнштейна имеет термодинамическое происхождение [13], т.е. это уравнение состояния Вселенной. Связь, которую установил Дж. Бекенштейн между гравитацией и термодинамикой крайне интересна, так как эйнштейновское уравнение — это гиперболическое дифференциальное уравнение второго порядка для метрики пространства-времени и термодинамика здесь, казалось бы, ни причём. Но дело в том, что Вселенная расширяется (при этом с ускорением) и постепенно охлаждается, поэтому физическая ситуация здесь другая, так как налицо неравновесная термодинамика и имеет место связь Клаузиуса:  $dS = \delta Q/T$ , при которой энтропия  $dS$  равна 1/4 площади горизонта,  $\delta Q$  — поток энергии через горизонт,  $T$  — температура Унру (Unruh), видимая ускоряющимся наблюдателем внутри горизонта [13]. Идейной основой этих рассуждений является утверждение о том, что гравитация на макроскопической шкале — это проявление термодинамики вакуума. В конце концов, новые квантовые состояния Вселенной образуются за счёт энергии вакуума и уравнение (17) является фридмановским уравнением.

Резюмируя эту часть доклада, можно утверждать, что удовлетворительная численная разница между плотностями вакуумной энергии в планковский момент времени и в настоящий момент времени реализуется, если к вакууму применить компенсационную гипотезу и голографическое приближение и тем самым "погасить" 123 кризисных порядка за счёт наличия фазовых переходов и образования новых квантовых состояний.

Кроме того, стоит также отметить, что тёмная энергия всё более и более "уступает место" вакуумной энергии, как показали последние экспериментальные данные коллаборации WMAP [6], упомянутые выше.

## 2. Тёмная материя

Не менее интригующая ситуация сложилась с другим компонентом нашей Вселенной — тёмной материей (DM), плотность которой  $\Omega_{DM} \sim 0,23$ . Ещё в 1933 г. швейцарский астрофизик Фриц Цвики (Fritz Zwicky), работая в США на большом телескопе, понял, что скопление галактик Волосы Вероники (Coma) не может быть связано гравитационно без присутствия дополнительной массы, которую потом назвали скрытой массой. В течение последних десятилетий стало ясно, что тёмная материя распространена во Вселенной намного обильнее, чем видимая материя ( $\Omega_{stars} \sim 0,005$ ) и барионная материя ( $\Omega_b \sim 0,04$ ). Появилось даже новое направление — DM-космология, задача которой заключается в том, чтобы выяснить, из каких частиц состоит тёмная материя. Формально этот компонент Вселенной может иметь даже барионную природу. В качестве примера

можно привести несформировавшиеся звёзды-"Юпитеры", малый разогрев которых при сжатии не позволил зажечься в них ядерным реакциям, или другие явные барионные структуры: чёрные дыры, коричневые и белые карлики. В частности, в обзоре "Мелкомасштабная структура тёмной материи и микролинзирование" [14] подчёркивается, что более половины тёмного вещества может иметь барионную природу. Кроме того, во Вселенной могут существовать неизлучающие остатки чёрных дыр планковских масс ( $10^{-5}$  г) и, вероятно, преонные звёзды с  $M \sim 10^2 M_{\oplus}$  (масса Земли  $M_{\oplus} \sim 6 \times 10^{27}$  г) [15]. Эксперимент EROS-2 (EROS от франц. — Experience de Recherche d'Objets Sombres) [16] по микролинзированию 25 млн звёзд в Магеллановых Облаках дал следующие результаты относительно масс массивных компактных объектов гало (Massive Astrophysical Compact Halo Objects, MACHO):  $M_{MACHO} \sim (10^{-2} - 10^{-6}) M_{\odot}$  (масса Солнца  $M_{\odot} \approx 2 \times 10^{33}$  г). Не вдаваясь в подробности, следует отметить, что в тёмной материи барионная компонента присутствует обязательно, так как  $\Omega_b \sim 0,04$ , а  $\Omega_{stars} \sim 0,005$ . Заметим, что было высказано "сумасшедшее" предположение [17] о том, что Стандартная модель может иметь большое число своих копий, и тогда наличием барионов в скрытых копиях можно естественным образом объяснить тёмную материю. В этой модели гравитация будет сильной уже при энергии в 1 ТэВ и число копий тёмных барионов  $N$  может быть огромным:

$$10^{11} \leq N \leq 10^{32}. \quad (19)$$

Такое число копий становится "возможным" благодаря новой перестановочной симметрии (permutation symmetry), введённой в [17]. Здесь есть и другой интересный момент: инфляция осуществляется через инфлатон, относящийся к нашей копии Стандартной модели, в то время как возмущение и разогрев после инфляции (reheating) обеспечиваются модуляторным полем общим для всех копий. Небарионный компонент тёмной материи должен состоять из стабильных частиц, или эти частицы должны иметь время жизни большее, чем возраст Вселенной. К таким частицам относятся, в первую очередь, нейтрино, нейтралино и аксион. Конечно, существуют и другие предположения по составу тёмной материи, вплоть до предположения о тёмной материи Калуцы–Клейна. Такая тёмная материя аннигилирует в заряженные лептоны, которые способны образовать наблюдаемый спектр космических лучей из электронов и позитронов в соответствии с измеренным в экспериментах PAMELA (Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics) и ATIC (Advanced Thin Ionization Calorimeter) [18]. Небарионные частицы тёмной материи могут быть как холодными (CDM), так и горячими (HDM) [19]:

$$\Omega_{CDM} \sim 0,223 \pm 0,016, \quad \Omega_{HDM} \sim 0,0152. \quad (20)$$

Напомним, что если эти частицы в момент образования (закалки) имели релятивистские скорости, то тогда они являются HDM-частицами, а если нерелятивистские, то тогда они представляют собой CDM-частицы. Примером HDM-частицы является лёгкое нейтрино<sup>5</sup>. Открытие нейтринных осцилляций, вероятно, явилось поворот-

<sup>5</sup> Нейтрино с массой 1 ГэВ и более уже является CDM-частицей.

ной точкой нашего понимания природы нейтрино. Это открытие поставило нейтринную физику в центр внимания физического сообщества, поскольку стало ясно, что нейтрино имеет массу (возникла даже индустрия нейтринных осцилляций (см. <http://neutrinooscillation.org>)). Наличие малых масс нейтрино подтвердило теоретические ожидания начала 1980-х годов, в которых так называемый *see-saw*-механизм индуцирует как лёгкие, так и сверхтяжёлые нейтрино, но некоторые "нейтринные вызовы" на будущее остались. Среди них — величина CP-нарушения в нейтринных осцилляциях, существование безнейтринного двойного  $\beta$ -распада (тогда нейтрино является частицей Майорана) и абсолютная шкала нейтринных масс. В работе Мальтони и др. [20] суммируются данные по нейтринным осцилляциям на уровне  $3\sigma$ :

$$\begin{aligned}\Delta m_{2,3}^2 &= (1,4-3,3) \times 10^{-3} \text{ эВ}^2, \\ \Delta m_{1,2}^2 &= (7,2-9,1) \times 10^{-5} \text{ эВ}^2.\end{aligned}\quad (21)$$

Следует упомянуть также о новых осцилляционных экспериментах с длинной базой, таких как MINOS (Main Injector Neutrino Oscillation Search), CNGS (CERN Neutrinos to Gran Sasso), ICARUS (Imaging Cosmic And Rare Underground Signal), OPERA (Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus), в которых будут "охотиться" за  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ -осцилляциями [21].

Ограничения, следующие из космологии, чувствительны ко всем трём массовым состояниям нейтрино:

$$\sum_i m_i \leq 0,2-1,7 \text{ эВ (95\% CL)}, \quad (22)$$

но космология не даёт значений углов смешивания или возможных CP-нарушений. Космологические ограничения следуют из обработки данных с космического аппарата WMAP (эксперимент CMB — Cosmic Microwave Background), из распределения галактик из Слоановского цифрового обзора неба (Sloan Digital Sky Survey — SDSS), данных телескопа Хаббла (Hubble Space Telescope, HST) и данных по сверхновым 1-го типа (SN1) [22]. Более определённое космологическое ограничение на массу нейтрино получено в недавней работе [23]:  $m_\nu < 1,05 \text{ эВ}$ . В. Лобашёв [24] по  $\beta$ -распаду трития в эксперименте в Троицке даёт следующее ограничение на массу электронного антинейтрино:

$$m_\nu < 2,05 \text{ эВ}. \quad (23)$$

Коллаборация KATRIN (KArlsruhe TRItium Neutrino) обещает достичь в определении масс нейтрино чувствительности порядка  $0,2 \text{ эВ}$  [25]. Интересные перспективы и в безнейтринном  $\beta$ -распаде ( $\beta\beta_{0\nu}$ ), в котором эффективная майорановская масса нейтрино

$$m_M^{\text{eff}} \leq 0,3-1 \text{ эВ}. \quad (24)$$

Отметим, что безнейтринный двойной  $\beta$ -распад должен происходить с несохранением лептонного числа и если он будет доказан, то это будет явным указанием на существование суперсимметрии, поскольку несохранение лептонного числа (как и барионного) является одним из ярых предсказаний суперсимметричных (SUSY) теорий.

Все нейтринные группы — это огромные коллаборации различных специалистов. Потоки нейтрино наблюдаются и измеряются разными методами в глубоких

шахтах (SNO (Sudbury Neutrino Observatory) в Канаде, Баксанская нейтринная обсерватория в России, лаборатория в шахте Болби (Boulby) в Англии, Национальная лаборатория Гран Сассо (Gran Sasso) в Италии, Kamioka в Японии), в реакторных экспериментах, в каскадах вторичных космических лучей от Солнца и даже от сверхновых. Общий вывод: основной компонент НДМ-составляющей<sup>6</sup> тёмной материи — нейтрино — вносит определённый и неисчезающий вклад в плотность тёмной материи ( $n_\nu \sim 112 \text{ см}^{-3}$  для каждого сорта нейтрино).

Но перейдём к основным CDM-компонентам тёмной материи, представителями которой являются нейтралино и аксион (эти частицы появляются из расширения Стандартной модели). Это более экзотические частицы, чем нейтрино, но такой их статус не должен продержаться долго.

Нейтралино  $\chi$  — слабодействующая массивная частица (Weakly Interacting Massive Particle, WIMP) — могла возникнуть в ранней Вселенной, если суперсимметрия имела место. Суперсимметрия может естественным образом решить проблему тёмной материи, поскольку в большинстве минимальных SUSY-моделей легчайший суперпартнёр является абсолютно стабильным, что связано с сохранением мультипликативного квантового числа (R-чётности). Вероятно, на ранних стадиях эволюции Вселенной суперчастицы, рождаясь парами, быстро распадались, образуя наряду с обычными частицами легчайшие суперсимметричные частицы. Последние должны быть незаряженными и не обладать сильным взаимодействием, чтобы не нарушать нуклеосинтез (Big Bang Nucleosynthesis, BBN). Этим требованиям удовлетворяет нейтралино, описываемое майорановским спинором. Волновая функция нейтралино состоит из суперпозиции волновых функций четырёх суперсимметричных частиц: двух гейджино и двух хиггсино. Если нейтралино составляют гало нашей Галактики, то тогда их плотность [26]

$$n_\chi \sim \frac{0,3}{m_\chi \text{ ГэВ}} [\text{см}^{-3}]. \quad (25)$$

Как отмечено в работе [14], нейтралино в гало нашей Галактики (и, естественно, в гало других галактик) могли образовать объекты мелкомасштабной ( $R \sim 10^{14}-10^{15} \text{ см}$ ) иерархической структуры и даже нейтралино-вые звёзды. Нейтралино предполагается наблюдать по продуктам распада при их аннигиляции. На поиски продуктов аннигиляции направлены усилия семи (!) подземных лабораторий. Сигнал от аннигиляции нейтралино принадлежит области  $100-200 \text{ ГэВ}$  (энергии Большого адронного коллайдера), и их вклад в полную плотность Вселенной лежит в пределах

$$0,1 < \Omega_\chi < 0,3, \quad \text{если } 5 \times 10^{-8} < \sigma_\chi < 5 \times 10^{-10} \text{ пб} \quad (26)$$

( $1 \text{ пб} \equiv 10^{-36} \text{ см}^2$ ). На поиски нейтралино направлены эксперименты таких нейтринных групп, как SuperKamiokande, "Байкал", "Ananda", "Баксан", а также эксперимент ANTARES (Astronomy with Neutrino Telescope and Abyss environmental RESearch), который будет проведён в Средиземном море.

<sup>6</sup> Стерильные нейтрино, как и гравитино, — это тёплая тёмная материя.

Аксион был постулирован более трёх десятилетий назад для объяснения сохранения в сильном взаимодействии P- и CP-симметрии, несмотря на то, что в Стандартной модели (в электрослабом секторе) эти симметрии нарушаются. Печи и Куин [27] предложили решить сильную CP-проблему путём введения новой глобальной симметрии  $U_{PQ}$ . Тогда аксионы как бозоны Намбу–Голдстоуна ассоциируются со спонтанным нарушением этой симметрии. Аксион имеет нулевой спин, нулевой электрический заряд и отрицательную внутреннюю чётность. Масса аксиона

$$m_a \sim 6 \times 10^{-6} \frac{10^{12}}{f_a} \text{ [эВ]}, \quad (27)$$

и если свободная константа связи  $f_a < 10^{12}$  ГэВ, то плотность аксионов не будет превышать критическую плотность Вселенной. В этой ситуации  $m_a \sim 10^{-5}$  эВ. Эта частица могла бы быть образована в КХД-фазовом переходе в очень ранний период эволюции Вселенной. Аксионы могут быть обнаружены в лаборатории посредством стимуляции сильным магнитным полем их конверсии в два микроволновых фотона [28]. Эксперимент ADMX (Axion Dark Matter eXperiment) направлен на регистрацию реликтовых аксионов. В пилотном поиске аксионов коллаборацией ADMX в области масс 1,98–2,17 мкэВ аксионов не обнаружено [29].

Отметим ещё один важный факт, который непосредственно не связан с темой доклада, однако связан с аксионами, точнее с фамилонами [30]. Если следующий фундаментальный уровень материи (преоны) будет обнаружен, то тогда роль поколений частиц проясняется. Первое поколение частиц даёт наблюдаемый нами барионный мир. Учёт симметрии между поколениями (как следствие их наличия) даёт всю тёмную материю. Таким образом, структурирование тёмной материи, а вслед за ней и барионного компонента могут дать частицы (фамилоны), возникающие только при рассмотрении симметрии между поколениями.

В среде из фамилонов мог иметь место фазовый переход, который "закалил" фрактальность (фрактальность — прерогатива только фазовых переходов), и барионы повторили бы распределение тёмной материи. В этом случае фрактальность барионной крупномасштабной структуры находит естественное объяснение. Следует хотя бы упомянуть работы по взаимодействию тёмной энергии и тёмной материи (см. [31] и приведённые там ссылки), а также работы по  $f(R)$  гравитации (см. [32] и приведённые там ссылки), которые непосредственно связаны с тёмной материей.

Другие варианты для частиц тёмной материи, которые мы здесь подробно не обсуждали, включают в себя стерильное (суперсимметричное) нейтрино, гравитино, аксино, лёгкие скалярные частицы, лёгкие хиггсы, тёмную материю Калуцы–Клейна, сверхтяжёлую тёмную материю (simpzillas), нетопологические солитоны (Q-balls), заряженные массивные частицы (CHAMPS), слабозадействующую тёмную материю (SWIMPS), тёмную материю мембранного мира, тяжёлое нейтрино четвёртого поколения, зеркальные частицы и др. Список экзотических кандидатов был представлен в докладе J. Collar на симпозиуме памяти Д. Шрамма в декабре 2005 г.

В заключение заметим, что наш главный результат — объяснение происхождения огромной разницы (123 порядка) между значениями плотности вакуумной энергии в момент рождения Вселенной и в настоящий момент, которая вызвала многолетний кризис физики. В нашей работе [33] плотность вакуума была вычислена при значениях красного смещения от  $z = 0$  до  $z = 10^{11}$  с использованием "космологического калькулятора" [34]. Кроме того, пришло понимание, зачем нужно три поколения частиц в нашей Вселенной. Но для такого "понимания" необходим следующий фундаментальный уровень материи (преонный). Тогда первое поколение частиц образует наблюдаемый нами барионный мир, а учёт симметрии между поколениями даёт всю тёмную материю.

## Список литературы

- Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)
- Peebles P, Ratra B *Rev. Mod. Phys.* **75** 559 (2003)
- Bouso R *Gen. Rel. Grav.* **40** 607 (2008); arXiv: 0708.4231
- Frieman J A, Turner M S, Huterer D *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **46** 385 (2008); arXiv: 0803.0982
- Бурдюжа В В *Астрон. журн.* **86** 419 (2009) [Burdyuzha V V *Astron.* **53** 381 (2009)]
- Komatsu E et al. *Astrophys. J. Suppl.* **180** 330 (2009); arXiv: 0803.0547
- Burdyuzha V, Vereshkov G *Astrophys. Space Sci.* **305** 235 (2006)
- Marochnik L, Usikov D, Vereshkov G, arXiv:0811.4484
- Зельдович Я Б *Письма в ЖЭТФ* **6** 883 (1967) [Zel'dovich Ya B *JETP Lett.* **6** 316 (1967)]
- Stephens C R, 't Hooft G, Whiting B F *Class. Quant. Grav.* **11** 621 (1994); gr-qc/9310006
- Bekenstein J D *Phys. Rev. D* **7** 2333 (1973)
- Balazs C, Szapudi I, hep-th/0603133
- Eling Ch, Guedens R, Jacobson T *Phys. Rev. Lett.* **96** 121301 (2006); gr-qc/0602001
- Гуревич А В, Зыбин К П, Сирота В А *УФН* **167** 913 (1997) [Gurevich A V, Zybin K P, Sirota V A *Phys. Usp.* **40** 869 (1997)]
- Hansson J, Sandin F *Phys. Lett. B* **616** 1 (2005); astro-ph/0410417
- Renault C et al. *Astron. Astrophys.* **324** L69 (1997)
- Dvali G, Sawicki I, Vicman A *JCAP* (08) 009 (2009); arXiv: 0903.0660
- Hooper D, Zurek K M *Phys. Rev. D* **79** 103529 (2009); arXiv: 0902.0593
- Frampton P H, astro-ph/0506676
- Maltoni M et al. *New J. Phys.* **6** 122 (2004)
- Balantekin A B *Phys. Lett. B* **613** 61 (2005); hep-ph/0405019
- Dolgov A D *Phys. Rep.* **370** 333 (2002)
- Малиновский А М и др. *Письма в Астрон. журн.* **34** 490 (2008) [Malinovsky A M et al. *Astron. Lett.* **34** 445 (2008)]
- Lobashev V M *Nucl. Phys. A* **719** C153 (2003)
- Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment. KATRIN, <http://www-ik.fzk.de/~katrin>
- Majorana Collab., nucl-ex/0311013; SuperNEMO, <http://nemo.in2p3.fr/supernemo>
- Peccei R D, Quinn H R *Phys. Rev. Lett.* **38** 1440 (1977)
- Sikivie P *Phys. Rev. Lett.* **48** 1156 (1982)
- Duffy L D et al. *Phys. Rev. D* **74** 012006 (2006)
- Burdyuzha V et al. *Astron. Astrophys. Trans.* **23** 453 (2004)
- Micheletti S, Abdalla E, Wang B *Phys. Rev. D* **79** 123506 (2009)
- Motohashi H, Starobinsky A A, Yokoyama J *Int. J. Mod. Phys. D* **18** 1731 (2009)
- Burdyuzha V, arXiv:1003.1025; *Phys. Rev. B* (2010), submitted
- Wright E R *Publ. Astron. Soc. Pacific* **118** 1711 (2006)