

УДК 539.1.05

**ПРОБЛЕМА ТЕМНОЙ ЭНЕРГИИ В СОВРЕМЕННОМ ЕСТЕСТВОЗНАНИИ***И. Г. Попова, С. С. Веретельник*

Донской государственной технической университет (Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

В работе сделан обзор современного состояния научных исследований по концепции темной энергии. Показано, каким образом эта концепция объясняет существующие наблюдательные данные и решает космологические проблемы. Выделяется основная проблема — проблема изотропности реликтового излучения. Приводится динамический анализ крупномасштабного движения вещества, позволяющий описать разбегание галактик в рамках классической механики. Анализируются недостатки модели с преобладанием темной материи и темной энергии ( $\Lambda$ CDM-модели) в рамках общего метода исследования состава Метагалактики, в частности, наличие проблемы «недостающих» барионов.

**Ключевые слова:** расширяющаяся Вселенная, темная энергия, Большой взрыв, вакуум, космологическая постоянная,  $\Lambda$ CDM-модель.

**THE PROBLEM OF DARK ENERGY IN MODERN NATURAL SCIENCE***I. G. Popova, S. S. Veretelnik*

Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russian Federation)

The paper reviews the current state of research on the concept of dark energy. It is shown how this concept explains the existing observational data and solves cosmological problems. The main problem is highlighted — the problem of the isotropy of the relic radiation. A dynamic analysis of the large-scale motion of matter is presented, which makes it possible to describe the recession of galaxies within the framework of classical mechanics. The drawbacks of the model with a predominance of dark matter and dark energy ( $\Lambda$ CDM-model) are analyzed within the framework of the general method for studying the composition of the Metagalaxy, in particular, the presence of the problem of “missing” baryons.

**Keywords:** expanding Universe, dark energy, Big Bang, vacuum, cosmological constant,  $\Lambda$ CDM-model.

**Введение.** В настоящее время в специальной и научно-популярной литературе существует большое количество данных по современной космологической теории, включающих выводы о темной энергии. Однако они зачастую противоречат друг другу; ощущается непоследовательность в математическом аппарате. В настоящей работе проводится анализ основных данных и приводится краткая формулировка динамики вакуума, основанная на концепции темной энергии.

**Основная часть.** К концу XX века в космологии накопился ряд нестыковок, главной из которых был феномен изотропности реликтового излучения. Это излучение, как считается в современной астрофизике, возникло в раннюю эпоху Вселенной, в первые доли секунды после Большого взрыва. В этот период вся материя Вселенной являлась плазмой — все частицы были заряжены: протоны и электроны, главным образом. Они излучали фотоны, которые затем поглощались и переизлучались с понижением частоты. Процесс носил равновесный характер. Позже температура понизилась с  $T \sim 10^{30}$  К до  $T \sim 3 \cdot 10^3$  К. Это произошло, когда возраст Вселенной составлял около 350 тыс. лет. Материя стала прозрачной, и рассеяние фотонов практически прекратилось. Однако рост Вселенной носил экспоненциальный характер, и, по стандартной модели, различные области не могли успеть прийти в равновесное состояние [1].

Поэтому характеристики реликтового излучения должны быть различными в разных направлениях. Однако, согласно данным космических миссий WMAP и Planck, это излучение оказалось изотропным с точностью не менее  $10^{-4}$ , что представлено на рис. 1. Еще одним необъясненным фактом стало открытие ускоренного расширения Вселенной. Само расширение (исследование которого и привело к концепции Большого взрыва) было обнаружено в 1929 г. Э. Хабблом.



Рис. 1. Состав массы-энергии Вселенной. Данные космической обсерватории PLANK, 2013 г.

Но в 1998 г. двумя независимыми группами: 1 — А. Райсса (США) и Б. Шмидта (Австралия), и 2 — С. Перлмуттера (США) на основе анализа вспышек сверхновых звезд (СН) Ia было установлено ускоренное расширение, что означало наличие сил отталкивания, которые на каких-то масштабах превосходят силы гравитационного притяжения. Скорость движения галактик, удаленных на 3,5...4 Мпк, оказалась выше, чем по теории Хаббла. Астрофизики вычислили дату старта ускоренного расширения Вселенной — порядка 6,4 млрд лет назад. Из предварительных расчетов следовало, что такое ускоренное расширение вызвано тем, что давление вакуума, заполняющего межгалактическое пространство, отрицательно [2]. Такое состояние вакуума было названо темной энергией. У него довольно необычное уравнение состояния,

$$p = -u, \tag{1}$$

где  $p$  — давление,  $u$  — плотность энергии.

Оказалось, что этот вид материи составляет около 70 % всей Вселенной (рис. 1). По мере эволюции космических объектов вакуум играл все большую и большую роль, что отражено на рис. 2. Расстояние  $r$  между далекими объектами Вселенной возрастало благодаря отталкиванию вакуума. Эры разных видов материи поочередно сменяли друг друга (рис. 3). В настоящее время доминирует именно вакуум, его плотность близка к так называемой критической —  $7 \cdot 10^{-27}$  кг/м<sup>3</sup>.

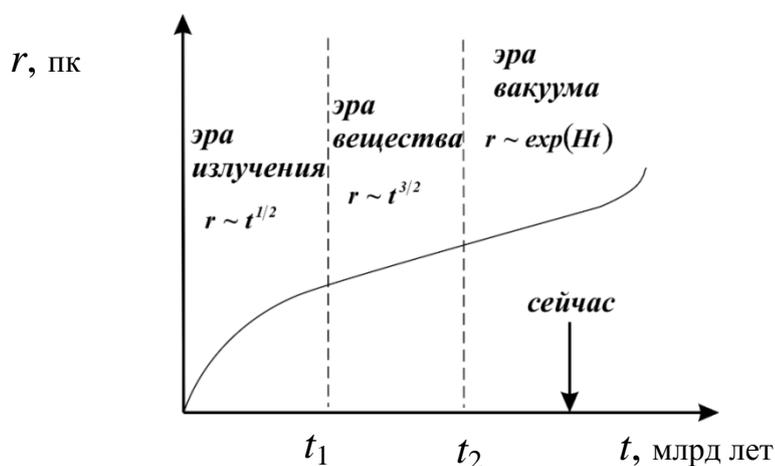


Рис. 2. Расстояние между удаленными объектами Вселенной как функции времени:

$$t_1 \approx 0,5 \text{ млрд лет}, t_2 \approx 6,5 \text{ млрд лет}$$

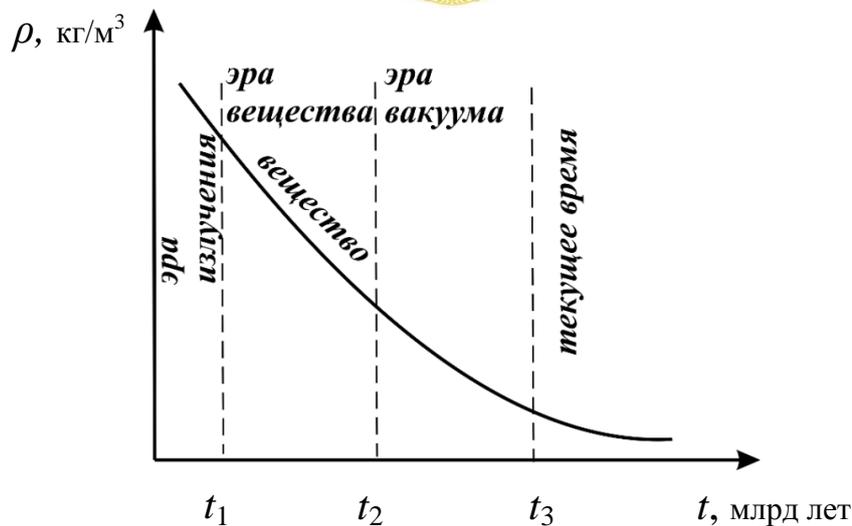


Рис. 3. Излучение, вещество и вакуум в расширяющейся Вселенной.  
Плотность как функция времени  $t_3 \approx 14$  млрд лет

Если эта концепция верна, тогда получает решение проблема изотропности реликтового излучения: инфляция ранней Вселенной шла с доминированием темной энергии, поэтому при разлете разных областей космоса сохранялись их сходные характеристики. До этой гипотезы считалось, что должен быть механизм, обеспечивающий выравнивание температур по раздувшейся Вселенной: только в этом случае параметры реликтового излучения могли быть одинаковыми по всем направлениям.

Математическая разработка новой концепции привела к созданию так называемой « $\Lambda$ CDM-модели» (*Lambda-Cold Dark Matter* — стандартная модель с преобладанием темной энергии). Ее уравнения описывают эволюцию «уплощенной» Вселенной, расширение которой отражается космологической постоянной  $\Lambda$ , впервые появившейся в уравнениях общей теории относительности Эйнштейна.

Анализ данных космических обсерваторий WMAP (2001–2009 гг.) и PLANCK (2009–2013 гг.), показал, что высокоточная картина распределения микроволнового излучения по направлениям хорошо согласуется с выводами  $\Lambda$ CDM-модели, что представлено на рис. 4, где  $\Omega_b$  — параметр плотности материи для базовой модели  $\Lambda$ CDM;  $\Omega_c$  — теоретическое значение параметра плотности материи;  $n_s$  — наклонный скалярный спектральный индекс;  $\tau$  — реионизационная оптическая толщина;  $A_s$  — амплитуда спектра;  — комбинация вероятности EE;  — комбинация вероятности TT, дополнительно включающая данные поляризации Planck с низкой вероятностью;  — вероятность TE только поляризационная составляющая картографического малопланковского правдоподобия;  — комбинация правдоподобия с использованием TT, TE, EE спектров и низкотемпературное поляризационное правдоподобие [6].

Однако ряд вопросов остается. Обратимся к истории вопроса с космологической постоянной  $\Lambda$ . Эйнштейн добавил эту константу (которая, по расчетам сделанным в 1920-е гг., должна иметь очень малое значение  $\sim 10^{-60} \text{ м}^{-2}$  в единицах СИ). Целью этой модификации явилось стремление Эйнштейна получить решения, соответствующие стационарной — неизменной на больших временах ( $\sim 10$  млрд лет и более) Вселенной. Слагаемое, содержащее  $\Lambda$ -член, отвечало за компенсацию притяжения, которое стягивало Вселенную обратно к состоянию малого объема (точке сингулярности). Однако наш соотечественник, петербургский астрофизик А. А. Фридман показал, что Вселенная проявляет признаки нестационарной эволюции и при наличии постоянной  $\Lambda$ . Еще один советский исследователь — Э. Глинер установил, что эта константа должна быть

характеристикой среды, равномерно заполняющей всю Вселенную. Пришло понимание того, что вакуум, понимаемый ранее как пустота, обладает ненулевой плотностью:

$$\rho_v = \frac{\Lambda c^2}{8\pi G}, \quad (2)$$

где  $\Lambda$  — космологическая постоянная,  $c$  — скорость света в вакууме,  $G$  — гравитационная постоянная Ньютона.

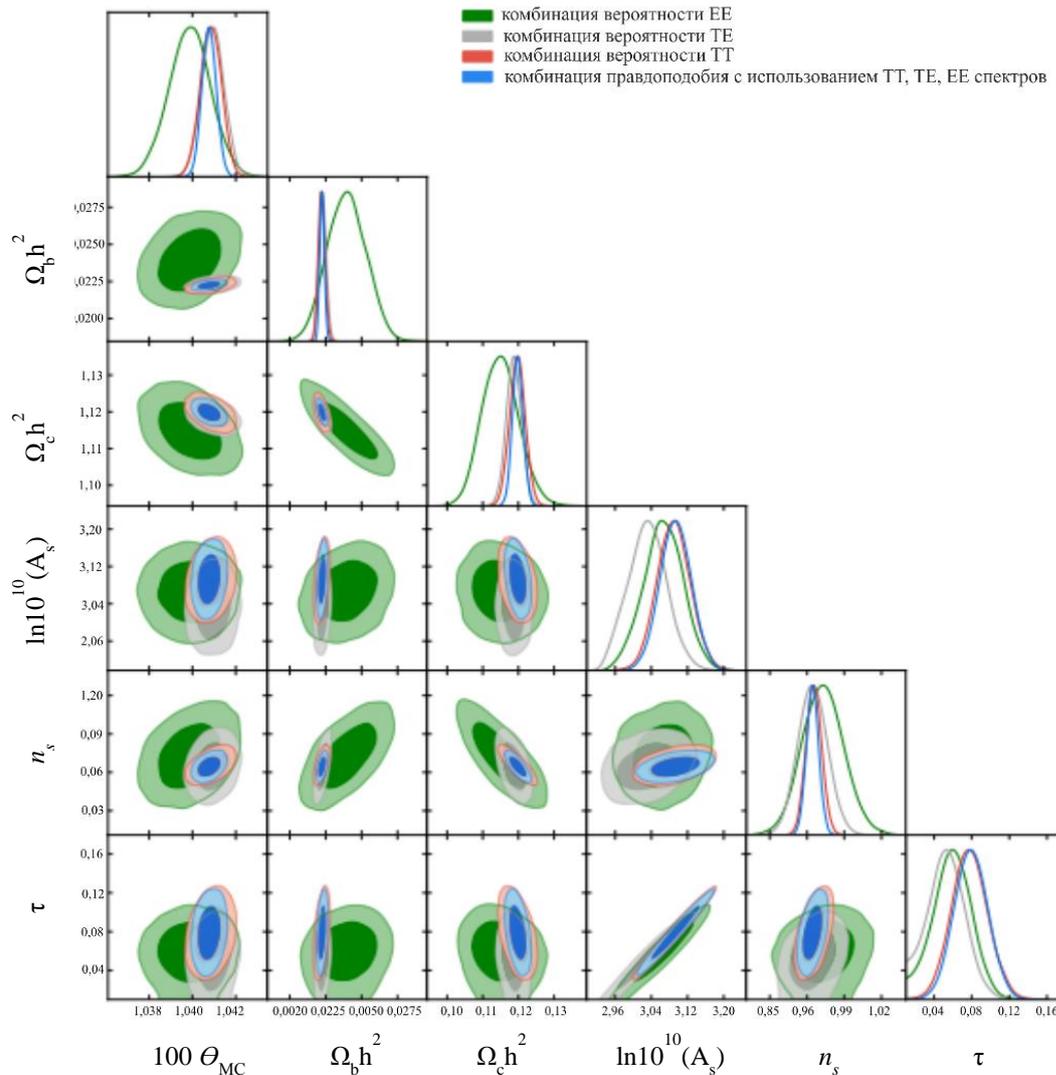


Рис. 4. Сравнение ограничений параметров базовой модели  $\Lambda$ CDM с данными о температуре и поляризации Planck

Будучи умноженной на квадрат скорости света, эта плотность равна «антидавлению», которое положительно, и может быть приравнено к отрицательному давлению, взятому со знаком минус:

$$\rho_v c^2 = -p_v.$$

Именно Глинер получил это уравнение состояния «связывающей среды» [2, 3]. Он показал, что относительно вакуума, описываемого этим уравнением, покой и движение эквивалентны. Можно сказать, что возродилась концепция эфира — спустя 100 лет после ее «выбраковки». Интересно то, что новая концепция оказывается полностью согласованной с выводами общей

теории относительности, один из которых указывает на давление как на второй, наряду с плотностью, фактор гравитации. В целом плотность, являющаяся источником тяготения, описывается формулой:

$$\rho_{\text{eff}} = \rho + 3\frac{P}{c^2}.$$

Но в случае вакуума эта сумма меньше 0:

$$\rho_{\text{эфф}} = -2\rho_V < 0.$$

Поэтому вакуум — среда со свойством расталкивания. По изучению всплеск СН был сделан вывод, что плотность вакуума больше результирующей плотности всех остальных видов материи [4, 5]. Отсюда следует, что антигравитация, начиная с некоторых расстояний, выше сил притяжения, и космологическое расширение должно происходить с ускорением.

Сила антигравитации  $F_V$  определяется через плотность вакуума  $\rho_V$  и является линейной функцией расстояния  $R$ :

$$F_V = +G\left(\frac{4\pi}{3}\right)2\rho_V mR. \quad (3)$$

Из выражения видно, что на тело действует полная масса вакуума  $m$ , помещаемая в сфере радиуса  $R$ . То есть, результирующая сила, действующая на пробную частицу-галактику, равна

$$F = F_g + F_V.$$

Первое слагаемое выражает обычную силу притяжения, второе — антигравитацию. Приравняв сумму к нулю, получим для радиуса сферы выравнивания сил:

$$R_V = \left(\frac{3M}{8\pi\rho_V}\right)^{\frac{1}{3}}, \quad (4)$$

здесь  $M$  — полная масса вещества внутри этой сферы. На меньших расстояниях превалирует притяжение, на больших — отталкивание. Оценки показывают, что для наблюдаемой части Вселенной  $R \approx 10$  Мпк.

Однако многое остается неясным. Один из таких моментов — малость константы  $\Lambda$ . Можно говорить о незавершенности теории. Признаком такой незавершенности является наличие в модели некоторого параметра, в котором, как в черном ящике, объединены неизвестные факторы. В данном случае речь идет о космологической постоянной. Одним из таких недостатков концепции темной материи является так называемая проблема «недостающих барионов»: по расчетам, выполненным на основе  $\Lambda$ CDM-модели, наблюдаемого количества газа и звезд во Вселенной должно быть почти в 10 раз больше [6].

Есть гипотезы, говорящие в пользу того, что источником космического разбегания галактик являются «скрытые измерения». И в этом случае темная энергия есть энергия движений и взаимодействий именно в этих измерениях.

**Заключение.** Таким образом, концепция темной энергии в настоящее время является достаточно обоснованным разделом современной космологической теории, позволяющей объяснить ряд наблюдательных фактов, главный из которых — большие красные смещения далеких сверхновых, свидетельствующие об ускоренном разбегании галактик. Но существуют также неясные проявления темной энергии. Кроме того, неизученной остается сама ее природа.

**Библиографический список**

1. Брайан, Г. Ткань космоса: Пространство, время и текстура реальности / Г. Брайан — Москва: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2009. — 608 с.
2. Чернин, А. Д. Темная энергия и всемирное антитяготение / А. Д. Чернин. — УФН, 2008. — Т. 178. — № 3. — С. 267–298.
3. Хлопов, М. Ю. Основы космофизики / М. Ю. Хлопов. — Москва: URSS, 2011. — 368 с.
4. Гинзбург, И. Ф. Нерешенные проблемы фундаментальной физики / И. Ф. Гинзбург. — УФН, 2009. — Т. 179. № 5. — С. 525–529.
5. Троицкий, С. В. Нерешенные проблемы физики элементарных частиц / С. В. Троицкий. — УФН, 2012. — Т. 182. № 1. — С. 77–103.
6. Planck Collaboration. Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters (англ.) // Astronomy and Astrophysics : journal. — 2016. — Vol. 594, №. 13. — P. A13. — DOI:10.1051/0004-6361/201525830. — Bibcode: 2016A&A...594A..13P. — arXiv:1502.01589.

*Об авторах:*

**Попова Инна Григорьевна**, доцент кафедры «Физика» Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), кандидат физико-математических наук, доцент, [inna111109@rambler.ru](mailto:inna111109@rambler.ru)

**Веретельник София Сергеевна**, студент Донского государственного технического университета (344003, РФ, г. Ростов-на-Дону, пл. Гагарина, 1), [sofa\\_ver963@mail.ru](mailto:sofa_ver963@mail.ru)

*Authors:*

**Popova, Inna G.**, Associate Professor, Department of Physics, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), Cand.Sci., Associate professor [inna111109@rambler.ru](mailto:inna111109@rambler.ru)

**Veretelnik, Sofiya S.**, Student, Don State Technical University (1, Gagarin sq., Rostov-on-Don, RF, 344003), [sofa\\_ver963@mail.ru](mailto:sofa_ver963@mail.ru)