

## ФИЗИКА НАШИХ ДНЕЙ

## Темная энергия: мифы и реальность

В.Н. Лукаш, В.А. Рубаков

Статья посвящена обсуждению вопросов, связанных с темной энергией во Вселенной. Отмечено, что несмотря на влияние темной энергии, генерация структуры все еще происходит в современной Вселенной и будет продолжаться в течение около 10 млрд лет. Комментируются некоторые утверждения, сформулированные в статье А.Д. Чернина "Темная энергия и всемирное антитяготение", УФН 178 267 (2008).

PACS numbers: 95.35.+d, 98.80.-k

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200803d.0301

## Содержание

1. Введение (301).
  2. Структурный аргумент и сверхновые (302).
  3. Хаббловские потоки и их нарушение (303).
    - 3.1. Неоднородная Вселенная. 3.2. Анизотропия холодных течений.
  4. О "внутренней симметрии в космологии" (305).
  5. О физической природе темной энергии (306).
  6. Дополнительные комментарии (307).
  7. Заключение (307).
- Список литературы (307).

## 1. Введение

Введение в научный обиход представления о существовании в природе темной энергии — слабовзаимодействующей физической субстанции, пронизывающей все пространство видимой Вселенной, — явилось сенсацией номер один в физике на рубеже XX–XXI вв. и стало неожиданностью для большинства исследователей, в особенности работающих на стыке физики элементарных частиц и космологии. Дело в том, что известные энергетические масштабы, характерные для фундаментальных взаимодействий, составляют величины порядка 1 ГэВ (сильные взаимодействия), 100 ГэВ (электрослабые взаимодействия) и  $10^{19}$  ГэВ (гравитационные взаимодействия), и не было никаких оснований<sup>1</sup> думать, что в

<sup>1</sup> За исключением соображений, основанных на антропном принципе (см. [1–3]).

**В.Н. Лукаш.** Астрономический центр Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, ул. Профсоюзная 84/32, 117997 Москва, Российская Федерация  
Тел. (495) 333-33-66. Факс (495) 333-23-78  
E-mail: vladimir@lukash.asc.rssi.ru

**В.А. Рубаков.** Институт ядерных исследований РАН, просп. 60-летия Октября 7а, 117312 Москва, Российская Федерация  
Тел. (499) 135-22-59, (499) 135-20-51. Факс (499) 135-22-68  
E-mail: rubakov@ms2.inr.ac.ru

Статья поступила 28 января 2008 г.

природе имеется еще один, гораздо меньший масштаб энергий. Однако оказалось, что темная энергия характеризуется масштабом<sup>2</sup>  $E_V \sim 10^{-3}$  эВ, определяемым тем, что плотность темной энергии равна  $\rho_V = E_V^4$ .

Кроме того, в пределах одного порядка величины в современной Вселенной имеется приближенное равенство

$$\rho_V \approx \rho_D \approx \rho_B, \quad (1)$$

где  $\rho_D$  и  $\rho_B$  — плотности массы темной материи и барионов (протонов, ядер) соответственно. Для этого равенства опять-таки не было (и нет) никаких скольконибудь очевидных априорных оснований. Подчеркнем, что приближенное соотношение  $\rho_D \approx \rho_B$  справедливо в каждый момент космологической эволюции после образования барионной асимметрии и генерации темной материи, поскольку  $\rho_D$  и  $\rho_B$  одинаковым образом — и довольно быстро — уменьшаются при расширении Вселенной. С другой стороны,  $\rho_V$  очень слабо зависит или вообще не зависит от времени, так что первое из равенств (1) справедливо именно в современную эпоху, после того как возникла структура во Вселенной и появились звезды. Конечно, трудно смириться с тем, что соотношение (1) носит характер случайного совпадения.

В связи с фундаментальностью проблемы и удивительными свойствами темной энергии важно понимать, какие именно данные наблюдательной космологии лежат в основе представления о ее существовании. Это нужно хотя бы для того, чтобы попытаться найти объяснения ускоренного расширения, кажущиеся сегодня экзотическими, и определить ключевые эксперименты для проверки гипотез. Об одной из таких попыток мы упомянем ниже. Заслуживают внимания и попытки объяснения приближенного равенства (1).

Этим вопросам в значительной мере посвящена статья А.Д. Чернина [4]. Нам представляется, однако,

<sup>2</sup> Мы сохраняем обозначения, используемые в статье А.Д. Чернина [4]: индексы V, D и B относятся к темной энергии, темной материи и барионам соответственно.

что эта статья отчасти мифологизирует темную энергию: с одной стороны, о некоторых важных результатах в ней сказано скороговоркой, а с другой стороны, часть обсуждаемых в этой статье вопросов к темной энергии отношения не имеет. Попытка же объяснения соотношения (1) на основе некоей "внутренней симметрии в космологии" является, мягко говоря, спорной.

В настоящей статье мы попытаемся отделить мифологию темной материи от реального положения дел.

## 2. Структурный аргумент и сверхновые

Часто в качестве основного наблюдательного аргумента в пользу существования темной энергии приводят результаты наблюдений сверхновых типа Ia, о которых в основном пишет А.Д. Чернин. Однако имеется целый ряд других, не менее серьезных аргументов, основанных на комбинациях космологических данных. Некоторые из этих аргументов были известны еще до наблюдений сверхновых типа Ia, так что ряд космологов [5–9] (обзор ранних работ см. в [10]) настаивал на необходимости существования темной энергии еще до появления результатов по сверхновым.

Один из независимых аргументов состоит в следующем. Еще к середине 1990-х годов анализ данных галактических каталогов по распределению материи в пространстве, использование совокупности различных методов определения массы кластеризованного ("сгущенного") вещества<sup>3</sup> совместно с измерениями анизотропии реликтового излучения и параметра Хаббла привели к признанию того, что полная плотность массы нерелятивистской материи, из которой состоит неоднородная структура нашей Вселенной — галактики и их образования (группы, скопления, цепочки, стенки, сверхскопления, пустоты), — не превышает 30 % от критической плотности  $\rho_c$ ,

$$\Omega_M \equiv \frac{\rho_M}{\rho_c} \lesssim 0,3, \quad (2)$$

где

$$\rho_M = \rho_D + \rho_B, \quad \rho_c = \frac{3H_0^2}{8\pi G} \simeq 10^{-29} \text{ г см}^{-3},$$

$H_0 \simeq 70 \text{ км с}^{-1} \text{ Мпк}^{-1}$  — константа Хаббла. Результат (2) — один из важнейших в современной космологии. Его довольно распространенная в течение длительного времени интерпретация состояла в том, что Вселенная обладает ненулевой пространственной кривизной. Действительно, если не вводить в рассмотрение темную энергию, то для открытой космологической модели уравнение Фридмана, записанное для современной эпохи, сводится к соотношению

$$\rho_c = \rho_M + \frac{3}{8\pi G R_\kappa^2},$$

где  $R_\kappa$  — современный радиус кривизны пространства. В соответствии с (2) кривизна (второе слагаемое в правой части) должна доминировать, составляя не менее  $0,7\rho_c$ .

Однако такая интерпретация сталкивалась с трудностями. Во-первых, с теоретической точки зрения заметную пространственную кривизну крайне трудно совместить с идеей инфляционной Вселенной: без специальной подгонки параметров инфляционные модели приводят к чрезвычайно малым значениям пространственной кривизны  $R_\kappa^{-2}$ . Во-вторых, современный возраст Вселенной в открытой модели без темной энергии составляет около 11 млрд лет, в то время как оценки времени существования наиболее старых объектов во Вселенной (например, шаровых звездных скоплений) давали и дают большие значения, 12–14 млрд лет. Имелся и ряд других аргументов против открытой модели с большой пространственной кривизной.

Если пространственная кривизна отсутствует, то результат (2) говорит о том, что не менее 70 % плотности энергии в современной Вселенной обусловлены наличием такой материи, которая не может быть возмущена гравитационными полями структур и остается "нескученной" (некластеризованной) в ходе космологической эволюции. Последнее требование означает, что эффективное давление этой материи отрицательно<sup>4</sup> и достаточно велико по абсолютной величине, т.е.  $p \approx -\rho$ . Это и есть темная энергия.

Модель с пространственной кривизной была окончательно отвергнута на основе результатов измерений анизотропии реликтового излучения, точнее, определения положения первого пика в угловом спектре анизотропии, наиболее чувствительного к значению пространственной кривизны. Уже в 1999–2000 гг. благодаря этим измерениям стало ясно, что трехмерное пространство с высокой точностью евклидово (т.е.  $R_\kappa^{-1}$  близко к нулю); ключевую роль здесь сыграли аэростатные эксперименты BOOMERANG (аббревиатура от англ. *Ballon Observations of Millimetric Extragalactic Radiation and Geophysics*) и MAXIMA (от англ. *Millimeter wave Anisotropy Experiment Imaging Array*) [11–14]. Впоследствии эксперимент WMAP (*Wilkinson Microwave Anisotropy Probe*) и другие эксперименты подтвердили этот результат. Таким образом, суммарная плотность энергии всех видов материи действительно должна совпадать с критической плотностью, и, следовательно, темная энергия действительно имеется в природе.

Структурный аргумент, основанный на комбинации результатов измерения анизотропии и поляризации реликтового излучения и результатов, относящихся к крупномасштабной структуре Вселенной, является сегодня однозначным свидетельством существования темной энергии. Стоит также упомянуть о недавно подтвержденном наблюдениями интегральном эффекте Сакса–Вольфе, который в будущем должен стать одним из методов прецизионного измерения свойств темной энергии [15].

Чтобы проиллюстрировать важность всей совокупности космологических данных о темной энергии, упомянем, например, о попытке альтернативного объяснения результатов наблюдений сверхновых типа Ia (см. обзор [16] и недавнее обсуждение [17]), основанной на

<sup>3</sup> Измерение пекулярных скоростей галактик в скоплениях и сверхскоплениях, гравитационное линзирование скоплений, измерение кривых вращений галактик, определение соотношения между светимостью и массой, измерение температуры рентгеновских скоплений и т.д.

<sup>4</sup> Заметим, что условие доминирования над нерелятивистской материей отмечает релятивистские частицы, поскольку их плотность энергии убывает со временем быстрее, чем плотность нерелятивистской материи.

предположении о том, что в нашей области Вселенной плотность массы вещества заметно ниже средней плотности. Анализ показывает [17], что в такой модели удается достичь согласия не только с результатами по сверхновым, но и с данными по реликтовому излучению. Удастся ли согласовать эту модель с результатами по крупномасштабной структуре и другими космологическими данными — большой вопрос.

### 3. Хаббловские потоки и их нарушение

К независимым аргументам в пользу существования темной энергии А.Д. Чернин относит результаты измерений локального холодного потока (автор употребляет не вполне адекватный термин "хаббловский поток"), весьма подробно останавливаясь на этом вопросе. К сожалению, в этом месте мы имеем дело с мифологизацией темной энергии.

Основные положения статьи [4] и ряда предыдущих работ А.Д. Чернина с соавторами базируются на утверждении, что закон Хаббла проявляется уже на малых по космологическим меркам расстояниях, а объясняется это антигравитацией. Например, на с. 278, 279 читаем: "...антигравитация способна в действительности управлять движением галактик чуть ли не во всем диапазоне космологических масштабов — от глобальных, «истинно космологических», до масштаба всего в несколько мегапарсек...", "...антигравитация доминирует и в нашем ближайшем галактическом окружении на расстояниях всего 1–2 Мпк от Млечного Пути", "...именно темная энергия... стоит в действительности за открытием Хаббла и придает этому открытию космологический смысл", "...темную энергию можно... измерять везде, где наблюдается регулярное разбегание галактик". В действительности, как мы покажем в этом разделе, влияние темной энергии на локальные распределения скоростей еще не успело в полной мере проявиться, и о расширении по закону Хаббла начиная с нескольких мегапарсек говорить не приходится. Свойства же локальных течений вытекают из формы спектра пространственных возмущений плотности.

Изначальные хаббловские потоки существовали во всем пространстве Вселенной. В разных областях пространства они нарушались в разные моменты времени в прямой зависимости от формирующейся структуры.

Как известно, структура Вселенной возникла вследствие гравитационного роста возмущений плотности, начальная амплитуда которых составляла величину порядка  $10^{-5}$  для длин волн, достигших текущего хаббловского размера. Возмущения росли быстрее для малых длин волн, в результате чего масштаб нелинейности, при котором полностью разрушаются хаббловские потоки (возмущения плотности темной материи и барионов  $\delta_M \equiv \delta\rho_M/\rho_M \sim 1$ ), увеличивался со временем. В сегодняшней Вселенной средний масштаб нелинейности — порядка 15 Мпк. Однако масштаб нелинейности варьируется в разных местах пространства. Так, вдали от скоплений галактик (самых массивных гравитационно-связанных образований) он меньше. В частности, в нашей локальной области Вселенной масштаб нелинейности составляет около 2 Мпк (размер Местной Группы галактик).

В квазилинейных областях, где возмущения плотности еще невелики ( $\delta_M < 1$ ), галактики продолжают раз-

бегаться в соответствии с начальными условиями. Однако и в этих областях Вселенной хаббловские потоки искажены. В будущем, через десятки миллиардов лет, пекулярные скорости затухнут из-за динамического влияния темной энергии и движение галактик будет опять следовать хаббловскому закону<sup>5</sup>, как это было в ранней Вселенной.

Именно в этом и состоит наше ключевое разногласие с утверждением статьи [4]. А.Д. Чернин считает, что вне гравитационно-связанных областей пекулярные скорости галактик уже затухли из-за динамического влияния темной энергии и движение происходит по хаббловскому закону. В этом разделе мы покажем, что такое восстановление хаббловских течений возможно лишь в далеком будущем (если темная энергия сохранит свойства вакуума), а сегодня мы находимся на стадии, когда пекулярные скорости, обусловленные неоднородностями плотности материи, имеют максимальные значения за всю историю Вселенной.

#### 3.1. Неоднородная Вселенная

На квазилинейной стадии эволюции наша неоднородная Вселенная описывается [18] обобщенным уравнением Фридмана<sup>6</sup>:

$$\left(\frac{\dot{b}}{H_V}\right)^2 = \frac{c}{b} + b^2 - \kappa \equiv f^2(b) - \kappa(\mathbf{x}), \quad (3)$$

где  $(t, \mathbf{x})$  — лагранжевы координаты, сопутствующие веществу (4-скорость материи дается выражением  $u_\alpha = t_{,\alpha}$ ),  $b = b(t, \mathbf{x})$  — масштабный фактор объемного расширения материи (сопутствующая плотность материи равна  $\rho_M = 3cH_V^2/(8\pi Gb^3)$ ),  $H_V = H_0\sqrt{\Omega_V} \simeq 2 \times 10^{-4}$  Мпк<sup>-1</sup> — константа Хаббла темной энергии,

$$c \equiv \frac{\Omega_M}{\Omega_V} = \frac{\Omega_M}{1 - \Omega_M} \simeq 0,39.$$

Функция

$$f(b) \equiv \left(\frac{c}{b} + b^2\right)^{1/2} \geq 1$$

имеет минимум  $f_{\min} \simeq 1$ , достигаемый при  $b_{\min}^{-1} \simeq 1,7$ .

Произвольная малая функция пространственных координат  $\kappa = \kappa(\mathbf{x})$  описывает локальную кривизну пространства. Нас интересуют области пространства с положительной правой частью<sup>7</sup> уравнения (3):

$$\kappa(\mathbf{x}) < 1. \quad (4)$$

<sup>5</sup> Здесь речь идет только о галактиках, находящихся в квазилинейных областях пространства ( $\delta_M < 1$ ). Внутри гравитационно-связанных систем ( $\delta_M > 1$ ) галактики, удерживаемые гравитационным полем этих образований, не разбегаются.

<sup>6</sup> На этой стадии плотностью излучения пренебрегаем, первые два члена в правой части уравнения (3) описывают соответственно нерелятивистскую материю (темную материю и барионы) и темную энергию в приближении космологической постоянной. Точка над обозначением переменной означает частную производную по времени  $t$ . Современное значение космологического масштабного фактора полагаем равным  $a_0 = 1$  (см. (5)).

<sup>7</sup> Условие (4) включает в себя как сверхскопления (области с  $\kappa > 0$ ), так и космологические "пустоты" ( $\kappa < 0$ ).

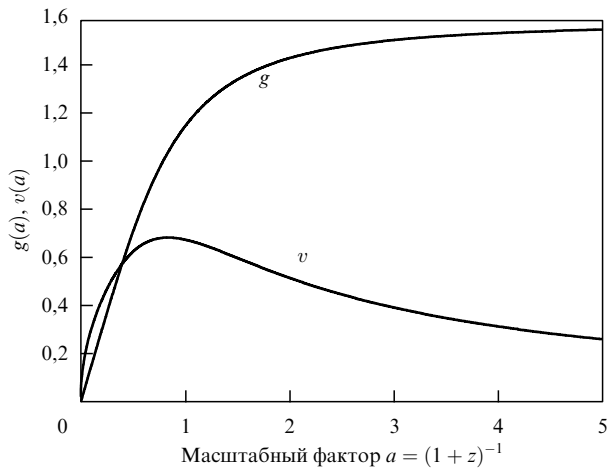


Рис. 1. Функции роста возмущений плотности  $g(a)$  и пекулярной скорости материи  $v(a)$ .

При этом условии плотность материи монотонно убывает со временем.

При  $\kappa = 0$  объемный и фоновый масштабные факторы совпадают (хотя анизотропия расширения остается большой (см. раздел 3.2)):

$$b = a(t) \equiv \frac{1}{1+z}, \quad H \equiv \frac{\dot{a}}{a} = H_V \frac{f(a)}{a}, \quad (5)$$

$f = f(a)$  — фактор роста хаббловской части скорости ( $\mathbf{V}_H = f H_V \mathbf{x}$ )

В общем случае в линейном порядке по  $\kappa$  получаем

$$b = a \left( 1 - \frac{1}{3} g\kappa \right), \quad \delta_M = g\kappa, \quad (6)$$

$$H_{\text{eff}} \equiv \frac{\dot{b}}{b} = H \left( 1 - \frac{1}{3} h\kappa \right), \quad h \equiv \frac{v}{f} = \frac{\dot{g}}{H}, \quad (7)$$

где  $\delta_M \equiv \delta\rho_M/\rho_M$  — сопутствующие возмущения плотности,  $H_{\text{eff}} = H_{\text{eff}}(t, \mathbf{x})$  — эффективная функция Хаббла,  $g = g(a)$  и  $v = v(a)$  — факторы роста возмущений плотности и пекулярной скорости материи (см. также (11)) соответственно,

$$g(a) = \frac{1}{c} \left( a - H \int_0^a \frac{da}{H} \right), \quad v(a) = \frac{3H_V}{2a^2} \int_0^a \frac{da}{H}. \quad (8)$$

Уравнения (3)–(8) описывают квазихаббловские течения с эффективной хаббловской "константой"  $H_{\text{eff}}$ , зависящей от местоположения наблюдателя. Функции  $g(a)$  и  $v(a)$  изображены на рис. 1. В современную эпоху функция  $v$  имеет широкий максимум, свидетельствующий о периоде наиболее интенсивной генерации структуры. Положение максимума  $v(a)$  соответствует  $z \approx 0,2$ , уровень 0,9 от максимального значения  $v$  достигается при  $a \approx 0,5$  и 1,4, а половина — при  $a \approx 0,1$  и 4. Таким образом, современная эпоха — это эпоха максимальных пекулярных скоростей, которая продлится еще космологическое время. Функция  $v$  затухнет вдвое лишь к тому времени, когда возраст Вселенной будет составлять 35 млрд лет. И только тогда можно будет говорить о наступлении эпохи затухания пекулярных скоростей во всех областях пространства, где  $\kappa < 1$ .

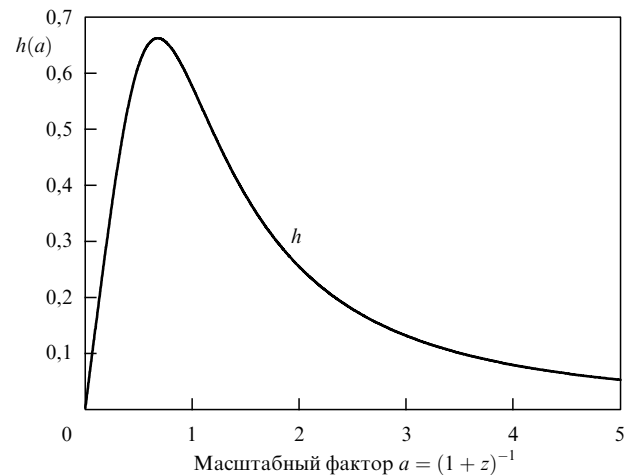


Рис. 2. Функция  $h(a)$ , описывающая отклонение локальной хаббловской "постоянной"  $H_{\text{eff}}$  от фоновой.

Функция  $h = h(a)$ , определяющая степень отклонения локальной хаббловской "постоянной" от фоновой, представлена на рис. 2. Максимум  $h(a)$  достигается при  $z \approx 0,4$ , а период  $h > 0,5h_{\text{max}}$  простирается в пределах  $a \in (0,1, 1,8)$ , что соответствует возрасту от 0,6 до 22 млрд лет. Рисунок 2 демонстрирует, что наша Вселенная находится на этапе максимального искажения хаббловского закона расширения, а восстановление хаббловских течений произойдет лишь через десяток миллиардов лет.

Подводя итог, мы можем заключить, что формирование крупномасштабной структуры во Вселенной происходит в период от 1 до 20 млрд лет с момента Большого взрыва. Стадия подавления неоднородностей хаббловских потоков из-за гравитационного влияния темной энергии еще не наступила. Поэтому одно из ключевых утверждений статьи [4, с. 279] о том, что "динамический эффект темной энергии способен естественным образом объяснить оба факта астрономии, казавшиеся до сих пор загадочными: 1) регулярность потока расширения внутри ячейки однородности и 2) единый темп расширения в локальном и глобальном масштабах", оказывается неверным.

Рассмотрим подробнее локальные течения вещества и их свойства.

### 3.2. Анизотропия холодных течений

Для описания калибровочно-инвариантного поля пекулярных скоростей необходимо перейти к эйлеровым (квазифридмановским) координатам,  $y^\alpha = (\tau, \mathbf{y})$ , в которых гравитационное поле локально изотропно в любой точке пространства в линейном порядке по  $\kappa$ . Интересующее нас преобразование имеет вид

$$\mathbf{y} = \mathbf{x} + g\mathbf{S}, \quad \tau = t - avH_V\bar{q}, \quad (9)$$

$$S_i = -\bar{q}_i, \quad q = \frac{3}{2} H_V^2 \bar{q},$$

где  $\mathbf{S} = \mathbf{S}(\mathbf{x})$  — вектор смещения элемента среды из невозмущенного положения<sup>8</sup>,  $q = q(\mathbf{x})$  — безразмерный потенциал смещения [18], не зависящий от времени.

<sup>8</sup> Напомним, что координата  $\mathbf{x}$  не изменяется с течением времени вдоль траектории элемента среды и совпадает с  $\mathbf{y}$  при  $t \rightarrow 0$ .

Сравнение с (6) показывает, что

$$\kappa = -\operatorname{div} \mathbf{S} = \Delta \bar{q}.$$

Смещение частиц материи от невозмущенных хаббловских траекторий монотонно увеличивается со временем и достигает сегодня величины  $\sigma_S \simeq 15$  Мпк. В будущем, если темная энергия сохранит свойства вакуума, смещение приблизится к своему предельному значению порядка 25 Мпк.

Из (9) получаем следующие представления метрического интервала в квазифридмановской и лагранжевой сетках:

$$\begin{aligned} ds^2 &= (1 + 2\Phi) dt^2 - \tilde{a}^2 dy^2 = \\ &= dt^2 - \tilde{a}^2 (\delta_{ik} - 2g\bar{q}_{,ik}) dx^i dx^k, \end{aligned} \quad (10)$$

где  $\tilde{a} \equiv a(t)(1 - q)$  — 4-скаляр, инвариантный относительно преобразований координат,  $\Phi = (cg/a)q$  — гравитационный потенциал возмущений плотности. Функция  $b(t, \mathbf{x})$  пропорциональна следу пространственной части лагранжева метрического тензора (ср. (10) с (6)).

Уравнение (10) задает физическую эйлерову координату элемента среды,  $\mathbf{r} = \tilde{a}\mathbf{y}$ . Дифференцируя  $\mathbf{r}$  по собственному времени, получаем следующее выражение для пекулярной скорости материи:

$$\mathbf{v} \equiv \dot{\mathbf{r}} - H\mathbf{r} = v H_V \bar{\mathbf{q}}. \quad (11)$$

Выражение (11) совпадает с определением 3-скорости  $\mathbf{v}$  как пространственной компоненты 4-скорости материи в квазифридмановской системе отсчета:

$$v_i = -\frac{\partial t}{a \partial y^i} = -v H_V \bar{q}_{,i}.$$

Таким образом, фигурирующая в (7) величина  $v$  действительно является фактором роста пекулярной скорости.

Обратимся к локальным хаббловским течениям. В областях (4) неоднородной Вселенной хаббловские течения описываются тензорным полем  $H_{ik} = H_{ik}(t, \mathbf{x})$ , обобщающим функцию  $H(t)$  для фридмановской модели (см. (13)). В фиксированный момент времени  $t$  получаем из (9) координатное расстояние между близкими точками среды:

$$\delta y_i = (\delta_{ik} - g\bar{q}_{,ik}) \delta x^k. \quad (12)$$

После дифференцирования физического расстояния  $\delta \mathbf{r} = \tilde{a} \delta \mathbf{y}$  по времени получаем поле парных скоростей:

$$\delta V_i \equiv \frac{\partial}{\partial t} (\delta r_i) = H_{ik} \delta r^k, \quad (13)$$

$$H_{ik} = H \delta_{ik} - \dot{g}\bar{q}_{,ik} = H(\delta_{ik} - h\bar{q}_{,ik}). \quad (14)$$

Как видно, след (14) представляет собой объемную функцию Хаббла  $H_{\text{eff}} = (1/3)H_{ii}$ , однако сам тензор  $H_{ik}$  сильно анизотропен. Анизотропия локального расширения (вариация проекций  $H_{ik}$  на радиальные направления от данной точки  $\mathbf{x}$ ) имеет тот же порядок величины, что и отклонения  $H_{\text{eff}}$  от истинного параметра Хаббла  $H$ . Например, в области Местной Группы на расстояниях более 2 Мпк от ее барицентра ожидаемая анизотропия

квазихаббловских разбеганий карликовых галактик может достигать 30 %.

Поле  $H_{ik}$  описывает регулярные (холодные) течения вещества. Следует сказать, что формула (13) справедлива в приближении малых расстояний между галактиками, не превышающих корреляционный масштаб двухточечной корреляционной функции вектора смещений. Для разных проекций этого вектора относительно направления  $\delta \mathbf{y}$  корреляционный радиус варьируется от 15 до 40 Мпк. С увеличением расстояний случайные отклонения от закона (13) возрастают. Так устроен спектр космологических возмущений скорости: он падает в сторону коротких длин волн при  $k > 0,03$  Мпк<sup>-1</sup>, поэтому случайные отклонения от средних скоростей (13) возрастают с увеличением длины волны  $k^{-1}$ . Для иллюстрации, на расстоянии 3 Мпк от барицентра Местной Группы отклонения от зависимости (13) составляют величину порядка 30–40 км с<sup>-1</sup>, т.е. около 15–20 % средней скорости. В то же время полная пекулярная скорость Местной Группы относительно реликтового излучения равна 600 км с<sup>-1</sup>. Основные масштабы неоднородностей, ответственные за столь высокую скорость, находятся в диапазоне от 15 до 50 Мпк.

Мы видим, что стандартная теория образования структуры Вселенной не имеет никаких "загадочных" проблем в объяснении наблюдаемых относительных движений материи в квазиоднородных областях Вселенной ( $\kappa < 1$ ). Локальные течения регулярны, гладки и сильно коррелированы. Малость случайных отклонений скоростей галактик от средних холодных потоков объясняется формой начального спектра пространственных возмущений плотности (а не эволюционным влиянием темной энергии, как считает А.Д. Чернин). На малых расстояниях течения носят квазихаббловский характер — они радиальны и скорость разбегания пропорциональна расстоянию, — однако "константа Хаббла" зависит от положения наблюдателя и направления в пространстве. Никаких причин для модификации стандартной теории здесь нет. Модель "Малого взрыва"<sup>9</sup>, предложенная в разделе 3 статьи [4] для объяснения холодных потоков, не выдерживает критики. В этой модели пекулярная скорость "выброшенных" из Местной Группы галактик должна затухнуть в  $\sim 5$  раз под гравитационным влиянием темной энергии. Как видно из рис. 1, для этого потребуется более сорока миллиардов лет.

#### 4. О "внутренней симметрии в космологии"

Сильные возражения вызывает предложение А.Д. Чернина связать соотношение (1) с мифической "внутренней симметрией в космологии" ([4], раздел 5). Центральным для автора в связи с этим является введение "фридмановских интегралов". Для нахождения их значений автор произвольным образом выбирает нормировку масштабного фактора (величину фигурирующего в формуле (57) статьи [4] параметра  $R_0$ ) равной размеру современного горизонта,  $R_0 = H_0^{-1}$ . При другом выборе параметра  $R_0$

<sup>9</sup> "Локальная космология" раздела 3.4 работы [4], на которой базируется модель "Малого взрыва", основана на приближении статического гравитационного поля (см. формулы (28)–(36) работы [4]). Это противоречит стандартной теории, в которой гравитационный потенциал  $\Phi(t, \mathbf{x})$  зависит от времени (см. формулу (10)).

приближенного равенства между "фридмановскими интегралами", например для темной материи и темной энергии  $A_D$  и  $A_V$ , не было бы вовсе. Нетрудно видеть, что при выборе  $R_0 = H_0^{-1}$  приближенное равенство между "фридмановскими интегралами"

$$A_B \sim A_D \sim A_R \sim A_V \quad (15)$$

эквивалентно приближенному равенству

$$\Omega_B \sim \Omega_D \sim \sqrt{\Omega_R} \sim \frac{1}{\sqrt{\Omega_V}} \quad (16)$$

для современных отношений плотностей энергии к критической плотности. Для того чтобы убедиться в этом, достаточно воспользоваться уравнением Фридмана для пространственно плоской или почти плоской Вселенной в современный момент времени, из которого следует, что для всех типов материи  $\lambda$

$$A_\lambda = R_0 [\Omega_\lambda (H_0 R_0)^2]^{1/(1+3w_\lambda)},$$

где  $w_\lambda = p_\lambda/\rho_\lambda$  (ср. с формулой (59) статьи [4]). Отсюда и вытекает эквивалентность по порядку величины между соотношениями (15) и (16). Соотношение (16) в свою очередь эквивалентно приближенному равенству (1), дополненному соответствующим соотношением для фотонов, с учетом того факта, что  $\Omega_B$ ,  $\Omega_D$  и  $\Omega_V$  несильно отличаются от единицы в современную эпоху (см., однако, (17), (18)).

Таким образом, то, что автор считает "симметрией", в действительности является перефразированием исходного утверждения о том, что плотности различных компонент энергии близки между собой в современную эпоху. Никакого дополнительного понимания вопроса о естественности соотношения (1) введение в рассмотрение "фридмановских интегралов" не дает.

Столь же неуклюжим представляется и подход автора к проблеме плоскостности ("проблеме Дикке"). Без чрезвычайной тонкой подстройки начальных данных космологической эволюции на горячей стадии — подстройки, о которой говорил Дикке и которая автоматически осуществляется в инфляционной теории, — иметь малую пространственную кривизну в современной Вселенной невозможно. На языке автора это означает, что безразмерный параметр, фигурирующий в формуле (87) статьи [4], без тонкой подстройки начальных данных был бы чрезвычайно большим в случае открытой модели, а в случае замкнутой модели равенство между плотностью энергии материи и плотностью темной энергии вообще никогда бы не наступало. Например, в случае замкнутой Вселенной и при фиксированном  $\rho_V \sim 10^{-29}$  г см<sup>-3</sup> совершенно ясно, что если бы в эпоху нуклеосинтеза вклад кривизны в уравнение Фридмана составлял, скажем,  $10^{-6}$  от вклада вещества, то расширение Вселенной сменилось бы сжатием и последующим реколлапсом задолго до того, как темная энергия стала играть какую-нибудь роль в космологическом расширении.

В действительности соотношения типа (1) или (16) содержат в себе несколько интереснейших, но непонятных до сих пор аспектов. Например, сохраняющееся во времени соотношение  $\rho_D \approx \rho_B$ , возможно, указывает на общее происхождение темной материи и барионной асимметрии Вселенной; впрочем, несмотря на неоднократные попытки построить модели такого рода, сколь-

ко-нибудь убедительной теоретической реализации указанной возможности до сих пор не предложено. Соотношение  $\rho_V \approx \rho_D$ , справедливое в современную эпоху, но включающее в себя величины, по-разному зависящие от времени, указывает на привилегированное, с точки зрения образования структур (и соответственно зарождения жизни), положение на оси времени эпохи перехода от доминирования вещества к доминированию темной энергии.

Факт существования крупномасштабной структуры Вселенной является ключевым с точки зрения проблемы совпадений. Соотношения между параметрами  $\Omega_R$ ,  $\Omega_V$  и  $\Omega_M = \Omega_D + \Omega_B$ ,

$$\Omega_R \ll \Omega_M, \quad \Omega_V \lesssim \Omega_M \quad (17)$$

имеют прямое отношение к возможности генерации структуры во Вселенной: гравитационная неустойчивость развивается только в период доминирования нерелятивистской материи и невозможна ни на радиационно-доминированной стадии, ни на стадии доминирования темной энергии. Однако для образования структуры необходимо выполнение еще одного условия: начальная амплитуда возмущений должна быть именно такой, чтобы неоднородности успели вырасти в период открытия "окна" гравитационной неустойчивости. В нашей Вселенной оба необходимых условия выполнены: начальные возмущения (порядка  $10^{-5}$ ) успевают вырасти и образовать крупномасштабную структуру Вселенной в период открытия "окна" от 300 тыс. до 20 млрд лет. Соотношение же

$$\Omega_R \ll \Omega_B \lesssim \Omega_D \quad (18)$$

необходимо для образования звезд в нелинейных гало темной материи.

Сколько-нибудь подробное обсуждение этих и подобных вопросов потребовало бы написания отдельного обзора (см. по этому поводу, например, [1, 3, 19–21]); нам важно здесь подчеркнуть, что обозначенный круг вопросов гораздо богаче, чем может показаться после чтения статьи А.Д. Чернина.

## 5. О физической природе темной энергии

Почти всюду в [4] А.Д. Чернин отождествляет темную энергию с энергией вакуума, лишь кратко упоминая о других возможностях. Мы здесь хотим подчеркнуть, что не менее привлекательна и другая точка зрения, связывающая темную энергию с новым сверхслабым и сверхлегким полем — квинтэссенцией, фантомным полем и т.п.

Привлекательность этой точки зрения связана, в частности, с тем, что объяснить ненулевое, но чрезвычайно малое по сравнению с масштабами энергий известных взаимодействий (см. раздел 1) значение энергии вакуума чрезвычайно трудно. Гораздо проще представить себе, что энергия вакуума на какой-то стадии эволюции Вселенной (задолго до известных стадий) релаксировала практически до нуля. В литературе имеются примеры соответствующих механизмов [22, 23]. В такой картине вполне естественным является представление о том, что темная энергия — это не энергия вакуума, а энергия некоторого нового поля.

Другой эвристический аргумент состоит в том, что современная стадия ускоренного расширения Вселенной качественно аналогична инфляционной стадии, отличаясь от последней "лишь" величиной плотности энергии и соответственно параметра Хаббла. Инфляционные же теории, как правило, основываются на использовании нового поля — инфлатона, аналогом которого и служит темная энергия в форме сверхслабого поля.

Если темная энергия — это энергия нового поля, то параметр  $w_V$ , связывающий давление и плотность энергии согласно соотношению  $p_V = w_V \rho_V$ , действительно отличается от  $-1$  (кстати, он совершенно не обязан быть постоянным во времени) и плотность темной энергии зависит от времени. Подчеркнем, однако, что в большинстве моделей подобного рода параметр  $w_V$  автоматически оказывается близким к вакуумному значению  $w = -1$ , так что наблюдательное ограничение  $|w_V + 1| < 0,1$  пока не слишком сужает класс моделей с новыми полями.

Заметим, наконец, что нельзя отметить и возможность того, что ускоренное расширение Вселенной обусловлено модификацией теории гравитации на сверхбольших расстояниях и космологических временах. Одна из возможностей здесь связана с представлением о дополнительных пространственных измерениях бесконечного размера (см., например, [24]), хотя до сих пор попытки построения соответствующих моделей сталкиваются с внутренними противоречиями. Другой, более реалистичной с точки зрения теоретической реализации, возможностью является расширение общей теории относительности до скалярно-тензорной теории гравитации [25, 26].

Таким образом, ускоренное расширение Вселенной может быть первым свидетельством новых физических явлений, происходящих на космологических масштабах (и, возможно, не только на этих масштабах). Разные объяснения ускоренного расширения характеризуются различной зависимостью плотности темной энергии от времени. Поиск зависимости темной энергии от времени, а в перспективе детальное исследование этой зависимости — важнейшая задача наблюдательной космологии, которая должна в конечном итоге позволить выяснить физическую природу темной энергии.

## 6. Дополнительные комментарии

Статью А.Д. Чернина нужно читать с некоторой долей осторожности. Так, далеко не все исследователи разделяют энтузиазм автора по поводу весьма вычурной модели Люмине с соавторами: особенности в спектре угловой анизотропии реликтового излучения, если они действительно имеются, могут быть объяснены менее экзотическим образом. Почти то же можно сказать про модель Аркани-Хамеда — Димопулоса — Двали (АДД по общепринятой терминологии). Эта модель, безусловно, сыграла значительную роль в формировании представления о том, что дополнительные пространственные измерения могут иметь большой (и даже бесконечный) размер, однако крайне маловероятно, что природа устроена именно в соответствии с этой моделью. Отметим еще, что статья А.Д. Чернина изобилует терминами, которые не являются общепринятыми (ЭГ-вакуум, К-вакуум, фридмановские интегралы и т.д.).

Суммируя, мы бы хотели порекомендовать заинтересованному читателю составить более взвешенное мнение

по вопросам, затронутым в статье А.Д. Чернина, используя для этого другие обзоры по этой теме, например [20, 27–30].

## 7. Заключение

Открытие темной энергии расставило все точки над  $i$  в наблюдательной космологии. Впервые за все время развития науки появилась стандартная космологическая модель ( $\Lambda$ CDM), удовлетворяющая всей совокупности наблюдательных данных и не имеющая сегодня серьезных конкурентов. Замечательно, что стандартная модель прекрасно описывает как эволюцию Вселенной в целом, так и образование ее структуры. Несмотря на влияние темной энергии, генерация структуры все еще происходит в современной Вселенной и будет продолжаться в течение около 10 млрд лет.

В то же время признание факта существования темной энергии качественно изменило ситуацию в физике, указав на недостаточность наших знаний о микромире. Не будет преувеличением сказать, что выяснение физической природы темной энергии — это центральная проблема современного естествознания.

Авторы благодарны А.Г. Дорошкевичу, М.В. Либанову, Е.В. Михеевой, В.Н. Строкову за полезные обсуждения. Работа выполнена при частичной поддержке РФФИ, гранты 07-02-00886 и 08-02-00473.

## Список литературы

- Weinberg S *Rev. Mod. Phys.* **61** 1 (1989)
- Martel H, Shapiro P R, Weinberg S *Astrophys. J.* **492** 29 (1998); astro-ph/9701099
- Linde A, in *Science and Ultimate Reality: Quantum Theory, Cosmological and Complexity* (Eds J D Barrow et al.) (Cambridge: Cambridge Univ. Press, 2004) p. 426; hep-th/0211048
- Чернин А Д *УФН* **178** 267 (2008) [Chernin A D *Phys. Usp.* **51** (3) (2008)]
- Kofman L A, Gnedin N Y, Bahcall N A *Astrophys. J.* **413** 1 (1993)
- Ostriker J P, Steinhardt P J *Nature* **377** 600 (1995)
- Krauss L M, Turner M S *Gen. Rel. Grav.* **27** 1137 (1995); astro-ph/9504003
- Krauss L M *Astrophys. J.* **480** 466 (1997); astro-ph/9607103; *Astrophys. J.* **501** 461 (1998); astro-ph/9706227
- Totani T, Yoshii Y, Sato K *Astrophys. J.* **483** L75 (1997); astro-ph/9705014
- Carroll S M, Press W H, Turner E L *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* **30** 499 (1992)
- Melchiorri A et al. (Boomerang Collab.) *Astrophys. J.* **536** L63 (2000); astro-ph/9911445
- de Bernardis P et al. (Boomerang Collab.) *Nature* **404** 955 (2000); astro-ph/0004404; Lange A E et al. (Boomerang Collab.) *Phys. Rev. D* **63** 042001 (2001); astro-ph/0005004
- Balbi A et al. *Astrophys. J.* **545** L1 (2000); "Erratum" **558** L145 (2001); astro-ph/0005124; Hanany S et al. *Astrophys. J.* **545** L5 (2000); astro-ph/0005123
- Jaffe A H et al. (Boomerang Collab.) *Phys. Rev. Lett.* **86** 3475 (2001); astro-ph/0007333
- Pogosian L *New Astron. Rev.* **50** 932 (2006); astro-ph/0606626
- Célerié M-N "The accelerated expansion of the Universe challenged by an effect of the inhomogeneities" *New Adv. Phys.* **1** 29 (2007); astro-ph/0702416
- Alexander S et al. "Local void vs dark energy: confrontation with WMAP and type Ia supernovae", arXiv:0712.0370
- Лукаш В Н *ЖЭТФ* **79** 1601 (1980) [Lukash V N *Sov. Phys. JETP* **52** 807 (1980)]; *Письма в ЖЭТФ* **31** 631 (1980) [*JETP Lett.* **31** 596 (1980)]; astro-ph/9910009

19. Tegmark M, Rees M J *Astrophys. J.* **499** 526 (1998); astro-ph/9709058
20. Weinberg S "The cosmological constant problems", astro-ph/0005265
21. Рубаков В А *УФН* **177** 407 (2007) [Rubakov V A *Phys. Usp.* **50** 390 (2007)]
22. Rubakov V A *Phys. Rev. D* **61** 061501 (2000); hep-ph/9911305
23. Steinhardt P J, Turok N *Science* **312** 1180 (2006); astro-ph/0605173
24. Deffayet C, Dvali G, Gabadadze G *Phys. Rev. D* **65** 044023 (2002); astro-ph/0105068
25. Boisseau B et al. *Phys. Rev. Lett.* **85** 2236 (2000); gr-qc/0001066
26. Gannouji R et al. *JCAP* (09) 016 (2006); astro-ph/0606287
27. Sahni V, Starobinsky A *Int. J. Mod. Phys. D* **9** 373 (2000); astro-ph/9904398
28. Peebles P J E, Ratra B *Rev. Mod. Phys.* **75** 559 (2003); astro-ph/0207347
29. Padmanabhan T *Phys. Rep.* **380** 235 (2003); hep-th/0212290
30. Sahni V, Starobinsky A *Int. J. Mod. Phys. D* **15** 2105 (2006); astro-ph/0610026

### Dark energy: myths and reality

**V.N. Lukash**

*Astro Space Center of P.N. Lebedev Physical Institute, Russian Academy of Sciences,  
ul. Profsoyuznaya 84/22, 117997 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-495) 333-3366. Fax (7-495) 333-2378. E-mail: vladimir@lukash.asc.rssi.ru*

**V.A. Rubakov**

*Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences,  
prosp. 60-letiya Oktyabrya 7a, 117312 Moscow, Russian Federation  
Tel. (7-499) 135-2259, (7-499) 135-2051. Fax (7-499) 135-2268  
E-mail: rubakov@ms2.inr.ac.ru*

In this paper on the cosmological dark energy problem we argue that in spite of dark energy's influence, large-scale structure is still being generated in the Universe and this will continue for another ten billion years or so. Some points of the paper "Dark energy and universal antigravitation" by A.D. Chernin (*Usp. Fiz. Nauk* **178** 267 (2008) [*Phys. Usp.* **51** (3) (2008)]) are commented on.

PACS numbers: **95.35. + d, 98.80. – k**

DOI: 10.3367/UFNr.0178.200803d.0301

Bibliography — 30 references

*Received 28 January 2008*

*Uspekhi Fizicheskikh Nauk* **178** (3) 301–308 (2008)

*Physics–Uspekhi* **51** (3) (2008)