

Препринт ФИАН № 6

Бурдюжа В.В.

**Космологическая константа
(современный взгляд)**

Москва, 2008

Абстракт

Кратко обсуждается современный взгляд на проблему космологической константы. Предполагается, что космологическая константа «закалилась» при $E \sim 150 \text{ MeV}$ после последнего фазового перехода (кварк-глюонного). До этой энергии вакуумная составляющая Вселенной эволюционировала (уменьшалась) скачками, т.е. в ее положительную плотность энергии вносили отрицательные вклады конденсаты квантовых полей. Это был квинтэссенционный период эволюции Вселенной – период интенсивной потери симметрии в первые доли микросекунды ее жизни. Но и эта точка зрения может быть подвергнута критике.

Другие приближения к решению этой проблемы также рассматриваются, т.к. малость космологической константы, точнее, ее «способность» ускорить расширение Вселенной, вызывает огромный интерес. Все предложения по космологической константе были недавно расклассифицированы S.Nobbenhuis, но удовлетворительного решения последней до сих пор нет. Поэтому эта проблема остается основным препятствием для дальнейшего прогресса квантовой гравитации и космологии. Хотя уже имеется понимание, что лямбда-член, космологическая константа, вакуумная энергия и темная энергия – это одно и то же понятие. Кроме того, имеется понимание и того, что нет необходимости компенсировать все 120 порядков.

Существование звезд из темной энергии также кратко обсуждается, как и возможность решения проблемы космологической константы путем введения универсальной волновой функции т.е. введением квантовой декогерентности (отказом от копенгагенской интерпретации квантовой механики, взяв точку зрения Х.Эверетта).

В уравнения общей теории относительности космологическая константа (лямбда-член) была введена неспроста. А.Эйнштейн преследовал определенную цель, пытаясь опираться на общепринятую точку зрения о статичности Вселенной.* Дальнейшая «драма» с этим введением известна, которая началась после открытия Э.Хабблом расширения Вселенной.

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

Но общая теория относительности есть хорошо работающая классическая теория гравитации и в ранней Вселенной, в ее квантовом режиме, она не применима,** а вычисление космологической константы «в лоб» приводит к огромной разнице вычисляемой величины и настоящей измеряемой плотности энергии вакуума (более 120 порядков). Современное значение плотности энергии вакуума - следующее:

$$\rho_{\Lambda} \sim 10^{-47} (\text{GeV})^4 \sim 10^{-29} \text{ г/см}^3 \text{ или } \Omega_{\Lambda} \sim 0.7 \quad (2)$$

Я.Зельдович [1], понимая это, 40 лет назад из соображений размерности получил формулу для вычисления Λ -члена, в которой космологическая постоянная представляет собой энергию нулевых колебаний квантовых полей, т.е. энергию вакуума:

$$\begin{aligned} \Lambda &\sim 8\pi G_N m^6 h^4 && \text{см}^{-2} \\ \rho_{\Lambda} &\sim G m^6 c^2 h^4 && \text{г/см}^3 \end{aligned} \quad (3)$$

Для вывода этой формулы Я.Зельдович использовал идеи А.Эдингтона и П.Дирака о больших числах, подсчитывая гравитационную энергию между частицами в вакуумных флуктуациях, как эффект высшего порядка (формулы (3) слегка модифицировал Н.Кардашев [2]). Масса частицы в формулах (3) в шестой степени и подставляя туда массу электрона или

* И.Дымникова считает, что А.Эйнштейн ввел Λ -член, чтобы работал принцип Маха.

** До сих пор Эверетовская интерпретация квантовой механики применительно к проблеме космологической константы не была обсуждена.

протона, как это делал Я.Б.Зельдович, получить удовлетворительное согласие с наблюдениями - невозможно. Но ситуация радикально меняется, если подставить в эту формулу массу π -мезона. Кроме того, здесь выстраивается красивая физика вакуумной составляющей Вселенной, но пока что на феноменологическом уровне. Очень вероятно, что наша Вселенная (а живем мы в мультиверсе) родилась как вакуумная флуктуация «из ничего» [3] и, вероятно, вакуумная энергия при этом была положительной, а симметрия очень высокой. При охлаждении Вселенной (она расширяется) имели место релятивистские фазовые переходы, внося своими конденсатами отрицательные вклады в первоначальную положительную плотность энергии вакуума. Сейчас мы живем в вакууме, который последний раз изменился (точнее сказать «закалился») в результате кварк-глюонного фазового перехода, т.е. когда во Вселенной образовался конфайнмент кварков и глюонов при $T \sim 150$ MeV. Можно сказать, что современный вакуум Вселенной с уравнением состояния $p = -\Delta$ есть вакуумный конденсат последнего релятивистского фазового перехода. Мы не знаем точной цепочки фазовых переходов, реализуя которую Вселенная теряла свою высокую симметрию, хотя последние два фазовых перехода должны были быть обязательно. Вероятно, следом потери высокой симметрии Вселенной могла быть следующая цепочка:

$$\begin{array}{l}
 P * D_4 \cdot [SU(5)]_{SUSY} * D_4 \cdot [U(1) \cdot SU(2) \cdot SU(3)]_{SUSY} * D_4 \cdot SU(3) \cdot SU(2) \cdot U(1) * \\
 10^{19} GeV \qquad \qquad 10^{16} GeV \qquad \qquad \qquad 10^5 \text{ } \equiv \text{ } 10^{10} GeV \\
 * D_4 \cdot SU(3) \cdot U(1) * D_4 \cdot U(1) \\
 10^2 GeV \qquad \qquad 150 MeV
 \end{array} \tag{4}$$

Здесь: D_4 – группа диффеоморфизмов, связанная с гравитацией. $SU(3)$, $SU(2)$, $U(1)$ – группы симметрии стандартной модели физики элементарных частиц – сильного, слабого и электромагнитного взаимодействия. Заметим, что потеря симметрии или «clash» симметрий в мембранном сценарии, обсуждается во многих работах, начиная с Планковской энергии, т.е. начиная

с матричной (М-теории), претендующей на «теорию всего» [4-5]. Вероятно, и дальше можно продолжить спекуляцию, как происходила компенсация «огромной» величины плотности вакуумной энергии к ее сегодняшнему значению в результате релятивистских фазовых переходов. Вообще-то идея компенсации впервые была высказана довольно давно А.Долговым в работе [6]. Прежде всего, воспроизведем «картину» вероятной потери симметрии Вселенной в ее квантовом режиме и обозначим те теории, которые за них в ответе.

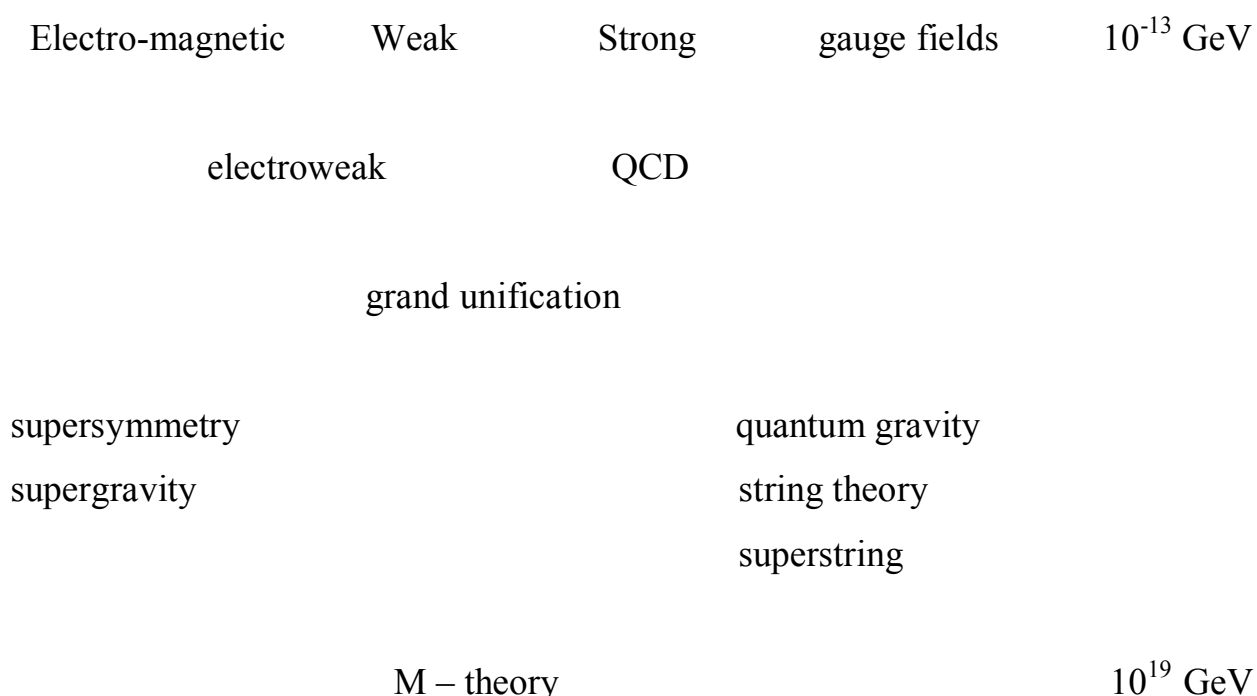


Рис. 1.

Эта картинка была представлена F.Englert [4] на недавней конференции в Miami (декабрь 2007). Как видно из Рис. 1, Вселенная к сегодняшнему дню «потеряла» из-за расширения 32 порядка по температуре. 120 порядков по плотности вакуумной энергии она могла также потерять в первые доли секунды из-за рождения частиц и из-за компенсации своей положительной

плотности энергии конденсатами квантовых полей. Как доказать эту гипотезу и как найти «правильную» цепочку фазовых переходов*.

Простейшее «доказательство», подстановкой в формулу Я.Зельдовича (3) средней массы π -мезона $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda/\rho_{\text{ст}} \sim 0.7$, получается автоматически. Здесь также имеется место и для неплохой физики. Мы утверждаем, что до $T \sim 150$ MeV Вселенная интенсивно теряла высокую симметрию, т.е. до этой энергии реализовался квинтэссенционный сценарий эволюции вакуумной составляющей Вселенной, когда космологическая постоянная зависит от красного смещения (при $E_{\text{pl}} \sim 10^{19}$ GeV красное смещение было бесконечным $z = \infty$). Итак, до 150 MeV в плотность вакуумной энергии вносили отрицательные вклады конденсаты квантовых полей, которые образовывались из-за резкого понижения температуры. Часть вакуумной энергии ушло на рождение частиц. Везде в тексте предполагается, что вакуумная составляющая и космологическая постоянная одно и то же понятие, также как и лямбда-член и темная энергия.

В стандартной модели физика элементарных частиц два конденсата с различными свойствами имеют место: Хиггсов конденсат и непертурбативный кварк-глюонный конденсат. Эти конденсаты имеют асимптотическое уравнение состояния $p = -\Delta$. Здесь уместно заметить, что малость космологической константы в нашей Вселенной имеет глубокий смысл. Вселенная с большим отрицательным Δ никогда не станет макроскопической**. Во Вселенной с большим положительным значением Δ не могут быть образованы сложные ядерные, химические и биологические структуры (мало времени). Следовательно, малость космологической

* Мы впервые выписали эту цепочку фазовых переходов в работе [7].

** Для ясности можно использовать в качестве физического смысла космологической постоянной – антигравитация.

константы – это данность, которая позволила так развиться нашей Вселенной, что в ней образовались крупномасштабные барионные структуры, сложные ядра и даже жизнь.* Но вернемся к кварк-глюонному конденсату, который был вехой в эволюции вакуумной компоненты, т.к. этот конденсат «закалил» космологическую постоянную (вакуумную энергию) при $T \sim 150 \text{ MeV}$. Это был хромодинамический квантовый фазовый переход, в результате которого киральная симметрия QCD вакуума была нарушена. Физической реализацией спонтанного нарушения киральной симметрии $SU(3)_L \cdot SU(3)_R$ являются голдстоуновские бозоны, точнее октет псевдоскалярных Голдстоуновских состояний в спектре образовавшихся частиц. Главный вклад в периодическое коллективное движение непертурбативного вакуумного конденсата внесли легчайшие частицы октета π -мезоны.** Здесь π -мезоны – возбуждения основного состояния, т.е. они характеризуют QCD вакуум. Подставляя среднюю массу π -мезонов ($138,04 \text{ MeV}$) в формулу Зельдовича (3) получаем $\Omega_b \approx \Omega_c / \Omega_{cr} \approx \frac{1}{3} c^2 / 3H_0^2 \sim 0.7$, если $H_0 \approx 72.5 (\text{km/s}) / \text{Mpc}$.

Это совпадение не может быть случайным, т.к. любые частицы есть возбуждения вакуума. Таким образом, вероятно, космологический вакуум закалился при $T \sim 150 \text{ MeV}$ и при дальнейшем охлаждении до $T \sim 10^{-10} \text{ MeV} \equiv 10^{-4} \text{ eV}$ этот вакуум можно рассматривать как космологическую константу, хотя «небольшие» изменения плотности энергии вакуума в сторону уменьшения, вероятно, должны быть, т.к. при интенсивном расширении плотность материи сильно падает [9]. В работе [10] подобный сценарий был рассмотрен с конденсатом скалярного поля. До $z \sim 0,5$ (в работе [10] это момент перехода от режима замедленного расширения к режиму ускоренного расширения) скалярное поле вело себя

*Здесь как-то может быть проявляются антропные резоны.

** На этот момент в свое время мое внимание обратил Д.А.Киржниц.

как космологическая константа, после $z \sim 0.5$ конденсат **уже** зависит от времени. Здесь также был рассмотрен фазовый переход. Но вернемся к моменту «закалки» вакуума при $T \sim 150 \text{ MeV}$. Мои подсчеты по формуле Я.Зельдовича могут быть наивными, т.к. Я.Зельдович вывел свою формулу (3) из соображений размерности и используя идеи П.Дирака и А.Эдингтона о больших числах. В работе [8d], исследуя процесс самоорганизации вакуума, мы вычислили плотность энергии непертурбативного QCD вакуума (кварк глюонный конденсат):

$$\rho_{vac} \approx 8.2 \mathcal{Q}_{QCD}^4 \quad (5)$$

Среднее значение квадрата флуктуаций глюонных полей есть основная характеристика непертурбативного QCD вакуума. Подставляя $\mathcal{Q}_{QCD} \approx 160 \text{ MeV}$, получаем $\rho_{vac} \sim 5 \times 10^{-3} (\text{Gev})^4$. Это значение экстремально отличается от наблюдаемого сегодняшнего значения $\rho \sim 10^{-47} (\text{Gev})^4$. Следовательно, наше утверждение о «закалке» космологической константы при $T \sim 150 \text{ MeV}$ не может являться точным.

Рассмотрим несколько новых приближений к проблеме космологической константы. Если несколько лет назад мы имели только 3 варианта темной энергии: ν -член, если $p = -\rho$ и $w = p/\rho = -1$; квинтэссенция, если $p \neq -\rho$ и $w > -1$; фантомная энергия, если $p \neq -\rho$ и $w < -1$, то сейчас их более десятка [11]. Отметим также, что вакуумная энергия – причина ускоренного расширения Вселенной в настоящее время ($z=0$), если $w < -1/3$

$$\frac{\ddot{a}(t)}{a(t)} \approx -\frac{4}{3} \mathcal{Q}_{BE}^2 \left(\frac{1}{3} + w \right) \quad (6)$$

Интересным вопросом является вопрос «почему энергия, запасенная в вакууме, не гравитирует?», который был поставлен еще S.Weinberg [12] и рассматривается активно до настоящего времени [13-14]. Речь идет о введении Лоренц инвариантной переменной для вакуума (3 forms для вакуума уже вводились Хоукингом [15]), которая позволяет обсуждать термодинамические свойства вакуума, такие как стабильность, сжимаемость,

Для вакуума этот инвариант приводит космологическую константу точно к нулю. Но она, как известно, мала, но не ноль. Здесь эрмитовы операторы преобразуются в операторы, чья эрмитовость модифицируется. Преобразования от x к ix требуют, чтобы граничные условия состояний были модифицированы. Волновые функции Φ , которые периодичны в действительном пространстве, перемещаются к волновым функциям, которые периодичны в ix . В этом подходе естественность в том, что вакууму приписывается некоторая симметрия, которая его зануляет точно.

В работе [17] подробно рассматриваются 4 различные класса «решений» проблемы космологической постоянной. Автор S.Nobbenhuis приходит к выводу, что ни один из известных потенциальных «кандидатов», способных решить эту проблему, не является приемлемым. Его точка зрения, что наиболее элегантное решение этой проблемы должно идти из симметричных соображений, совпадает с нашей точкой зрения. Другие точки зрения (может быть не такие элегантные) относятся: 1) к нарушению «строительных» блоков ОТО; 2) к статистическим приближениям; 3) к обратным реакциям на неустойчивость.

Но вернемся к симметрии. Здесь, как вариант, одним из приближений может быть поиск симметрии, которая запрещает существование космологической константы и исключает ее как на классическом, так и на квантовом уровнях [18]. Хороший пример суперсимметрия, хотя имеются некоторые трудности в применении суперсимметричных моделей, как к проблеме космологической константе, так и к корректному описанию феноменологии физики частиц, включая проблему массы бозона Хиггса. А искать такую симметрию авторы [18] предлагают в комплексном пространстве. Кроме того, авторы этой работы также предлагают следующий постулат: вакуумное состояние эволюционирует *time-symmetrically* образом, т.е. нарушается CPT симметрия для вакуума (вероятно, она и должна быть нарушена в вакууме)

$$w(t) \approx \frac{1}{2} [T \exp(-iHt) T^{-1} \exp(iHt) - \exp(iHt) T \exp(-iHt) T^{-1}] \quad (9)$$

Идея присутствия полей, эволюционирующих назад во времени (9) и их сосуществования с нормальными полями, эволюционирующими вперед во времени, использовалась ранее во многих различных контекстах. Здесь, конечно, надо отметить, что не существует частиц движущихся обратно во времени в нашем мире, в котором время движется вперед. Единственное влияние, которое оказывает этот «обратный мир» на нас, есть присутствие вакуумной энергии в правой части уравнений Эйнштейна.

Вероятно, уместно напомнить и несколько «новых» идей, которые уже были упомянуты в нашем кратком обзоре [19] и возвратиться совсем к последним идеям.

В работе [20] автор рассматривает комплексное скалярное поле и даже предлагает форму его потенциала для объяснения кривых вращения галактик, когда это поле в фазе Бозе-конденсата. Вне этой фазы (т.е. на космологической шкале) это поле обеспечивает отталкивание. Эта модель призвана объяснить как наличие темной материи (фаза Бозе-конденсата), так и наличие темной энергии. Автор работы [20] называет свою модель темной жидкостью, которая может быть в 2-х фазах. Лагранжиан такого поля имеет вид:

$$L \approx g^{\mu\nu} \partial_\mu \Phi^* \cdot \partial_\nu \Phi - V(\Phi) \quad (10)$$

а его потенциал $V(\Phi)$ обладает глобальной симметрией:

$$\Phi \rightarrow \Phi e^{i\alpha} \quad (11)$$

И, конечно, проблема есть в выборе такого потенциала. Автор работы [20] прекрасно понимает, что в момент нуклеосинтеза Вселенной (BBN) плотность такого поля должна быть пренебрежимо мала, если оно обеспечивает «поведение» материи в момент рекомбинации и в момент образования структур. В настоящую эпоху оно обеспечивает отталкивание на

космологической шкале и притяжение на более мелких масштабах, как это уже отмечено. В работе [20] даже предлагается вид такого потенциала:

$$V(\Phi) \sim m^2 \Phi^2 \exp(-\alpha \Phi^2) \quad (12)$$

и, вероятно, подбором α и β можно получить нужное поведение, хотя это сделать очень трудно (потенциал слишком «вычурный»). Тем не менее, красивая физика здесь также может реализоваться. Там, где барионы собираются в области с достаточной плотностью, скалярное поле возбуждается и конденсируется, образуя гало (Бозе-конденсат), т.е. оно (скалярное поле) в этих областях имеет притягивающий потенциал, как любая материя. Где барионная плотность низкая (космологическая шкала), данное скалярное поле не возбуждается, а имеет отталкивающий потенциал, который и ускоряет Вселенную.

Не менее интересной (в некотором роде даже сумасшедшей) является идея о звездах из темной энергии [21-22]. Если к новым компактным объектам, которые уже обсуждались, мы как-то привыкли, то обсуждать звезды из вакуума как-то страшновато. Компактные объекты – это все фермионные звезды – белые карлики, нейтронные (кварковые) звезды, черные дыры и преонные звезды, и все бозонные звезды: аксионные, дилатонные и геонные. А теперь вот «всплыли» звезды из темной энергии. Здесь надо обратиться к истокам за разъяснениями. Разъяснения обсуждены И.Дымниковой в работе [23(a)] «Космологический член как источник массы». А.Эйнштейн ввел Λ -член, чтобы «работал» принцип Маха (материя имеет инерциальные свойства тогда и только тогда, когда существует другая материя во Вселенной), хотя по общепринятой версии, он ввел Λ -член, чтобы Вселенная была стационарной. К уравнениям, которые описывают гравитацию, как геометрию пространства-времени, генерируемую материей:

$$G_{\mu\nu} \sim 8\pi G T_{\mu\nu} \quad (13)$$

он добавил Λ -член:

$$G_{\alpha\beta} = 8\pi G T_{\alpha\beta} + \lambda g_{\alpha\beta} \quad (14)$$

При $T_{\alpha\beta} \neq 0$ введение λ -члена исключало инерцию. После того, как де Ситтер нашел решение Эйнштейновских уравнений с $\lambda g_{\alpha\beta}$ без $T_{\alpha\beta}$ (де Ситтеровское решение), дальнейшая «драма» с отказом от λ -члена хорошо известна. Но суть осталась. λ -член имеет что-то общее с инерцией, а значит и с материей.

В работах [23] замечено, что классическая ОТО не может быть корректной в картине гравитационного коллапса, т.к. она конфликтует с обычной квантовой механикой из-за невозможности синхронизации атомных часов на горизонте событий (речь идет о черной дыре). Для «спасения» классических идей предложена альтернатива, что при коллапсе вакуумное состояние имеет «недиагональный порядок» и в области горизонта событий пространство-время подвергается непрерывному фазовому переходу. Утверждается, что падающая материя конвертирует в вакуумную энергию, когда последняя проходит через горизонт событий. При приближении к горизонту событий падающая материя распадается на легкие частицы (ускоряется даже процесс протонного распада). Это дополнительный (а может основной) источник позитронов в галактиках. Тогда, если коллапсирует объект с массой большей, чем несколько масс Солнца, то у него образуется поверхность, соответствующая квантовой критической поверхности для пространства-времени, внутренность которого имеет больше вакуумной энергии, чем обычное пространство-время. Это и есть «dark energy star». Автор работы [23(a)] ввела сверхтекучесть, как наилучшую модель для вакуума пространства-времени (здесь вакуумная энергия много больше, чем космологическая вакуумная энергия). Кроме того, внутри такой звезды отсутствует сингулярность и временной фактор для внутренней метрики – положительный в резком противоречии с предсказаниями ОТО, в которой имеет место отрицательный временной

фактор – течение времени замедляется! Другими словами, внутри «dark energy star» имеет место де Ситтеровский вакуум [23(б)] (более точно, де Ситтеровский конденсат!). Как и черные дыры, эти звезды, имея стабильные конфигурации, могут существовать довольно долго и даже возможно, что это будет отдельная популяция звезд. Интересным моментом является коллапс такой звезды, т.к. в течении коллапса w может пересечь фантомную границу $w = -1$ (т.е. стать $w < -1$) и тогда «dark energy star» конвертирует в кротовую нору.

Менее экзотическое предложение сделано в работе [24]. Авторы использовали голографические теории. Здесь малость космологической вакуумной энергии авторы называют естественной, распространяя голографические идеи на всю Вселенную. Критическую плотность Вселенной, выраженную в Планковских единицах, они сравнивают с обратной энтропией Вселенной, также выраженную в Планковских единицах. Эти величины практически совпадают. Конечно, встает тут же вопрос о возможности применения голографического принципа ко всей Вселенной, т.к. это 4-х мерная система, имеющая объем и одну скалярную координату – время. Идея в том, что голография ограничивает число степеней свободы, которые могут существовать внутри граничной поверхности, конечным значением этих степеней свободы. А если вспомнить, что современная теория поля с ее беконечностями, вероятно, не является последним словом в физической науке, то голографический подход, конечно, оправдан. Бесконечное число степеней свободы допускает не только теория электромагнитного поля, но и теория суперструн, поэтому уход от бесконечностей – правильный путь.

Голографична ли Вселенная? Примером действия голографического принципа стали анти-де Ситтеровское пространство-время, которое имеет границу, находящуюся на бесконечном удалении. Квантовые полевые теории в их настоящем виде не голографичны! В этом причина, по мнению авторов

работы [24], огромной переоценки вакуумной энергии, т.е. может быть, что ключом к будущей фундаментальной теории будут голографические представления. Они утверждают также, что голография есть первичная причина малости полной плотности Вселенной и, следовательно, малости ее вакуумной составляющей. В голографических теориях энтропийная граница кладет верхний предел на среднюю плотность энергии [25-26]. Проблема с вакуумной энергией была (и пока есть) в том, что на Планковской шкале плотность вакуумной - энергии огромная величина $\rho \sim M_{Pl}^4$ ($M_{Pl} \sim 10^{19}$ GeV). В реальности эта величина контрастирует с наблюдаемой плотностью (10^{-47}) на 123 порядка, как мы уже отмечали это несколько раз. Авторы работы [24] считают, что малость наблюдаемой космологической вакуумной энергии, есть естественное следствие 2-х хорошо известных факторов:

1. Вселенная – голографическая система, т.е. ее энтропия ограничивается голографической энтропийной границей (пределом);

2. Вселенная – большая по сравнению с Планковской длиной (это, конечно, тонкое замечание).

Они получили голографический предел на плотность энергии во Вселенной:

$$\rho \leq \frac{3T}{4R} M_{Pl}^2 \leq \frac{3}{2A} M_{Pl}^2 \quad (15)$$

в котором T-температура, R – размер горизонта Вселенной, $A \approx 4\pi R^2$; $T \approx \frac{1}{2\pi R}$.

Хотя 123 порядка «отыграть» не удастся, но 90 порядков, которые дает голографический подход, это уже что-то.*

Обсудим кратко тестирование темной энергии, хотя следует также упомянуть и о гравитационном секторе теории, т.е. о модификации гравитации, и о дополнительных измерениях. Так или иначе все это связывается с космологической константой. Например, в работе [27]

* По мнению авторов работы [24], голографическая термодинамика кладет верхний предел на плотность энергии во Вселенной, посредством ее энтропийного предела.

рассматривают дополнительную пространственную размерность, т.е. 5D теорию гравитации. Здесь (в мембранном секторе) гравитация распространяется в объем, а все частицы «заперты» на гиперповерхности (бране). В этой версии космологическая константа может существовать как в объеме, так и на бране. Кроме того, она бесконечна в момент рождения Вселенной и распадается к астрофизическому приемлемому значению к настоящему времени. Основная формула работы [27] выглядит следующим образом:

$$\lambda = \frac{3}{L^2} \left(\frac{\ell}{\ell_0} \right)^2 \quad (16)$$

При $\ell = \ell_0$ $\lambda = 3/L^2$ (ℓ - дополнительная координата, ℓ_0 - произвольная константа). В стандартном случае по версии авторов работы [27] $L = 10^{28}$ см при $\lambda = 3/L^2$. Заметим, что 5D теории это низкоэнергетический предел четных теорий с дополнительными измерениями. Они включают: 10D - суперсимметрию, 11D - супергравитацию и 26D - струнную теорию. Легко заметить, что в работе [27] присутствует расширение ОТО. Скалярно-тензорные модели для темной энергии позволяют даже, если $w < -1$ (фантомный случай) расти возмущениям плотности материи. Это и есть модификация гравитации, как отмечает А.Старобинский в ряде своих последних работ [28-29]. Т.е. это уже геометрические модели темной энергии. Среди геометрических моделей простейшая модель может быть модель [29], в которой плотность Лагранжиана есть:

$$L = \frac{f(R)}{16\pi G} - L_m \quad (17)$$

В этом выражении L_m описывает все негравитирующие сорта материи, а $f(R)$ может быть произвольной функцией, при $f(R) = R + \lambda$ - это функция редуцируется к Эйнштейновской гравитации с космологической константой

(R-Ricci скаляр). Здесь стандартная модель – Λ CDM содержится как частный случай. В этой модели (впрочем как и любой другой, имеющей отношение к темной энергии) наличествуют свои трудности. Модели темной энергии с $f(R)$ гравитацией «страдают» от переизбытка новых скалярных частиц (скаляронов) в очень ранней Вселенной.

Возможный интерес представляет и хорошо забытое старое. Здесь речь пойдет об экранировке (лучше сказать о занулении) космологической константы. В работах [30-31] показывается, что Эйнштейна-Гильберта действие

$$S = \frac{1}{16\pi G} \int d^4x \sqrt{-g} (R - 2\Lambda) \quad (18)$$

невозможно обратить в нуль путем ренормализации в классическом случае (т.е. в ОТО). Но в квантовом случае, в Φ^4 теории, это сделать возможно (см. подробно работу [31]). Это практически совпадает с утверждением Полякова [30], что в действительности имеет место «инфракрасная экранировка» гравитационного поля (речь идет об инфракрасных флуктуациях метрики, которые экранируют Λ).

Авторы работы [32] ставят очень важный вопрос. Последние наблюдательные данные говорят о том, что космологическая константа (вакуумная энергия) никогда не изменялась, т.е. она реально – константа, тогда это должно быть фундаментальным свойством пространства. В этом случае «масштаб» $M_{cc} \sim \Lambda_{DE}^{1/4} \sim 10^{-3}$ eV. Это значение на 15 порядков меньше «масштаба» стандартной модели $M_{SM} \sim 1$ TeV. Но с другой стороны, между Планковской шкалой $M_{pl} \sim 10^{19}$ GeV и «масштабом» стандартной модели существует тоже огромный и практически тот же самый зазор (здесь 16 порядков). Вопрос был тривиальный: если какая-либо связь между космологической константой с вышеупомянутой проблемой иерархии. Простейшая арифметика дает связь:

$$M_{cc} \sim \left(\frac{M_{SM}}{M_{pl}}\right)^2 M_{pl} \sim \alpha_G^2 M_{pl} \quad (19)$$

в которой α_G^2 - гравитационная тонкоструктурная константа ($\sim 3 \times 10^{-16}$).

«Включив» идеи суперсимметрии авторы [32] видят решение проблемы космологической константы в Randall-Sundrum геометрии на бране, где эффект Казимира на бране индуцируется полем объема, т.е. они показывают, что $E_{Cazimir} \sim \alpha_G^2 M_{pl}$. С моей точки зрения это физически обоснованное «хорошее решение» проблемы космологической постоянной.

Хотя проблема космологической константы до конца не решена, смею утверждать, что компенсационная парадигма имеет прямое отношение к космологической константе. Кроме того, т.к. часть первоначальной вакуумной энергии ушла на образование частиц, поэтому нет необходимости компенсировать все 120 порядков т.е. нет такого безобразного расхождения. Без сомнения, космологическая константа – вакуумная составляющая Вселенной и это не только мое мнение (см. например, обзорную работу [33]).

Нельзя не отметить красивую мысль А. Логунова и соавторов, развитую в работе [34]. Если гравитационное поле – калибровочное, тогда в слабом гравитационном поле космологическая константа проявляется как масса покоя гравитона $m_g \sim 10^{-66}$ г. Кроме этого утверждается, что если РТГ* верна, что Вселенная циклична (не было сингулярности). Как известно, РТГ – альтернатива ОТО и в ней нет места космологической постоянной, а есть место квинтэссенции, т.е. вакуумной энергии зависящей от времени.

В заключении хотелось бы отметить, что сейчас ведутся интенсивные исследования по уточнению уравнения состояния темной энергии [35]. И хочется верить, что наши основные утверждения правильны, т.е. космологическая константа практически не менялась с ранних эпох эволюции Вселенной (см. также работу [36]). Но имеется одна «неприятность», которая возможно и делает такой проблемной

* РТГ – релятивистская теория гравитации.

космологическую константу. Вопрос стоит в правильной интерпретации квантовой механики и восходит этот вопрос к знаменитой работе Х. Эверетта пятидесятилетней давности [37]. Я имею в виду его опровержения «постулата», по которому квантовая механика действует только в микромире. Х. Эверетт ввел универсальную волновую функцию, связывающую наблюдателя и объект наблюдения в единую квантовую систему. Он дал единое описание макроскопического мира, считая макрообъекты, также находящиеся в состоянии суперпозиции (т.е. он полностью отошел от Н. Бора и В. Гейзенберга – от копенгагенской интерпретации квантовой механики). По Эверетту волновая функция при каждом взаимодействии разветвляется, т.е. разделившиеся ветви волновой функции становятся независимыми и представляются классическими реальностями. Это так называемая теория квантовой декогерентности. Она является признанной (правда не всеми) частью современной квантовой теории. В интерпретации Х. Эверетта множественность миров (вселенных) – следствие непротиворечивой теории универсальной волновой функции, следующей из уравнений квантовой механики. Возвращаясь к подсчету и интерпретации космологической константы (вакуумной энергии) нельзя забывать, как родилась наша Вселенная (тоннельный переход от осцилляций на фридман [7]) т.е. в этом процессе и произошло то самое разветвление универсальной волновой функции в большой вселенной, после чего и выделилась наша маленькая (Планковского масштаба) Вселенная. К сожалению, эти «прозрения» до сих пор не были применены к космологической константе, а ведь пространственно-временная пена Дж. Уилера должна описываться универсальной волновой функцией.

Литература

1. Я.Б. Зельдович. Письма ЖЭТФ 6, 883 (1967)
2. Н.С. Кардашев. Астроном.Ж. 74, 803 (1988)
3. A. Vilenkin. Phys. Lett. B. 117, 2528 (1982)
4. F. Englert hep-th/0406162, 24 June, 2004; Talk on the conference Miami-2007 (<http://server.physics.miami.edu/~cgc>)
5. K.C. Wali hep-th/0605135, 15 May, 2006
6. А. Долгов hep-ph/0405089
7. V. Burdyuzha, O. Lalakulich, Ya. Ponomarev, G. Vereshkov Phys.Rev. D. 55, R7340 (1997)
8. V. Burdyuzha (a), in Proceedings of the Symposium “Particles, Strings, Cosmology” “PASCOS-98” Ed. P.Nath, World Scientific, p.101 (1999)
V. Burdyuzha (b) arXiv: 0801.0047 v.1, 29 Dec. 2007
V. Burdyuzha, G. Vereshkov (c) Astrophys.Space Sci. 305, 235 (2006)
V. Burdyuzha, G. Vereshkov, O. Lalakulich, Yu. Ponomarev (d) arXiv: gr-gc/9907101
9. L. Marochnik and G. Vereshkov (частное сообщение)
10. M. Pietroni astro-ph/0505615
11. V. Sahni, A. Starobinsky astro-ph/0610026
12. S. Weinberg Rev. Mod. Phys. 61, 1 (1989)
13. F.R. Kinkhamer, G.E. Volovik arXiv: 07 11.3170 [gr-qc] 12 Dec. 2007
14. G.E. Volovik arXiv: 0801/2714, 17 January, 2008
15. S. Hawking Phys.Lett 134, 403 (1984)
16. G. t’Hooft , S.Nobbenhuis gr-gc/0602076, 4 April, 2006
17. S. Nobbenhuis gr-gc/0609011, 4 Sept. 2006
18. A.A. Agdrianov et al arXiv: 07041436 v.3 [gr-gc] 15 June, 2007
19. В. Бурдюжа. Препринт ФИАН № 15, 2006
20. A. Arbey astro-ph/0601274, 12 January, 2006
21. F.S. Lobo gr-gc/0508115, 31 August, 2005

22. G. Chapline Talk on Texas Symposium on Relativistic Astrophysics, Stanford, Ca, 12-17 December, 2004
23. I. Dymnikova (a) gr-gc/01 12 052, 20 December, 2001
J. Barbiéri, G. Chapline (b) Phys. Lett B 590, 8 (2004)
24. C. Balazs, I. Szapudi hep-th/0603133, 17 March, 2006
25. G. t'Hooft gr-gc/9310026
26. W. Fischer, L. Susskind hep-th/9806039
27. B. Mashhoon, P. Wesson gr-gc/0401002
28. R. Gannouji, D. Polarski, A. Ranquet, A. Starobinsky arXiv:astro-ph/0701650, 23 January, 2007
29. A. Starobinsky arXiv: 0706.2041 25 June, 2007
30. А. Поляков, УФН 136, 538 (1982) arXiv: hep-th/0006132, 19 June, 2000
31. R. Jackiw, C. Mumez, S-Y. Pi arXiv: hep-th/0502215, 23 February, 2005
32. P. Chen, Je-An Gu arXiv: 0712.2441, [hep-th] 20 December, 2007
33. R. Bousso arXiv: 0708 4231 v.2, [hep-th] 11 September, 2007
34. С.С.Герштейн, А.А.Логунов, М.А.Мествиришвили. ЭЧАЯ 38, вып.3, 2007
35. R.A.Daly, S.G.Djorgovski arXiv: 07 10.5690 v.1 [astro-ph] 30 October, 2007
36. Y.Kodama et al., arXiv: 08 02.3428 v.1 [astro-ph] 23 February, 2008
37. H. Everett. Rev. Mod. Phys. 29, 454 (1957)