

В. А. Юров, А. А. Юрова

МИРЫ «ФЕНИКСЫ»

Поступила в редакцию 27.08.2021 г.

Рецензия от 14.09.2021 г.

80

Обсуждается проблема бальцмановских наблюдателей. Показано, что предложенный Пейджем способ решения этой проблемы приводит к тому, что вселенная, в которой существуют упорядоченные наблюдатели, существует не более секунды, после чего разрушается пузырьер новой фазы. Оценивается масса сверхтяжелого гравитино, которая оказывается на один порядок больше по сравнению с оценкой Пейджа.

The problem of Boltzmann observers is discussed. It is shown that Page's proposed way of solving the problem includes this universe, which exists ordered observers, exists for no more than a second, after which it is destroyed by a bubble of a new phase. The mass of the superheavy gravitino is estimated to be one more than Page's estimate.

Ключевые слова: бальцмановский мозг, фазовые переходы, космологическая постоянная, масса гравитино

Keywords: Boltzmann brain, phase transitions, cosmological constant, gravitino mass

В 2006 г. Дон Пейдж впервые сформулировал проблему, получившую название проблемы «бальцмановских наблюдателей». Суть ее заключалась в следующем. Согласно принципам квантовой механики, всякий процесс измерения какой бы то ни было физической величины описывается унитарным квантовомеханическим оператором, причем этот оператор может применяться к произвольным волновым функциям. Частным случаем измерения является процесс осознания обычным наблюдателем (Ordered Observer, OO) окружающей его физической реальности (в том числе в процессе чтения данной статьи). Следовательно, существует некоторый унитарный оператор, который, действуя на волновую функцию наблюдателя, описывает процесс осознания этим наблюдателем окружающей его реальности. Но этот же оператор с тем же успехом можно применить и к другим волновым функциям, в том числе там, где вроде бы нет наблюдателя. С практической точки зрения это означает, что в произвольно выбранном объеме возможно спонтанное возникновение «идентичного натуральному» наблюдателя в виде квантовой флуктуации, существующей ровно столько, сколько необходимо для того, чтобы совершить единственный акт осознания (в нашем случае — для прочтения данной фразы). Таких «виртуальных» наблюдателей Пейдж назвал бальцмановскими наблюдателями (Boltzmann Brains, BB), после чего показал, что в тех Вселенных типа де Сит-



тера (dS), которые просуществуют как минимум 10^{60} лет, доминирующим типом наблюдателей станут именно ВВ. Однако теория струн предсказывает, что вселенные типа dS могут существовать значительно дольше — порядка $e^{0.5 \times 10^{123}}$ лет. Следовательно, нам приходится заключить, что произвольно взятый наблюдатель в dS-вселенной должен быть ВВ, даже если он об этом не подозревает.

Естественно, такое заключение вызвало активную критику среди космологов. Было предложено множество подходов, призванных решить парадокс ВВ, в том числе при помощи специального выбора космологической меры [2–4] и путем допущения существования фантомной компоненты [5]. Сам же Пейдж в [6] предложил собственную, весьма любопытную гипотезу, согласно которой проблема ВВ в dS решается вследствие спонтанного возникновения в dS «пузырей-убийц» — областей истинного вакуума. Рассмотрим плоскую изотропную и однородную вселенную с линейным элементом

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t)(dr^2 + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2)). \quad (1)$$

Идея Пейджа состоит в том, что во вселенной возникает движущийся со скоростью света пузырь новой фазы, причем вероятность того, что вселенная не будет разрушена, определяется приближенным соотношением

$$P \sim e^{-AV_4},$$

где

$$V_4 \sim c \int dt a^3(t).$$

Более точные формулы приводят, в частности, к неберущимся интегралам, при этом приводя практически к тем же численным оценкам. По этой причине в данной работе мы ограничимся вышеприведенными соотношениями.

Условие Пейджа имеет вид

$$\int d^4x P \sqrt{-g} < \infty. \quad (2)$$

Суть его в том, что пузырь новой фазы ограничивает экспоненциальный (в случае dS-моделей) рост масштабного фактора, приводя эффективно к конечному четырехмерному объему вселенной (точнее, рассматриваемого домена в мультиверсе). Если этого не сделать, то вселенная будет неограниченно расширяться и четырехмерный объем будет неограниченно расти. Как показано в [1], если логарифм этой величины превысит 10^{50} , то в таком домене будут доминировать ВВ, а не ОО.

В dS-вселенной параметр Хаббла

$$H_\Lambda = \text{const}, \quad a(t) = a_0 e^{H_\Lambda t},$$



причем

$$H_{\Lambda} = \sqrt{\frac{8\pi G\Lambda}{3}},$$

где Λ имеет естественную размерность плотности массы. Используя (1) и (2), имеем

$$A > \frac{9H_{\Lambda}^2 t}{ca_0^3} e^{-3H_{\Lambda} t}. \quad (3)$$

Правая часть выражения (3) имеет максимум при $t = (3H_{\Lambda})^{-1}$, откуда получаем оценку

$$A > A_{min} = \frac{3H_{\Lambda}^4}{ec^4}, \quad (4)$$

где положено $c = H_{\Lambda} a_0$.

Для получения численных оценок воспользуемся данными, собранными в рамках проектов Hubble Space Telescope Key Project [7]:

$$H_{\Lambda} = \sqrt{\Omega_{\Lambda}} H_0, \quad H_0 = 72 \pm 8 \text{ km/s / Mpc},$$

и WMAP [8; 9]

$$\Omega_{\Lambda} = 0.72 \pm 0.04.$$

Здесь Ω_{Λ} — отношение плотности массы (то есть энергии, деленной на c^2) Λ -члена к критической плотности, а H_0 — современное значение параметра Хаббла. В дальнейшем будем использовать популярные значения $H_0 = 64$ км/с/Мпс, $\Omega_{\Lambda} = 0.74$ (такие оценки принимает в своих последних работах Линде). В результате получаем

$$A_{min} = (0.164 \times 10^{29} \text{ см})^{-4} = (20 \text{ Глет})^{-4} = e^{-564}. \quad (5)$$

Здесь переход от сантиметров к гигагодам (миллиардам лет) осуществлен в рамках СТО: 1 см соответствует примерно 0.3×10^{-10} с, а последнее выражение записано в планковских единицах.

Таким образом, получаем, что среднее время жизни вселенной (домена), разваливаемой пузырьком новой фазы, составляет около 20 Глет (20×10^9 лет).

Однако Пейдж не учел факта существования мультиверса, в котором реализуются различные значения Λ . Величина Λ в мультиверсе является суммой двух слагаемых: (отрицательного) хиггсовского конденсата $\langle \Phi \rangle$ и случайной переменной χ , зависящей от набора полей материи, в простейшем случае — от одного скалярного поля ϕ :

$$\Lambda = \langle \Phi \rangle + \chi(\phi). \quad (6)$$



Именно используя представления о наблюдаемой космологической постоянной как об эффективной (6), Гаррига и Виленкин показали, что Λ должна быть мала и с вероятностью около 10–20% совпадать с наблюдаемой [10; 11]. Эта эпохальная работа фактически стала первым решением проблемы малости космологической постоянной и в то же время указанием на необходимость существования мультиверса¹.

Для дальнейшего существенно, что величина скорости распада A и эффективная величина космологической постоянной Λ являются независимыми друг от друга. Следуя Пейджу, будем считать, что A определяется механизмом квантового туннелирования, предложенным в [13], согласно которому можно написать выражение

$$A \sim \exp \left[-\frac{\pi(C-1)^2}{4m_{3/2}^2 C^2 (C-1/2)^2} \right], \quad (7)$$

где $m_{3/2}$ – масса гравитино, $C^2 > 1$ – отношение глубин двух суперсимметричных AdS-вакуумов, а также принята система единиц, в которой $\hbar = c = 8\pi G = 1$.

Как видно из (7), величина A не зависит от $\chi(\phi)$ (хотя может зависеть от $\langle \Phi \rangle$ через массу гравитино), поэтому значения эффективной космологической постоянной и скорости туннелирования могут рассматриваться как две независимые переменные.

Теперь рассмотрим области мультиверса, в которых не происходит эффективной компенсации величин $\langle \Phi \rangle$ и $\chi(\phi)$ (таких областей большинство). В областях, в которых Λ велика и отрицательна, происходит быстрый коллапс, предотвращающий преобладание ВВ над ОО, поэтому сконцентрируемся на доменах с положительной и большой по модулю эффективной космологической постоянной (6) – именно они представляют основную опасность с точки зрения возможного преобладания ВВ.

Заметим, что существование ВВ накладывает верхнюю границу на Λ . Это следует из ограничения Бекенштейна, согласно которому максимальное число квантовых состояний в области с пространственным размером R ограничено неравенством:

$$N \leq \frac{\pi R^2}{L_p^2 \ln 2},$$

где $L_p^2 \sim 10^{-33}$ см – планковский масштаб. В dS-вселенной в качестве R можно взять горизонт событий будущего

$$R = a(t) \int_t^{+\infty} \frac{dt'}{a(t')} = \frac{c}{H_\Lambda},$$

¹ Недавно о неизбежности введения мультиверса писал Рубаков в [12]. Он пояснил, что если запуск LHC не позволит найти бозон Хиггса и легчайшую суперсимметричную частицу, то придется признать существование мультиверса. Ему это не очень нравится, но другого выхода, как он пишет, по-видимому, не будет.



поэтому возникновение ВВ, требующих не менее N бит, заведомо невозможно в доменах с

$$\Lambda > \Lambda_m = \frac{3c^2}{8\pi GN \ln(2)L_p^2},$$

или с

$$H_\Lambda^2 > H_m^2 = \frac{\pi c^2}{N \ln(2)L_p^2}. \quad (8)$$

84

По оценке Моравека, для одного акта осознания требуется от 10^{14} до 10^{17} бит. Выбирая верхнюю границу, подставляем в (8) и (4). В результате находим величину A_m , которая необходима для отсутствия ВВ вплоть до предельных значений Λ_m :

$$A_m = \frac{3\pi^2}{eN^2 \ln^2 2 L_p^2} = (0.44 \times 10^{-35} \text{ s})^{-4} = e^{-75}, \quad (9)$$

где последнее значение приведено в планковских единицах.

Сравнивая с (5), видим, что среднее время полураспада вселенной за счет квантового туннелирования будет составлять всего 10^{-35} с. Таким образом, мы не являемся ВВ, только если домены существуют 10^{-35} с, после чего уничтожаются пузырями новой фазы. Этот результат доказывает утверждение, сделанное в абстракте.

В заключение оценим массу гравитино. Считая $S \gg 1$ и вводя перенормированную массу $\mu_{3/2}$ (масса $m_{3/2}$ из (7) неперенормирована), находим из (7)

$$\frac{\pi}{4\mu_{3/2}^2} = -\ln A,$$

откуда в планковских единицах

$$\mu_{3/2} \sim 0.1 \sim 10^{18} \text{ GeV},$$

что на один порядок больше числа, полученного Пейджем:

$$\mu_{3/2} \sim 0.038 \sim 10^{17} \text{ GeV}.$$

Следовательно, гравитино должно быть в десять раз тяжелее, чем предсказано в [6].

Список литературы

1. Page D.N. The Lifetime of the Universe // J. Korean Phys. Soc. 2006. Vol. 49. P. 711–714. arXiv:hep-th/0510003v1.
2. Linde A. Sinks in the landscape, Boltzmann brains and the cosmological constant problem // Journal of Cosmology and Astroparticle Physics. 2007. №1. arXiv:hep-th/0611043.



3. *Vilenkin A.* Freak observers and the measure of the multiverse // *Journal of High Energy Physics*. 2007. №1. arXiv:hep-th/0611271.
4. *Bousso R., Freivogel B.* A paradox in the global description of the multiverse // *Journal of High Energy Physics*. 2007. №6. arXiv:hep-th/0610132.
5. *Astaschenok A.V., Yurov A.V., Yurov V.A.* The possible resolution of Boltzmann brains problem in phantom cosmology // *Gravitation and Cosmology*. 2006. Vol. 22, iss. 2. P. 212–219.
6. *Page D.N.* Is Our Universe Likely to Decay within 20 Billion Years? // *Phys. Rev. D*. 2008. Vol. 78, iss. 6. arXiv:hep-th/0610079.
7. *Freedman W.L., Madore B.F., Gibson B.K. et al.* Final Results from the Hubble Space Telescope Key Project to Measure the Hubble Constant // *Astrophys. J.* 2001. Vol. 553. P. 47–72. arXiv:astro-ph/0012376.
8. *Spergel D.N., Verde L., Peiris H.V. et al.* First-Year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* Observations: Determination of Cosmological Parameters // *Astrophys. J. Suppl.* 2003. Vol. 148. P. 175–194. arXiv:astro-ph/0302209.
9. *Spergel D.N., Bean R., Doré O. et al.* Three-Year *Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP)* Observations: Implications for Cosmology // *Astrophys. J. Suppl.* Vol. 170. P. 377–408. arXiv:astro-ph/0603449.
10. *Garriga J., Vilenkin A.* Solutions to the cosmological constant problems // *Phys. Rev. D*. 2001. Vol. 64. arXiv:hep-th/0011262v3.
11. *Vilenkin A.* Cosmological constant problems and their solutions // *The Dark Universe: Matter, Energy, and Gravity* / ed. by M. Livio. Cambridge, 2004. arXiv:hep-th/0106083.
12. *Рубаков В.А.* Иерархии фундаментальных констант (к пунктам 16, 17 и 27 из списка В.Л. Гинзбурга) // *Успехи физических наук*. 2007. Т. 177, №4. С. 407–414.
13. *Ceresole A., Dall'Agata G., Giriyavets A. et al.* Domain walls, near-BPS bubbles, and probabilities in the landscape // *Phys. Rev. D*. 2006. Vol. 74. arXiv:hep-th/0605266.

Об авторах

Валериан Артемович Юров – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Россия.

E-mail: vayt37@gmail.ru

Алла Александровна Юрова – канд. физ.-мат. наук, доц., Балтийский федеральный университет им. И. Канта; Калининградский государственный технический университет, Россия.

E-mail: AIUrova@kantiana.ru

The authors

Dr Valerian A. Yurov, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, Russia.

E-mail: vayt37@gmail.ru

Dr Alla A. Yurova, Associate Professor, Immanuel Kant Baltic Federal University, State Technical University, Russia.

E-mail: AIUrova@kantiana.ru