

Nick Gorkavyi, Alexander Vasilkov, John Mather “A Possible Solution for the Cosmological Constant Problem”. In: Proc. 2nd World Summit: Exploring the Dark Side of the Universe. 25-29 June, 2018, University of Antilles, Pointe-à-Pitre, Guadeloupe, France
<https://pos.sissa.it/335/039/pdf>

Перевод:

ВОЗМОЖНОЕ РЕШЕНИЕ ПРОБЛЕМЫ КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ
Н. Горькавый, А. Васильков, Дж. Мазер

АБСТРАКТ

Таинственное ускорение расширения Вселенной, обнаруженное в 1998 году, может быть описано космологической константой, введенной Эйнштейном в 1917 году. В квантовой космологии существование отталкивающей силы связывают с «тёмной энергией» - гипотетической средой с отрицательным давлением. Но многочисленные попытки получить из квантовой теории наблюдаемое значение космологической константы приводят к значениям на 120 порядков больше этой величины. В космологии отскока предполагается коллапс Вселенной предыдущего цикла, а затем её новое расширение. Мы рассматриваем космологию отскока в свете недавнего открытия гравитационных волн и большого количества массивных чёрных дыр, которые являются вероятным кандидатом на роль тёмной материи. Когда Вселенная коллапсирует, значительная часть гравитационной массы сливающихся чёрных дыр превращается в гравитационные волны. Во время слияния размер чёрных дыр увеличивается. Самую большую из них мы будем называть Большой Чёрной Дырой (БЧД). На стадии расширения, частота слияния чёрных дыр резко уменьшается, и, из-за поглощения гравитационных волн, начинается обратный процесс медленного роста массы чёрных дыр, в первую очередь - БЧД, которая имеет максимальную поверхность. Если предположить, что гравитационное излучение само не генерирует гравитационное поле, то можно показать, что резкое уменьшение гравитационной массы Вселенной вызывает сильную антигравитацию, которая может быть причиной Большого Взрыва. Гравитационная масса БЧД на стадии расширения Вселенной будет расти, и гравитационное влияние БЧД будет растягивать поле галактик. Этот эффект растяжения описывается появлением космологической постоянной в уравнениях Фридмана. Оценка величины космологической постоянной хорошо согласуется с наблюдениями. Циклическая модель Вселенной может быть разработана на основе периодического преобразования массы сливающихся чёрных дыр в гравитационные волны и поглощения фонового гравитационного излучения Большой Чёрной Дырой.

1. БОЛЬШИЕ КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ВОПРОСЫ

Мы знаем сегодняшнюю вселенную: далекие галактики, убегающие от нас; космическое микроволновое фоновое излучение [1]; распространенность химических элементов и доказательства для тёмной материи и тёмной энергии. Мы имеем относительно простую теорию расширения примерно с семью параметрами, которая очень хорошо описывает наблюдения. Но некоторые загадки остались, и речь идёт не только о тёмной материи, тёмной энергии и квантовой гравитации. Возможно, пора провести ещё немного мысленных экспериментов.

Что, если нынешняя вселенная перестанет расширяться, скажем, потому что тёмная энергия имеет уравнение состояния, которое мы не знаем, или, может быть, она не то, что мы думаем? Что случится с объектами, которые мы видим сегодня? Как они будут себя вести, если будут сближаться в каком-то гигантском сжатии? Будут ли звёзды раздавлены и измельчены, испарятся ли в облака элементарных частиц, или они упадут в чёрные дыры и исчезнут из поля зрения? Будут ли чёрные дыры поглощать всё, включая тёмную материю, которую мы считаем найденной? Что-нибудь может остановить этот коллапс? Будет ли коллапс иметь достаточную симметрию, чтобы вселенная снова стала гладкой, или она разделится на отдельные части вроде чёрных дыр? Другими словами, сможет ли наша нынешняя вселенная испытать отскок, если она перестанет расширяться и начнёт падать назад? Что происходит с энтропией - она продолжает расти, или, может быть, мы не знаем, как вычислить энтропию бесконечной системы?

Или какая предыдущая вселенная может совершить такой отскок, чтобы создать нашу вселенную? Идея отскока вселенной очень старая и на самом деле стояла за поиском космического микроволнового фонового излучения Робертом Дикке. Идея отскока является интересной альтернативой инфляционной теории. Как мы можем различить их экспериментально?

И связанный с этим вопрос: что происходит с общей скоростью расширения по мере того, как гравитационная масса меняет форму, переходя между энергией покоя, кинетической энергией, лучистой энергией, чёрными дырами и гравитационными волнами? В частности, полна ли формулировка Эйнштейна, связывающая кривизну с тензором энергии-импульса, и дает ли гравитационное излучение вклад в тензор энергии-импульса, а также и в дополнительную кривизну? Жерар 'т Хоофт пишет [2]: «Я подчеркиваю, что любая модификация уравнений Эйнштейна во что-то вроде $S_{ik} - (1/2) R g_{ik} = k (T_{ik} (matter) + t_{ik} (grav))$, где $t_{ik} (grav)$ будет чем-то вроде «гравитационного вклада» в тензор напряжения-энергии-импульса, вопиюще ошибочен. Написание такого варианта выдает полное непонимание общей теории относительности. Энергия и импульс гравитационного поля полностью учитываются нелинейными частями исходного уравнения».

Возможно, нам нужно разделить (по крайней мере, мысленно) члены космологической кривизны нулевой частоты от высокочастотных членов кривизны, представляющих распространяющиеся гравитационные волны. Тогда мы могли бы представить плотность энергии в распространяющихся волнах как эквивалентный источник, который естественным образом заменил бы импульсно-энергетические члены материальных полей и чёрных дыр по мере их превращения. Это не было бы уходом от общей теории относительности, а только разделением нулевых или низкочастотных членов от высокочастотных членов. Если 'т Хоофт полностью прав, то это должно быть эквивалентно нелинейным частям исходного уравнения.

Например, когда сливаются две чёрные дыры, энергия гравитационной волны распространяется наружу, а масса новой чёрной дыры меньше массы сливающихся партнеров, по крайней мере, по всем вычислениям общей теории относительности, которые вполне соответствуют наблюдениям. Должны ли мы увидеть внезапное радиальное ускорение по мере прохождения мимо нас расширяющейся оболочки гравитационного излучения? Аналогичная идея была высказана недавно Филиппом У. Андерсоном [3]: «В недавних наблюдениях гравитационного излучения от столкновения чёрных дыр было подсчитано, что масса результирующей системы на несколько солнечных масс ... меньше, чем сумма масс исходной пары ... Наблюдаемая вселенная становится легче с какой-то неизвестной скоростью, в зависимости от уровня необратимого излучения. ... Это, по-видимому, не учитывается в существующей космологии, и может объяснить часть, или даже всю «тёмную энергию», которая сейчас постулируется».

Если бы Земля внезапно уменьшила массу, мы ожидали бы изменения гравитационного притяжения к ней. Мы открыли поперечные гравитационные волны, но как насчет монопольного члена? Об этом было много дискуссий в контексте общей теории относительности. Знаем ли мы, как применить к этой ситуации теорему Биркгофа? Аналогично, и это, вероятно, уже известно, что происходит с энтропией и информацией в чёрных дырах, когда они сливаются? И, кроме чистой теории, существует ли какой-либо возможный эксперимент, который можно было бы осуществить, чтобы проверить эти предсказания? Кстати, будут ли другие теории гравитации давать различающиеся прогнозы?

2. КОСМОЛОГИЯ ОТСКОКА И ПРОБЛЕМА КОСМОЛОГИЧЕСКОЙ ПОСТОЯННОЙ

Попробуем ответить на некоторые вопросы, которые были упомянуты в разделе 1, например: «Что происходит с общей скоростью расширения, когда меняется гравитационная масса?» Согласно космологии отскока, Вселенная сжимается до небольшого размера (несколько световых лет), а затем снова начинает расширяться (см. рис. 1а). Накопленные тяжелые элементы разрушаются при высоких температурах. Гамов считал, что нынешнее расширение Вселенной «является просто «упругим отскоком» [4].

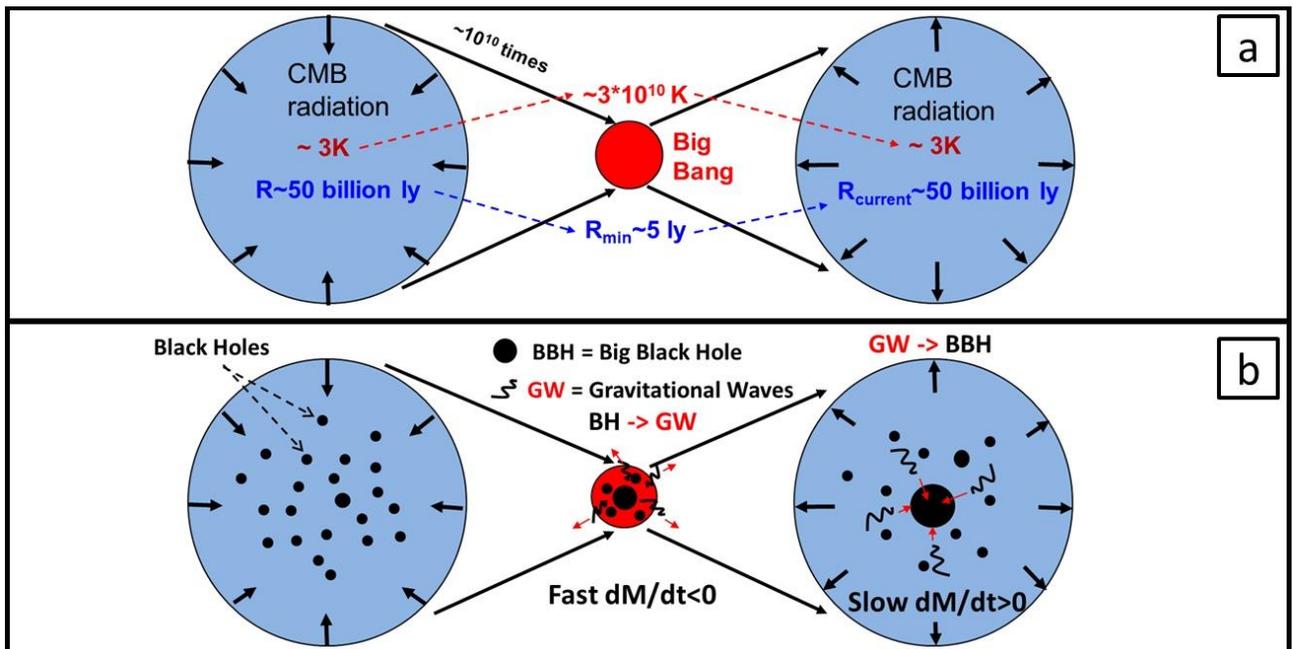


Рис. 1. а. Классическая космология отскока предполагала возвратное движение и коллапс Вселенной до небольшой горячей сферы, где ядра превращались в барионы. б. Современная космология отскока включает ВН (чёрные дыры) как DM (тёмную материю). В конце коллапса Вселенной ВН быстро превратились в GW (гравитационные волны); после Большого Взрыва, во время расширения, масса чёрных дыр, включая ВВН (Большую Черную Дыру), медленно растёт из-за поглощения GW.

Дикке и др. [5] так описывали превращение тяжелых ядер в барионы: «пепел предыдущего цикла должен снова переработаться в водород». Пибблс изложил сценарий обращения Вселенной вспять: «Давайте экстраполируем расширение Вселенной обратно на красное смещение $z \sim 10^{10}$, когда температура была $T \sim 3 \cdot 10^{10} \text{ K}$, а характеристическая энергия фотона была $kT \sim 3 \text{ Mev}$. В эту эпоху фотоны достаточно энергичны, чтобы фотодиссоциировать сложные ядра, оставляя свободные нейтроны и протоны» [6]. Однако причина «упругого отскока» или Большого взрыва оставалась загадкой.

В конце 20-го века возникла проблема ускоренного расширения Вселенной [7,8]. Это ускорение хорошо описывается введением космологической постоянной [9] со значением $1.1 \cdot 10^{-56} \text{ см}^{-2}$ [10], но природа этой силы отталкивания остается неясной. Зельдович впервые обсудил идею вывода космологической постоянной из квантовых флуктуаций вакуума [11], но полученные значения превышают наблюдаемую величину космологической постоянной на 120 порядков [12,13]. В известном обзоре Вайнберга 1989 года [12] упоминалось около ста работ, посвященных проблеме космологической постоянной. После открытия ускорения расширения Вселенной было опубликовано много тысяч статей на эту тему [14]. Однако колебания вакуума могут и не давать вклад в космологическую постоянную [15]. Частые утверждения о том, что эффект Казимира является свидетельством вакуумных колебаний, недавно были поставлены под сомнение [16]. Таким образом, возможно, что космологическая константа имеет неквантовое происхождение, и это ещё одна сложная проблема для космологии отскока или любой другой космологической модели. В последние годы космология отскока возвращается в космологическую повестку дня [17]. Количество чёрных дыр, обнаруженных LIGO, может быть достаточным для объяснения тёмной материи [18]. Если основная часть Вселенной содержится в чёрных дырах, то как изменится космология отскока? Во время коллапса Вселенной чёрные дыры превращаются в гравитационные волны (см. Рис. 1b). С расширением Вселенной чёрные дыры будут расти, поглощая фоновые гравитационные волны. Гравитационные волны не могут служить источником гравитационного поля, как утверждал Эйнштейн [19], но многие другие ученые не согласны с ним [20]. Включить или не включать $t_{ik} (grav)$ в правую часть уравнения Эйнштейна? Эта проблема является частью аксиоматической основы общей теории относительности и не может быть решена теоретически. Вот почему нам нужно изучить практические следствия разных вариантов ответа. В этой работе мы предполагаем, что гравитационное излучение не генерирует гравитационное поле. Таким образом, гравитационная масса всей Вселенной будет меняться при взаимных превращениях чёрных дыр и гравитационных волн. Мы покажем, что модель Вселенной с переменной гравитационной массой может объяснить как причину Большого Взрыва [21], так и происхождение космологической постоянной [22].

3. ОБЪЯСНЕНИЕ БОЛЬШОГО ВЗРЫВА И УСКОРЕНИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Рассмотрим квазисферическую систему, состоящую из большого количества сливающихся чёрных дыр. Для системы со слабым гравитационным полем имеем $g_{ik} = \eta_{ik} + h_{ik}$, где η_{ik} - тензор Минковского, и $\eta_{ik} \gg h_{ik}$. Мы можем написать уравнение Эйнштейна следующим образом [20,23]:

$$\square^2 h_{\mu\nu} = -\frac{16\pi G}{c^4} S_{\mu\nu}, \text{ where } S_{\mu\nu} \equiv T_{\mu\nu} - \frac{1}{2} \eta_{\mu\nu} T_{\lambda}^{\lambda}. \quad (3.1)$$

Решение уравнения (3.1) - запаздывающие потенциалы [20,23]. Если предположить, что сами гравитационные волны не генерируют гравитационное поле [2,19], то нулевая компонента метрического тензора [21] равна:

$$g_{00} = -\left[1 - \frac{2GM(t - r/c)}{rc^2}\right]. \quad (3.2)$$

Аналогичное решение было найдено Кутчерой [24] для монополярной волны вызванной изменением гравитационной массы релятивистского фэйрбола (см. также [11] о возможности монополярных гравитационных волн). Метрика (3.2) существенно отличается от

метрики Шварцшильда, поскольку она описывает изменяющуюся гравитационную массу.

Опишем уменьшающуюся массу Вселенной экспоненциальной функцией: $M = M_0 \exp[-\alpha(t-r/c)]$. Предполагая слабые гравитационные поля и низкие скорости, получим следующее выражение для гравитационного ускорения:

$$a \approx \frac{c^2}{2} \frac{\partial g_{00}}{\partial r} = -\frac{GM}{r^2} + \frac{\alpha GM}{c r}. \quad (3.3)$$

Если $\alpha > 0$, то второй член уравнения (3.3) является положительным и описывает отталкивающую силу (антигравитацию), если $\alpha < 0$, то второй член описывает «гипергравитацию». Чтобы прояснить физический смысл уравнения (3.3), мы можем переписать гравитационное ускорение через квази-ньютоновский потенциал φ : $a = \frac{d\varphi}{dr}$, где $\varphi = -\frac{GM(t-\frac{r}{c})}{r}$. После дифференцирования получаем выражение (3.3). Выведем модифицированные уравнения Фридмана для метрики с переменной массой в сопутствующих координатах x^* , y^* , z^* :

$$ds^2 = c^2 dt^2 - a^2(t,r)[1 + b(t,r)](dx_*^2 + dy_*^2 + dz_*^2) \quad (3.4)$$

где $b(t,r) = 2GM(t,r)/(rc^2)$ - известная функция, и $a(t,r)$ - неизвестный масштабный коэффициент. Для $|\alpha| \gg c/r$ зависимость $a(t,r)$ от пространственных координат значительно слабее, чем у $b(t,r)$ [22]. Присутствие в метрике (3.4) функции $b(t,r)$ приводит к дополнительным членам, которые можно рассматривать как эффективную «космологическую константу». Для случая слабых гравитационных полей и $b(t,r) \ll 1$ мы получаем первое модифицированное уравнение Фридмана в виде:

$$\left(\frac{\dot{a}}{a}\right)^2 + \left(\frac{\dot{a}}{a}\right)\dot{b} = \frac{\Lambda(t,r)c^2}{3} + \frac{8\pi G\rho}{3} \quad (3.5)$$

где космологическая функция $\Lambda(t,r)$ задается следующим выражением:

$$\Lambda(t,r) = \frac{1}{a^2} \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x_*^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y_*^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial z_*^2} \right) = \left(\frac{\partial^2 b}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 b}{\partial z^2} \right) \quad (3.6)$$

где x, y, z - физические координаты. Из уравнения 3.6 для $|\alpha| \gg c/r$

$$\Lambda(t,r) \approx \frac{\alpha^2}{c^2} b(t,r) = \frac{\alpha^2}{c^2} \frac{2GM(t,r)}{rc^2} = \frac{\alpha^2 r_0}{c^2 r} \approx 0.7 \times 10^{-56} (\alpha T)^2 \frac{r_0}{r} [cm^{-2}] \quad (3.7)$$

где r_0 - радиус Шварцшильда, $T \sim 4 \cdot 10^{17}$ сек - космологическое время. $\Lambda(t,r)$ равна наблюдаемому значению космологической постоянной $1.1 \cdot 10^{-56} cm^{-2}$, если $(\alpha T)^2 \frac{r_0}{r} = 1.6$ [22].

Например, это выполняется, если безразмерные параметры $\frac{r_0}{r} = 0.016$ и $|\alpha|T = 10$. Рассмотрим случай, когда БЧД растет в среде реликтового гравитационного излучения с постоянной плотностью ρ_{GW} . Скорость изменения массы ВЧД выражается следующим образом:

$$\dot{M} = -\alpha M = \rho_{GW} 4\pi r_0^2 c. \quad (3.8)$$

Тогда получим

$$\rho_{GW} = \frac{|\alpha|c^3}{16\pi G^2 M} = 5 \times 10^{-28} \text{ g/cm}^3 \quad (3.9)$$

где $|\alpha|T = 10$ и масса БЧД: $M = 6 \cdot 10^{54}$ г (эта масса БЧД может быть вычислена из условия $\frac{r_0}{r} = 0.02$ [22]). Значение ρ_{GW} из (3.9) в 25 раз больше критической плотности и примерно на два порядка больше средней плотности вещества во Вселенной. Рассмотрим случай, когда член с космологической функцией доминирует над членом со средней плотностью. Для экспоненциального изменения массы БЧД получаем $\dot{\Lambda}(t, r) = \alpha\Lambda(t, r)$. Тогда второе уравнение Фридмана:

$$\frac{\ddot{a}}{a} \approx -\frac{\alpha}{2} \sqrt{\frac{\Lambda(t, r)c^2}{3}} \quad (3.10)$$

Ускорение наблюдаемой части Вселенной обусловлено гипергравитацией $\alpha < 0$ или растяжением совокупности галактик из-за неоднородного торможения или замедления в поле растущей БЧД.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Космология с переменной гравитационной массой может объяснить причину Большого Взрыва, а также приводит к возможному решению проблемы космологической постоянной. Из наблюдаемого значения современного ускорения Вселенной можно рассчитать уровень энергии реликтового гравитационного излучения, который на два порядка больше средней энергии материи Вселенной. Если Вселенная состоит из ~99% реликтовых гравитационных волн и ~1% чёрных дыр (как тёмной материи), барионов и других элементарных частиц, то мы можем предложить циклическую модель Вселенной без введения гипотетических физических веществ или полей. Большой взрыв вызван антигравитацией, которая возникает после коллапса Вселенной и перехода чёрных дыр в гравитационное излучение [21]. Большая чёрная дыра, сохранившаяся после Большого взрыва, растет благодаря поглощению реликтовых гравитационных волн. Этот рост обеспечивает современное ускоренное растяжение поля галактик, которое характеризуется космологической постоянной [22]. Ключевым доказательством этой модели было бы открытие высокочастотных гравитационных волн, которые содержат основную часть энергии Вселенной.

5. ВКЛАД АВТОРОВ

Дж.М. написал раздел 1 этой статьи, Н.Г. и А.В. - другие разделы.

6. БЛАГОДАРНОСТИ

Н.Г. выражает благодарность организаторам конференции за поддержку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mather J.C. and Boslough J., 2008, The very first light. Basic Books, New York.
2. 't Hooft G. Strange misconceptions of general relativity. March 2010, <http://www.staff.science.uu.nl/~hooft101>
3. Anderson Ph.W., 2018, Four last "conjectures", arXiv:1804.11186
4. Gamow G., 1953, The Creation of the Universe. Viking Press.

5. Dicke R.H. et al., 1965, *Astrophys. J.*, 142, 414
6. Peebles P.J.E., 1993, *Principles of Physical Cosmology*. Princeton Univ. Press.
7. Perlmutter S. et al., 1999, *ApJ.*, 517, 565.
8. Riess A.G. et al., 1998, *Astron.J.*, 116, 1009.
9. Einstein A., 1917, *Sitzungsber. Preuss. Acad.Wiss.*, 142-152.
10. Ade P.A.R. et al., 2016, *Astron. Astrophys.*, 594, A13, 1.
11. Zeldovich Ya.B., Novikov I.D., 1971, *Stars and Relativity*. Chicago Press.Univ.
12. Weinberg S., 1989, *Rev. Modern Phys.*, 61, 1
13. Rugh S.E., Zinkernagel H., 2002, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, pp.663-705.
14. O`Raifeartaigh C. et al., 2018, *Europ. Phys. Journal, H*, v.43, iss.1,pp.37-117.
15. Brodsky S.J., Shrock R., 2011, *Proc.Nat.Acad.Sci.*108:45-50.
16. Jaffe R.L., 2005, *Phys.Rev. D*72, 021301.
17. Brandenberger R., Peter P., 2017, *Found Phys*, 47: 797.
18. Bird S. et al., 2016, *Phys. Rev. Lett.*, 116, 201301.
19. Einstein A., 1953, *The Meaning of Relativity*, 4th edn. Princeton Univ. Press, Princeton
20. Weinberg S., 1972, *Gravitation and Cosmology*. John Wiley and Sons, N-Y, London.
21. Gorkavyi N., Vasilkov A., 2016, *MNRAS*, 461, 2929-2933.
22. Gorkavyi N., Vasilkov A., 2018, *MNRAS*, 476, 1384-1389.
23. Landau L.D., Lifshitz E.M., 1975, *The Classical Theory of Fields*. Vol. 2 (4th ed.). Butterworth-Heinemann.
24. Kutschera M., 2003, *Mon.Not.R.Astron.Soc.*, 345, L1.