

## ЯВЛЯЮТСЯ ЛИ СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК ГИПЕРМАССИВНЫМИ СФЕРИЧЕСКИ- СИММЕТРИЧНЫМИ ЧЕРНЫМИ ДЫРАМИ?

*А. Ф. Захаров*<sup>а, б, 1</sup>

<sup>а</sup> Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»,  
Москва, 123182, Россия

<sup>б</sup> Объединенный институт ядерных исследований, Дубна, 141980, Россия

Недавно была обсуждена возможность оценки параметров альтернативных теорий гравитации из наблюдений «точек разворота» скоплений галактик. При этом предполагалось, что гравитационное поле скопления галактик в стандартном варианте общей теории относительности описывается метрикой Шварцшильда – де Ситтера. Авторы этой работы декларировали, что они получили оценки на параметры альтернативных теорий гравитации исходя из наблюдений скоплений галактик, однако никакого сравнения теории с наблюдениями в работе не приводилось, а авторы исходили из того, что теоретическое описание точек разворота в ОТО и рассматриваемых альтернативных теориях должно быть сходным. В настоящей работе сделаны выводы о том, что теоретические модели типа статических сферических черных дыр вряд ли могут быть использованы для получения ограничений на параметры альтернативных теорий гравитации с анализом различий радиусов разворота в этих теориях и ОТО, исходя из наблюдений скоплений галактик.

Recently, the possibility of estimating the parameters of alternative gravity theories from observations of galaxy cluster “turnaround points” has been discussed. It was assumed that the gravitational field of a galaxy cluster in the standard version of general relativity is described by the Schwarzschild – de Sitter metric. The authors of this paper declared that they had obtained estimates of the parameters of alternative gravity theories from observations of galaxy clusters, but no comparison of the theory with observations was made in the paper, and the authors assumed that the theoretical description of turning points in GR and the alternative theories under consideration should be similar. In this paper, we conclude that theoretical models such as static spherical black holes can hardly be used to obtain constraints on the parameters of alternative gravity theories by analyzing the differences in the turning radii in these theories and GR, based on observations of galaxy clusters.

PACS: 04.20.–q; 95.35.+d

### ВВЕДЕНИЕ

В последние годы сделан большой шаг вперед в проверке эффектов ОТО, и предсказания общей теории относительности стало можно проверить в новых наблюдениях и экспериментах. Однако продвижение в понимании феномена темной материи

---

<sup>1</sup>E-mail: alex.fed.zakharov@gmail.com

и темной энергии кажется весьма медленным. Успех наблюдательных технологий и проблемы темной материи и темной энергии стимулировали появление большого количества работ, в которых авторы при рассмотрении альтернативных теорий гравитации выражали надежду на то, что развитие этих исследований приведет к объяснению темной материи и темной энергии как гравитационного эффекта (см., например, [1–4]). Однако, по крайней мере пока, предложенные альтернативные теории гравитации не продемонстрировали своего превосходства над стандартной ОТО, т. е. еще не предложено ни одной альтернативной теории гравитации, которая бы описывала все наблюдательные и экспериментальные эффекты ОТО и в то же время объясняла феномены темной материи и темной энергии как эффекты, связанные с изменением теории гравитации.

## 1. ОСНОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ И ПОНЯТИЯ

Как известно, первые реалистичные модели расширяющейся Вселенной были построены в работах А. Фридмана [5, 6]<sup>1</sup> и Дж. Леметра [12, 13]<sup>2</sup>. Метрику Фридмана–Леметра можно записать в виде, предложенном в работах Г. Робертсона [19] и А. Уолкера [20] (см. также [21]):

$$ds^2 = (dt)^2 - a^2(t) \left[ \frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2(d\theta^2 + \sin^2\theta d\phi^2) \right], \quad (1)$$

где параметр  $k = +1; -1$  или  $0$ .

Напомним определение радиуса разворота (turnaround radius) для скопления галактик, предполагая справедливость космологической модели Фридмана–Леметра–Робертсона–Уолкера (см., например, [22]). Запишем сопутствующую скорость галактики в точке  $\mathbf{r}$  в виде

$$\mathbf{V} = H_0\mathbf{r} + \mathbf{V}_{\text{pec}}(\mathbf{r}). \quad (2)$$

<sup>1</sup>Эти статьи были опубликованы в вестнике немецком журнале «Zeitschrift für Physik» в 1920-е гг. Ввиду важности их в 1999 г. английские переводы этих работ были опубликованы в журнале «General Relativity and Gravitation» [7, 8]. К сожалению, в СССР официальная атеистическая идеология отрицала возможность рождения и эволюции Вселенной. По этой причине примерно с 1933 по 1963 гг. в СССР не говорили о важном физическом (космологическом) значении этих работ Фридмана. Более того, в книгах и статьях того времени писали, что советская точка зрения состоит в том, что Вселенная бесконечна во времени и пространстве. Только с 1963 г. (когда АН СССР отмечала 75-летие А. А. Фридмана) в СССР стали говорить о Фридмане как о создателе реалистичной модели физической космологии. После этого было принято решение об академическом издании его трудов. Только в 1966 г. были опубликованы русские переводы космологических статей Фридмана в собрании его избранных трудов [9]. К 100-летию со дня рождения А. А. Фридмана была издана замечательная его биография [10], переведенная впоследствии на английский язык. Интересная книга с обсуждениями космологических работ Фридмана опубликована недавно [11], где, в частности, высказано аргументированное мнение, что он сделал великое открытие. Это мнение подтверждает анализ развития космологии после ухода Фридмана из жизни 100 лет тому назад. Обсуждение некоторых аспектов развития физической космологии за более чем 100 лет представлено в недавней работе [39].

<sup>2</sup>Известно, что в работе [12] Леметр теоретически получил закон Хаббла, открытый на основе наблюдательных данных [14, 15], о чем, в частности, писал Дж. Пиблс [16, 17], однако только относительно недавно стало известно [18], что Леметр сам попросил убрать вывод этого закона из английского перевода своей статьи [13].

Относительное повышение плотности можно записать в виде

$$\Delta = \frac{\langle \rho \rangle}{\rho_m} - 1, \quad (3)$$

где  $\langle \rho \rangle$  — средняя плотность внутри шара с радиусом  $r$ ,  $\rho_m = \Omega_m \rho_{\text{crit}} = \frac{3\Omega_m H_0^2}{8\pi G} \approx 1,88 \cdot 10^{-29} h^2 \text{ г/см}^3 \approx 2,28 \cdot 10^{11} h^2 M_\odot/\text{Мпк}^3$  ( $h = H_0/[100 \text{ (км/с)/Мпк}]$  — безразмерная нормированная постоянная Хаббла) [23]. Недавняя оценка постоянной Хаббла коллаборации «Dark Energy Spectroscopic Instrument» (DESI) дала оценку  $H_0 = (76,5 \pm 2,2) \text{ (км/с)/Мпк}$  [24], хотя оценка параметра Хаббла по наблюдениям космического телескопа «Planck» существенно меньше  $H_0 = (67,4 \pm 0,5) \text{ (км/с)/Мпк}$  [25]. Ряд оценок постоянной Хаббла, полученных в последнее время, существенно различен, в то время как их статистические оценки довольно малы и эта ситуация в последнее время вызывает напряженность, известную как «Hubble tension» (обсуждение этой проблемы можно найти в работе [26]). Рассмотрим соотношение (4) по радиальной координате

$$V = H_0 r - V_{\text{pec}}, \quad (4)$$

где  $V_{\text{pec}}$  — компонента пекулярной скорости, направленной к началу координат, тогда на точке разворота имеем  $H_0 r = V_{\text{pec}}$ .

Для оценки параметров скоплений галактик (включая значение радиуса разворота) обычно прибегают к компьютерному моделированию в задаче  $N$  тел. Так, для некоторого «типичного скопления» получено, что для радиуса скопления  $5h^{-1}$  Мпк типичная избыточная относительная плотность для области внутри радиуса разворота — в диапазоне  $\Delta \approx (12-24)h^{-1}$  Мпк [23]. Для реалистичных космологических параметров  $\Omega_m = 0,27$  и  $\Omega_\Lambda = 0,73$  относительное превышение плотности в точке разворота  $R$  принимает значение  $\Delta_t = 13,1$ . В этом случае масса структуры внутри шара с радиусом  $R$  составляет  $M_t(R) = 4,1 \cdot 10^{12} h^{-1} M_\odot [R/(h^{-1} \text{ Мпк})]^3$  [23]. Как отмечено в работе [27],  $M_t(R)$  — минимальная масса, необходимая для разворота движения материи и коллапса внутри шара с радиусом  $R$ . В работе [28] с помощью компьютерного моделирования областей с повышенной плотностью в сверхскоплениях галактик получены значения радиуса разворота для выбранных различных значений космологических параметров.

## 2. КОСМОЛОГИЧЕСКИЕ ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ И СКОПЛЕНИЯ ГАЛАКТИК

Использовать понятие радиуса разворота для анализа стандартной космологической теории и некоторых альтернативных теорий гравитации предложено более 10 лет назад (см., например, [28–30]). Обсуждения во всех трех статьях начинаются с рассмотрения статической сферически-симметричной метрики черной дыры Шварцшильда–де Ситтера (как обычно используем геометрическую систему единиц, где  $c = G = 1$ ):

$$ds^2 = A(r) dt^2 - \frac{dr^2}{A(r)} + r^2(d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2), \quad (5)$$

где

$$A(r) = 1 - \frac{2M}{r} + \frac{\Lambda r}{3}. \quad (6)$$

Во всех трех работах [28–30] находится критическое значение радиальной координаты  $r_c$ , которое соответствует неустойчивому равновесию тела между гравитационным притяжением и гравитационным отталкиванием для черной дыры Шварцшильда – де Ситтера, обусловленным наличием  $\Lambda$ -члена

$$r_c = \left( \frac{3M}{\Lambda} \right)^{1/3}, \quad (7)$$

или в размерных единицах

$$r_c = \left( \frac{3GM}{\Lambda c^2} \right)^{1/3}. \quad (8)$$

Вследствие того, что положение равновесия при  $r = r_c$  неустойчиво, даже в идеализированной постановке задачи и в мысленном эксперименте, можно лишь заметить, что тело, помещенное в точку  $r < r_c$ , будет двигаться к черной дыре, а при  $r > r_c$  будет двигаться от черной дыры.

В недавней статье [31] авторы обсудили возможность оценки параметров альтернативных теорий гравитации из наблюдений «точек поворота» скоплений галактик. Указанные авторы привели соотношение (8) (без ссылок на авторов, приводивших это соотношение ранее и обсуждавших его в деталях) и стали утверждать, что это соотношение описывает точки разворота в скоплениях галактик в рамках стандартной ОТО, затем проанализировали положения точек разворота для решений типа черных дыр в альтернативных теориях гравитации. Насколько вакуумное решение Шварцшильда – де Ситтера адекватно для описания скоплений галактик, осталось за рамками указанной работы.

По-видимому, поскольку ранее эти авторы работы [31] рассматривали черные дыры в альтернативных теориях гравитации, они заменили рассмотрение нестационарных и не являющихся сферически-симметричными скопления галактик сферически-симметричными статическими черными дырами с массами, сравнимыми с типичными массами скоплений галактик. В указанной работе авторы сравнивают значения, полученные в рамках ОТО, для черной дыры Шварцшильда – де Ситтера с предсказаниями для радиуса разворота для решений типа черных дыр в альтернативных теориях гравитации и говорят о допустимых параметрах этих альтернативных теорий. Однако эти утверждения нам представляются безосновательными, поскольку остается открытым вопрос, насколько модель статической черной дыры Шварцшильда – де Ситтера (и/или ее обобщения в альтернативных теориях гравитации) адекватна для описания поведения скоплений галактик. Даже гипотетическое возможное совпадение значения радиуса разворота для гипермассивной черной дыры Шварцшильда – де Ситтера и радиуса разворота для некоторого скопления галактик не является убедительным аргументом адекватности модели, поскольку физическая природа этих объектов весьма различна.

### 3. ВЫВОДЫ

Если привести характерные масштабы масс для сверхскоплений галактик Девы, Ланиакеа и Шепли (Virgo, Laniakea and Shapley), то их массы оценятся как  $(1-2) \cdot 10^{15} M_{\odot}$ ,  $h^{-1} \cdot 10^{17} M_{\odot}$  и  $h^{-1} \cdot 10^{16} M_{\odot}$ . Размер областей, которые в дальнейшем сколлапсируют, для этих сверхскоплений составляет примерно  $10h^{-1}$  Мпк [28].

Этот факт можно проиллюстрировать следующим образом. Предположим, что имеются шары с постоянной плотностью. Тогда при массе шаров, отличающейся на три порядка, радиусы шаров отличны на порядок.

Предложенный авторами метод оценки параметров альтернативных теорий гравитации в зависимости от значения радиуса разворота не может быть применен к анализу данных скоплений галактик, поскольку в качестве моделей скопления галактик рассматриваются сферически-симметричные метрики черных дыр Шварцшильда – де Ситтера (и их обобщения в альтернативных теориях гравитации), в то время как скопления галактик не являются ни сферически-симметричными, ни статическими. По сути дела авторы рассмотрели гипотетические космологические черные дыры с массами, по порядку величины сопоставимыми со скоплениями галактик [32–35]. Даже предполагая, что такие черные дыры где-то существуют, непонятно, как из наблюдений скоплений галактик (и каких наблюдений, и каких галактик) можно получить значение радиуса разворота. Даже предполагая, что существуют гипермассивные черные дыры в пустотах (войдах), не ясно, какие необходимы наблюдения, чтобы оценить для них радиус разворота в случае, если масса такой черной дыры неизвестна. По гравитационному линзированию такой черной дыры можно оценить ее массу, если расстояние до нее известно. Зная массу, можно получить значение радиуса разворота из соотношения (8), однако новой информации от этого простого вычисления не добавляется.

Можно, конечно, предложить мысленный эксперимент, в котором помещаем неподвижное тело на разных расстояниях от черной дыры Шварцшильда – де Ситтера (или ее аналогов в альтернативных теориях). И в случае, если тело движется в черной дыре, то значение радиальной координаты меньше радиуса разворота, а если тело движется от черной дыры, то это влияние гравитационного отталкивания и значение радиальной координаты больше радиуса разворота.

Известно, что на масштабах скоплений галактик  $(1-10)h^{-1}$  Мпк распределение массы существенно неоднородно [36, 37], а также нестационарно, поскольку уже на масштабах движения галактик — членов локальной группы — видны признаки хаббловского потока. И как отмечал А. Д. Чернин, закон Хаббла был обнаружен при анализе движения ближайших галактик [37, 38]. Поскольку относительные скорости определяются постоянной Хаббла  $H_0 = h(100 \text{ км/с})/\text{Мпк}$ , на масштабах  $10h^{-1}$  Мпк относительные скорости могут составлять порядка 1000 км/с, т. е. существенные величины по сравнению со скоростью света, и возникают вопросы о состоятельности приближений статических метрик черных дыр для исследований отклонения от ОТО в законах гравитации по данным наблюдений скоплений галактик.

Суммируя, можно прийти к выводу, что вряд ли вакуумные сферически-симметричные статические решения типа Шварцшильда – де Ситтера могут быть использованы для исследования отклонений от стандартной ОТО, поскольку они слишком отличаются от таких существенно сферически-несимметричных нестатических объектов, как скопления галактик. Следует также заметить, что и физический смысл понятия радиуса разворота несколько различный для статических черных дыр и эволюции скоплений галактик. Так, условия для точки разворота для скопления галактик — это равенство по абсолютной величине радиальной пекулярной скорости и величины скорости хаббловского потока (причем понятие точки разворота началось задолго до того, как стали говорить о существенном ненулевом значении  $\Lambda$ -члена), в

то время как для статических решений типа Шварцшильда – де Ситтера условие на точку разворота связано с неустойчивым равновесием между притяжением и отталкиванием, как уже отмечалось ранее. Поскольку наблюдаемые скопления галактик существенно отличаются от статических и сферически-симметричных конфигураций, получение значений радиуса разворота обычно связано с трудоемким компьютерным моделированием движения  $N$  тел. Для получения ограничений на альтернативные теории гравитации из анализа структуры и движения скоплений галактик необходимо рассматривать аналог решений Фридмана–Леметра для альтернативных теорий гравитации и обобщать формализм роста неоднородностей, разработанный Пиблсом и другими авторами для ОТО и ее ньютоновского предела в слабом гравитационном поле, как это делается в целом ряде работ, появившихся в последнее время.

**Благодарности.** Автор благодарен проф. А. Д. Чернину за полезные обсуждения различных космологических проблем, в частности, за его пояснения по поводу связи закона Хаббла и наблюдений движения галактик из локальной группы.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zakharov A. F., Capozziello S., De Paolis F., Ingrosso G., Nucita A. A.* The Role of Dark Matter and Dark Energy in Cosmological Models: Theoretical Overview // *Space Sci. Rev.* 2009. V. 148, Iss. 1–4. P. 301–313.
2. *Capozziello S., Francaviglia M.* Extended Theories of Gravity and Their Cosmological and Astrophysical Applications // *Gen. Rel. Grav.* 2008. V. 40, Nos. 2–3. P. 357–420.
3. *Capozziello S., De Laurentis M.* Extended Theories of Gravity // *Phys. Rep.* 2011. V. 509, Nos. 4–5. P. 167–321.
4. *Faraoni V., Capozziello S.* Beyond Einstein Gravity: A Survey of Gravitational Theories for Cosmology and Astrophysics. Berlin: Springer, 2011. V. 170.
5. *Friedman A.* Über die Krümmung des Raumes // *Z. Phys.* 1922. V. 10. P. 377–386.
6. *Friedman A.* Über die Möglichkeit einer Welt mit Konstanter Negativer Krümmung des Raumes // *Z. Phys.* 1924. V. 21, Iss. 1. P. 326–332.
7. *Friedman A.* On the Curvature of Space // *Gen. Rel. Grav.* 1999. V. 31, No. 12. P. 1991–2000.
8. *Friedman A.* On the Possibility of a World with Constant Negative Curvature of Space // *Ibid.* P. 2001–2008.
9. *Фридман А. А.* Избранные труды. М.: Наука, 1966 (Классики науки).
10. *Тропп Э. А., Френкель В. Я., Чернин А. Д.* Александр Александрович Фридман. Жизнь и деятельность. М.: Наука, 1988.
11. *Соловьев В. О.* Как Фридман Эйнштейна подковал. М.; Ижевск: Ин-т комп. исслед., 2022.
12. *Lemaître G.* Un Univers homogène de masse constante et de rayon croissant rendant compte de la vitesse radiale des nébuleuses extra-galactiques // *Ann. Société Scientifique de Bruxelles.* 1927. V. A47. P. 49–59.
13. *Lemaître G.* A Homogeneous Universe of Constant Mass and Increasing Radius Accounting for the Radial Velocity of Extra-Galactic Nebulae // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 1931. V. 91. P. 483–490.
14. *Hubble E.* A Relation between Distance and Radial Velocity Among Extra-Galactic Nebulae // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1929. V. 15. P. 168–173.
15. *Hubble E., Humason M. L.* The Velocity-Distance Relation for Isolated Extragalactic Nebulae // *Proc. Natl. Acad. Sci. USA.* 1934. V. 20. P. 264–268.
16. *Peebles P. J. E.* Large Scale Structure in the Universe. Princeton Univ. Press, 1980.
17. *Peebles P. J. E.* Impact of Lemaître’s Ideas on Modern Cosmology // *The Big Bang and Georges Lemaître: Proc. Symp. in Honour of G. Lemaître Fifty Years after His Initiation*

- of Big-Bang Cosmology, Louvain-la-Neuve, Belgium, Oct. 10–13, 1983. 1st ed. Dordrecht: D. Reidel Publ. Co., 1984. P. 23–30.
18. *Livio M.* Lost in Translation. Mystery of the Missing Text Solved // *Nature*. 2011. V. 479, Iss. 7372. P. 171–173.
  19. *Robertson H. P.* Relativistic Cosmology // *Rev. Mod. Phys.* 1933. V. 5, No. 1. P. 62–90.
  20. *Walker A. G.* Completely Symmetric Spaces // *J. London Math. Soc.* 1944. V. 19, Iss. 76, Part 4. P. 219–226.
  21. *Линде А. Д.* Физика элементарных частиц и инфляционная космология. М.: Наука, 1990.
  22. *Regos E., Geller M. J.* Infall Patterns around Rich Clusters of Galaxies // *Astron. J.* 1989. V. 98, No. 3. P. 755–765.
  23. *Gramann M., Einasto M., Heinämäki P. et al.* Characteristic Density Contrasts in the Evolution of Superclusters. The Case of A2142 Supercluster // *Astron. Astrophys.* 2015. V. 581. ID. A135.
  24. *Scolnic D., Riess A. G., Murakami Yu. S et al.* The Hubble Tension in Our Own Backyard: DESI and the Nearness of the Coma Cluster // *Astrophys. J.* 2025. V. 979. ID. L9.
  25. *Aghanim N., Akrami Y., Ashdown M. et al. (Planck Collab.).* Planck 2018 Results. VI. Cosmological Parameters // *Astron. Astrophys.* 2018. V. 641. ID. A135.
  26. *Verde L., Schöneberg N., Gil-Martín H.* A Tale of Many  $H_0$  // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 2024. V. 62, No. 1. P. 287–331.
  27. *Chon G., Böhringer H., Zaroubi S.* On the Definition of Superclusters // *Astron. Astrophys.* 2015. V. 575. ID. L14.
  28. *Pavlidou V., Tomaras T. N.* Where the World Stands Still: Turnaround as a Strong Test of  $\Lambda$ CDM Cosmology // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2014. V. 09. ID. 020; arXiv:1310.1920 [astro-ph.CO].
  29. *Bhattacharya S., Dialektopoulos K. F., Romano A. E. et al.* The Maximum Sizes of Large Scale Structures in Alternative Theories of Gravity // *J. Cosmol. Astropart. Phys.* 2017. V. 07. ID. 018; arXiv:1611.05055 [astro-ph.CO].
  30. *Capozziello S., Dialektopoulos K. F., Luongo O.* Maximum Turnaround Radius in  $f(R)$  Gravity // *Intern. J. Mod. Phys. D.* 2024. V. 62, No. 1. P. 287–331; arXiv:1805.01233 [gr-qc]; <https://doi.org/10.1142/S0218271819500585>.
  31. *Алексеев С. О., Зенин О. И.* Проверка теорий гравитации в режиме описания ускоренного расширения вселенной: радиус разворота // *ЖЭТФ*. 2025. Т. 167, вып. 1, № 5. С. 680–684.
  32. *Stornaiolo C.* Cosmological Black Holes // *Gen. Rel. Grav.* 2002. V. 34, No. 12. P. 2069–2078.
  33. *Capozziello S., Funaro M., Stornaiolo C.* Cosmological Black Holes as Seeds of Voids in the Galaxy Distribution // *Astron. Astrophys.* 2004. V. 420. P. 847–851.
  34. *Serpico M., D’Abrusco R., Longo G., Stornaiolo C.* Cosmological Black Holes as Voids Progenitors: Simulations // *Gen. Rel. Grav.* 2007. V. 39, No. 10. P. 1551–1562; doi:10.1007/s10714-007-0485-4.
  35. *Zakharov A. F., Capozziello S., Stornaiolo C.* Gravitational Lens Models for Cosmological Black Holes // *Phys. Part. Nucl. Lett.* 2017. V. 14, No. 2. P. 416–418.
  36. *Teerikorpi P.* Observational Selection Bias Affecting the Determination of the Extragalactic Distance Scale // *Ann. Rev. Astron. Astrophys.* 1997. V. 35. P. 101–136.
  37. *Чернин А. Д.* Космический вакуум // *УФН*. 2001. Т. 171, № 11. С. 1153–1175.
  38. *Chernin A. D., Emelyanov N. V., Karachentsev I. D.* Dark Energy Domination in the Local Flow of Giant Galaxies // *Month. Not. Roy. Astron. Soc.* 2015. V. 32, No. 1. P. 2069–2078.
  39. *Zakharov A. F.* Nearly Forgotten Results in Development of Physical Cosmology // arXiv:2511.06018.